

**М.В. КАНИЩЕВ
Л.М. УЛЬЕВ**

ВВЕДЕНИЕ В АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Обзор основных технологий 3D-печати

ТОМ I

**ВВЕДЕНИЕ В АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
Обзор основных технологий 3D-печати**

**М.В. КАНИЩЕВ
Л.М. УЛЬЕВ**

№ 4674 МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ МИСИС
ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПЬЮТЕРНЫХ НАУК
Кафедра автоматизированного проектирования и дизайна

М.В. Канищев
Л.М. Ульянов

ВВЕДЕНИЕ В АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 1
ОБЗОР ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ

Учебник

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета



Москва 2023

УДК 004.9

К19

Рецензент

д-р экон. наук, доц., заслуженный работник
Санкт-Петербургского горного университета *Е.И. Рейшахрит*;

д-р техн. наук, проф., профессор кафедры АСУ
Университета МИСИС *В.В. Курьянов*

Канищев, Максим Викторович.

К19 Введение в аддитивные технологии. Т. 1. Обзор основных технологий 3D-печати : учебник / М.В. Канищев, Л.М. Ульев. – Москва : Издательский Дом НИТУ «МИСиС», 2023. – 352 с.

ISBN978-5-907560-37-6

Учебник посвящен быстро развивающимся технологиям аддитивного производства и 3D-печати. Кратко рассмотрены возникновение и история развития аддитивных технологий, а также их значение для технологического развития современного общества. С помощью технологии аддитивного производства автоматически производятся компоненты из различных материалов, таких как пластмассы, металлы и сплавы, биоматериалы и керамика. Вот уже несколько десятилетий методы 3D-печати используются в дизайне, строительстве и на транспорте, а также в аэрокосмической, производственной и медицинской отраслях. В учебнике помимо описания основных технологий 3D-печати рассмотрены характеристики используемых при 3D-печати материалов, общие особенности напечатанных моделей и методы их постобработки.

Будет полезен промышленным экспертам, предпринимателям, профессорам и студентам университетов, исследователям.

УДК 004.9

ISBN978-5-907560-37-6

© Канищев М.В.,
Ульев Л.М., 2023

© НИТУ МИСИС, 2023

Содержание

Предисловие	11
Основные сокращения и обозначения	14
Введение и аналитический обзор: Индустрия 4.0 и аддитивное производство	18
В.1. Выгоды и риски Индустрии 4.0	18
В.2. Технические аспекты Индустрии 4.0 и облачного производства	25
В.2.1. Критерии прогресса	25
В.2.2. Концепции Индустрии 4.0	27
В.3. Облачное производство	35
В.3.1. Определение, концепция и технологии облачного производства	35
В.3.2. Текущее состояние исследований новой парадигмы облачного производства	38
В.4. Сравнительный анализ облачного производства и Индустрии 4.0	39
В.5. Роль аддитивного производства в эпоху нового технологического уклада – Индустрии 4.0	45
В.5.1. Организация «умных фабрик»	45
В.5.2. Материалы	48
В.5.3. Процессы	54
В.5.4. Проектирование	58
В.5.5. Недостатки и будущее аддитивного производства	60
Контрольные вопросы	62
ГЛАВА 1. Этапы становления аддитивного производства	63
1.1. История появления аддитивных технологий	63
1.2. История становления 3D-печати	65
1.2.1. Зарождение идеи	66
1.2.2. Доступность 3D-печати	72
1.3. 3D-печать сегодня	74
1.3.1. Дальнейшее развитие 3D-печати	74

1.4. Будущее. 4D-печать: новые материалы, меняющие характеристики и форму	80
1.4.1. Память формы	83
Контрольные вопросы	85
ГЛАВА 2. Знакомство с технологией 3D-печати	86
2.1. Классификация технологий, применяемых в производстве	86
2.2.1. Формовочные методы (литьевое прессование, отливка, штамповка, выковка)	87
2.1.2. Субтрактивные методы (станки с ЧПУ, обтачивание, сверление)	88
2.1.3. Аддитивное производство (3D-печать)	89
2.1.4. Сравнение по стоимости	89
2.2. Процесс 3D-печати	90
2.2.1. Создание 3D-файла	90
2.2.2. Создание STL-файла и операции над ним	93
2.2.3. Печать	95
2.2.4. Удаление напечатанного	95
2.2.5. Постобработка	97
Контрольные вопросы	98
ГЛАВА 3. Введение в методы 3D-печати и их классификация	99
3.1. Классификация технологий 3D-печати	99
3.2. Материалы, применяемые в 3D-печати	105
3.2.1. Полимеры	106
3.2.2. Металл	107
3.2.3. Другие материалы	108
Контрольные вопросы	108
ГЛАВА 4. Экструзионные методы 3D-печати	109
4.1. Экструзия материала – FFF (FDM)	109
4.1.1. Технологии экструзии филамента. 3D-печать методом послойного наплавления (FFF/FDM)	110
4.1.2. Конструкция и характеристики принтеров для FDM 3D-печати. Параметры этих принтеров	110

4.2. Аддитивное производство с помощью шнековой экструзии гранулированного материала	146
4.2.1. Некоторые ограничения, присущие 3D-печати с помощью экструзии филамента	146
4.2.2. Устройство полимерного экструдера	147
4.2.3. Качественный анализ работы полимерного экструдера	149
4.2.4. Современное состояние 3D-печати методом экструзии из гранул.	151
Контрольные вопросы	159
ГЛАВА 5. Особенности FFF/FDM печати.	161
5.1. Искривление слоев при FFF/FDM печати	161
5.2. Межслойная адгезия.	162
5.3. Поддержки для печатаемых деталей на FFF/FDM-принтерах	163
5.4. Растворимые поддержки при FFF-печати.	165
5.5. Заполнение области печати в FFF/FDM-технологии	165
5.6. Точность FFF-печати	166
5.7. Материалы для FFF/FDM-печати	167
5.8. Свойства филаментов, применяемых для FFF/FDM-печати	170
5.9. Свойства наиболее популярных пластмассовых филаментов.	171
5.9. Полимерные материалы с наполнителем для экструзии материалов.	173
5.10. Постобработка деталей после FFF-печати	175
5.11. Преимущества и ограничения FFF/FDM-печати	178
5.12. Промышленная и настольная FFF-печать.	178
5.13. Типичные области применения FFF/FDM-печати	183
5.14. Новые разработки в технологии FFF/FDM-печати	185

5.15. Металлическая FFF/FDM-печать – Metal X от Markforged и Desktop Metal DM Studio	186
5.16. Интеграция электронных схем – Voxel8 DK	188
Контрольные вопросы	189
ГЛАВА 6. Полимеризация в резервуаре (ванночке) – SLA/DLP	191
6.1. Технологии полимеризации в резервуаре	191
6.1.1. Стереолитография (SLA)	191
6.1.2. Цифровая светодиодная проекция (DLP)	194
6.1.3. SLA против DLP	194
6.2. Характеристики SLA/DLP-принтеров	196
6.2.1. Параметры принтера	196
6.2.2. Печать в направлениях снизу вверх и сверху вниз.	196
6.2.2.1. Печать снизу вверх	196
6.3. Структуры поддержки при SLA-печати	204
6.4. Точность размеров при SLA/DLP печати.	204
6.5. Материалы, использующиеся для SLA/DLP-печати	205
6.6. Постобработка моделей, изготовленных на SLA/DLP принтерах	206
6.7. Преимущества и ограничения SLA/DLP-печати	209
6.8. Промышленная и настольная печать полимеризацией в резервуаре	209
6.9. Распространенные области применения SLA/DLP-технологии.	211
6.10. Новые разработки в SLA/DLP-технологиях	213
Контрольные вопросы	214
ГЛАВА 7. Технология плавки порошков (полимеры) – SLS	216
7.1. Технологии плавки порошков, изготовленных из полимеров	216

7.2. Характеристики SLS-принтеров	219
7.2.1. Параметры SLS-принтера	219
7.2.2. Наполнение лотков в SLS-принтерах	220
7.2.3. Адгезия слоев при SLS-печати	221
7.3. Точность размеров при SLS-печати	222
7.4. Материалы, применяемые при SLS-печати.....	223
7.5. Постобработка изделий, полученных при SLS-печати.....	224
7.6. Преимущества и ограничения при SLS-печати.....	227
7.7. Наиболее распространенные области применения SLS-печати.....	228
7.7.1. Изготовление функциональных деталей	228
7.7.2. Особенности мелкосерийного производства изделий	229
7.7.3. Печать сложных каналов (с полым профилем)....	229
7.8. Перспективы новых разработок в SLS-технологиях	230
7.9. Печать с помощью мультиструйной плавки – HP....	230
7.10. Настольные SLS-принтеры Shareboot SnowWhite, Sintarec, Sinterit и Formlabs Fuse 1.....	232
Контрольные вопросы	234
ГЛАВА 8. Краткое описание технологии струйной 3D-печати (DOD)	235
8.1. Технологии струйной 3D-печати	235
8.2. Метод печати – подача по требованию.....	237
8.3. Параметры принтеров, применяемых при струйной 3D-печати	238
8.4. Поддержки при струйной печати.....	239
8.5. Матовая и глянцевая струйная печать	240
8.6. Соблюдение точности размеров при струйной 3D-печати	242
8.7. Основные материалы, используемые при струйной 3D-печати	242

8.8. Особенности постобработки в струйной 3D-печати	244
8.9. Основные преимущества и ограничения струйной 3D-печати	246
8.10. Наиболее распространенные области применения струйной 3D-печати	247
8.11. Новые разработки для технологии струйной печати	249
Контрольные вопросы	250
ГЛАВА 9. Технология струйной печати связующим веществом	251
9.1. Технологии струйной печати связующим веществом	251
9.1.1. Струйная печать связующим веществом с песком	252
9.1.2. Полноцветные модели при струйной печати связующим веществом	253
9.1.3. Печать песчаных стержней и форм для отливки	254
9.1.4. Струйная печать связующим веществом с металлом	254
9.2. Характеристики принтеров для струйной печати связующим веществом	256
9.2.1. Основные параметры принтера для струйной печати связующим веществом	256
9.2.2. Прочность изделий	256
9.2.3. Заполнение лотка для порошка	257
9.3. Точность размеров при струйной печати связующим веществом	257
9.4. Наиболее распространенные материалы, использующиеся при струйной печати связующим веществом	258
9.5. Постобработка после струйной печати связующим веществом	259

9.6. Основные преимущества и недостатки струйной печати связующим веществом	260
9.7. Наиболее распространенные области применения струйной печати связующим веществом	261
9.7.1. Полноцветные модели	261
9.7.2. Струйная печать связующим веществом песчаных форм для литья	262
9.7.3. Функциональные металлические изделия.	263
Контрольные вопросы	264
ГЛАВА 10. 3D-печать металлических изделий	265
10.1. Технологии плавки металлических порошков	265
10.1.1. Аддитивное производство и дизайн металлических прототипов	266
10.1.2. Влияние технологических параметров на аддитивное производство и маршрутизация производства металлических компонентов	267
10.1.3. Прямое лазерное спекание металлов (DMLS) и выборочная лазерная плавка (SLM)	271
10.1.4. Электронно-лучевая плавка (EBM)	274
10.2. Характеристики принтера для плавки металлических порошков	275
10.2.1. Параметры принтера	275
10.2.2. Поддержки	275
10.2.3. Управление качеством поверхности изделий при печати.	277
10.3. Соблюдение точности размеров в DMLS/SLM-технологиях.	277
10.4. Материалы для 3D-печати плавкой металлических порошков	278
10.5. Особенности постобработки изделий после DMLS/SLM-технологий	279
10.6. Основные преимущества и недостатки DMLS/SLM-технологий	281
10.6.1. Общие особенности методов DMLS/SLM 3D-печати	281

10.6.2. Плавка металлических порошков или струйная печать связующим веществом	283
10.7. Распространенные области применения технологий DMLS/SLM	283
10.7.1. Стоматологическое применение	284
10.7.2. Медицинское применение	284
10.7.3. Аэрокосмическая и автомобильная области применения	285
10.8. Электродуговое наращивание	285
10.8.1. DED-технология	286
10.8.2. WAAM-принтер	289
Контрольные вопросы	292
ГЛАВА 11. Основные правила для правильного выбора технологии 3D-печати.	293
Контрольные вопросы	296
Заключение	297
Библиографический список	298
Глоссарий	327
Предметный указатель	338

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время человечество вступает в период нового технологического уклада, который получил название Индустрия 4.0. Основной чертой Индустрии 4.0 является создание и интеграция интеллектуальных производственных систем и информационных технологий, которые проникают во все структуры производства и могут обеспечить эффективное решение проблем, с которыми сталкивается промышленность. Аддитивное производство считается важным компонентом этого нового механизма.

Настоящий учебник представляет собой введение в технологии 3D-печати, которая является основной частью и базисом аддитивных технологий.

Во введении основное внимание уделяется описанию особенностей Индустрии 4.0. Приводится ее определение и рассмотрены основные присущие ей факторы – широкое применение киберфизических систем, Интернета вещей, Интернета услуг, Интернета людей и облачных вычислений, коротко рассмотрена концепция облачного производства. Показана важность аддитивного производства при переходе на новый технологический уклад – Индустрию 4.0. Также выполнен аналитический обзор последних научных и технических достижений в этом направлении.

В первой главе рассматривается история появления и становления аддитивных технологий, а также развитие 3D-печати от ранних систем быстрого прототипирования до современных технологий, 3D-принтеров и используемых материалов для 3D-печати. Также кратко рассмотрены возможные направления развития 3D-печати.

Во второй главе приведена классификация технологий, применяемых для изготовления материальных ценностей. Кратко рассмотрены этапы 3D-печати от создания начального САД-файла или образа 3D-сканирования, его обработки, создание слайсер-модели и непосредственно 3D-печать прототипа детали, а также ее постобработка.

В третьей главе приводится классификация технологий 3D-печати и материалов, которые применяются при 3D-печати. Рассмотрены также свойства этих материалов.

Четвертая глава посвящена технологии послойного наплавления полимерной нити (филамента) – fuse filament fabrication (FFF) или fuse deposition modelling (FDM). Кратко рассмотрены принципы FDM-печати и представлены основные характеристики FDM-принтеров. Рассмотрены основные элементы FDM-принтеров, такие как экструдер, фидер, печатающая головка, камера плавления, нагревательный блок и сопло. Также анализируется устройство платформы и различных кинематических систем, рассмотрены различные конструкции FFF/FDM-принтеров. Это самая большая глава по объему из-за того, что экструзионные методы 3D-печати получили наибольшее распространение в мире.

В пятой главе рассмотрены особенности FFF/FDM-печати и дана характеристика наиболее популярных материалов, из которых производятся филаменты.

Шестая глава посвящена обзору технологии 3D-печати с помощью фотополимеризации полимера в ванночке, которая известна под названием стереолитография (SLA). Рассмотрены различные варианты 3D-печати с помощью стереолитографии и различные устройства 3D-принтеров для стереолитографии.

Технология плавки полимерных порошков рассматривается в седьмой главе. Приведены особенности конструкции принтеров для спекания порошков и характеристики применяемых материалов для 3D-печати с помощью плавления полимерных порошков и особенности постобработки при стереолитографии. Кратко дана характеристика мультиструйной плавки.

В восьмой главе рассмотрен процесс струйной 3D-печати и его особенности. Также представлены конструкция и характеристики 3D-принтера для струйной печати. Приведен список материалов, который может быть использован при струйной 3D-печати, и разобраны особенности постобработки моделей, получаемых при струйной 3D-печати.

В девятой главе рассматривается струйная печать связующим веществом. Обсуждается технология струйной 3D-печати связующим веществом, ее особенности, такие как прочность получаемых изделий и их применимость. Также рассматриваются устройство принтеров, которые используются в этой технологии, и материалы для этой печати.

Десятая глава посвящена рассмотрению технологий 3D-печати металлических изделий. Рассматриваются технологии прямого лазерного спекания, выборочная лазерная плавка материала, металлическая струйная печать связующим веществом, технология одновременной подачи металлического порошка и энергии в оплавляемую область и технология электродугового наращивания металлической проволоки. Показаны принципиальные конструкции некоторых принтеров для 3D-печати металлом. Представлены различные металлические изделия, полученные с помощью рассмотренных технологий.

В одиннадцатой главе приведена сводная таблица особенностей различных технологий 3D-печати, с помощью которой можно выбрать подходящую для стоящей задачи технологию 3D-печати.

Авторы благодарят организацию ООО «АТ 2050» за предоставленные материалы и возможность написать данную книгу. Авторы также благодарят Национальный центр промышленного дизайна и инноваций 2050.ЛАБ за предоставленную возможность ознакомиться с работой 3D-принтеров, печатающих металлические детали. Отдельную благодарность авторы выражают сотрудникам ООО «2050» М.А. Васильеву, А.И. Сотневу, и К. Силантьеву, а также сотруднику 2050.ЛАБ М. Чащину.

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

- АМП – аддитивное металлическое производство.
- АП – аддитивное производство.
- ВЧИМ – взаимодействие человека и машины.
- ВВП – внутренний валовый продукт.
- ИВ – Интернет вещей.
- ИКТ – информационно-компьютерные технологии.
- ИПл – Интернет платформ.
- ИПс – Интернет пользователей.
- ИУ – Интернет услуг.
- ИУст – Интернет устройств.
- КФПС – киберфизическая промышленная система.
- КФС – киберфизическая система.
- МСП – малые и средние предприятия.
- НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки.
- ПВА – поливинилацетатный клей.
- ПДАП – проектирование для аддитивного производства.
- ПО – программное обеспечение.
- ППФ – полимеры с памятью формы.
- САПР – система автоматического проектирования.
- СП – субтрактивное производство.
- СПФ – сплавы с памятью формы.
- СУП – система управления производством.
- ТО – топологическая оптимизация.
- УФ – ультрафиолет.
- ФСИ – фонд содействия инновациям.
- ЧПУ – числовое программное управление.
- АВА – сополимер акрилонитрила, бутадиена и акрилата.
- ABS – сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола (АВС-сополимер).
- ADAM – atomic diffusion additive manufacturing (атомно-диффузионное аддитивное производство).
- AF – additive fabrication (аддитивное производство).
- ALM – additive layer manufacturing (технология аддитивного слоя).
- AM – additive manufacturing (аддитивное производство).
- ASTM – American Society for Testing and Materials (Американское общество тестирования и материалов).

Big Data – аналитика больших данных.	EBM – electron beam melting (электронно-лучевая плавка).
BJ – binder jetting (струйная печать связующим материалом).	EBSD – electron back scatter diffraction (электронная дифракция обратного рассеяния).
CAM – computer aided manufacturing (автоматическое производство).	FDM – fused deposition modelling (моделирование методом послойного наплавления).
CDLP – continuous direct light processing (непрерывная прямая световая проекция).	FFF – fused filament fabrication (производство методом плавления нити).
CFF – continuous filament fabrication (непрерывное плавление нити).	FGF – fused granula fabrication (производство расплавленными гранулами).
CLIP – continuous liquid interface production (непрерывная проекционная печать с жидким интерфейсом).	FLM – fused layer modelling (моделирование расплавленного слоя).
DED – direct energy deposition (прямой подвод энергии).	FPM – fused pellet modelling (моделирование расплавом гранул).
DLP – digital light processing (световая светодиодная проекция).	GSM – graded structural material (градиентный структурированный материал).
DMD – digital micromirror device (система микрозеркал).	HAZ – heat affected zone (зона термического влияния).
DMLS – direct metal laser sintering (прямое лазерное спекание).	HDMMR – hybrid deposition and subsequent micro-rolling (гибридное напыление и последующая микропрокатка).
DOD – drop on demand (подача по требованию).	HIPS – ударопрочный полистирол.
DTM – desk top manufacturing (настольное производство).	IN100 – суперсплав на никелевой основе.

- LAAM – laser assisted additive manufacturing (аддитивное производство с помощью лазера).
- LAM – laser additive manufacturing (лазерное аддитивное производство).
- LAMZ – laser additive manufactured zone (зона аддитивного лазерного производства).
- LBMD – laser based metal deposition (выборочное лазерное нанесение материала).
- LENS – laser engineering net sharpening (технология сетевого лазерного плавления).
- LS – laser sintering (лазерное спекание).
- MJ – material jetting (струйная 3D-печать).
- MJF – multi jet fusion (мульти-струйная плавка).
- NPJ – nanoparticle jetting (струйная печать металлическими наночастицами).
- PA – полиамид.
- PA 12 – полиамид 12.
- PA 6 – полиамид 6.
- PAM – polymer additive manufacturing (полимерное аддитивное производство).
- PC – поликарбонат.
- PE – полиэтилен.
- PEEK – полиэфирэфиркетон.
- PEI – полиэфиримид.
- PETG – полиэтилентерефталат-гликоль.
- PLA – полилактид, полимолочная кислота, биоразлагаемый термопластичный алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота.
- PMMA – полиметилметакрилат, сополимеры метилметакрилата.
- PP – полипропилен.
- PPE – полифениленэфир, термопластичный материал с низкой плотностью.
- PS – полистирол, полистирольные пластики.
- PVA – поливинилацетат.
- PVC – поливинилхлорид.
- RepRap – replication rapid prototype (быстрое изготовление прототипов).
- SLA – stereolithography (то же, что и STL, стереолитография, фотополимеризация жидкого полимера с использованием ультрафиолетового лазера, светодиодов).
- SLM – selective laser melting (выборочная лазерная плавка).
- SLS – selective laser sintering (селективное лазерное спекание).

SPJ – single pass jetting (плавка металлического порошка с распылением связующего).

STL – stereolithography (то же, что и SLA, стереолитография, фотополимеризация жидкого полимера с использованием ультрафиолетового лазера, светодиодов).

TC11 – титановый сплав.

TPU – термопластичный полиуретан.

UAM – ultrasonic additive manufacturing (ультразвуковое аддитивное изготовление).

WAAM – wire and additive manufacturing (аддитивное производство с помощью электродуговой наплавки).

WAX – полимерный воск.

WSZ – wrought substrate zone (зона деформируемой подложки).

ВВЕДЕНИЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР: ИНДУСТРИЯ 4.0 И АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

В.1. Выгоды и риски Индустрии 4.0

В течение последних 200 лет технологии играли доминирующую роль в повышении производительности труда, что отразилось в трех промышленных революциях, т.е. механизации (механизмы приводятся в действие паровыми двигателями в XIX веке), затем в массовом производстве (механизмы приводятся в действие электричеством, был введен в действие сборочный конвейер в начале XX века) и автоматизации (применение компьютеров в конце XX века) [1].

Одной из главных составляющих особенностей современного цивилизационного развития человечества является переход всего мирового мегасообщества на новый технологический уклад – Индустрию 4.0. Переход на новый уровень осуществляется в условиях глобализации, усиления тенденций десуверенизации государственных образований, актуализации проблем всех типов идентичности (от уровня индивидов до национально-государственной идентичности) и на основе так называемых сингулярных технологий, связанных с воздействием на человеческое сознание. Соответственно почти все государства мира, которые хотят быть субъектами, а не объектами мировой геополитики, сталкиваются со всеобъемлющими задачами модернизации в области экономики, политики, общественного сознания (прежде всего в переходных государствах, в которых все виды инициатив исходят в основном от правящих элит). В целом под модернизацией понимаются сложные процессы перехода устоявшихся общественных образований и традиционных обществ к современным обществам.

Сверхзадачи модернизации требуют новых научно-практических разработок, которые включали бы анализ феноменов внешнего и внутреннего информационно-технологического,

информационно-коммуникативного пространства, теоретических оснований процессов модернизации, типа ментальности, типа рациональности государствообразующего этноса. Кроме того, модернизационные преобразования требуют консолидации социумов, а следовательно, новых идеологических подходов, обладающих большим интеграционным, мобилизационным, эмоциональным потенциалом, т.е. требуют модернизации общественного сознания в целом.

Насколько правомочна прямая постановка проблемы модернизации? Насколько правомочна с точки зрения этики постановка вопроса о воздействии на умы людей? Собственно, эта проблема существовала всегда на протяжении истории человечества. Однако в связи с особенностями формирующегося нового технологического уклада вопрос воздействия на общественное сознание обретает особую этическую остроту, усиливая критический дискурс в решении этого вопроса. Этическая составляющая становится конституирующей особенностью мирового цивилизационного развития вне зависимости от отношения политических элит к вопросам этики.

Во введении к своей книге «Четвертая промышленная революция» К. Шваб пишет, что *«развитие и внедрение новейших технологий связаны с неопределенностью и означают, что мы пока не имеем представления, как в дальнейшем будут развиваться преобразования, обусловленные этой промышленной революцией»*¹ [2]. Данное обстоятельство налагает огромную ответственность на всех участников глобального тренда «индустриальная революция 4.0» – правительства различных стран, бизнес, научное сообщество и общественность. Действительно, ведь социальные, экономические, политические, морально-нравственные, ценностно-культурные последствия четвертой промышленной революции непредсказуемы, и они могут отрицательно воздействовать на бытие человека и всего человечества. Многие эксперты утверждают, что четвертая революция будет не только и не столько «индустриаль-

¹ Здесь и далее в цитатах полужирный курсив наш. – Авт.

ной», так как она затронет все стороны человеческой жизни. Причем последствия могут быть не только положительными, но и отрицательными или даже просто губительными для человека и человеческой цивилизации.

Для анализа возможных проблем обратимся к процессу роботизации как к одному из важных направлений развертывания четвертой промышленной революции. Каковы же опасения экспертов в связи с четвертой индустриальной революцией? Во-первых, повсеместное внедрение роботов может привести к вытеснению человека из сферы производства и других секторов экономики – сначала частичному, а затем полному (социальные последствия). Во-вторых, роботы могут начать управлять людьми (политические последствия). В-третьих, человек в результате соединения с роботом может превратиться в киборга, т.е. произойдет исчезновение того вида, который мы привыкли называть *homo sapiens* (антропологические последствия).

Эксперты, занимающиеся тематикой четвертой индустриальной революции, обращают внимание на то, что изменения в начале XXI века стали происходить с увеличивающейся скоростью. При этом движущие силы этих изменений не очень понятны. Кто-то считает, что четвертая революция – «объективный» процесс развития науки и техники, кто-то полагает, что она плод заговора мирового закулисья против человечества, кто-то уверен в мистической природе изменений.

В узком смысле под роботами понимаются технические устройства, которые позволяют замещать человека в производстве и других сферах экономической и интеллектуальной деятельности. Роботы в машиностроении и других отраслях промышленности стали появляться еще в прошлом веке. Их внедрение называлось автоматизацией производства. Сначала роботы значительно повышали производительность труда, появились роботизированные конвейеры. Но в какой-то момент времени производства стали почти полностью безлюдными. Постепенно роботизация стала выходить за рамки материального производства, захватывая торговлю, транспорт, сферу услуг,

финансы и денежное обращение. Дело дошло до того, что сегодня большая часть решений в сфере финансовых спекуляций принимается роботами, которые просчитывают самые оптимальные решения на основе обработки больших массивов информации о состоянии разных финансовых рынков (аналитика больших данных – Big Data). Такие роботы в течение рабочего дня могут совершать громадное количество операций покупки и продажи финансовых инструментов, зарабатывая значительную прибыль за счет гигантских оборотов. В мире спекуляций это называется высокочастотным трейдингом, а потребность в живых трейдерах неуклонно снижается.

Роботы все чаще внедряются банками и инвестиционными фондами в сферу управления активами. Роботы-консультанты (робоэдвайзеры) стремительно завоёвывают себе место под солнцем на мировых фондовых рынках. По данным исследовательской компании Aite Group, в 2015 г. глобальная индустрия робоэдвайзинга показала рост на 200 %. Банк России в своем докладе оценил совокупный объем активов под управлением роботов-консультантов в 50 млрд долл. США по всему миру, а компания McKinsey&Co считает, что в перспективе этот объем может дорасти до 13,5 трлн долл. Пока роботы в управляющих компаниях, фондах и банках выступают в качестве консультантов. Однако завтра они могут полностью заменить живого управляющего активами.

В широком смысле под роботами понимаются технические устройства, которые не только выполняют операции в сфере производства и различных сферах профессиональной деятельности, но и обслуживают бытовую сферу. Самый яркий пример – автомобили, управляемые автопилотами. В скором будущем человеку не придется садиться за руль, машину будет вести робот. И это не фантастика, Google уже несколько лет разрабатывает и тестирует беспилотный автомобиль. Серийное производство машин-роботов может начаться через 2–3 года.

Одно из направлений робототехники – повсеместное внедрение 3D-принтеров, т.е. периферийных устройств, использующих метод послойного создания физического объекта

на основе цифровой 3D-модели. Уже сегодня 3D-принтеры используются для изготовления моделей и форм для литейного производства, а также различных мелочей в домашних условиях, в медицине (для протезирования и изготовления имплантатов). Однако уже есть примеры изготовления по этой технологии гораздо более серьезных и массивных вещей – деталей для производства оружия (и даже всего оружия), кузовов автомобилей, в строительстве и т.д.

Еще более «продвинутой» роботизация – связывание производственных роботов, а также роботов-вещей в единые сети. Это называется робототехническим Интернетом или межмашинной коммуникацией, еще это называют Интернетом устройств. По замыслу разработчиков таких систем, межмашинная коммуникация позволяет оптимизировать производственные, коммерческие и финансовые операции и крайне перспективна в крупных корпорациях. Компании, которые специализируются на информационно-компьютерных технологиях (ИКТ), продвигают роботов во все сферы жизнедеятельности человека.

Однако у социологов, политиков и просто здравомыслящих людей есть серьезные опасения, что роботизация может привести к катастрофическим последствиям, например, к полностью безлюдному производству. За примерами далеко ходить не надо. Так, в 1990-е гг., европейская компания Adidas приняла решение о перемещении своего производства в Азию, где рабочая сила стоила в разы дешевле, чем в Германии. Сегодня начался новый этап «оптимизации» издержек компании, даже без перемещения производства за тысячи километров от «базы». Adidas начинает работу на новой фабрике в Аисбахе (Германия), на которой все операции осуществляют роботы. По такому же пути идет и другой производитель спортивной одежды и обуви – компания Nike, которая объявила о скором введении в эксплуатацию полностью безлюдной фабрики. Вторым примером относится к электронике. Ведущий производитель электронных компонентов для компаний Apple, Hewlett Packard, Dell и Sony корпорация Foxconn сосредоточила свои

производства на Тайване. Она установила 1 млн роботов, которые заменили 1,2 млн работников. Еще пример. В Австралии одна из крупнейших в мире горнодобывающих компаний Rio Tinto использует самоуправляемые грузовики и буры, не требующие присутствия людей-операторов на месторождениях железной руды. Скоро запустят автоматические поезда, которые будут доставлять руду в порт, находящийся на расстоянии около 500 км.

Газеты, журналы, телевидение в индустриально развитых западных странах почти каждый день публикуют оценки того, сколько рабочих мест может «сэкономить» работодателям внедрение роботов на отдельных предприятиях, в отдельных отраслях и производствах, в экономике в целом в ближайшие годы. Так, американский футуролог Дик Пельтье считает, что к 2030 г. человечество потеряет более 50 млн рабочих мест, которые достанутся роботам. А к 2040 г. человечество лишится более половины всех рабочих мест в мире.

Что же ожидает современное общество в результате продолжения научно-технического прогресса? Мнения исследователей расходятся: одни считают, что все проблемы рано или поздно будут решены, другие – что человеку придется смириться с неспособностью выстраивать жизнь по собственному плану и подчиниться закономерностям технического развития, пользуясь теми «экологическими нишами», которые техносфера оставит ему, и не надеясь на чудеса. Находящаяся в стадии становления неоиндустриальная экономика развитых странах мира на самом же деле является финансовым капитализмом, в который выродился промышленный капитализм, чьим конечным продуктом является неорентная экономика. В этой системе отношений рост ВВП основан не на устойчивом развитии за счет эффективного использования производительных сил «экономики знаний», а на поведении субъектов рынка, ориентированном на извлечение ренты путем создания добавочной стоимости, связанной с монополией на материальные, интеллектуальные и организационные ресурсы, как правило, в непроизводственном и главном об-

разом финансовом секторе экономики. Подобного рода трансформация промышленного капитализма в финансовый сопровождается в ряде случаев деиндустриализацией и переводом производства в страны с дешевой рабочей силой.

В настоящее время вся мировая экономика представлена на трех основных уровнях:

- четыре экономических центра силы первого уровня (Tier 1 economic powerhouses) – США, ЕС, Китай и Япония;
- 13 экономических центров силы второго уровня (Tier 2 economic powerhouses) – Бразилия, Россия, Индия, Австралия, Мексика, Южная Корея, Саудовская Аравия, Турция, Индонезия, Аргентина, Нигерия, ЮАР и Египет;
- развивающиеся экономики остальных стран мира (rest of the world's Tier 3 developing economies).

Экономические центры силы первого уровня получают доход за счет извлечения четырех видов ренты: лидерской, финансовой, технологической и миграционной. Экономические центры силы второго уровня выживают за счет извлечения одного из трех видов ренты: ресурсной, социально-экологической и геостратегической (или их комбинации).

За инновационную ренту, в ходе которой большинство стран (в особенности из числа экономических центров силы второго уровня) будут стремиться как максимум выстроить новые, а как минимум существенно изменить существующие глобальные схемы кооперационных связей. Это будет происходить на фоне попыток экономических центров силы первого уровня возратить промышленное производство на собственную территорию, что уже пытался сделать президент США Дональд Трамп. Мы можем стать свидетелями возникновения целого ряда новых альянсов (как глобальных, так и региональных), основанных на совместном доступе к инновационным технологиям и квалифицированной рабочей силе. Косвенно это демонстрирует появление нового альянса AUKUS в сентябре 2021 г.

России следует учитывать эту тенденцию в процессе разрывывания четвертой промышленной революции.

В.2. Технические аспекты Индустрии 4.0 и облачного производства

В.2.1. Критерии прогресса

В настоящее время информационные и коммуникационные технологии, в частности Интернет и технологии встроенных систем, стремительно развиваются, что привело к появлению ряда новых технологий, таких как киберфизические системы (КФС), Интернет вещей (ИВ), облачные вычисления и аналитика больших данных (Big Data). Появление этих новых технологий позволяет создать «умный» сетевой мир, в котором «вещи» наделены определенной степенью интеллекта и, более того, все больше связаны друг с другом. В области производства повсеместное развертывание датчиков и широкое применение программного обеспечения в промышленном производстве объединяют физический и виртуальный миры, создавая основу для КФС. Более того, с помощью Интернета можно подключить большое количество различных производственных объектов и «услуг» для создания таких вещей и услуг, как Интернет вещей и Интернет услуг (ИУ). Все эти преобразования знаменуют переход существующего промышленного производства к четвертому технологическому укладу – Индустрии 4.0, который характеризуется искусственным интеллектом и нетворкингом [1].

Помимо промышленных революций есть и другой вариант развития промышленного производства – это появление новых технологий. Практически в то же время, когда произошла третья промышленная революция, были предложены различные передовые производственные модели и технологии [3]. Однако у существующих передовых производственных моделей и технологий есть некоторые недостатки, которые не позволяют им удовлетворять растущие потребности производственных предприятий в совместном использовании и сотрудничестве. В последние годы облачные вычисления создали совершенно новый способ доставки вычислительных

ресурсов [4]. Гениальное сочетание облачных вычислений с производством породило революционную производственную парадигму – облачное производство [5].

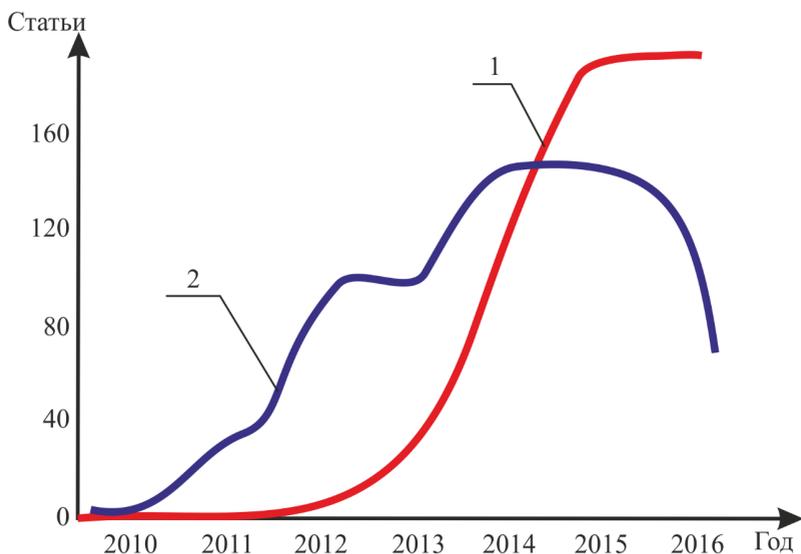


Рис. В1. Количество статей, посвященных Индустрии 4.0 и Облачному производству: 1 – Индустрия 4.0; 2 – Облачное производств

Индустрия 4.0 и облачное производство представляют собой два основных направления использования преимуществ информационных технологий для содействия дальнейшему развитию обрабатывающей промышленности в производственном сообществе. С момента своего создания они привлекли огромное внимание представителей как академических кругов, так и промышленности. Опубликовано несколько сотен статей (рис. В1) (обратите внимание, что в качестве ключевых слов для поиска литературных источников по Индустрии 4.0 следует взять «Индустрия 4.0» и «Индустрии 4.0», и литература с любым из ключевых слов в заголовках, ключевых словах или рефератах будет включена).

Учитывая текущую тенденцию быстрого развития этих двух направлений, можно предположить, что они обладают большим потенциалом для преобразования обрабатывающей промышленности в будущем. Однако до настоящего времени они в основном рассматривались изолированно друг от друга. Несмотря на то, что, они представляют различные точки зрения и охватывают разные идеи, каждая из них имеет свои ключевые особенности, которые во многом дополняют друг друга, показывая более масштабную картину развития. Для их лучшего понимания и использования необходимо сравнить эти две концепции и прояснить их взаимосвязь. С этой целью мы сначала представим основные идеи Индустрии 4.0 и облачного производства, затем сделаем краткий обзор текущего состояния исследований и их подробный сравнительный анализ.

В.2.2. Концепции Индустрии 4.0

В.2.2.1. Определение, концепция и технологии

В работе [6] представлено определение Индустрии 4.0: *«Термин «Индустрия 4.0» означает четвертую промышленную революцию, следующий этап в организации и контроле всего потока создания ценности на протяжении жизненного цикла продукта. Этот цикл основан на все более индивидуальных пожеланиях клиентов и варьируется от идеи, заказа, разработки, производства и доставки конечному потребителю до утилизации и сопутствующих услуг. Основопологающим моментом здесь является доступность всей необходимой информации в режиме реального времени через сеть всех инстанций, участвующих в создании ценности, а также способность всегда извлекать из данных наилучший возможный поток создания ценности. Соединение людей, объектов и систем приводит к созданию динамических, самоорганизующихся, межорганизационных, оптимизированных в реальном времени сетей создания ценности, которые можно оптимизировать в соответствии с рядом критериев,*

таких как затраты, доступность и потребление ресурсов». Авторы исследования [7] определили Индустрию 4.0 как «собираемый термин для технологий и концепций организации цепочки создания стоимости. В рамках «умных» фабрик Индустрии 4.0 с модульной структурой КФС отслеживает физические процессы, создает виртуальную копию физического мира и принимает децентрализованные решения. Через Интернет вещей КФС общаются и взаимодействуют друг с другом и людьми в режиме реального времени. Через ИУ как внутренние, так и межорганизационные услуги предлагаются и используются участниками цепочки создания стоимости». Оба приведенных выше определения рассматривают Индустрию 4.0 как следующий этап организации и управления цепочкой создания стоимости.

Индустрия 4.0 характеризуется интеграцией по трем направлениям: вертикальная интеграция вместе с сетевыми производственными системами, горизонтальная интеграция через сети создания стоимости и сквозная цифровая интеграция инженерии по всей цепочке создания стоимости продукта на всех этапах жизненного цикла. Умное производство – это ключевой компонент концепции, а также ключевая особенность Индустрии 4.0, в которой происходит вертикальная интеграция. Горизонтальная интеграция означает интеграцию нескольких «умных» фабрик через сети создания ценности, происходящие как внутри «умной» фабрики, так и между разными «умными» фабриками. Вертикальная и горизонтальная интеграция обеспечивает сквозную интеграцию по всей цепочке создания стоимости. Умный продукт – еще один важный концептуальный компонент в концептуальной системе Индустрии 4.0. На «умном» предприятии продукты и машины взаимодействуют друг с другом, совместно управляя производством. Умные продукты могут относиться к объектам, устройствам и машинам, которые оснащены датчиками, управляются программным обеспечением и подключены к Интернету [5]. Индустрия 4.0 приведет к появлению новых платформ КФС, предназначен-

ных для поддержки совместных промышленных бизнес-процессов и связанных бизнес-сетей. На платформах КФС возникают особые требования к горизонтальной и вертикальной интеграции КФС, приложений и сервисов в бизнес-процессы (рис. В2) [1]. Следует отметить, что Индустрия 4.0 означает четвертую промышленную революцию, которая требует рассмотрения многих других вопросов, которые могут возникнуть в наступающей новой эре, включая стандартизацию, безопасность, эффективность использования ресурсов, новую социальную инфраструктуру, организацию работы и дизайн работы, обучение и нормативную базу [1].

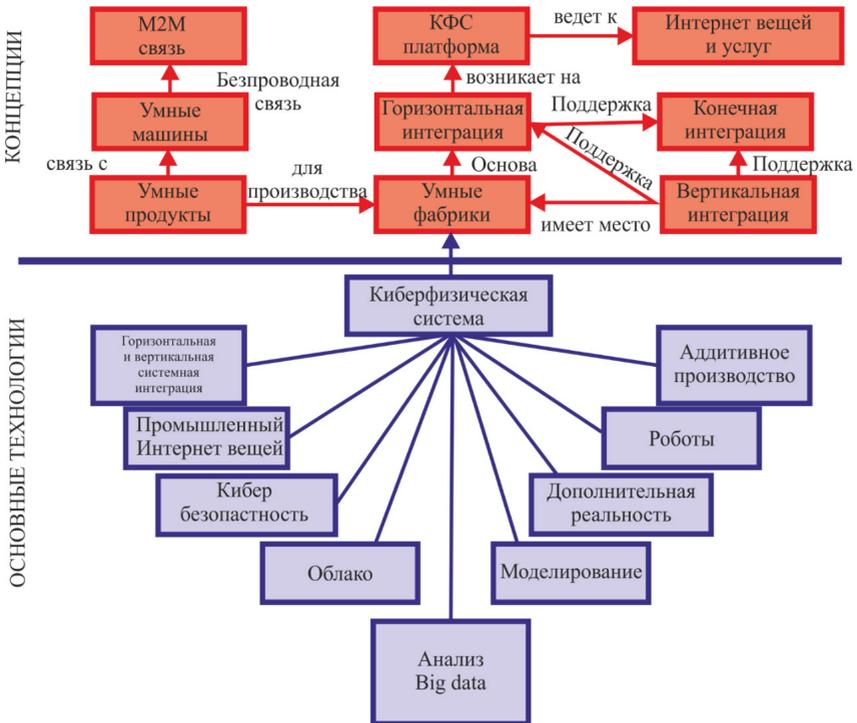


Рис. В2. Основные концепции и технологии, доступные для исполнения в Индустрии 4.0

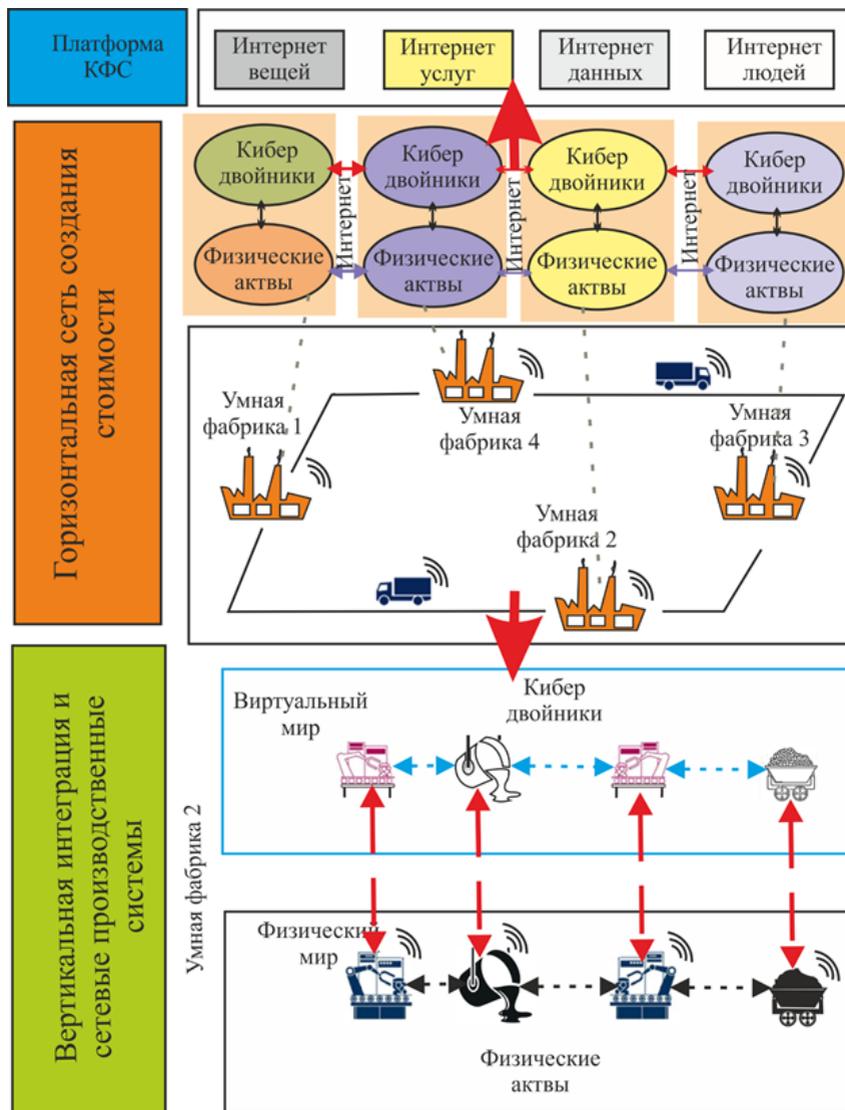


Рис. В3. Принципы Индустрии 4.0

Были идентифицированы девять концепций создания стоимости, приводящие к преобразованию текущего промышленного производства в промышленное производство Индустрии 4.0, которые имеют значительное отношение к КФС [8] (см. рис. В2). КФС обеспечивает важную поддержку вертикальной и горизонтальной системной интеграции. Комбинация КФС и промышленного ИВ позволяет создавать ИВ и ИУ. КФС, несомненно, вызовет проблему кибербезопасности. Более того, широкое применение КФС означает создание больших промышленных баз данных и знаний, для которых требуются облачные технологии и аналитика больших данных для хранения и анализа. Виртуальный мир КФС состоит из множества моделей производственных объектов, для которых моделирование может сыграть важную роль. Для взаимодействия операторов с КФС требуется технология дополненной реальности. Аддитивное производство и роботы являются неотъемлемой частью производственных систем Индустрии 4.0 на основе КФС [8].

На рис. В3 показаны основные принципы Индустрии 4.0. Внутри «умной» фабрики все элементы физического производства в физическом мире имеют кибердвойника (т.е. цифровую модель) в виртуальном мире. Физический и виртуальный миры, а также физические активы и цифровые двойники в них бесшовно связаны для достижения глобальной оптимизации производства в рамках «умного» завода. Более того, в рамках сети создания стоимости несколько фабрик интегрированы по горизонтали, т.е. физические активы и цифровые двойники соответственно объединены, чтобы обеспечить оптимальное принятие решений в сети создания стоимости. Интеграция через сеть создания стоимости приведет к появлению платформ КФС, в рамках которых вещи, услуги, «данные» и «люди» соединяются через Интернет.

В.2.2.2. Текущее состояние исследований

В настоящее время опубликовано достаточно много научных работ по Индустрии 4.0 (см. рис. В1), в которых хорошо проработаны принципы и элементы Индустрии 4.0.

КФС. Текущие исследования КФС в области Индустрии 4.0 сосредоточены на обсуждениях концепции, технологий, архитектуры, проблем и новых направлений КФС (или киберфизических производственных систем (КФПС)) [9–11]. В частности, авторы работы [11] представили последний статус и достижения КФС в производстве. Авторы работы [12] предложили унифицированную пятиуровневую архитектуру в качестве руководства для реализации КФС в Индустрии 4.0, включая уровень интеллектуального соединения, уровень преобразования данных в информацию, киберуровень, уровень познания и уровень конфигурации.

Умная фабрика. Исследователи в публикации [13] определили «умную» фабрику как *«производственное решение, которое обеспечивает такие гибкие и адаптивные производственные процессы, которые решают проблемы, возникающие на производственном объекте с динамическими и быстро меняющимися граничными условиями в мире возрастающей сложности»*. То есть «умная» фабрика должна представлять собой сеть адаптивных и самоорганизованных производственных единиц, которая позволяет оптимизировать производственные процессы в глобальном масштабе и может адаптироваться к неожиданным изменениям. В работе [14] представлена эталонная архитектура для «умных» фабрик на основе Интернета вещей. В работе [15] построена общая архитектура интеллектуальной фабрики, которая включает промышленные беспроводные сети, облако, а также стационарные или мобильные терминалы с интеллектуальными артефактами, такими как машины, продукты, и исследовали рабочий механизм с точки зрения техники управления. Авторы работы [16] обсудили, как реализовать задачи управления «умным» предприятием с помощью распределенных сервисов. В некоторых работах обсуждались вопросы межзаводской интеграции, такие как горизонтальная интеграция в совместных сетях и сквозная цифровая интеграция [17], а также управление инновационными производственными сетями интеллектуальных фабрик [18].

Большие данные и их аналитика. Большие данные и связанная с ними аналитика играют важную роль в оптимизации качества производства, экономии энергии и улучшении обслуживания оборудования в контексте Индустрии 4.0 [8, 19]. Сбор и всесторонняя оценка данных из множества различных источников – производственного оборудования и систем, а также систем управления предприятием и клиентами – станут стандартом для поддержки принятия решений в реальном времени. Однако сравнение пяти больших данных (т.е. объем, разнообразие, достоверность, скорость и ценность) создает множество проблем, таких как новые требования к аппаратному и программному обеспечению для обработки данных, срочность возможности онлайн-обнаружения/обработки и необходимость междисциплинарных подходов [20]. Индустрия 4.0 – это новая производственная парадигма автономного и децентрализованного управления, которая предполагает новый уровень интеграции и обработки данных в промышленном производстве. В контексте Индустрии 4.0 существует множество явных и неявных требований к обработке данных, касающихся данных, которые необходимо обработать (например, модель данных, интеграция данных и содержание данных), и обработки данных (например, обработка решений, знание обработки и обработка в реальном времени) [21].

Услуги и ИУ. Индустрия 4.0 направлена на создание ИУ, чтобы поставщик услуг мог предлагать свои услуги через Интернет. В Индустрии 4.0, поскольку все больше программного обеспечения и встроенного интеллекта интегрируются в промышленные процессы и системы, технологии прогнозирования могут еще больше переплетать интеллектуальные алгоритмы и приводить к трансформации производственных услуг, таких как прогнозирование снижения производства продукта, а также автономное управление и оптимизация потребностей в обслуживании продуктов и товаров [19]. Помимо услуг, связанных с продуктом, фабрики могут пойти еще дальше и предложить специальные производственные техноло-

гии, а не просто типы производства, в качестве услуг, которые можно использовать для производства продуктов или компенсации производственных мощностей [7]. Индустрия 4.0 может использовать облачное производство для создания, публикации и совместного использования сервисов, представляющих производственные процессы [22].

Облако. Облачные технологии могут широко использоваться в Индустрии 4.0 для расширения обмена данными как в пределах границ одной компании, так и между компаниями, повышения производительности системы (например, увеличения маневренности и гибкости) и снижения затрат за счет вывода систем в оперативный режим. Как следствие, интеграция облачных технологий с промышленными КФС становится все более важной [23]. Многие поставщики начали предлагать облачные решения для систем управления производством (СУП). Однако фабрики состоят из различных подсистем, модулей, устройств и машин, которые работают с различными протоколами связи и интерфейсами. Существует потребность в унифицированной связи между технологическим уровнем (в контексте Индустрии 4.0 технологический уровень состоит из КФС и интеллектуальных продуктов) и более высоким уровнем отраслевой иерархической модели. В работе [24] авторы предложили отраслевой шлюз ИВ для подключения физических устройств и более высоких уровней и, таким образом, поддержки связи с облаком (например, сервисов СУП в облаке). Сенсорные сети и технологии облачных вычислений также используются для обеспечения передового производственного решения для Индустрии 4.0 [25]. Однако есть некоторые проблемы с текущим планированием ресурсов предприятия (ПП) и решением СУП для поддержки общего облачного подхода в распределенном производстве [26].

Другие вопросы. Авторы публикации [27] обсудили механизмы, способствующие повышению производительности в рамках Индустрии 4.0. Другие вопросы, которые вызывают интерес исследователей, включают приложения дополненной реальности

[28], знания [29], коммуникации [30, 31], агентные технологии [32], стандартизацию [33], энергию [34], взаимодействие человека и машины (ВЧМ) [35], обучение [36, 37] и т.д.

В.3. Облачное производство

В.3.1. Определение, концепция и технологии облачного производства

Авторы в работе [5] предложили термин **«облачное производство»** и определили его как *«новую парадигму сетевого производства, которая организует производственные ресурсы по сетям (производственные облака) в соответствии с потребностями и требованиями потребителей для предоставления разнообразных производственных услуг по запросу через сети (например, Интернет) и платформы облачных производственных услуг»*. Впоследствии в исследовании [38] было определено облачное производство как *«модель для обеспечения повсеместного, удобного сетевого доступа по требованию к общему пулу настраиваемых производственных ресурсов (например, производственного программного обеспечения, производственного оборудования и производственных возможностей), которые могут быть быстро предоставлены и выпущены с минимальными усилиями руководства или взаимодействия с поставщиком услуг»*.

На рис. В4 показаны основные концепции и технологии облачного производства. Основные концепции облачного производства тесно связаны с его режимом работы (рис. В5). В режиме облачного производства поставщики предоставляют свои производственные ресурсы, которые будут преобразованы в услуги, а затем объединены в платформу облачного производства. В соответствии с теорией рыночной экономики операторы должны управлять платформой, чтобы гарантировать и предоставлять высококачественные услуги. Клиенты могут отправлять свои требования платформе для запроса услуг, начиная с проекти-

рования продукта, производства, тестирования, управления и на всех других этапах жизненного цикла продукта.

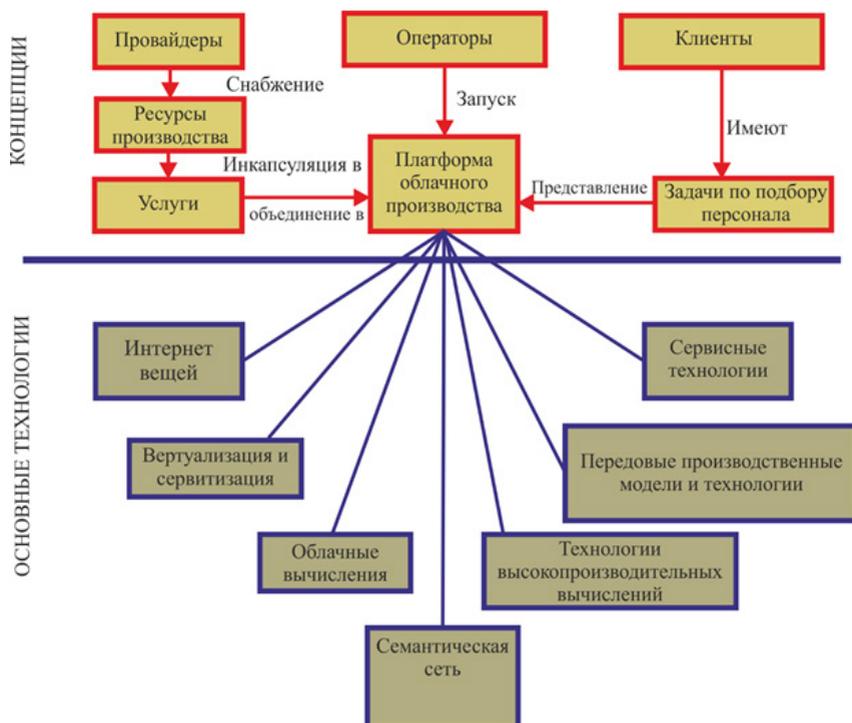


Рис. В4. Основные концепции и технологии, доступные для исполнения в облачном производстве

Ядро облачного производства заключается в создании платформы облачного производства, которая опирается на множество технологий. Платформа облачного производства имеет многоуровневую архитектуру, включая уровень ресурсов, уровень виртуальных ресурсов, уровень глобальных услуг, уровень приложений и уровень интерфейса [38], как показано на рис. В5 (для краткости такие уровни, как уровень безопасности, уровень знаний и уровень связи не показаны).

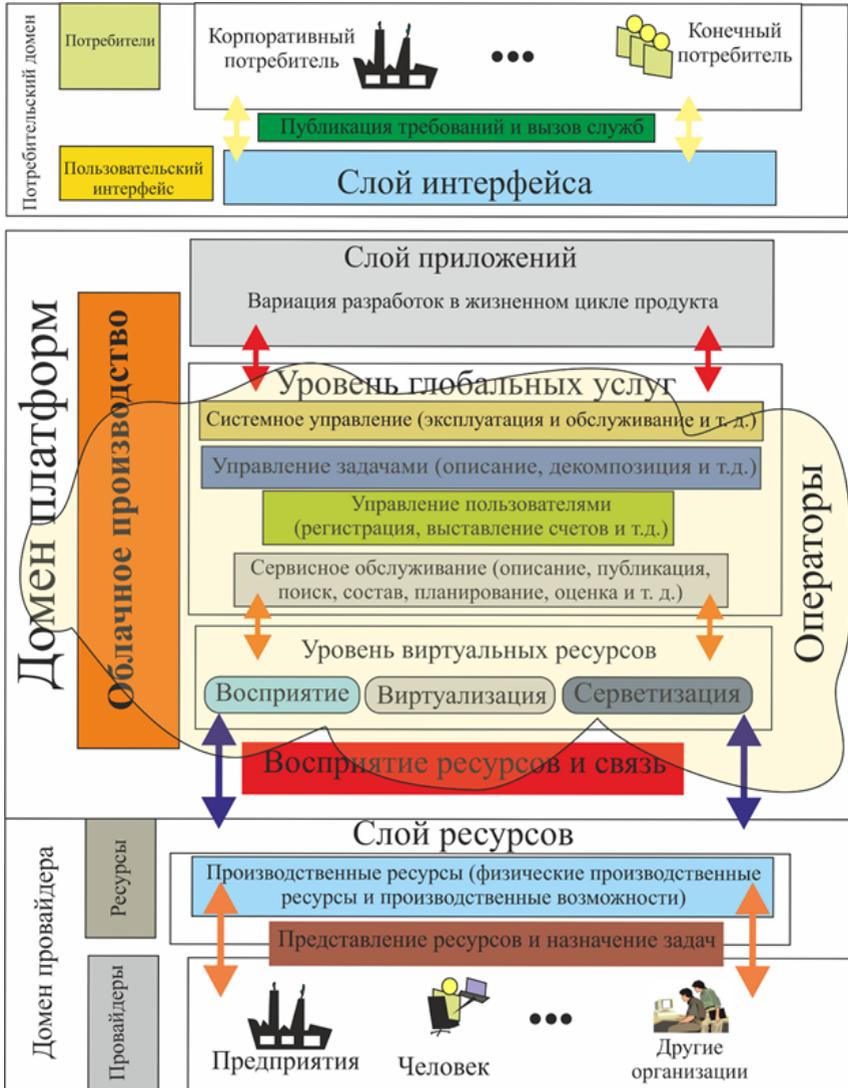


Рис. В5. Основные принципы облачного производства

Реализация разных слоев платформы облачного производства требует разных технологий. Технологии Интернета

вещей, виртуализации и сервитизации необходимы для определения производственных ресурсов и преобразования физических ресурсов в виртуальные ресурсы на уровне виртуальных ресурсов. Основными технологиями для глобального уровня сервисов являются облачные вычисления, сервисные технологии (включая сервисно-ориентированные технологии и технологии, связанные с управлением сервисами) и технология семантической сети. В интерфейсе важную роль играет технология взаимодействия человека с машиной. Безусловно, важны также высокопроизводительные вычислительные технологии и передовые производственные модели и технологии. Многие другие вспомогательные технологии, такие как обработка больших данных, также необходимы для полной реализации платформы облачного производства [39].

В.3.2. Текущее состояние исследований новой парадигмы облачного производства

С момента своего создания концепция облачного производства привлекла большое внимание исследователей, и было опубликовано большое количество статей (см. рис. В1). Существующие исследования облачного производства в основном сосредоточены на обсуждении самой концепции облачного производства, а также архитектуры и реализации функций платформы облачного производства, включая проблемы с ресурсами и услугами, работу системы облачного производства и другие соответствующие вопросы, такие как безопасность. Наиболее полно исследования облачного производства отражены в обзорах [40–42].

В 2010 г. в работе [5] систематизирована концепция облачного производства. После этого появилось много работ, посвященных прояснению понятия, определения, коннотации и характеристик [43–48]. Ключевые особенности облачного производства включают Интернет производственных ресурсов (или Интернет производственных объектов) и повсеместное обнаружение, виртуальное производственное общество и гибкую

производственную систему по запросу, ориентированное на услуги производство и предоставление возможностей на протяжении всего жизненного цикла, эффективное сотрудничество и бесшовную интеграцию, знаний [46].

В облачном производстве производственные ресурсы можно разделить на физические производственные ресурсы и производственные возможности [49, 50]. Физические ресурсы могут быть «жесткими» или «мягкими». Производственные возможности – это нематериальные и динамические ресурсы, которые представляют способность организации выполнять конкретную задачу или операцию с компетентностью. В облачном производстве все производственные ресурсы виртуализированы и инкапсулированы как производственные облачные сервисы для создания производственных услуг Интернета [51].

Платформы облачного производства могут быть созданы для малых и средних предприятий (МСП) или групповых предприятий [52, 53] и могут быть интегрированы на основе режима федерации [45]. Как и в случае с облачными вычислениями, существует четыре режима развертывания облачного производства, т.е. частное облако, облако сообщества, общедоступное облако, а также их совокупность (т.е. гибридное облако) [54].

В.4. Сравнительный анализ облачного производства и Индустрии 4.0

Индустрия 4.0 названа в честь отраслевой революции, а облачное производство основано на передовых производственных моделях и технологиях. Следовательно, Индустрия 4.0 должна иметь возможность описывать ландшафт обрабатывающей промышленности в грядущую эпоху и предлагать решения проблем, которые необходимо решить (например, эффективность использования ресурсов и энергии, городское производство и демографические изменения). Производственные системы Индустрии 4.0, основанные на КФС, способны предоставить эффективные средства для решения проблем. Облачное производство – это передовая производственная

бизнес-модель, которая фокусируется на вопросах, непосредственно связанных с производством (например, совместное использование ресурсов и сотрудничество в облаке), и уделяет меньше внимания таким вопросам, как городское производство, демографические изменения и т.д.

С точки зрения концептуальной системы, Индустрия 4.0 включает как вертикальную, так и горизонтальную интеграцию, но облачное производство концентрируется на интеграции в платформу облачного производства в форме композиции услуг (интеграция в облаке соответствует концепции горизонтальной интеграции в Индустрии 4.0). На заводе облачное производство больше заботится о том, как подключить производственные ресурсы к платформе облачного производства, и уделяет меньше внимания вопросу внутренней организации и работы (например, вертикальной интеграции) внутри фабрики облачного производства. Но это не значит, что внедрение фабрики облачного производства неважно. Изучение требований фабрики по производству облачных вычислений и ее создание являются важными задачами будущих исследований в области производства облачных вычислений. В этом аспекте интеллектуальная фабрика Индустрии 4.0 на основе КФС может служить важным ориентиром. Основываясь на приведенном выше анализе, мы можем сделать вывод, что Индустрия 4.0 представляет собой более широкую концептуальную систему, чем облачное производство, с точки зрения затрагиваемых вопросов и полноты концептуальных систем (рис. В6).

Фундаментальная идея Индустрии 4.0 состоит в том, чтобы интегрировать производственные системы различных «умных» заводов вдоль цепочки создания стоимости (или сети создания стоимости) в форме КФС, чтобы можно было получать данные и информацию в реальном времени по всей цепочке создания стоимости, что позволяет в реальном времени принимать точные решения. Производственные системы, основанные на КФС Индустрии 4.0, обладают высокой гибкостью, адаптивностью, возможностями реального времени и могут

обеспечить прозрачность производственных процессов. Таким образом, Индустрия 4.0 способна производить все более индивидуализированные продукты (даже размером партии 1 шт.) с более высоким качеством, более низкими затратами, более высокой производительностью и т.п. (рис. В6).

Фундаментальная идея облачного производства состоит в том, чтобы соединить и интегрировать производственные ресурсы различных фабрик (или предприятий) в облако, чтобы крупномасштабное совместное использование ресурсов и совместная работа могли быть реализованы в форме сервисов и их состава (см. рис. В6). Метод совместного использования ресурсов в облачном производстве может также принести предприятиям огромные выгоды и преимущества, такие как финансовая гибкость, маневренность бизнеса и мгновенный доступ к инновациям [54]. И Индустрия 4.0, и облачное производство объединяются, чтобы лучше удовлетворять потребности клиентов, которые становятся все более индивидуальными (см. рис. В6). Фактически Индустрия 4.0 представляет собой в высшей степени цифровую и сетевую производственную парадигму, которая удовлетворяет потребности предприятий в цифровом производстве и сотрудничестве между ними и бизнес-партнерами, в то время как облачное производство может эффективно удовлетворить потребности предприятий в совместном использовании и совместной работе удобным и гибким способом [55]. Технологии, представленные на рис. В2 и В4, тесно связаны с основными идеями Индустрии 4.0 и облачного производства. В целом технологии для Индустрии 4.0 имеют какое-то отношение к КФС, в то время как технологии для облачного производства в основном предназначены для реализации платформы облачного производства.

Что касается межзаводской интеграции, Индустрия 4.0 опирается на платформы КФС, а облачное производство опирается на платформы облачного производства (см. рис. В6). Эти два типа платформ различаются по назначению, основным технологиям, режиму работы и архитектуре платформ.

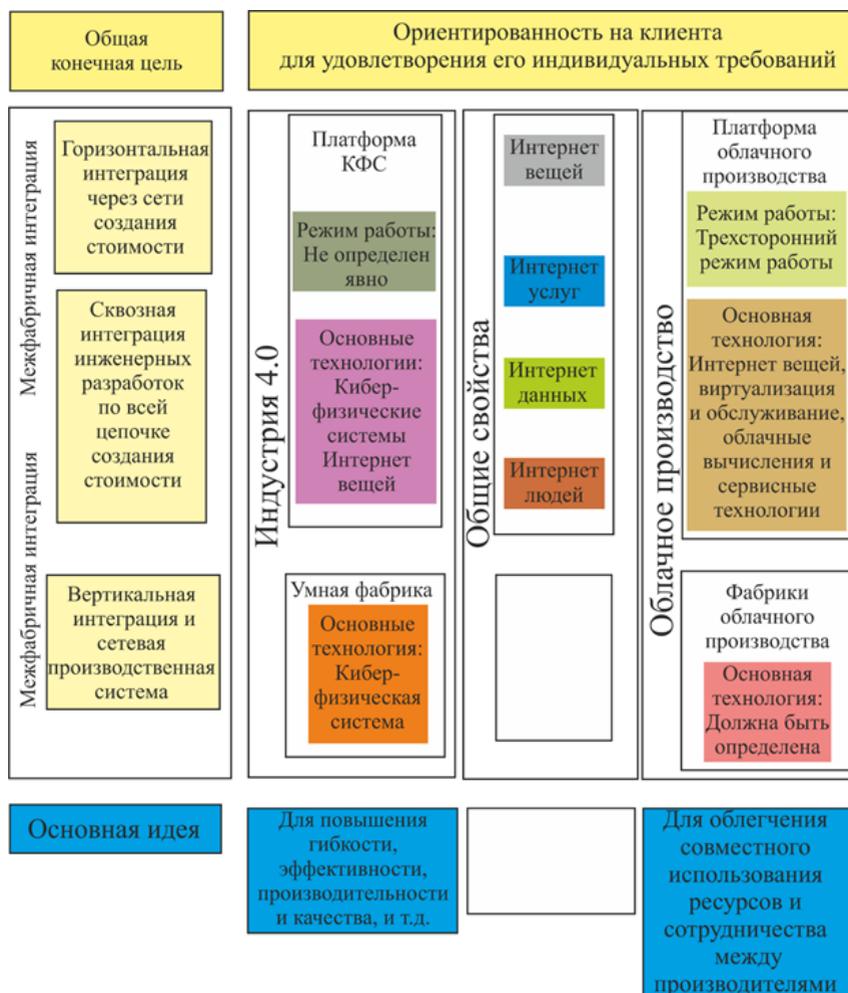


Рис. В6. Сравнение концепций Индустрии 4.0 и облачного вычисления

Цель. Платформы облачного производства призваны поддерживать полное совместное использование и эффективное сотрудничество социальных производственных ресурсов посредством централизованного управления и эксплуатации.

Платформы облачного производства открыты, что позволяет предприятиям свободно присоединяться или выходить из них. Платформы КФС также нацелены на обеспечение поддержки совместных промышленных бизнес-процессов и связанных бизнес-сетей для всех аспектов интеллектуальных предприятий и жизненного цикла интеллектуальных продуктов [1].

Основные технологии. Для платформы КФС, несомненно, КФС и ИВ – ключевые технологии. В зависимости от бизнес-целей платформ КФС могут потребоваться и другие технологии. В то время как для платформ облачного производства основные технологии включают Интернет вещей, виртуализацию и сервитизацию, облачные вычисления, сервисные технологии и т.п. (см. рис. В4 и В6).

Режим работы и бизнес-модель. Режим работы платформы КФС в Индустрии 4.0 – открытая проблема, и ее мало обсуждают [1]. Напротив, режим работы облачной производственной платформы был явно определен [5]. Тем не менее есть некоторые общие проблемы, которые необходимо решить в отношении этих двух типов платформ с точки зрения бизнес-модели, такие как динамическое ценообразование, справедливое распределение выгод, более широкие нормативные требования, защита интеллектуальной собственности и ноу-хау, мониторинг бизнес-процессов, юридические вопросы, а также вопросы безопасности.

Архитектура. На сегодняшний день не было никаких конкретных дискуссий относительно архитектуры платформы КФС, в то время как платформа облачного производства использует многоуровневую сервис-ориентированную архитектуру, по которой исследователи в основном достигли консенсуса [40].

Общие между платформами КФС и платформами облачного производства части лежат в реализациях ИВ и ИУ, Интернета устройств (ИУст) и Интернета платформ (ИПл) (или Интернета пользователей (ИПо)) (см. рис. В6) [1, 39]. Более того, сервис является важной концепцией как для Индустрии 4.0, так и для облачного производства. В этих двух концепциях есть некоторые различия в значении услуг. В Индустрии 4.0

услуги тесно связаны с КФС. Наиболее часто упоминаемая концепция обслуживания в Индустрии 4.0 – это услуги, связанные с продуктом (например, мониторинг состояния, а также профилактическое и прогнозирующее обслуживание) [19, 56]. Облачное производство включает концепцию производства как услуги, принимая все (в том числе производственные ресурсы и процессы, охватываемые всем жизненным циклом продукта) как услуги. Это самая широкая концепция обслуживания (включая услуги, связанные с продуктами и процессами в Индустрии 4.0). Следовательно, объем и значение услуг в облачном производстве намного шире, чем в Индустрии 4.0.

Хотя было проведено много исследований как в области Индустрии 4.0, так и в области облачного производства, они все еще находятся на очень ранней стадии. Существующие исследования Индустрии 4.0 больше касаются КФС, «умных» фабрик, больших данных и т.д. Несмотря на то, что межзаводские сети и интеграция (т.е. горизонтальная и сквозная интеграция) также являются ключевыми составляющими концепции Индустрии 4.0, соответствующих исследований на самом деле мало. В связи с этим лишь в нескольких работах обсуждалась проблема межзаводской интеграции [17, 18]. Напротив, исследования в области облачного производства в основном сосредоточены на том, как реализовать платформу облачного производства и связанные с ней технологии, среди которых большой объем работ был направлен на решение проблем, связанных с ресурсами и услугами, таких как классификация ресурсов, восприятие и подключение, виртуализация и сервитизация [39].

Индустрия 4.0 вытекает из концепции и метода цифрового производства. Цифровое производство существует уже несколько десятилетий, и теперь с помощью Интернета и других новых технологий оно развивается в сторону сетевой версии с более высоким уровнем оцифровки (т.е. КФС). В то же время сервитизация, облачность и глобальное сотрудничество производственных предприятий также являются в наши дни непреодолимыми тенденциями. В будущем вопрос о том, как добиться полной интеграции этих тенденций,

станет важным вопросом исследований для всей обрабатывающей промышленности.

И Индустрия 4.0, и облачное производство являются эволюционирующими концепциями и в целом парадигмой нового индустриального уклада. В будущем Индустрия 4.0 может прибегнуть к концепции облачного производства *«производство как услуга»* и его операционному режиму для достижения более крупномасштабного делового сотрудничества, и облачному производству может также потребоваться заимствовать концепцию интеллектуального производства в промышленности 4.0 для создания фабрик по производству облачных вычислений, чтобы облегчить восприятие ресурсов и подключение.

В настоящее время мы входим во все более «умный» сетевой мир. Индустрия 4.0 и облачное производство позволяют объединять в сеть производственные объекты, услуги, данные и людей через Интернет в производственной сфере, которая составляет часть интеллектуального сетевого мира. Можно предположить, что Индустрия 4.0 и облачное производство раскроют весь потенциал обрабатывающей промышленности в наступающей новой эре промышленного производства.

В.5. Роль аддитивного производства в эпоху нового технологического уклада – Индустрии 4.0

В.5.1. Организация «умных фабрик»

Последняя промышленная революция, Индустрия 4.0, поощряет интеграцию интеллектуальных производственных систем и передовых технологий с информационными технологиями. Аддитивное производство (АП) считается важным компонентом этого нового механизма. Нами представлен всесторонний обзор технологий АП вместе с их вкладом в Индустрию 4.0. Обзор фокусируется на трех важных аспектах АП:

последние достижения в области материаловедения, разработка процессов и улучшения в проектировании. Основная наша цель – классифицировать текущие знания (и технологические тенденции) об АП и выделить потенциальные возможности его использования.

Четвертая промышленная революция, а именно Индустрия 4.0 – это недавно возникшее движение в области интеллектуальной автоматизации. В новую эпоху использование современных производственных навыков в контексте интеграции новых информационных технологий играет важную роль в экономической конкурентоспособности [57]. Как показано на рис. В7, Индустрия 4.0 предлагает кибернетические и физические системы для прибыльного сотрудничества с целью создания «умных» фабрик за счет переопределения роли людей.

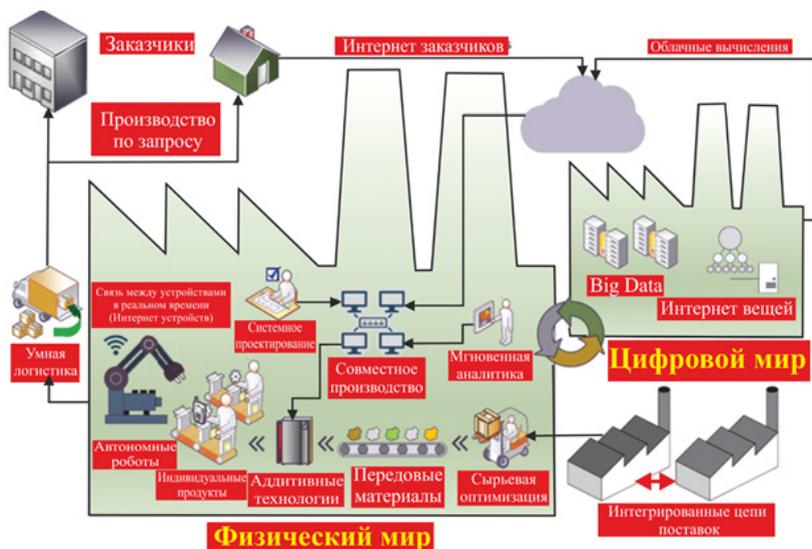


Рис. В7. Основные свойства и структура «умных» фабрик в Индустрии 4.0

Фундаментальные концепции Индустрии 4.0, связанные с виртуальной средой, включают ИВ, большие данные,

облачные вычисления и т.д. Тогда как его физическая область включает автономных роботов и аддитивное производство [58]. Что касается киберфизических систем, ИВ описывается как концепция сбора информации с физических объектов с использованием компьютерных сетей или ускоренных беспроводных подключений. Информация, извлеченная из продуктов, машин или производственных линий, представляет собой значительный объем статистических данных, подлежащих обмену и анализу. Другими источниками данных являются проектные записи, заказы клиентов, поставки поставщиков, складские запасы и информация, связанная с логистикой. В целом это большое количество данных определяется как большие данные, что является еще одним важным понятием, используемым в Индустрии 4.0. Более того, облачные вычисления, которые связаны с обработкой всей доступной информации, также можно рассматривать как одно из наиболее значимых явлений в виртуальном индустриальном мире. Все эти кибертехнологии (цифровые технологии) помогают обеспечить эффективное использование существующей информации для интеллектуального производства будущего [59].

С другой стороны, физическая часть «умных» фабрик ограничена возможностями существующих производственных систем. Это делает АП одним из жизненно важных компонентов Индустрии 4.0. Из-за необходимости массовой настройки в Индустрии 4.0 необходимо разработать нетрадиционные методы производства. Таким образом, АП может стать ключевой технологией для изготовления продуктов по индивидуальному заказу благодаря своей способности создавать сложные объекты с расширенными атрибутами (новые материалы, формы). Благодаря повышению качества продукции АП в настоящее время используется в различных отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, биомедицинская, производственная и транспортная [60]. Хотя все еще есть некоторые сомнения относительно его применимости в массовом производстве, использование АП в про-

мышленности растет из-за новых технологических достижений. Являясь развивающейся технологией для создания точных и усиленных сложных объектов с повышенной скоростью производства, оно может предложить способ замены традиционных производственных технологий в ближайшем будущем.

В.5.2. Материалы

Материаловедение – ключ к пониманию развития технологий АП. Исследователи в этой области проявляют большой интерес к новым материалам, подходящим для 3D-печати. Хотя для АП доступно большое количество пластиковых/полимерных компонентов [61], некоторые конкретные материалы привлекают дополнительное внимание промышленности, как показано на рис. В8. В данном разделе рассматриваются свойства перспективных материалов, которые, вероятно, будут разработаны в эпоху Индустрии 4.0. Нам необходимо подробно обсудить и определить их потенциальное использование.



Рис. В8. Общий обзор современных материалов для АП в эпоху Индустрии 4.0

В.5.2.1. Металл и аддитивное производство

Из-за своих хороших механических характеристик металлы, пожалуй, являются наиболее распространенными материалами в машиностроении. Как следствие, индустрия 3D-печати ищет новые решения для создания металлических деталей, которые могут заменить их аналоги, производимые традиционным способом. Новые разработки в технологии 3D-печати приводят к попыткам перейти в активную область исследований: аддитивное металлическое производство (АМП). В последнее время многие металлические компоненты могут изготавливаться методами АП с использованием алюминия, титана, нержавеющей стали и т.д. в качестве основных компонентов в процессе [62]. В большинстве коммерческих металлических 3D-принтеров используются металлические порошки, в то время как другие подходящие смеси материалов также были тщательно исследованы на предмет АМП [63]. Кроме того, микроструктура, полученная в результате АП, оказывает большое влияние на механические свойства деталей, такие как поведение при растяжении/усталости. Таким образом, вопросы, связанные с микроструктурой, фазовым составом, термообработкой, в последнее время привлекли внимание сообщества исследователей АП [64].

Авторы [65], например, исследовали некоторые механические свойства компонентов, изготовленных с помощью процесса АМП на основе лазера, демонстрируя механизм растрескивания. С другой стороны, еще многое предстоит разработать, поскольку изготовленные детали еще не оправдали ожиданий отрасли. Некоторые проблемы, которые необходимо решить, включают приемлемую стоимость, скорость производства, улучшенные характеристики при растяжении/усталости, твердости, улучшенное качество поверхности и однородную микроструктуру [66]. В новую эру АМП, вероятно, станет ключевым направлением в реализации Индустрии 4.0, если преодолеет существующие препятствия за счет усовершенствований как в материаловедении, так и в процессах АМП.

В.5.2.2. Умные материалы

Считается, что интеллектуальные конструкции изменяют свою форму или свойства материала в результате воздействия внешних условий. Из-за того, что со временем свойства меняются, они также были классифицированы как материалы для 4D-печати.

Внедрение интеллектуальных материалов в индустрию АП предоставляет такие преимущества, как изменение конфигурации печатной структуры и достижение желаемых свойств материала во времени. В общем, сплавы с памятью формы (СПФ) и полимеры с памятью формы (ППФ) реализуются как материал для 4D-печати при производстве функциональных частей мягких роботизированных систем, саморазвивающихся структур и устройств управляемого последовательного складывания [67].

Сплавы с памятью формы применяются из-за их основных свойств сверхэластичности и термического восстановления формы. Некоторые СПФ, такие как никель-титановые, широко используются в различных областях – от биомедицинских имплантатов до микроэлектромеханических устройств.

Как еще одна ветвь интеллектуальных материалов ППФ также чувствительны к внешним воздействиям, таким как свет, влажность и температурный градиент. Из-за биосовместимости ППФ растет интерес к его применению в медицинской технике [11]. Цифровая световая обработка материалов ППФ также используется в швейной промышленности и при производстве ювелирных изделий [68].

Кроме того, пьезоэлектрические материалы считаются еще одной замечательной альтернативой 3D-печати. Для целей сбора и накопления энергии, например солнечной, а также создания движителей в механических системах применялось трехмерное нанопроизводство таких материалов [69].

В эпоху Индустрии 4.0 все эти сектора, вероятно, будут использовать АП с дальнейшим улучшением качества производимых деталей.

Одной из новых областей применения интеллектуальных материалов является мягкая робототехника. Исследователи обнаружили, что функциональные компоненты с электроактивными полимерами можно стимулировать извне для контролируемого изменения их жесткости [70]. Например, в работе [71] авторы определили функцию самосгибания/разворачивания 3D-печатных ППФ как активного оригами и продемонстрировали управляемость активных петель, созданных с помощью печати на нескольких материалах. Одно из возможных применений активных шарниров – это самораскрывающиеся сателлитные компоненты, активируемые внешним воздействием [67]. Аналогичным образом, авторы [72] изучали печать на нескольких материалах, состоящую из гидрофильного полимера, где самоэволюция трехмерной формы вызывается наложенными деформациями под воздействием воды. Результаты таких исследований будут открывать путь исследованиям самособирающихся конструкций. В будущем могут появиться «умные» материалы для экстремальных условий, таких как глубокий океан или космос, активизация их будет осуществляться водой или ультрафиолетовым светом соответственно.

Подводя итог, можно сказать, что технология 3D-печати может ускорить внедрение интеллектуальных материалов. Потенциальными будущими применениями могут быть самособирающиеся конструкции, компактные конфигурации, механизмы, активируемые внешним или внутренним воздействием в экстремальных условиях, и программируемые материалы, которые будут легко использоваться в новую технологическую эпоху. Тем не менее необходимо провести дальнейшие исследования интеллектуальных материалов для создания новых комбинаций материалов, инновационных производственных процессов и улучшению конструкции.

В.5.2.3. Печать гидравлических и электронных систем

Авторы работы [73] исследовали нововведение в АП с несколькими материалами, где в исследовании представлена на-

печатанная на 3D-принтере гидравлическая система, в которой твердые и жидкие материалы были напечатаны в одном процессе. Моделирование наплавленного осаждения (FDM) с несколькими соплами использовалось для изготовления твердых структур, состоящих из жестких, гибких, поддерживающих материалов, и одновременного заполнения их жидкостью. В результате рабочие механизмы с гидравлическим приводом, такие как мягкие роботизированные захваты, были изготовлены всего за один этап без каких-либо дополнительных этапов сборки. Таким образом, 3D-печать может предложить простой способ изготовления роботов и готовых к использованию функциональных систем целиком без дополнительной сборки.

В эту новую эру введение проводящих веществ для АП позволяет встроить электронные схемы в печатный объект. Следовательно, полная интеграция схемы в сопутствующий объект (так называемую встроенную электронику) становится важной темой. В исследовании [74] авторы сконцентрировались на одном примере интеллектуальных встроенных электронных приложений, в которых светодиоды и электронная печатная плата интегрированы в электронные игровые кости (напечатанные на 3D-принтере). В другой работе [75] исследователи изучали 3D-печать индивидуальных объектов (в целях реабилитации), содержащих электронные устройства. Дальнейшее применение печатной электроники (квадрокоптеры, растягиваемые тактильные датчики, микробатарей) упоминаются в новейшем исследовании функциональных компонентов, напечатанных на 3D-принтере [76]. Результаты таких работ раскрывают потенциал АП для создания «умных» объектов для различных областей.

В заключение отметим, что АП предоставляет возможности для производства продуктов вместе с электроникой. Эффективность упаковки электронных систем может быть увеличена в эпоху Индустрии 4.0, что позволит создавать более инновационные конструкции всего за один такт с помощью технологии печати из нескольких материалов.

В.5.2.4. Специальные материалы и их применение

Общий взгляд на новые материалы для АП был изложен в предыдущих подразделах. В этом подразделе мы кратко обсудим дополнительные материалы АП, которые, вероятно, будут использоваться в новую эпоху.

Последние успехи в области применения аддитивного производства в строительстве показали возможность создания зданий одновременно с их инфраструктурой. Основные методы аддитивного строительства базируются на использовании бетона и других вяжущих материалов, которые являются совершенно новыми для аддитивного производства [77]. Другими новыми направлениями применения аддитивного производства являются швейная промышленность и ювелирное дело. Некоторые преимущества АП в индустрии моды заключаются в скорости процесса проектирования, малом времени изготовления и снижении затрат, связанных с упаковкой и транспортировкой [78].

Еще один необычный материал для 3D-печати – съедобные компоненты пищевой промышленности. В последнее время возможности их различного использования для достижения необходимой структуры поверхности и содержания питательных веществ были исследованы с применением методов АП на основе экструзии. Хотя проблемы, связанные с производительностью процесса, долговечностью и удобством использования съедобного материала, еще не решены, АП в будущем могут применяться в производстве пищевых продуктов [79].

Есть некоторые исследования, изучающие возможности 3D-печати лунной пыли для создания космических колоний [80], в которых обсуждается возможность создания среды обитания и инфраструктуры на Луне с использованием возможностей технологии АП [81]. Кроме того, было предложено рационально использовать ресурсы Марса в качестве материала для 3D-печати для будущих пилотируемых исследовательских миссий, чтобы уменьшить количество переносимых с Земли ресурсов [82].

В.5.3. Процессы

Хотя количество инновационных процессов АП значительно увеличивается, они берут свое начало в хорошо зарекомендовавших себя фундаментальных технологиях, показанных на рис. В3 [83, 84]. Вероятно, с появлением новых технических достижений в АП будут разработаны более совершенные процессы. Однако в настоящее время большинство процессов разработано для печати полимерными материалами, которые неприменимы в тяжелом машиностроении.

Для нужд тяжелого машиностроения в контексте Индустрии 4.0 сейчас проводится большое количество исследований для развития аддитивной печати металлами, которые являются наиболее предпочтительным материалом АМП в промышленности [66].

АМП играет жизненно важную роль в Индустрии 4.0 из-за широкого использования металлических компонентов почти во всех областях машиностроения. Следовательно, процессы АМП преобладают над другими типами 3D-печати. Аддитивное металлическое производство может быть внедрено с помощью четырех основных подходов: плавление в слое порошка, прямой подвод энергии, распыление материала, распыление связующего. Первые два типа являются наиболее распространенными в промышленности. В порошковых технологиях, таких как селективное лазерное спекание/плавление (selective laser sintering/melting, SLS/SLM) и электронно-лучевое плавление (electron beam melting, EBM), используется источник энергии для нагрева материала в порошковой ванне, название которого соответствует используемому источнику [85]. С другой стороны, методы прямого подвода энергии, такие как технология сетевого лазерного плавления (laser engineering net shape, LENS), используют тепловую энергию для плавления во время осаждения расплавленного металла. Кроме того, также доступны непрямые методы АМП, в которых формование металлических деталей и литье выполняются после их применения [61]. Новым металлическим АП-процессом является

аддитивное производство с помощью электродуговой наплавки проволоки (wire and arc additive manufacturing, WAAM), которое описывается как аддитивный процесс дуговой сварки в сочетании с подачей проволоки [86]. Недавно применение WAAM было реализовано в аэрокосмической промышленности из-за его превосходства в производстве очень больших элементов и его способности совмещать все свариваемые металлы.

Также недавно был запатентован процесс АМП – струйная печать наночастицами (nanoparticle jetting, NPJ), при которой нагретые металлические наночастицы внутри специальной жидкой среды выбрасываются струей, образуя очень тонкие слои изготовленной детали [87]. Изобретатели этого нового процесса утверждают, что NPJ обеспечивает лучшую чистоту поверхности среди всех существующих технологий АМП, что обеспечивает высокую точность без какого-либо ухудшения скорости производства. Более того, NPJ предлагает почти такие же металлургические свойства, что и при традиционных способах производства, а также обеспечивает более безопасные условия производства за счет исключения опасного порошка.

Атомно-диффузионное аддитивное производство (atomic diffusion additive manufacturing, ADAM) – еще один новый процесс, представленный Markforged [88], где плотные металлические детали печатаются слой за слоем с использованием металлического порошка, заключенного в пластиковую связку. Постепенное удаление пластичного связующего и спекание позволяют получить конечный продукт, в котором достигаются превосходные механические характеристики за счет спекания всей детали сразу. Точно так же Desktop Metal недавно анонсировал новую технологию АМП, названную **Single Pass Jetting, SPJ** [89]. В процессе SPJ за осаждением и уплотнением металлического порошка следует последовательное распыление связующего. Двухнаправленное движение печатающей головки делает процесс в 100 раз быстрее, чем обычные лазерные аддитивные технологии для металла. Компания утверждает, что SPJ способствует созданию первого 3D-принтера,

способного к массовому производству, с конкурентоспособной производственной стоимостью в расчете на каждую деталь.

Несмотря на разработки в АМП, все еще ведутся обширные исследования, направленные на преодоление сложных проблем, таких как отсутствие стабильности/повторяемости процесса, а также ограниченный размер детали, высокая стоимость единицы и плохие механические свойства готовой продукции. Чтобы найти способы решения этих проблем, исследователи недавно тщательно изучили оптимизацию параметров, осуществили поиск точных операций спекания, подходящих порошковых смесей и т.д. [90]. Кроме того, такие области исследований, как производственный мониторинг и инспекция, приобрели большое значение в преодолении барьера для будущего производства металлов [91]. Поскольку АМП неизбежно для «умных» фабрик Индустрии 4.0, разработка новых процессов и сопутствующих технологий, вероятно, будет ускорена в обозримом будущем.

В. 5.3.2. Гибридные производственные процессы

Гибридные процессы относятся к комбинации процессов аддитивного и субтрактивного производства (СП), применяемых последовательно или комплексно, включая надлежащее закрепление и контроль ориентации для формирования деталей [92]. Этот подход используется как для повышения точности размеров, так и для ускорения всего производственного процесса. Кроме того, проблема изготовления сложных участков, где одного производственного процесса (либо субтрактивного, либо аддитивного) недостаточно, может быть решена с помощью гибридных технологий [93].

В последнее десятилетие исследователи выдвинули гибридные решения для создания продуктов с выбранными техническими характеристиками [94]. Недавно Ли и др. [95] разработали гибридную систему быстрого прототипирования, в которой FDM использовался в качестве аддитивного процесса, в котором был разработан экструдер для переключения с АП на СП без ущерба для рабочего пространства. В аналогичном исследовании за процессом FDM следует обработка с ЧПУ в зависимо-

сти от угла осаждения FDM, чтобы добиться более низкой шероховатости поверхности продукта, а также не ухудшить его морфологию [96]. Для металлов, с другой стороны, гибридный процесс, состоящий из EBM и быстрой обработки с ЧПУ, предложили повысить эффективность процесса авторы работы [92]. В их исследовании фрезерование используется как метод СП вместе с надлежащим планированием процесса. Аналогичным образом авторы работы [97] ввели комбинацию избирательного лазерного плавления с прецизионным фрезерованием для получения желаемой чистоты поверхности. Кроме того, гибридное напыление и последующая микропрокатка (известная как hybrid deposition and subsequent micro-rolling, HDMR) используются для производства металлических деталей самолетов с выдающимися механическими свойствами [98].

Проблема дальнейшего повышения эффективности гибридного производства тесно связана с расширенным планированием процессов, объединяющим дизайн и производство. Рабочая схема, предложенная в работе [99], применяет АП/СП и процессы проверки в их сочетании. Алгоритм в этой структуре разработан для организации производственных операций/последовательностей с соответствующими параметрами при оптимизации времени производства и расхода материалов во время производства [100]. Подобная идея реализована в интересном методе, в котором гибридный процесс применялся для повторного использования существующих продуктов путем добавления материала и последующей обработки [101].

После четвертой промышленной революции дальнейший прогресс в области гибридных технологий может быть обусловлен развитием информационных технологий и эффективным использованием имеющихся данных, облачными вычислениями и производством. В результате как появления новых гибридных процессов, так и эффективного планирования имеющихся процессов промышленные потребности, вероятно, будут удовлетворены за счет повышения качества продукции.

В.5.4. Проектирование

Поскольку аддитивные технологии — это относительно новая производственная технология, инженеры и конструкторы обладают небольшим опытом и недостаточными знаниями о возможностях и ограничениях АП. Развитие цифровизации в контексте Индустрии 4.0 создало возможности для преодоления барьеров, связанных с дизайном, на новых производственных технологиях. Разработка новых вычислительных инструментов для моделирования, визуализации и мгновенного анализа напрямую связана с современным производством.

Благодаря улучшениям в кибертехнологиях Индустрии 4.0 дизайнеры получают расширенные вычислительные ресурсы, что, в свою очередь, приводит к повышению производительности и эффективности АП. **Проектирование для аддитивного производства (ПдАП)** было недавно представлено как один из дополнительных инструментов проектирования для оптимального выбора параметров процесса (таких как стоимость, время, качество, надежность и ограничения САПР).

Фактически ПдАП разделен на две ветви, в которых основное внимание уделяется подходам к общей структуре проектирования и методам, обеспечивающим улучшенную функциональность для конкретных продуктов [102]. Первый дает неопытным дизайнерам широкую перспективу для выбора лучших вариантов на этапах проектирования и производства АП. Например, автор работы [103] предложил общую методологию ПдАП для разработки новых продуктов (или реформирования существующих), в которой потребности клиентов, функциональные требования, параметры дизайна и переменные процесса оцениваются одновременно. В аналогичном исследовании другая структура ПдАП, в которой рассматриваются вопросы производства и сборки на ранней стадии разработки продукта, предоставляет проектировщикам выбор подходящих материалов и процессов [104]. С другой стороны, последняя методика (т.е. вторая группа ПдАП) предлагает качественные продукты для конкретной цели за счет меньшего внимания к другим действующим факторам [105]. Как часть

второй ветви целенаправленная методология в основном опирается на **топологическую оптимизацию (ТО)**. Она определяется как метод получения наилучшей возможной геометрии/формы при удовлетворении определенных требований. Например, часто исследуются возможности оптимизации объема продукта при сохранении минимального соответствия деталей [106]. Для снижения отношения «вес/жесткость» существует несколько новых приложений ТО [60]. Одним из интересных конструктивных приложений для конкретных целей является использование ТО для оптимальной теплопередачи конструкций, изготовленных с помощью АП [107]. Точно так же методы ТО, такие как, как создание **твердых изотропный материалов с пенализацией**, недавно были исследованы в отношении гибридного АП [108].

Другие исследования оптимизации дизайна были сосредоточены на таких параметрах, как толщина среза, геометрическая информация модели САПР, ориентация сборки детали и опорные конструкции [109]. Среди перечисленных параметров вопросы программного обеспечения САПР в последние годы вызывают большой интерес исследователей. Например, недостатки, связанные с форматом файлов STL, были устранены в цифровых форматах файлов АП (AMF) и в производственном формате 3D (3MF) [84]. Точно так же использование проектов программного обеспечения САПР с открытым исходным кодом было рассмотрено в исследовании [110]. Было также предложено несколько алгоритмов нарезки и эффективных методов планирования процессов, например, тот, который использует согласованность неоднородных внутренних частей для минимизации перемещений головки принтера [111].

Важность вопросов, связанных с проектированием, будет значительно возрастать по мере того, как промышленное и академическое исследовательское сообщество приобретет опыт благодаря успешному внедрению новых вычислительных технологий и новейших методологий проектирования. Следовательно, в ближайшем будущем можно будет более эффективно управлять ограничениями и возможностями АП.

В.5.5. Недостатки и будущее аддитивного производства

В последнее десятилетие Индустрия 4.0 привлекла внимание как академических кругов, так и промышленности, поскольку считается основным сдвигом парадигмы на предприятиях будущего. АП как ключевая технология в контексте предстоящей промышленной революции предлагает большой потенциал для перспективных разработок в эту новую технологическую эру при условии, что некоторые существующие препятствия будут преодолены в ближайшем будущем.

Из-за основных недостатков скорости производства, точности, воспроизводимости и стоимости АП не может быть предпочтительным на обычных промышленных предприятиях, особенно для массового производства обычных деталей. Тем не менее оно по-прежнему имеет превосходство над традиционными методами производства в изготовлении сложных и индивидуальных объектов. Фактически АП предоставляет возможности в широком диапазоне с точки зрения материала (от полимеров до металлов), размера (от нанометров до крупных деталей) и функциональности (самосборка для оптимальной теплопередачи) [112]. Прочность производимых деталей – еще один недостаток АП, преодолению которого могут способствовать появление новых материалов/процессов, вызывающих улучшение микроструктуры, и надлежащая оптимизация конструкции/топологии. Кроме того, гибридное производство позволяет компенсировать некоторые недостатки, такие как качество поверхности продукта, а также дает возможность ремонтировать/изменять форму существующих деталей.

В будущем децентрализация может стать возможной за счет распределения рабочей нагрузки по фабрикам/машинам посредством эффективного использования облачных сервисов [59]. Еще одно направление будущего развития АП – это проблема устойчивого развития, в которой АП может сыграть значительную роль в сокращении отходов и

энергопотребления за счет использования производства точно в срок. Более того, можно ожидать, что 3D-печать и цифровое производство окажут влияние на общество. Во-первых, необходимо переопределить роль сотрудников в отрасли, чтобы они выполняли работу, связанную с управлением/проектированием/анализом, а не являлись рабочей силой. Во-вторых, такие платформы, как «сделай сам» и «продвижение производителей», облегчают пользователям участие на стадии проектирования и производства [84]. Например, студенты могут создавать свои собственные продукты, превратив класс в небольшую практическую лабораторию с недорогим 3D-принтером.

В эпоху Индустрии 4.0 существует несколько популярных областей исследования аддитивного производства: новые составы материалов для обогащенных микроструктур, инновационные основы проектирования для оценки подходящих параметров, улучшенные утилиты САПР для оптимизации/моделирования, новых АП/гибридных процессов вместе с контролем и проверкой процессов в реальном времени и т.д. Основная рекомендация – сотрудничество исследовательского сообщества, промышленности и правительств для преодоления всех существующих препятствий на АП. Кроме того, то, что АП является относительно новой технологией, влечет за собой проблемы со стандартизацией в этой области, что требует некоторой работы по соответствующей сертификации [112].

Киберфизическая интеграция позволяет на «умных» фабриках с высокой эффективностью производить высококачественные индивидуализированные продукты. Развитие информационных технологий ускоряет переход к новой индустриальной эре, в которой значительную, если не основную, роль будет играть аддитивное производство. В настоящей главе были кратко рассмотрены конкретные темы, способствующие развитию АП, а именно: создание новых материалов и процессов, а также развитие совершенно новых методов и вопросы проектирования.

В будущем, вероятно, потребуются дополнительные междисциплинарные исследования. Роль проектирования, производства и потребления будет значительно пересмотрена, поскольку производственный процесс будет осуществляться, например, на небольших рабочих местах на предприятиях, которые в этом нуждаются. Другими словами, нынешний барьер массового производства в одном месте с длинными логистическими плечами будет преодолен за счет рассредоточенного и индивидуального изготовления.

В целом существует тенденция к появлению новых материалов, доступных для АП, таких как интеллектуальные материалы и металлические компоненты, для целенаправленного достижения требуемых характеристик изготавливаемой продукции. Еще одна популярная тенденция направлена на создание функциональных деталей/машин всего за один этап производства. Из-за возможностей, предоставляемых новыми технологиями АП, задачи проектирования и производства ограничиваются только индивидуальным желанием.

Контрольные вопросы

1. Дайте основные характеристики Индустрии 4.0.
2. Дайте характеристику уровням мировой экономики.
3. Охарактеризуйте Интернет вещей и Интернет услуг.
4. Что такое Big Data?
5. Дайте характеристику КФС.
6. Что такое цифровой двойник?
7. Дайте характеристику «умной» фабрике.
8. Что такое облачные вычисления?
9. Дайте характеристику облачного производства.
10. Что такое аддитивное производство?
11. Дайте характеристику «умных» материалов.
12. Опишите основные процессы, используемые в АП.

ГЛАВА 1. Этапы становления аддитивного производства

1.1. История появления аддитивных технологий

К настоящему времени история аддитивного производства насчитывает более 150 лет и уходит корнями в такие области, как фотоскульптура и топография (рис. 1.1). Фотоскульптура (Photosculpture) была предложена François Willème в 1890 г. Ее основная идея состояла в следующем: вокруг объекта или субъекта располагали фотокамеры, на которые производили одновременное фотографирование. 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 полученного контура. Для уменьшения трудоемкости процесса Carlo Baese в 1904 г. предложил использовать фоточувствительный желатин, который при обработке водой расширялся в зависимости от степени засветки – экспозиции.

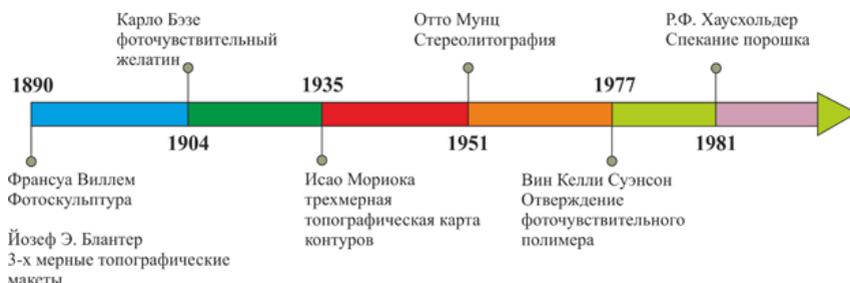


Рис. 1.1. Начало и становление аддитивных технологий

Способ изготовления топографических макетов – трехмерных карт поверхности местности был предложен Josef E. Blather в 1890 г. Суть метода заключалась в том, что из тонких восковых пластин по контурным линиям топографической

карты вырезались фрагменты, соответствующие воображаемому горизонтальному сечению объекта, затем эти пластины укладывались друг на друга в определенном порядке и склеивались. Получался «послойный 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.

В 1935 г. Isao Morioka предложил способ, сочетающий топографию и фотоскульптуру. Этот способ предполагал использование структурированного света (сочетание черных и белых полос) для создания топографической «карты» объекта – набора контуров. Контуры вырезались из листового материала, укладывались в определенном порядке, так 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.

У истоков всего современного аддитивного производства стоит процесс, предложенный в 1951 г. Otto Munz, который впоследствии был определен как стереолитография (stereolithography, SL). Система Munz использовала поршневой механизм для последовательной избирательной засветки и отвердевания фотополимера по сечениям сканируемого объекта и создавала так называемые фотоглифы. Принцип работы был аналогичен современному подходу: для сканирования объекта использовалась система сканирования, одновременно применялась специальная машина для создания отсканированной геометрии слой за слоем, пока отсканированный объект не будет успешно повторен. Этот метод показывает аналогию с хорошо известной фотополимеризацией в резервуаре (стереолитографией – SLA), используемой в настоящее время [113, 114].

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 начинают появляться технологии послойного синтеза из порошковых материалов.

Способ формирования тонкого слоя порошкового материала путем нанесения его на плоскую платформу был предложен в 1981 г. R.F. Housholder. После нанесения слоя порошкового материала производилось разравнивание его до определенной величины с последующим спеканием.

В 1982 г. A.J. Herbert опубликовал научную работу по созданию трехмерных моделей с помощью X-Y-плоттера, УФ-лампы и системы зеркал.

С этого времени процесс патентования новых технических решений по АТ-технологиям приобрел лавинообразный характер.

Далее представим несколько широко используемых аббревиатур и перейдем к рассмотрению технологий, непосредственно связанных с 3D-печатью.

Для аддитивных технологий американская организация ASTM International (American Society for Testing and Materials), занимающаяся разработкой технических стандартов для широкого спектра материалов, изделий, систем и услуг, рекомендует два основных термина – Additive Fabrication (AF), Additive Manufacturing (AM), а также «легитимные» синонимы – additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing и freeform fabrication, которые в русскоязычном варианте могут быть корректно переведены как «аддитивные технологии» (АТ), «аддитивное производство» (АП), а также технологии послойного синтеза.

1.2. История становления 3D-печати

Считается, что 3D-печать появилась на свет 40 лет назад и открыла потрясающие возможности для создания различных моделей в прототипировании, стоматологии, мелкосерийном производстве, изготовлении кастомизированных продуктов, миниатюр, скульптур, макетов и многого другого.

1.2.1. Зарождение идеи

В 1980 г. сотрудник муниципального промышленного исследовательского института в Нагое, Хидео Кодاما (Hideo Kodama) (рис. 1.2) подал заявку на регистрацию патента на устройство, которое с помощью УФ-засветки послойно формировало жесткий объект из фотополимерной смолы (рис. 1.3).



Рис. 1.2. Хидео Кодاما

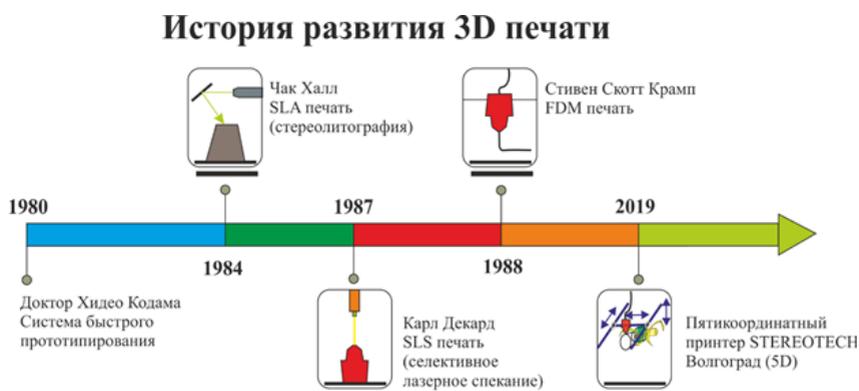


Рис. 1.3. История развития 3D-печати

В 1983 г. трое французских инженеров Ален Ле Мехо, Оливье де Витт и Жан-Клод Андрэ из национального центра научных исследований в попытке создания фрактального объекта пришли к идее использования лазера и мономера, который под воздействием лазера превращался в полимер. Заявку на патент они подали за 3 недели до американца Чака Хала. Первым объектом, созданным на аппарате, стала винтовая лестница.

Технологию французы назвали стереолитографией, а патент был одобрен только в 1986 г. Благодаря им самый известный формат файла для 3D-печати и называется STL (stereolithography). К сожалению, институт не разглядел перспектив в изобретении и его коммерциализации, и патент не был использован для создания конечного продукта.

В то же самое время Чарльз (Чак) Халл (рис. 1.4) работал в компании, которая делала покрытия для столешниц и мебели при помощи ультрафиолетовых ламп. Производство небольших пластмассовых деталей для прототипирования новых конструкций изделий занимало до двух месяцев. Чаку Халлу пришла в голову идея ускорить этот процесс совместив УФ-технологию и размещение тонкого пластика послойно.

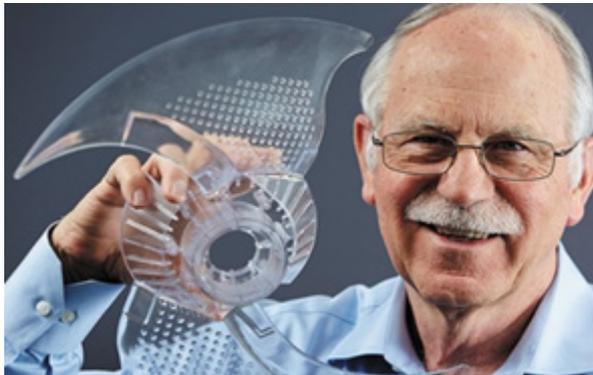


Рис. 1.4. Чак Халл

В компании ему выделили небольшую лабораторию для экспериментов, где он работал по вечерам и выходным. В качестве материала Чак Халл использовал затвердевающие под воздействием ультрафиолета фотополимеры на акриловой основе. Однажды ночью после месяцев экспериментов он смог наконец напечатать образец и был настолько окрылен удачей, что пошел домой пешком. Чак показал свое изобретение жене. Это была чашечка для промывки глаза, больше похожая на чашу для причастия, по мнению жены (рис. 1.5). Она и считается официально первой 3D-печатной моделью в мире и по-прежнему хранится в семье Халл, а после их смерти будет передана в Смитсоновский научно-исследовательский институт в Вашингтоне.



Рис. 1.5. Первый напечатанный образец

Чак Халл подал патентную заявку 8 августа 1984 г., и 11 марта 1986 г. она была одобрена. Изобретение получило название «Аппарат для создания трехмерных объектов с помощью стереолитографии». Чак Халл основал свою компанию – 3D Systems, и в 1988 г. выпустил на рынок первый коммерческий 3D-принтер – модель SL1 (рис. 1.6). Тогда же, в 1988 г., разработана модель принтера для 3D-печати в домашних условиях – SLA 250.



Рис. 1.6. Первый 3D-принтер SL1

Еще один новый способ 3D-печати появился примерно в то же время, что и SLA-печать. Это селективное лазерное спекание SLS, при котором лазер используется для превращения сыпучего порошка (вместо смолы) в твердый материал. Разработкой занимались Карл Декард, молодой студент бакалавриата в Техасском университете в Остине, и его преподаватель, профессор, доктор Джо Биман. Причем идея принадлежала Карлу Декарду. В 1987 г. они вместе основали корпорацию Desk Top Manufacturing (DTM) Corp.

В том же году компанией Scott Grump (сейчас Stratasys) было изобретено моделирование плавленными осаждениями. После нескольких лет относительного затишья, в 1991 г., компания Helisys разрабатывает и выпускает на рынок технологию для производства многослойных объектов, а через год, в 1992 г., в компании DTM выходит в свет первая система селективного лазерного спекания.

Затем, в 1993 г. основывается компания Solidscape, которая и приступает уже к серийному производству принтеров на струйной основе, способных производить небольшие детали с идеальной поверхностью, причем при относительно небольших затратах.

Однако пройдет еще не менее 20 лет, пока SLS 3D-печать станет коммерчески доступной потребителю. В 2001 г. компанию DTM выкупила компания Чака Халла – 3D Systems.

Удивительно, но более простой и дешевый способ 3D-печати – FDM (Fused Deposition Modelling) был создан после SLA и SLS, в 1988 г. Его автором стал авиационный инженер Скотт Крамп (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Скотт Крамп

Крамп искал простой способ создания игрушечной лягушки для своей дочери и использовал горячий клеевой пистолет: расплавил пластик и разлил его по слоям. Так родилась идея FDM 3D-печати, технологии послойного наплавления пластиковой нити. Крамп запатентовал новую идею и стал соучредителем Stratasys вместе со своей женой Лизой Крамп в 1989 г. В 1992 г. они выпустили на рынок свой первый серийный продукт – Stratasys 3D Modeler (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Stratasys 3D Modeler

Тогда же Массачусетский университет патентует технологию трехмерной печати, подобную струйной технологии обычных 2D-принтеров. Но, пожалуй, пик развития и популярности 3D-печати все же пришелся на новый, XXI век.

В 2005 г. появился первый 3D-принтер, способный печатать в цвете, это детище компании Z Corp под названием Spectrum Z510, а буквально через два года появился первый принтер, способный воспроизводить 50 % собственных комплекующих.

В настоящее время круг возможностей и сфер применения 3D-печати постоянно растет. Этим технологиям оказалось подвластно все – от кровеносных сосудов до коралловых рифов и мебели. Впрочем, о сферах применения данных технологий мы поговорим чуть позже.

1.2.2. Доступность 3D-печати



Рис. 1.9. Первые 3D Systems и Stratasys

Первые создаваемые 3D Systems и Stratasys агрегаты были громоздкими и дорогостоящими (рис. 1.9). Стоимость одного составляла сотни тысяч долларов, и использовать их могли только крупнейшие компании автомобильной и аэрокосмической отрасли. Принтеры имели массу ограничений и не могли широко применяться. Развитие технологии шло очень медленно. Спустя 20 лет, в 2005 г., появился проект RepRap (Replicating Rapid Prototyper) – самовоспроизводящийся механизм для быстрого изготовления прототипов (рис. 1.10).

Его идейным вдохновителем был доктор Эдриан Бауэр из Университета Бата в Великобритании. Целью проекта было «самокопирование», воспроизведение компонентов самих 3D-принтеров. На фотографии все пластиковые детали «ребенка» напечатаны на «родителе». Но фактически группа энтузиастов во главе с Эдрианом Бауэром смогла наконец создать бюджетный 3D-принтер для домашнего или офисного использования.

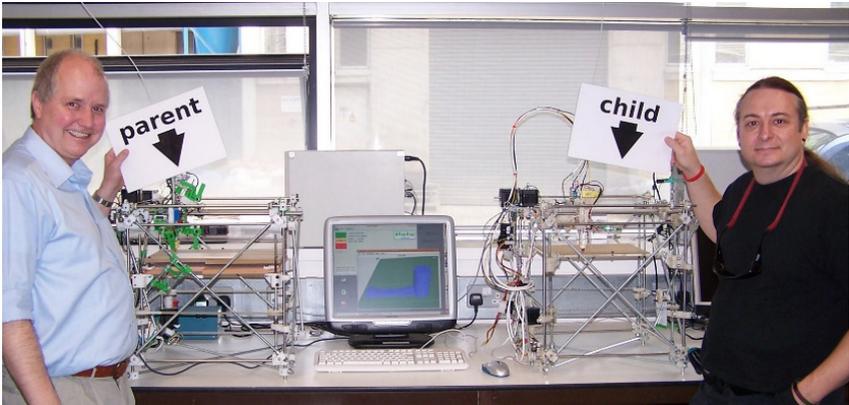


Рис. 1.10. Эдриан Бауэр и его проект RepRap

Идею быстро подхватили трое техногиков из Нью-Йорка и открыли компанию по производству настольных FDM-принтеров – MakerBot (рис. 1.11). Это и стало вторым поворотным моментом в современной истории 3D-печати.

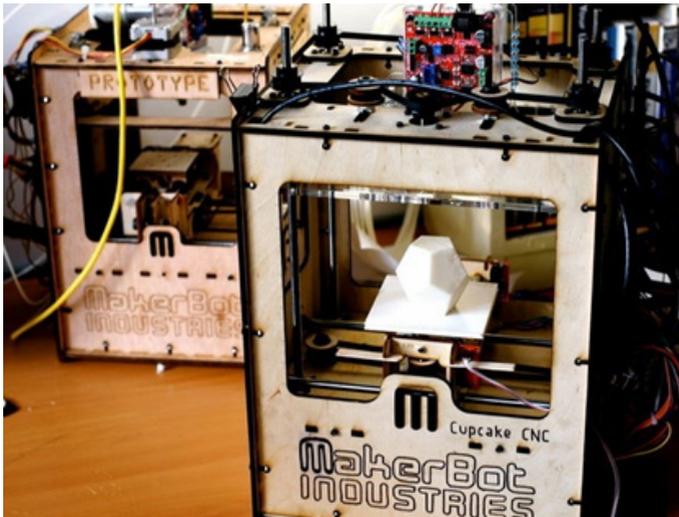


Рис. 1.11. Настольные 3D-принтеры MakerBot

Параллельно шли разработки других технологий. Среди них можно выделить биопринтинг. Томас Боланд из Клемсонского университета запатентовал использование струйной печати для 3D-печати живых клеток, что сделало возможным печать человеческих органов в будущем. Исследования в этой области ведут десятки компаний по всему миру.

Еще одним важным способом применения новой технологии стало создание протезов, сначала обычных, а потом и бионических. В 2008 г. первый напечатанный протез был успешно трансплантирован пациенту и позволил ему вернуться к нормальному образу жизни.

1.3. 3D-печать сегодня

В последние годы 3D-печать стала доступной массовому потребителю: цены на принтеры значительно сократились, а их использование стало удобнее. Фотополимерные 3D-принтеры печатают детализированные модели с высокой точностью и разрешением. Количество пользователей растет в том числе за счет огромного сообщества энтузиастов, готовых прийти на помощь новичкам. Этому способствует и наличие готовых файлов для 3D-печати, и доступность программного обеспечения для создания моделей.

3D-печать становится уже стандартным решением в таких отраслях, как стоматология, ювелирное дело, ортопедия, в других отраслях внедрение также идет полным ходом. Перспективы бесконечны – от строительства домов до нейрохирургии, от печати шоколадом до печати металлом.

3D-печать зародилась в 1980-е гг. – гораздо раньше, чем люди начали массово пользоваться всемирной паутиной. Но Интернет уже давно стал обыденной частью жизни, а аддитивные технологии до сих пор нельзя назвать широко распространенными.

1.3.1. Дальнейшее развитие 3D-печати

Волгоградский производитель «СтереoТек» выпустил принтер STE520 с большой долей отечественных комплектую-

щих, не менее 94,5 %, который считается первым в мире настольным 5D-принтером. Это не значит, что аппарат может напечатать время и ощущения – просто вместо трех осей координат X , Y и Z он печатает еще в двух плоскостях. Инновационная технология аддитивной пятиосевой печати позволяет создавать более прочные изделия, чем при обычной 3D-печати. Причем, как утверждают создатели, качество печати с технологией 5Dtech не зависит от формы деталей. Правда, размер изделий пока ограничен: 15×15×15 см. Но это препятствие преодолимо, тем более что технология вызывает большой интерес со стороны авиационных и оборонных предприятий.

Технологии 3D-печати давно широко используются в промышленности. А это, в свою очередь, требует разработки новых устройств, чтобы изделия отвечали требованиям самых разных заказчиков. Повышаются и требования к самим деталям: они должны быть прочными, надежными, сложной формы, а сам процесс изготовления – максимально быстрым.

Кротно рассмотрим историю появления пятикоординатной печати.

Алексей Дроботов работал доцентом Волгоградского государственного технического университета кафедры автоматизации производственных процессов (АПП). В 2012 г. он стал научным руководителем Артема Авдеева и Андрея Швеца по выпускной работе бакалавра. Общие интересы студентов и их преподавателя вышли за рамки науки. Совместная работа над технологиями 3D продолжилась после защиты диплома.

В 2016 г. научные разработки, которыми занимались молодые ученые, привели к созданию собственного бизнеса – компании по производству многоосевых 3D-принтеров. В 2019 г. компания стала резидентом «Сколково».

Изначально проект развивался только в рамках научной деятельности и только за счет энтузиазма основателей, однако уже в 2013 г. команде удалось получить первые средства на проект по программе «Умник» Фонда содействия инновациям (ФСИ). Вскоре появились первые результаты, которые дали понять, что разрабатываемая идея обладает

большим потенциалом коммерциализации. Впоследствии команда выиграла грант по «СТАРТ 1» ФСИ и основала компанию. На дальнейшее развитие были привлечены средства и по программе «СТАРТ 2» вместе с первыми средствами от инвестора. Всего на разработку потребовалось больше 9 млн рублей. Средства пошли на НИОКР и заработную плату сотрудников компании.

На первом этапе проекта компания реализовала настольное решение технологии; окупаемость проекта заняла 3 года. Планируется, что в 2020 г. основатели полностью возвратят вложенные средства. Окупаемость производственного и промышленного решений, по предварительным расчетам, займет два года и год соответственно, поскольку каждый новый этап основан на предыдущем и дополняет его.

Сейчас компания по-прежнему находится в Волгограде. Она работает по трем направлениям: производство базовых моделей 5D-принтеров собственной марки, печать изделий на заказ, внедрение отраслевых решений с инновационной технологией 5Dtech. Последняя позволяет печатать изделия любой формы, при этом прочность деталей в 4 раза выше, чем при печати по традиционным технологиям. Полученный результат компания усиливает за счет печати непрерывным волокном – в таком виде изделия будут прочнее алюминиевых, при этом имея в 2 раза меньший вес. В «Стереотек» производят как настольные, так и промышленные принтеры.

В 2019 г. был завершен проект 5Dtech, и был представлен первый пятиосевой принтер, который позволяет печатать функциональные детали с низкой себестоимостью для дорогостоящего оборудования.

5D-принтер радикально отличается от классического 3D-принтера. В процессе печати задействованы пять координат движения вместо трех. Решение данной компании уникально по совокупности преимуществ, в этом случае предлагается производственный инструмент, который позволяет получать композитные изделия с прочной трехмерной структурой, не нуждающиеся в постобработке и удалении поддер-

жек. При этом созданное программное обеспечение подготавливает модели к многоосевой печати автоматически, чего нет даже в решениях крупных компаний, например, Siemens NX.

Прочные детали, изготовленные методом многоосевой печати, востребованы в медицинской, авиастроительной и автомобилестроительной отраслях. В настоящий момент компания разрабатывает отраслевые решения по изготовлению индивидуальных и прочных культовых гильз для протезов нижних конечностей, созданию композитных изделий для авиа- и автостроения.

Кроме этого, изготовление деталей, в том числе штучно или малыми партиями, очень востребовано в бизнесе. Особенно часто с такими заказами обращаются компании, когда требуется быстро заменить вышедшую из строя деталь оборудования. Это дает возможность быстро получить нужные комплектующие для ремонта, благодаря чему сокращается время простоя. Услуга востребована в самых разных сферах – от ресторанного и гостиничного бизнеса до медицинских организаций и фитнес-клубов.

3D-принтер Stereotech STE 520 – пятикоординатный 3D-принтер для печати прочных изделий. В пятиосевом принтере Stereotech STE 520 используется инновационная технология разработки компании Stereotech – 5D additive manufacturing. Эта технология позволяет печатать детали с помощью наложения нити материала в разных направлениях, что позволяет получать изделия в 4 раза прочнее напечатанных на обычном 3D-принтере. Важным отличием конструкции 5D-принтера является наличие наклонно-поворотного стола вместо плоской платформы печати.

Рассмотрим кратко технологию 5D-печати.

Основными недостатками технологии 3D-печати являются (рис. 1.12):

- 1) необходимость печати поддержек для нависающих элементов модели;
- 2) постобработка модели;
- 3) низкая прочность между слоями модели.

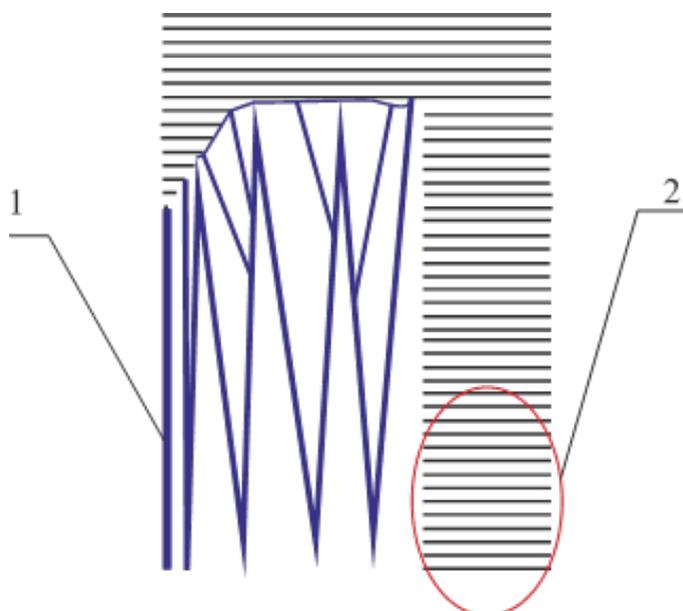


Рис. 1.12. Печать с помощью 3D-принтера: 1 – поддержки; 2 – низкая прочность между слоями

По всем экономическим параметрам 5D-печать более выгодна, чем 3D-печать (рис. 1.13).

Технология 5D additive manufacturing, разработанная компанией Stereotech, позволяет преодолеть некоторые недостатки современной FDM-печати, что является ее главным преимуществом (рис. 1.14).

Изготовленные изделия, по результатам испытаний, получают в 4 раза прочнее. Происходит экономия материала и времени печати до 50 % за счет снижения количества или полного отсутствия поддержек. Строится прочная объемная структура изделий вместо послойной. Увеличивается скорость печати до 2 раз за счет оптимизации перемещений, при которых принтер дольше работает на установленной скорости. Возможно крепление любой оснастки для серийного производства.



a

б

Рис. 1.13. Сравнение 3D- и 5D-печати: *a* – 3D-печать (FDM), время печати – 25 часов 46 минут, расход пластика – 85 г; *б* – 5D-печать (5Dtech), время печати – 13 часов 17 минут, расход пластика – 35 г

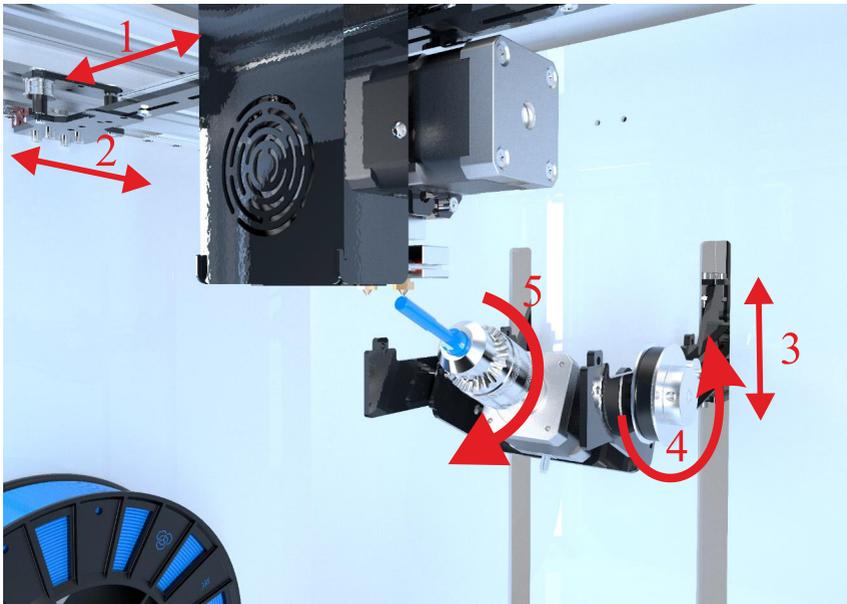


Рис. 1.14. Печать по трем декартовым координатам (1, 2, 3), печать по двум дополнительным полярным координатам (4, 5)

Качество 5D-печати также выше, чем у 3D-печати (рис. 1.15).

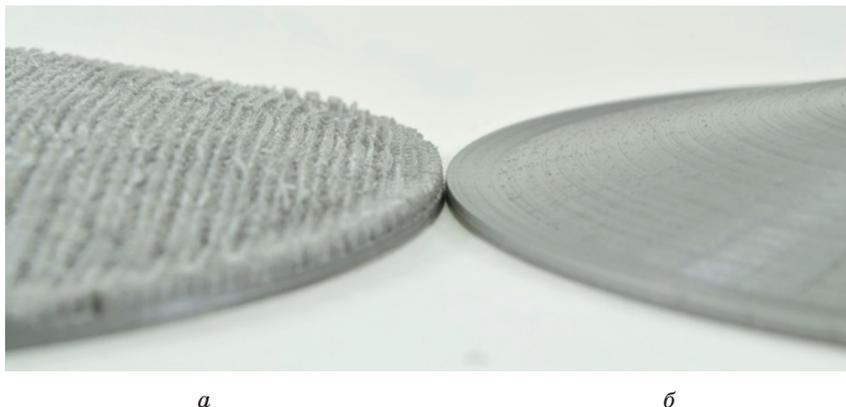


Рис. 1.15. Сравнение качества печати:
а – 3D-печать; *б* – 5D-печать

1.4. Будущее. 4D-печать: новые материалы, меняющие характеристики и форму

Обычно под 4D подразумевают четырехмерное пространство, в котором существуют четырехмерные объекты – тессеракт, икоситетрадор (не имеет аналогов в трехмерном мире) и т.п. Несколько лет назад термин 4D стали использовать для обозначения особой технологии печати предметов, меняющих свои характеристики с течением времени (рис. 1.16). Таким образом, в 4D-печати четвертым называют не измерение, а параметр, с которым связано положение (возможно, что и функция) объекта. В некоторых случаях под 4D-печатью подразумевают четырехкоординатную печать – аналог пятикоординатной печати (5D).

Понятие четырехмерной печати было впервые представлено Skylar Tibbits в формате конференции TED-Talk: тогда они показали пример самосборки объектов, выполненных на базе

3D-печати, изменяющих свою форму, комплектуя в режиме реального времени коробки и логотипы посредством расширения объема одного материала и его прохождения между волокнами другого. «Управление» в данном случае осуществлялось за счет уникального исполнения исходных материалов и создания волокон или прорезей, для того чтобы впоследствии привести их в действие при помощи внешнего импульса (в данном случае поглощение воды). Несмотря на сильный эффект, произведенный прогонкой данной технологии, прежде чем она выйдет в производство, необходимо будет решить несколько возникших проблем: долгое время активации продолжительностью в несколько минут, недостаточная тонкость исполнения из-за применения несвойственных для этого материалов и высокая хрупкость конечных изготовленных элементов.

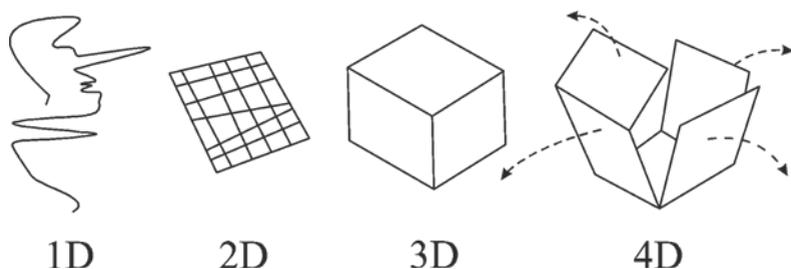


Рис. 1.16. К определению 4D-печати

Для решения возникших проблем ученые опираются на существующие достижения в области 3D-печати с использованием различных материалов. Один из подходов заключается в принципе струйного вбрасывания, схожего с принципом печати на струйном принтере. При этом подходе в качестве материалов для печати используются фотополимерные материалы различной твердости, что обеспечивает изготовление конечных деталей разной плотности.

Было установлено, что применяемые полимеры имеют свойство памяти формы, подобно далеко идущей технологии сплавов с эффектом памяти формы. Два этих свойства – воз-

возможность печатать на 3D-принтере, используя материалы разной твердости, и эффект памяти формы – открывают принципиально новые возможности и области применения технологии четырехмерной печати.

Технологии 4D-принтера трудно назвать революционными по сравнению с обычной 3D-печатью – объект точно так же создается слой за слоем. Самое интересное происходит потом, когда готовый предмет начинает меняться. И здесь все зависит от того, какой материал используется в принтере. Специальные материалы изменяются под воздействием воды, тепла, света, механического воздействия, а также могут быть запрограммированы на определенные действия.

Давайте посмотрим, зачем нужна 4D-печать и как выглядит мир, построенный на основе вещей, изменяющих свою форму и поведение.

Команда ученых Гарвардского университета обратила внимание на растения, которые реагируют и изменяют свою форму в ответ на стимулы окружающей среды. Были разработаны гидрогелевые композитные структуры, меняющие форму при погружении в воду.

Объект в форме цветка орхидеи напечатали гидрогелевыми композитными чернилами, содержащими определенно направленные волокна целлюлозы (рис. 1.17). Чтобы придать древесным волокнам нужное направление, их смешали с акриламидным гидрогелем. При погружении в воду получившееся вещество изменяет свои геометрические размеры заранее определенным образом.

Композитные чернила позволяют получать изделия разной формы. Более того, можно менять состав материала для получения определенных свойств, например электропроводности или биосовместимости.

Четырехмерный принтер может быть использован для исследований в области химии, материаловедения и в областях, связанных с обороной. Предполагается, что 4D-печать позволит создавать новые химические и биологические датчики, конструкции и материалы для микрочипов.

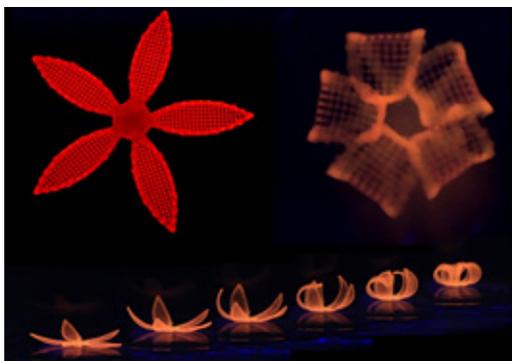


Рис. 1.17. Гидрогелевая орхидея

В настоящее время прогресс сдерживает отсутствие недорогого оборудования, способного выполнять печать со сверхвысоким разрешением (примерно в 1000 раз меньше толщины человеческого волоса) из твердых (металлов и полупроводников) и мягких (например, органических) материалов.

Четырехмерный принтер станет основой нового поколения инструментов для разработки архитектур, в которых материалы, формирующие функциональные компоненты электроники, могут быть объединены с биологическими объектами.

1.4.1. Память формы

Еще в 2013 г. исследователи из Университета Колорадо разработали методику 4D-печати, включив полимерные волокна с эффектом памяти формы в композитные материалы, используемые в традиционной 3D-печати. В качестве примеров применения технологии назывались солнечные батареи, способные сворачиваться для транспортировки и разворачиваться, автомобильные покрытия, адаптирующиеся к среде, а также военная форма, меняющая тип камуфляжа или эффективнее защищающая от газа или осколков.

Спустя три года объединенная группа ученых из Сингапурского университета технологии и дизайна, MIT и Техно-

логического института Джорджии разработала новый метод 4D-печати на основе воздействия светом на фоточувствительные материалы. Новая методика печати способна создавать элементы толщиной в человеческий волос.

В принтер заливали раствор фоточувствительного полимера и проецировали слой за слоем требуемый объект, обрабатывая материал ультрафиолетом. Для проверки, что полимер способен восстанавливаться после деформаций, исследователи напечатали мягкий манипулятор, который в свободном состоянии закрыт. С его помощью ученые смогли успешно захватывать небольшие предметы (например, винты) (рис. 1.18).

Уже на данном этапе подобную технологию можно адаптировать для реального применения – к примеру, создать капсулы, высвобождающие вещества при повышении температуры тела или осуществляющие порционное внесение полезных удобрений при одновременном мониторинге почвы.

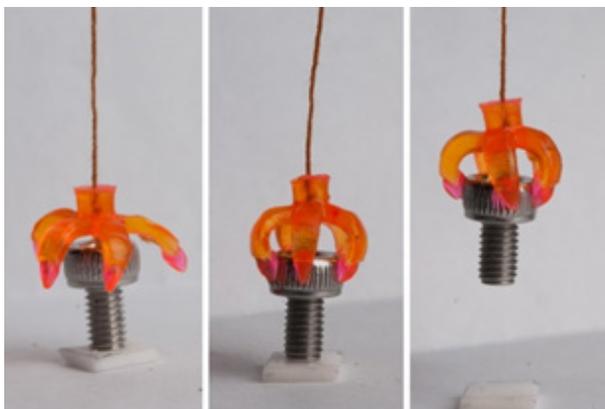


Рис. 1.18. Мягкий манипулятор из светочувствительного фотополимера

Врачи из провинции Шэньси на северо-западе Китая провели успешную и редкую операцию на трахее с использованием технологии четырехмерной печати. Врачи вставили пациентке трубчатый трахеальный стент, чтобы сохранить

открытыми дыхательные пути. Для производства стента использовался биоматериал поликапролактон, который со временем растворяется – биodeградация в теле человека происходит медленно, около 3 лет. Врачи заранее определили время растворения напечатанного стента, и пациенту не нужно будет проходить еще одну операцию по его удалению.

Схожий случай произошел в США. Гарретт Петерсон родился с пороком развития бронхов – бронхомаляцией, когда хрящи недостаточно твердые. Вентиляция бронхов была нарушена, и ребенок всю свою жизнь провел в госпитале Университета штата Юта на искусственной вентиляции легких, поддерживающих жизнь. Между тем, в Мичиганском университете разработали трехмерную печатную шину, которая со временем могла разрушаться внутри тела без всяких последствий, но при этом могла держать открытыми дыхательные пути в течение двух-трех лет – достаточно, чтобы восстановить бронхиальный хрящ. После создания виртуальной модели принтер печатает слои поликапролактона в форме конкретной трахеи. Хотя процесс создания индивидуальных стентов может показаться трудным, он занимает всего один день.

Вполне вероятно, что 4D-биоматериалы рано или поздно выйдут далеко за рамки лечения заболеваний дыхательных путей. Уже изучается проблематика реконструкции лица и восстановления ушей.

Контрольные вопросы

1. Когда появились аддитивные технологии и какие вы знаете этапы их развития?
2. Как и когда возникла 3D-печать?
3. Расскажите об основных характеристиках 3D-принтеров.
4. Сформулируйте перспективы развития 3D-технологий.
5. Что такое пятикоординатные 3D-принтеры?
6. Что такое 4D-печать?
7. Что такое память формы?

ГЛАВА 2. Знакомство с технологией 3D-печати

Для изучения технологий 3D-печати важно ознакомиться с терминологией, которая используется в научной и практической литературе по аддитивным технологиям. Для этого в конце книги имеется глоссарий, к которому читатель может обращаться по мере знакомства с материалом, изложенным в книге.

2.1. Классификация технологий, применяемых в производстве

Большинство техник изготовления предметов можно отнести к трем основным группам (рис. 2.1).

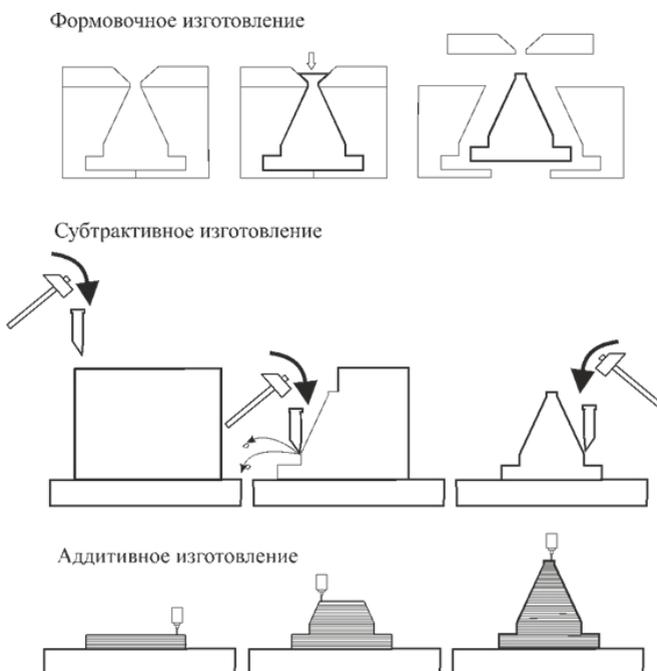


Рис. 2.1. Классификация техник изготовления

Формовочное изготовление лучшим образом подходит для изготовления больших партий одной и той же детали. Требует больших начальных вложений в формы и оборудование. Затем детали производятся быстро и по низкой цене.

Субтрактивное изготовление считается нерациональным из-за большого количества материала, удаляемого для изготовления детали. Подходит для изготовления деталей сравнительно простой геометрии в средних объемах и из функциональных материалов (например, из металла).

Аддитивное изготовление лучше всего подходит для малых объемов, сложных проектов, которые невозможно осуществить формовочным или субтрактивным методом.

2.2.1. Формовочные методы (литьевое прессование, отливка, штамповка, выковка)

Формовочное изготовление обычно формирует материал в желаемую форму посредством нагрева и давления. Сырье может быть расплавлено и спрессовано в форму (литьевое прессование, отливка в формы), расплавлено и вылито в форму (отливка) или спрессовано либо вытянуто в нужную форму (штамповка/вакуумное формообразование/выковка). Формовочные техники позволяют производить детали из широкого ряда материалов (и металла, и пластика). Для больших объемов производства формовочное изготовление зачастую ни с чем не сравнимо по цене. Основное ограничение формовочного изготовления – это необходимость изготовить оборудование (форму или заготовку) для формования детали. Оборудование обычно дорогостоящее и сложное в производстве, что увеличивает подготовительно-наладочное время и задерживает изготовление детали. Такие большие стартовые инвестиции являются причиной тому, что формовочное изготовление главным образом предполагает малозатратное производство в больших объемах. Конструкция формовочного оборудования усложнена необходимостью наличия таких элементов формы, как монтажные дуги и направляющие, для содействия формованию деталей.

Также ограничение конструкции деталей, произведенных формочными методами, определяется такими свойствами, как угол литейного уклона и однотипная толщина стенок.

2.1.2. Субтрактивные методы (станки с ЧПУ, обтачивание, сверление)

Субтрактивное изготовление начинается с блока цельного материала (заготовки) и продолжается с применением режущих инструментов удаления (обработки) материала для получения конечной формы. Станки с ЧПУ, фрезеровка, обтачивание (на токарном станке) и такие машинные операции, как сверление и резка, являются примером субтрактивных техник.

При субтрактивном изготовлении можно производить высокоточные детали с безупречной обработкой поверхности. Почти все материалы поддаются машинной обработке. Для большинства конструкций субтрактивное изготовление является самым эффективным по цене решением.

Субтрактивное изготовление ограничено некоторыми факторами. Большинство конструкций нуждается в системе автоматической и технологической подготовки производства (Computer Aided Manufacturing, САМ) для составления маршрутов использования инструмента и эффективного удаления материала. Это вызывает дополнительные задержки и затраты на процесс в целом. При проектировании деталей для субтрактивного изготовления необходимо учитывать наличие доступа инструмента к обрабатываемому объекту, так как инструмент резки должен иметь возможность доставать до всех поверхностей, чтобы удалить весь ненужный материал.

Но хотя такие станки, как пятиосевые с ЧПУ, избавляют от некоторых из этих ограничений, положение сложных деталей придется менять в процессе обработки, что еще более увеличит затраты и время подготовки. Также субтрактивное изготовление считается нерациональным процессом из-за большого количества материала, который удаляется для изготовления конечной геометрии детали.

2.1.3. Аддитивное производство (3D-печать)

Аддитивные методы производства могут создавать различные сложные формы и структуры при правильном управлении материалами, это приводит к меньшему количеству отходов и различным другим преимуществам по сравнению с традиционным производством, что делает их все более популярными [115–117].

Аддитивное производство (АП), более известное как 3D-печать, – это процесс последовательного составления детали слой за слоем. Существует целый ряд технологий 3D-печати, каждая из которых обладает своими преимуществами и ограничениями и позволяет напечатать детали из различных материалов.

Изготавливаемые детали могут обладать почти любой геометрией, что является одним из основных преимуществ 3D-печати (хотя все равно в каждой из технологий есть соблюдаемые правила). Также 3D-печать не полагается на дорогостоящие инструменты, что означает практически отсутствие стартовых вложений. Преимуществом этого являются быстрые разработка и утверждение прототипов и деталей, производимых в малых объемах.

Одним из значительных ограничений 3D-печати является невозможность создать детали из материалов, подобных тем, которые применяются в субтрактивных и формовочных техниках. Большинство технологий 3D-печати изготавливают детали, которые по природе анизотропные или не полностью плотные. 3D-печать также ограничена в воспроизводимости, это означает, что детали будут иметь незначительные различия из-за неравномерного охлаждения или деформации во время отверждения.

2.1.4. Сравнение по стоимости

Цена зачастую является определяющим фактором в решении того, как деталь будет изготовлена. Общее представление о том, как стоимость изготовления (цена за единицу) различается в зависимости от количества производимых деталей дает рис. 2.2.

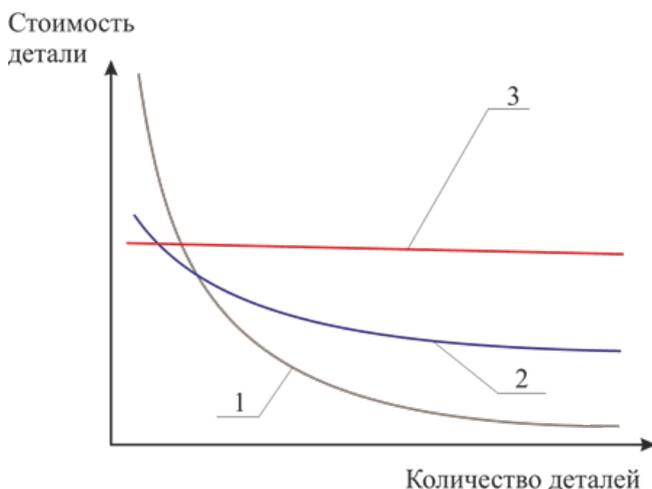


Рис. 2.2. Удельная стоимость изготовления:
 1 – формование; 2 – субтракция; 3 – аддитивные технологии

2.2. Процесс 3D-печати

Существует множество технологий 3D-печати, но во всех технологиях существуют общие для них этапы изготовления продукта от конструирования до конечной детали. И хотя каждый метод 3D-печати позволяет производить детали своим способом, эти основные этапы присутствуют во всех технологиях.

2.2.1. Создание 3D-файла

Создание цифровой модели детали является первым шагом в процессе 3D-печати. Самый распространенный метод создания 3D-модели – это система компьютерного проектирования (Computer Aided Design, CAD). При этом могут быть использованы различные программные пакеты инженерной графики, такие как AutoCAD, Компас-3D, NanoCAD, SolidWorks и др. Обратное проектирование также можно применять для

составления цифровой модели с помощью 3D-сканирования (рис. 2.3). И CAD-моделирование, и обратное проектирование будут рассмотрены в следующих главах. В данной главе кратко остановимся на прототипировании или обратном проектировании как достаточно новом направлении. Это важно потому, что многие промышленные, транспортные устройства, работающие в настоящее время, были изготовлены достаточно давно. Их комплектующие проектировались и поставлялись из разных стран, чему во многом способствовал распад СССР. И в настоящее время, как правило, отсутствует документация для их изготовления. Единственным выходом для изготовления аналогов износившихся деталей является обратное проектирование.

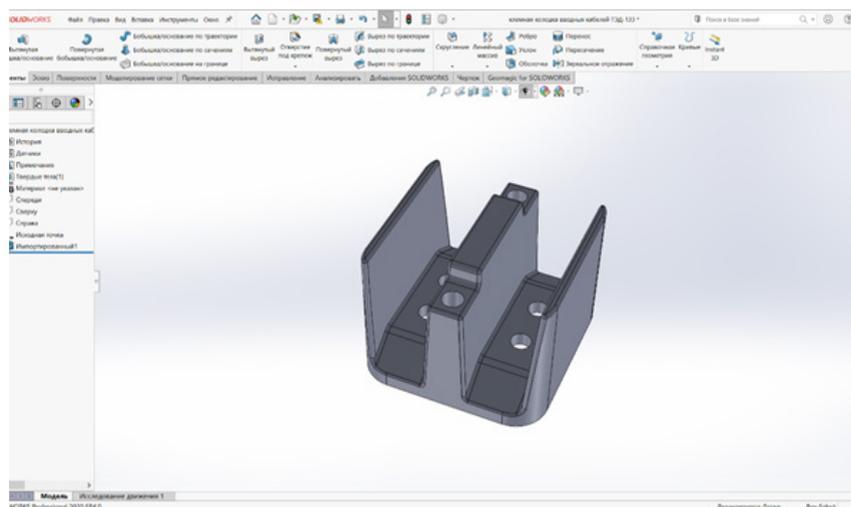


Рис. 2.3. 3D-модель клеммной колодки вводных кабелей

При проектировании 3D-печати необходимо оценивать несколько проектных решений. Они в основном относятся к ограничениям внешней и внутренней геометрии объекта, поддерживаемым материалам и требованиям к выходным отверстиям. Проектирование деталей для 3D-печати будет также обсуждаться в последующих разделах.

Обратное проектирование начинается с 3D-сканирования объекта. Сейчас существует множество конструкций 3D-сканеров, которые основаны на различных принципах работы. В целом 3D-сканирование относится к большому научно-техническому направлению с названием «Техническое зрение» [113].

3D-сканеры могут быть контактными и бесконтактными, с активным или пассивным принципом излучения, с лазерным сканированием и структурированным освещением. Наиболее распространены лазерные сканеры со структурированным (прерывистым) излучением. Вспышки лазера формируют на модели вершины, считываемые специальной камерой в виде координат. Затем ближайшие вершины специальная программа соединяет ребрами, получаются многоугольники – полигоны. Они, как правило, являются треугольниками. Поэтому лазерное 3D-сканирование часто называют лазерной триангуляцией по аналогии с триангуляцией в численных методах конечных и граничных элементов. Затем систему полигонов в специальном математическом обеспечении можно сгущать, что дает возможность сглаживать прототип сканируемой модели. На рис. 2.4 представлен процесс 3D-сканирования.

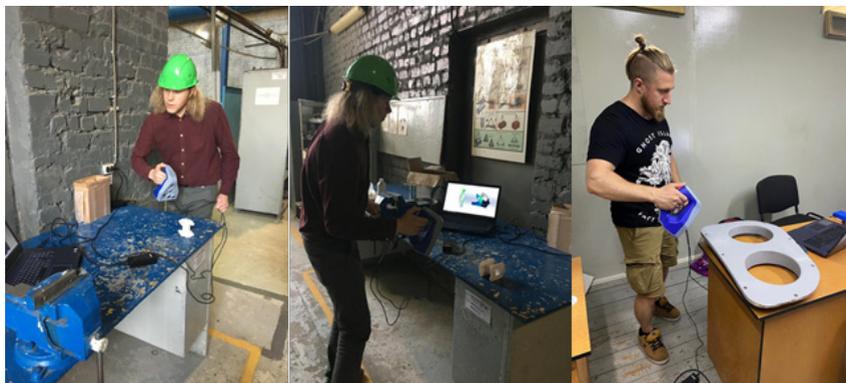


Рис. 2.4. Процесс 3D-сканирования деталей кабины тепловоза

2.2.2. Создание STL-файла и операции над ним

Для того чтобы напечатать деталь, отсканированная 3D-модель должна быть преобразована в формат, обрабатываемый 3D-принтером – в файл стереолитографии (stereolithography, STL), также упоминаемый как файл «стандартного треугольного языка» (Standard Triangle Language) обрабатываемый 3D-принтером в специализированном математическом пакете, в котором, как правило, для сканированных моделей возможно сгущение полигонов и сглаживание поверхности сканированной модели (рис. 2.5).

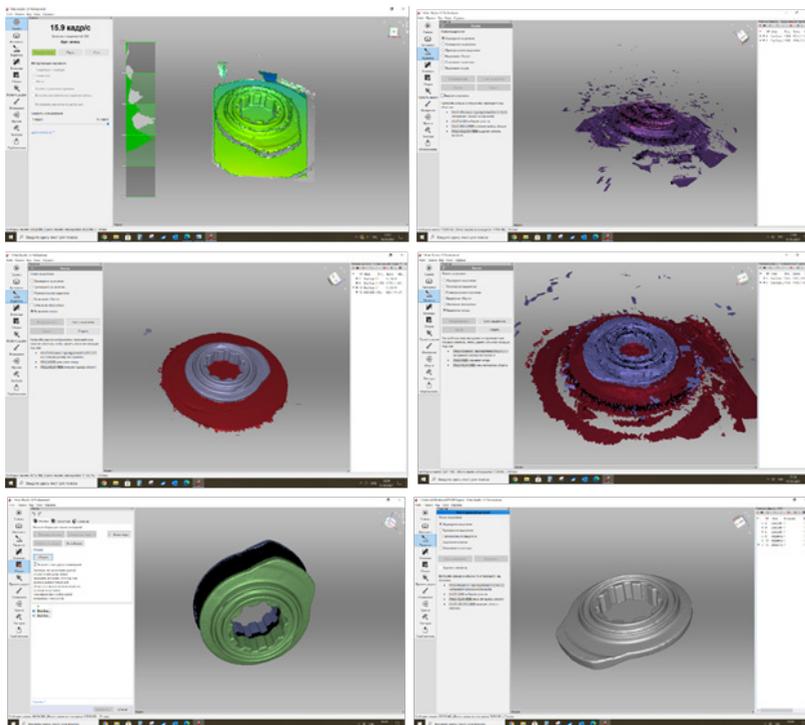


Рис. 2.5. Последовательность подготовки отсканированной модели к 3D-печати

Заметим, что направление технического зрения сейчас интенсивно развивается. Уже существуют сканеры, основанные на компьютерной томографии. С их помощью можно сканировать объекты с любой сложностью внутренней геометрии. Эти сканеры могут быть основаны на различных физических процессах, рентгеновской томографии, ультразвуковой томографии или нейтронной томографии. Размеры объектов для сканирования тоже впечатляют – от больших зданий, судов, автомобилей до наноструктур. Данные технологии позволяют прототипировать и напечатать объект любой сложности, например, двигатель автомобиля, который будет работать. При этом все резьбовые соединения будут в рабочем состоянии.

Все начинается с преобразования CAD-модели в файл стереолитографии (stereolithography, STL), также упоминаемый как файл «стандартного треугольного языка» (Standard Triangle Language). Типы файлов OBJ и 3DP также приемлемы для 3D-печати, но менее распространены. STL применяет треугольники (полигоны) для описания поверхностей объекта, существенно упрощая зачастую сложную CAD-модель. Большинство CAD-программ способны экспортировать модели в файл STL.

Когда файл STL сформирован, он импортируется программой подготовки модели к печати (слайсером), она разделяет конструкцию на слои, которые будут применяться в создании детали. Слайсер берет STL-файл и конвертирует его в G-код. G-код – язык программирования для устройств с числовым программным управлением, применяемый в САМ для управления автоматизированными машинами наподобие машин с ЧПУ и 3D-принтеров.

Слайсер также позволяет оператору 3D-принтера определить параметры конструирования у 3D-принтера, выясняя положение поддержки, толщину слоя, расположение детали и положение поддерживающего материала (рис. 2.6). Слайсеры часто являются собственностью марки 3D-принтера, но есть также и универсальные слайсеры, такие как Netfabb, Simplify3D и Slic3r.

2.2. ПРОЦЕСС 3D-ПЕЧАТИ

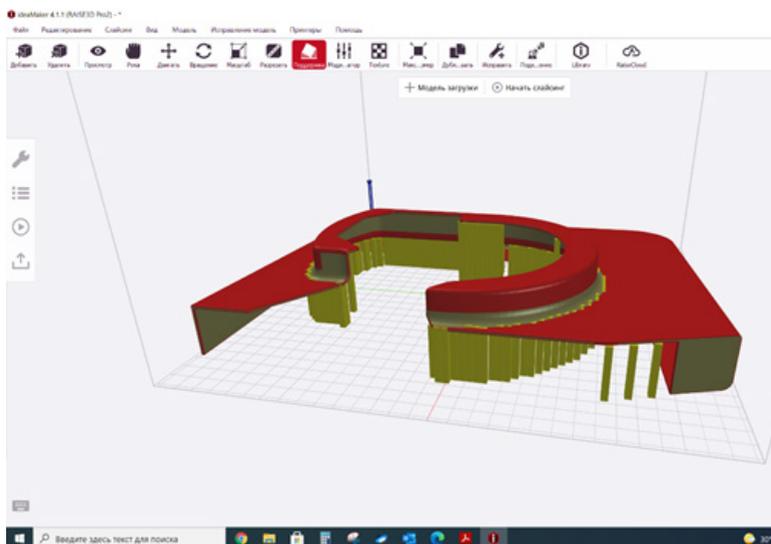


Рис. 2.6. Импорт файла STL слайсером

Проектировщику чаще всего необходимо предоставить оператору 3D-принтера STL-файл. Оператор затем настраивает желаемые параметры для печати и сам создает файлы G-кода.

2.2.3. Печать

По каждой из технологий, обсуждаемых в данном курсе, по-разному аддитивно изготавливаются детали. Подробное объяснение того, как изготавливаются детали, включая связанные с этим материалы, представлено в последующих разделах. Пример законченной печати на платформе показан на рис. 2.7.

2.2.4. Удаление напечатанного

Для некоторых технологий 3D-печати удаление напечатанного настолько же просто, как отделение напечатанной части от рабочей платформы (рис. 2.8). Для других промыш-

ленных методов 3D-печати удаление напечатанного – это высокотехнологичный процесс, включающий точное извлечение напечатанного, когда оно еще заключено в поддерживающем материале или прикреплено к подложке. Для этих методов в большинстве случаев требуются выверенные процедуры удаления и высококвалифицированные операторы вместе с оснащением для техники безопасности и контролируемой средой.

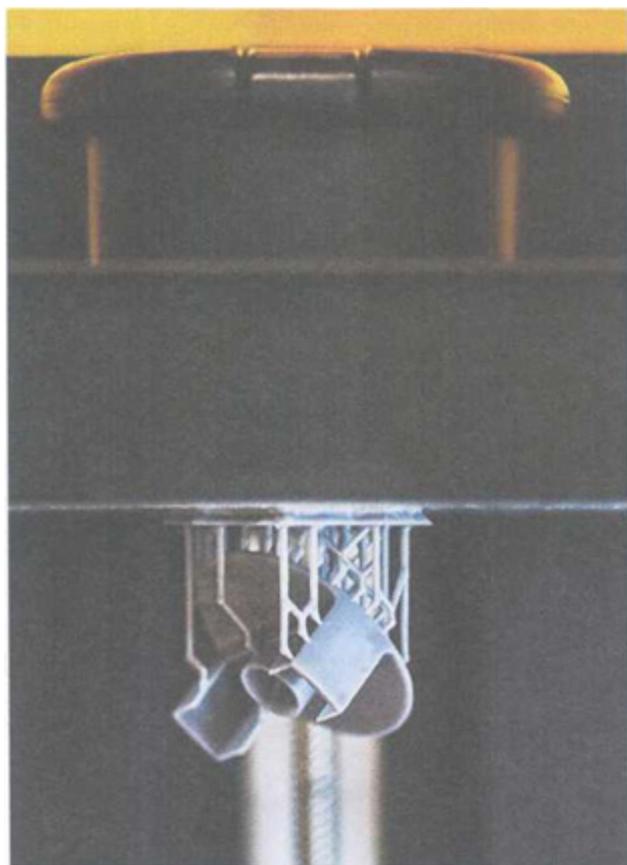


Рис. 2.7. Изготовленная крышка торца вала на Formlabs Form 2 до удаления с рабочей платформы. Печать заняла приблизительно 1,5 ч

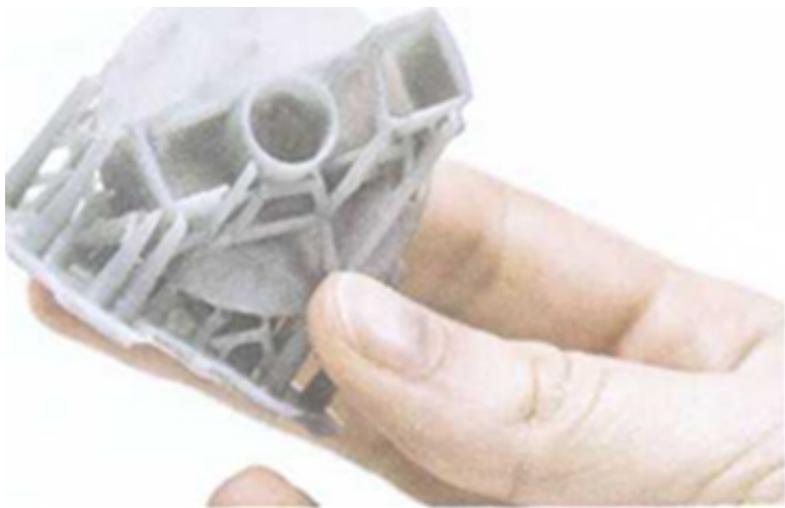


Рис. 2.8. Крышка торца вала после удаления с рабочей платформы с прикрепленными поддержками

2.2.5. Постобработка

Процедуры постобработки также варьируются в зависимости от технологии печати. Некоторым технологиям необходим процесс отверждения под УФ-лучами, в то время как другие позволяют сразу же передавать детали далее. В технологиях, применяющих поддержки, удаление материала происходит в этой же стадии постобработки (рис. 2.9). Самые распространенные варианты постобработки для каждого метода обсуждаются в главах, посвященных 3D-печати из полимерных материалов.

Самый лучший способ определить, подходит ли определенный метод 3D-печати для данного применения, – это понять механизмы изготовления деталей для каждой технологии. В последующих главах мы ответим на этот вопрос, рассматривая самые распространенные методы 3D-печати и то, как по каждому из них аддитивно изготавливаются детали.



Рис. 2.9. Обработанная крышка торца вала без поддержек

Контрольные вопросы

1. Какие технологии изготовления деталей применяются в производстве?
2. Охарактеризуйте формовочные методы производства.
3. Что такое субтрактивное производство?
4. Что такое аддитивное производство?
5. Охарактеризуйте удельную стоимость в различных технологиях производства.
6. Охарактеризуйте процессы 3D-сканирования и создания CAD-модели.
7. Что такое STL-файлы и слайсеры?
8. Зачем необходима постобработка при 3D-печати?

ГЛАВА 3. Введение в методы 3D-печати и их классификация

Трехмерная печать (Three-dimensional printing, 3DP) – это инновационная технология, которая может преобразовывать трехмерные компьютерные модели в реальные объекты с помощью аддитивного производства [119]. Технологии 3DP стали доступны с начала 1990-х гг., когда они были разработаны для быстрого и экономичного производства прототипов моделей [120]. На этапе знакомства с 3D-печатью проектировщикам и инженерам бывает достаточно сложно принять решение, какую из доступных технологий 3D-печати и какой материал выбрать для изготовления необходимой детали. В данной главе мы рассмотрим наиболее распространенные технологии 3D-печати и используемые в них материалы. Обладая этой информацией, инженеры смогут свободно ориентироваться в большом разнообразии технологий, методов, материалов и принтеров, применяемых в 3D-печати.

3.1. Классификация технологий 3D-печати

Для стандартизации всей терминологии АТ, а также для классификации каждого метода 3D-печати в 2015 г. был создан стандарт ISO/ASTM 52900. В итоге было установлено восемь категорий процессов АТ [121, 122]:

- 1) экструзия материалов;
- 2) фотополимеризация в резервуарах (ванночке);
- 3) плавление порошкового слоя (полимеры);
- 4) струйная обработка материалов;
- 5) струйная обработка связующего;
- 6) плавка порошков (металлы)
- 7) направленное энергетическое осаждение (прямой подвод энергии).
- 8) ламинирование листов.

На рис. 3.1 они представлены с их общепринятыми аббревиатурами. Ламинирование здесь не показано потому, что

иногда его относят к субтрактивному производству. Рассмотрим кратко каждую из них.

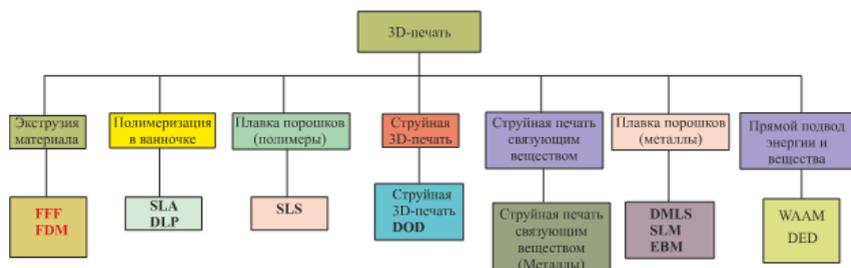


Рис. 3.1. Классификация 3D-печати

1. Экструзия материала. Аддитивный процесс изготовления, в котором расплавленный материал подается через сопло или жиклер (фильеру) (рис. 3.2), а затем при охлаждении отверждается, называется производством с помощью метода плавления филамента (Fused Filament Fabrication, FFF), также иногда его называют моделированием методом послойного наплавления (Fused Disposition Modelling, FDM).

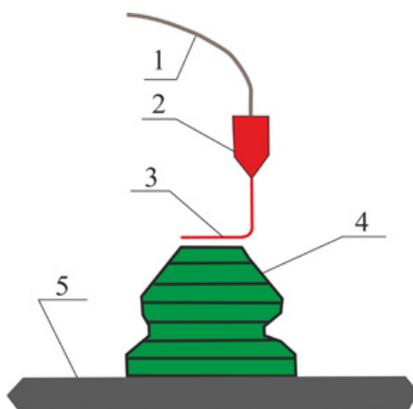


Рис. 3.2. Экструзия материала (филамента): 1 – филамент; 2 – экструдер с соплом; 3 – расплавленный филамент; 4 – изготавливаемая деталь; 5 – рабочая платформа

2. Полимеризация в резервуаре (ванночке). Аддитивный процесс изготовления изделий, в котором расплав фотополимера в резервуаре отверждается под воздействием источника света так, чтобы получилась заданная деталь (рис. 3.3). Этот процесс 3D-печати получил название – стереолитография (Stereolithography, SLA), в которой обычно используется луч лазера. При использовании светодиодного источника света, процесс называют цифровой светодиодной проекцией (Digital Light Processing, DLP). Также для отверждения полимера может использоваться проекция LCD экрана.

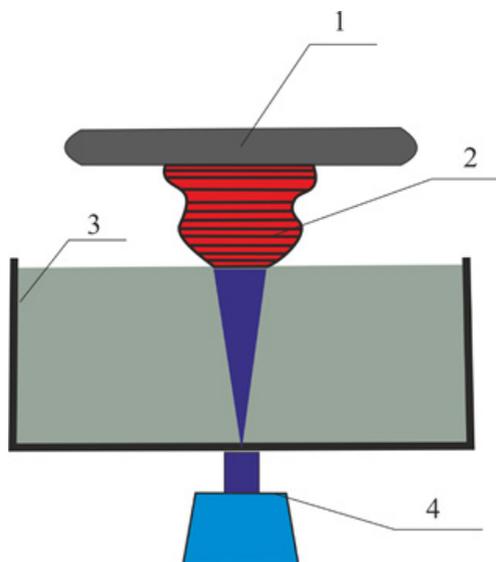


Рис. 3.3. Полимеризация в резервуаре: 1 – рабочая платформа; 2 – изготовляемая деталь; 3 – резервуар с расплавом полимера; 4 – лазер

3. Плавка порошков. Аддитивный процесс изготовления, в котором тепловая энергия лазерного излучения выборочно расплавляет участки слоя порошкового пластика (рис. 3.4) для последующего отверждения в изготавливаемую деталь называют выборочным лазерным спеканием (Selective Laser

Sintering, SLS). Если для спекания используется металлический порошок, то такой процесс 3D-печати называют прямым лазерным спеканием металлов (Direct Metal Laser Sintering, DMLS), или иногда выборочной лазерной плавкой (Selective Laser Melting, SLM). Если же в качестве источника энергии используется электронная пушка, процесс 3D-печати называют электронно-лучевой плавкой (Electron Beam Melting, EBM).

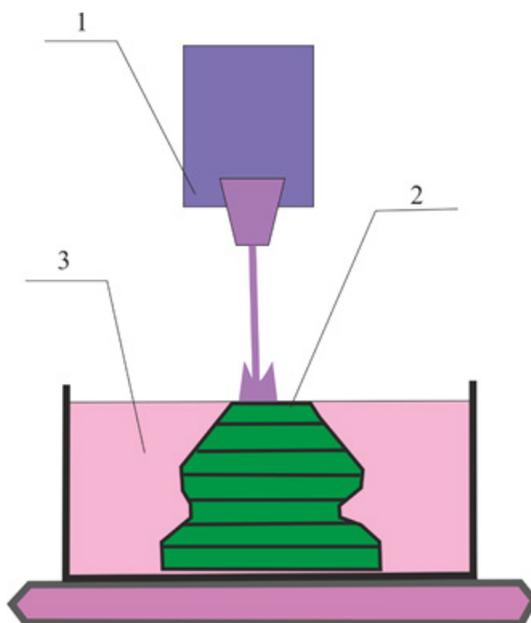


Рис. 3.4. Плавка порошков: 1 – лазер с нагревателем; 2 – рабочая поверхность; 3 – лоток с порошком

4. Струйная 3D-печать. Аддитивный процесс изготовления, в котором капли материала выборочно помещаются на подложку и отверждаются (рис. 3.5) с помощью ультрафиолетового облучения обычно называют струйной 3D-печатью (Material Jetting, MJ) или подачей по требованию (Drop On Demand, DOD).

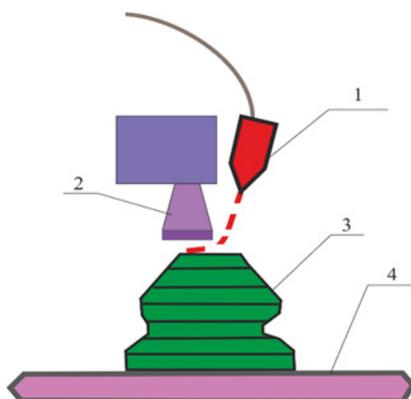


Рис. 3.5. Струйная печать: 1 – печатающая головка; 2 – источник ультрафиолетового излучения; 3 – деталь; 4 – рабочая платформа

5. Струйная печать связующим веществом. Аддитивный процесс изготовления, в котором жидкое связующее вещество выборочно наносится на участки порошкового материала для его скрепления (рис. 3.6) называют струйной печатью связующим веществом (Binder Jetting, BJ).

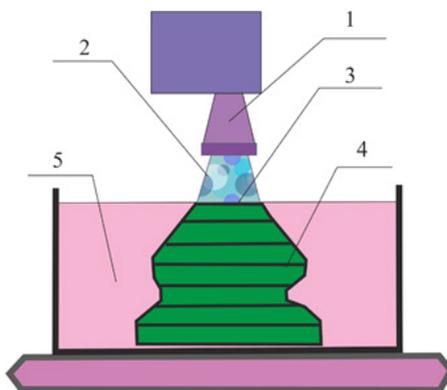


Рис. 3.6. Струйная печать связующим веществом: 1 – печатающая головка; 2 – связующее вещество; 3 – рабочая поверхность; 4 – деталь; 5 – порошок

6. Прямой подвод энергии и материала. Аддитивный процесс изготовления, в котором сконцентрированная тепловая энергия применяется для сплавления материалов по мере нанесения слоев (рис. 3.7) обычно называется плавкой путем создания формы лазером (Laser Enineering Net Shaping, LENS), а иногда называют его выборочным лазерным нанесением металла (Laser Based Metal Deposition, LBMD). При лазерном прямом подводе энергии и металлического материала через конические коаксиальные каналы процесс называют прямым энергетическим наращиванием (Direct Energy Disposition, DED). Прямой подвод энергии осуществляется также при электродуговом наращивании (Wire are additive manufacturing, WAAM).

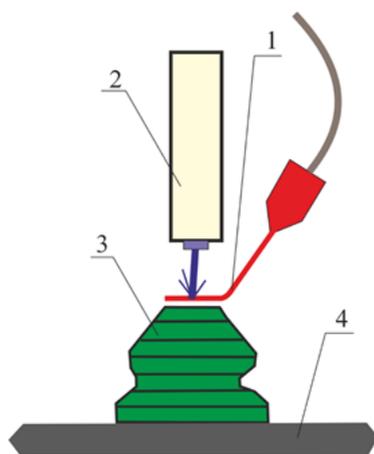


Рис. 3.7. Прямой подвод энергии и материала:
 1 – материал для наращивания; 2 – источник энергии;
 3 – деталь; 4 – рабочая платформа

7. Ламинирование. Аддитивный процесс изготовления, в котором листы форматированного материала скрепляются для формирования детали (рис. 3.8) называется производством изделий посредством ламинирования (Laminated Object Manufacturing, LOM), иногда просто листовым ламинированием (Sheet Lamination, SL). Этот способ 3D-печати, так же как и

ультразвуковое аддитивное изготовление (Ultrasonic Additive Manufacturing, UAM) выходят за рамки данного учебника вследствие того, что они не имеют широкого применения.

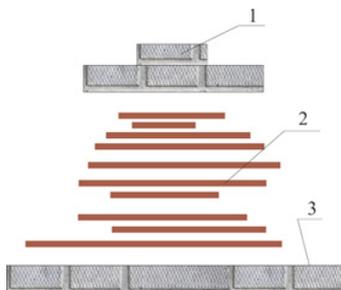


Рис. 3.8. Листовое ламинирование: 1 – пресс; 2 – деталь; 3 – рабочая платформа

3.2. Материалы, применяемые в 3D-печати

Как и технологии 3D-печати, материалы 3D-печати также можно разделить по категориям. Большинство из них можно обособить в две группы: полимеры и металлы (рис. 3.9). Кратко рассмотрим эти группы.

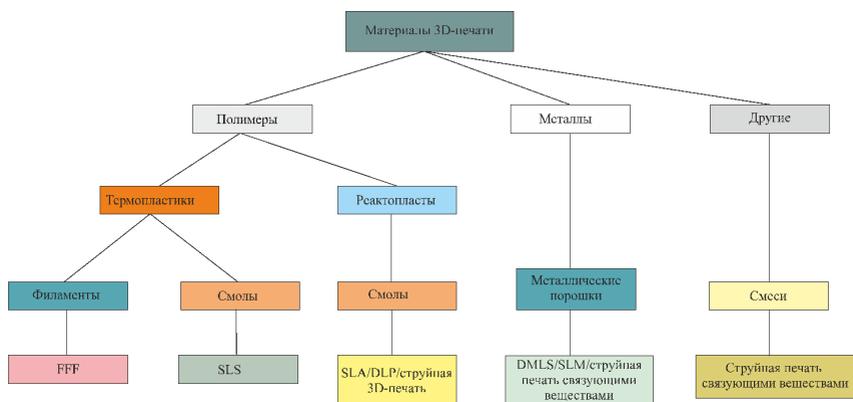


Рис. 3.9. Классификация материалов 3D-печати

3.2.1. Полимеры

Полимеры, например пластик, мы получаем во множестве различных форм, и богатство их свойств позволяет говорить об их широком применении. Полимеры сейчас используются повсюду, начиная от клеящих составов до биомедицинских устройств. На сегодняшний день полимерная промышленность занимает более высокие позиции, нежели стальная, алюминиевая и медная вместе взятые.

Для 3D-печати полимеры поступают в трех различных формах: пластиковая нить (или филамент), смола и порошок (рис. 3.10). Полимеры для 3D-печати в основном относят к двум категориям: термопластики и реактопласты. Различаются они в основном поведением при термическом воздействии.



Рис. 3.10. Виды пластика для 3D-печати: 1 – катушки филамента для FFF; 2 – контейнер смолы для SLA; 3 – нейлоновый порошок для SLS

Термопластики. Их можно плавить и отверждать снова и снова с сохранением их свойств. При литьевом прессовании

наряду с процессами FFF-печати используются термопластики, твердый термопластик нагревается до пластичного состояния и выливается или вытесняется в заготовку либо на рабочую платформу, где он и затвердевает. Типовыми продуктами, изготавливаемыми из термопластика, являются пластиковые бутылки, LEGO-кирпичики, пищевая упаковка, подошвы обуви и др.

Реактопласты. В отличие от термопластиков реактопласты не плавятся. Сначала реактопласты представляют собой вязкую жидкость и затем отверждаются до твердого состояния. Отверждение может осуществляться посредством нагрева, экспонирования или смешения с отвердителем. После отверждения реактопласты не могут быть расплавлены, под воздействием высоких температур они только утратят структурную целостность. В процессах SLA/DLP и струйной 3D-печати применяются фотополимерные реактопласты, которые отвердевают под воздействием лазера или УФ. Типичные продукты, изготавливаемые их реактопластов, которыми могут быть, например, двухкомпонентные эпоксидные смолы, – это шары для боулинга, а также элементы домашнего хозяйства, подверженные высоким температурам, такие как регуляторы на кухонной плите, розетки и выключатели.

3.2.2. Металл

В отличие от полимеров, которые применяются в различных формах (твердые филаменты, порошки, смолы), металлическая 3D-печать, чаще всего использует порошки. Существует также металлическая печать с прямым подводом энергии и материала. Печать из металла позволяет создавать высококачественные, функциональные и несущие детали из различных металлических порошков. Гранулометрическое распределение, форма и текучесть (совокупность сил, воздействующих на отдельные частицы в процессе перетекания) являются важными свойствами, по которым можно определить, насколько металлический порошок подходит для 3D-печати.

3.2.3. Другие материалы

В некоторых технологиях 3D-печати используются керамика (обычно полимер, наполненный керамическим порошком) или композиты (измельченный угленасыщенный филамент или металло-нейлоновый порошок).

Полимерам, наполненным керамическим порошком, свойственна улучшенная износостойкость, что делает их идеальным материалом для изготовления инструментов. В SLA-печати, например, применяются смолы с керамическим порошком для производства детализированных форм для литья под давлением. Углерод, алюминий, графит и стекло – все это при добавлении в SLS-порошок улучшает соотношения прочности и массы, износостойкости и статического сопротивления. В FFF-печати применяется множество экзотичных филаментов, к примеру PLA-пластик, наполненный деревом или металлом, в результате чего получается уникальный внешний вид детали.

Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию технологий 3D-печати.
2. Назовите материалы, применяемые в 3D-печати.
3. Каковы характеристики полимерных материалов, используемых в 3D-печати?
4. Охарактеризуйте металл и другие материалы для 3D-печати.

ГЛАВА 4. Экструзионные методы 3D-печати

4.1. Экструзия материала – FFF (FDM)

По технологии экструзии материала печать осуществляется при помощи нити цельного термопластичного материала (филамента или полимерной стренги), подаваемой через разогретое сопло и расплавляемой в ходе печати. Принтер укладывает материал на рабочую платформу по запрограммированной траектории, где филамент охлаждается и отвердевает, формируя цельную деталь (рис. 4.1).

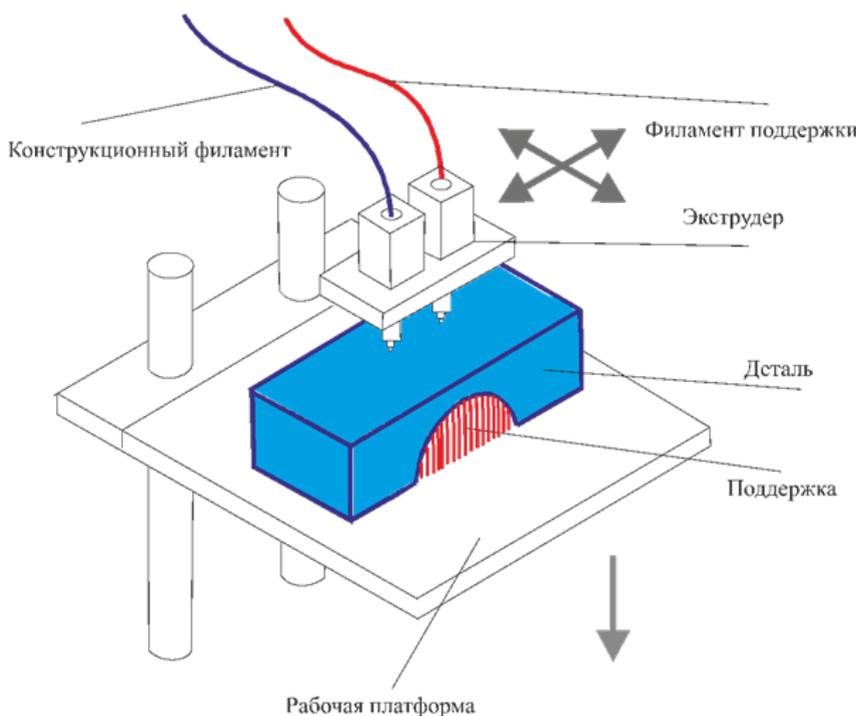


Рис. 4.1. Схематическое представление FFF-принтера

4.1.1. Технологии экструзии филамента. 3D-печать методом послойного наплавления (FFF/FDM)

Самой популярной технологией экструзии материала является производство методом плавления нити, или FFF (чаще упоминаемое как моделирование послойным наплавлением; термин, запатентованный компанией Stratasys) (рис. 4.2).

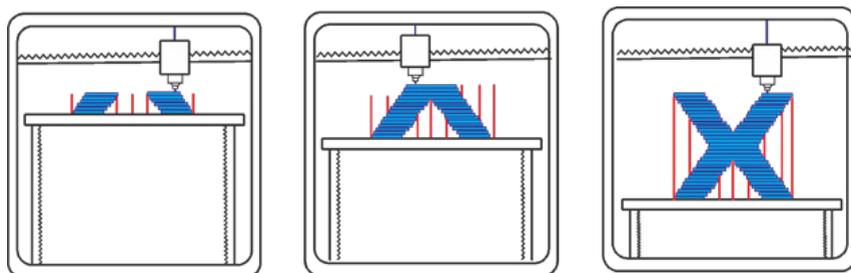


Рис. 4.2. Процесс FFF-печати

Катушка с филаментом заправляется в принтер и протягивается к экструдеру. По достижении нужной степени нагрева сопла электромотор принтера начинает продвигать филамент через разогретое сопло, расплавляя его. Затем принтер перемещает экструдер, укладывая расплавленный материал в выверенные положения, где он охлаждается и затвердевает. Как только слой оказывается завершенным, рабочая платформа смещается ниже, и процесс повторяется, составляя деталь слой за слоем (по сути, это напоминает высокоточный клеевой пистолет).

4.1.2. Конструкция и характеристики принтеров для FDM 3D-печати. Параметры этих принтеров

Многие параметры на большинстве FFF-машин можно настраивать для достижения точности печати. Скорость печати, скорость экструзии и температура сопла определяют консистенцию выходящего материала и регулируются оператором

4.1. ЭКСТРУЗИЯ МАТЕРИАЛА – FFF (FDM)

(некоторые машины применяют автоматические предустановки, основанные на типе используемого материала).

FFF(FDM)-принтеры различной конструкции приведены на рис. 4.3.

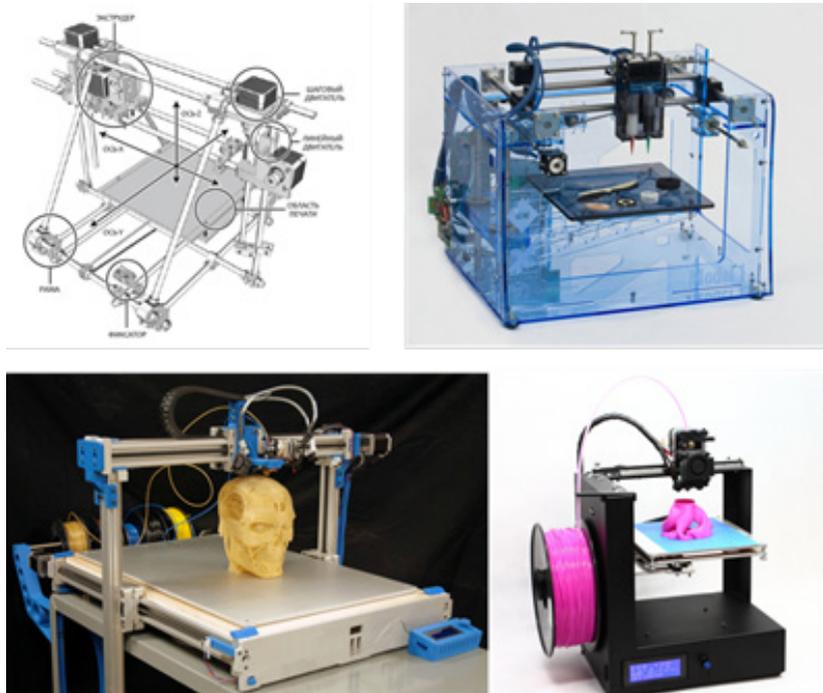


Рис. 4.3. Различные конструкции FDM-принтеров

По большому счету, диаметр сопла и толщина слоя определяют разрешение печатаемой детали. Все параметры настраивают точность размеров детали, но, в частности, меньшие величины диаметра сопла и толщины слоя в основном являются решением для случаев, когда необходима обтекаемая поверхность и высокая детализация.

В целом FDM-принтер представляет собой пространственную раму, внутри которой печатающая головка оставляет

на рабочем столе тонкую нить из расплавленного пластика. Из нитей составляются объемные изделия. Все разнообразие бытовых 3D-принтеров сводится к очень малому количеству вариантов: как движется стол, как движется печатающая головка, как осуществляется подача пластика и какие пластики может использовать.

Рассмотрим основные элементы FDM-принтера.

4.1.2.1. Стол FDM 3D-принтера

Столы бывают подогреваемые и не подогреваемые (как правило, на старых 3D-принтерах); текстолитовые и алюминиевые с нагревателем; со стеклом и без, с адгезионной наклейкой/покрытием и без нее.

Качество печати 3D-принтеров, работающих по технологии FDM, зависит от многих факторов (материала печати, режимов работы нагревательного стола, экструдера, температуры внутри принтера и т.д.).

Кроме вышеперечисленных факторов большое значение имеет печать первого слоя, формируемого на печатном столе. Ведь от того, насколько качественно он напечатан, зависит как адгезия пластика к напечатанному слою, так и качество конечной детали в целом. Поэтому большое значение приобретает автокалибровка печатного стола. Для автоматической калибровки стола у некоторых моделей есть специальные датчики касания (давления):

- механический bltouch/3Dtouch;
- пьезоэлектрический датчик давления;
- мембранный датчик давления;
- оптический датчик;
- индукционный датчик приближения (как в смартфонах).

Все они хороши и удобны, если есть. Каждый тип имеет свою точность. Если нет – не страшно. Калибровка делается достаточно редко и довольно просто.

В качестве покрытия стола часто используют:

- гладкое стекло/зеркало;
- полимерное покрытие для адгезии.

Магнитные съемные столы несовместимы с печатью высокотемпературными пластиками, например, ABS. Не все пластики надежно липнут к покрытию горячего стола. На сегодняшний день наиболее эффективным способом является печать по стеклянной поверхности с применением клея (спиртовые и водные растворы ПВА, ПВП или БФ2).

Адгезия к столу при FFF-печати. Известно, что PLA и PETG хорошо прилипают к чистому стеклу без всяких клеев. Потому в первую очередь на хорошую адгезию влияет правильно откалиброванный стол. Необходимо, чтобы печатаемая нить первого слоя на половину вдавливалась в стол и далее создавала монолитное покрытие с едва заметными бороздками между линиями.

Жидкие адгезивы создают тонкий слой, имеют высокую эффективность и очень экономичны. Защищают стекло от растрескивания. На текущий момент актуальны следующие варианты.

Клей ПВП, иначе он называется «повидон». Создает на столе тонкую пленку, липкую начиная с 50 °С. Остывая ниже 40 °С клей перестает удерживать отпечаток. Варианты: клей-спрей для FDM-печати, клей-карандаш канцелярский, лак и спрей для волос «суперсильная фиксация», водный или спиртовой раствор порошка ПВП (или клей-карандаша) в соотношении 1 к 50. Это недолговечное водорастворимое покрытие. Требуется периодическое обновления.

Клей ПВБ, иначе называемый БФ2. Это многоразовое покрытие, которое также, как и повидон, клеит только при температуре более 50 °С. Клей БФ2 достаточно густой, поэтому для удобства надо приготовить 10–20 % раствор БФ2 на спирту. БФ2 требует однократного нанесения и затем 10-минутной полимеризации на температуре 100 °С. После данной процедуры покрытие может функционировать многократно длительное время. Клей БФ2 спирторастворим.

Клей ПВА, одноразовое покрытие с удовлетворительной силой удержания. Пленка ПВА легко удаляется без использования инструментов. Желательно использовать ПВА с вы-

соким содержанием клеящего вещества. Обычно встречается в строительных магазинах. Водорастворим.

Печать на малярный скотч, из-за шероховатости поверхности малярная липкая лента отлично удерживает пластики. Может использоваться для успешной печати даже нейлоном. Однако это не самый экономичный способ.

Печать по пластиковым покрытиям Anycubic Ultrabase. По заверениям производителя этих покрытий, они сами обеспечивают сильное прилипание. Зачастую требуется шпатель для снятия отпечатков. Но часто покрытия получаются недолговечными.

4.1.2.2. Экструдер принтеров для FFF/FDM печати

Экструдер отвечает за выдавливание пластика в нужном количестве и включает (рис. 4.4):

- **фидер** – подающий механизм, отвечающий за правильное количество выдавленного пластика;
- **печатающая головка**, она расплавляет филамент в нить заданной температуры и толщины.

Экструдер условно делится на **печатающую головку** и систему подачи (**фидер**). Фидер тяжелый, печатающая головка легкая. Экструдер, выполненный единым блоком с фидером, называется **direct**. Обеспечивает прямую подачу, более высокую точность подачи материала, лучшую работу с эластичными филаментами, ниже скорость печати (больше вибраций из-за подвижной массы) (рис. 4.4, 4.5).

Экструдер с отдельным фидером называется **bowden**. Обеспечивает отдельную подачу, при этом ниже точность подачи филаментов, лучше механика (меньше вибраций при той же скорости).

Экструдеры принято делить на две важные составные части: хот-энд (калька с англ. hot end) и колд-энд (cold end). Первое, что делает экструдер, – это доставляет филамент в зону нагрева, чтобы его расплавить. Обычно экструдер состоит из механизма, вращающего подающую шестерню, и упорного колеса, позволяющего нити проходить дальше. В этом случае

4.1. ЭКСТРУЗИЯ МАТЕРИАЛА – FFF (FDM)

он и называется прямым (direct), который мы уже ранее рассматривали (см. рис. 4.4).

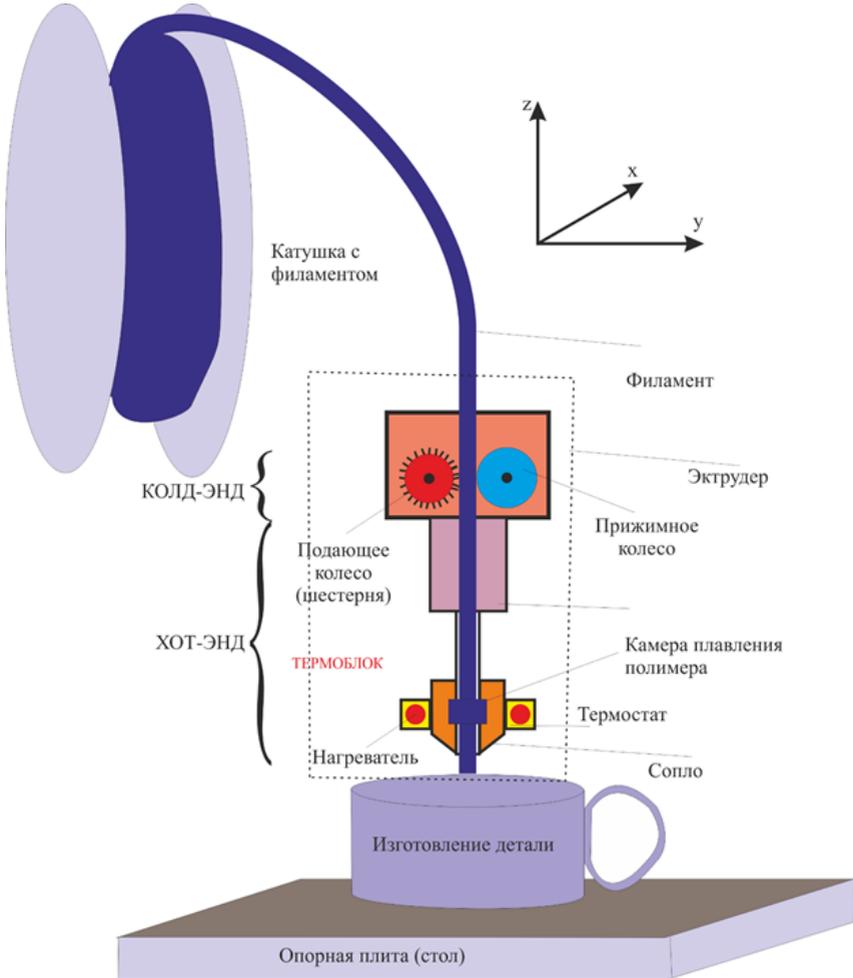


Рис. 4.4. Экструдер FDM-принтера. Показаны фидер, термоблок, включающий нагреватель, термостат и сопло печатающей головки, катушка с филаментом

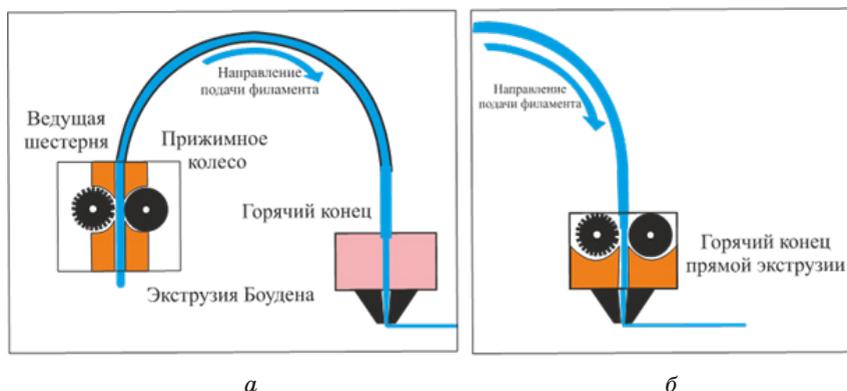


Рис. 4.5. Экструдер FDM-принтера:
а – Боуден-схема; *б* – Direct-схема

Возможен и несколько иной вариант, нежели на изображении, так называемый экструдер Уэйда (Wade's extruder), когда двигатель связан с роликом не напрямую, а через большое колесо. Такой метод позволяет обеспечивать большее давление на пластик, хотя и делает конструкцию колд-энда несколько массивнее.

Основная задача колд-энда – обеспечить стабильную подачу филамента (нити) и избежать его проскальзывания. Для этого подающее колесо делается зубчатым (хотя зубья, конечно же, меньше, чем на картинке).

Подающий механизм экструдера не так требователен к материалам, как хот-энд, так что многие его части можно изготавливать на другом принтере. Даже учитывая, что в этом случае они производятся на таких же FFF-принтерах и обладают ограниченной прочностью, их обычно хватает для длительной работы механизма без нареканий.

Теперь перейдем ко второй части экструдера: так называемому хот-энду, где обеспечивается расплавление нити и выдавливание ее на платформу. Самыми важными частями в его конструкции являются нагревательный элемент, датчик для контроля температуры, ствол экструдера, термобарьер и соп-

ло. Как работает дуэт из первых двух частей достаточно очевидно, а вот на трех последних неплохо было бы остановиться подробнее.

Начнем с термобарьера и ствола. Во время работы принтера температура экструзии часто достигает 200 °С и более. Если она будет распространяться на стренгу выше по стволу, то сможет поплавить пластиковые элементы подающей части. Но это в целом не так страшно, ведь экструдер можно сделать целиком из металла. Другое дело, что филамент станет мягким и проталкивать его дальше будет невозможно, что, по факту, сделает печать неосуществимой. Поэтому в конструкцию хот-энда включают специальную вставку, чтобы обеспечить отсутствие перегрева. Способ, как этого добиваются, хот-энды можно условно следующим образом:

- установка между частями экструдера неплавящейся вставки, в этом случае хот-энд называется традиционным либо по названию материала, например, РЕЕК-хот-энд;

- изготовление всей конструкции только из металла и охлаждение ее вентиляторами и радиаторами, в этом случае хот-энд называется цельнометаллическим.

В первом случае для ствола хот-энда мы решаем использовать жесткий, плохо проводящий материал. Чаще всего им будет являться РЕЕК (полиэфирэфиркетон). Мы с ним в обычной жизни не сталкиваемся, так что и примеров привести не сможем, но если вам это поможет, то из него можно изготавливать подшипники скольжения и много других вещей. Внутри него обычно находится трубка из РТФЕ (политетрафторэтилена), более известная под маркой Тефлон. Кроме выполнения функции термобарьера тефлон обеспечивает еще и скольжение пластика, что очень важно при печати.

Другой вариант – цельнометаллический хот-энд. Здесь нет никаких пластиков, никакого тефлона, только металл. И для того чтобы не расплавить колд-энд, используются вентиляторы и радиаторные системы. Все это приводит к усложнению и удорожанию конструкции, но это необходимо, чтобы обеспечить доступ к большому выбору пластиков. Да, температура,

при которой начинает плавиться традиционный хот-энд, кажется внушительной – 250 °С, но для пластика это не предел. Выбирая неметаллический хот-энд, вы лишаете себя возможности печатать, например, сверхпрочным нейлоном. Также при печати традиционными пластиками вы приобретаете новые проблемы. Тефлоновая трубка гладкая и обеспечивает ровную подачу. А вот металл этому не способствует, поэтому пластик, особенно PLA, иногда застревает. Чтобы избежать этого, хот-энд чистят, полируют и смазывают маслом, но до конца избежать этого эффекта почти невозможно.

Течения в каналах экструзионных головок достаточно полно исследованы. Основные научные работы по изучению изотермического и неизотермического течения расплавов полимеров были опубликованы в конце XX века. В работе [123] авторы рассмотрели неизотермическое течение расплава полимера с Аррениусовской зависимостью вязкости от температуры в цилиндрическом канале экструзионной головки. В работе [124] автор исследовал неизотермическое течение нелинейно вязкой жидкости в конических каналах экструдера. Автором работы [125] изучено неизотермическое течение Бингамовских расплавов полимеров с нелинейной зависимостью реологических параметров от температуры в каналах экструзионных головок. В работе [126] исследованы нелинейные эффекты перепада давления при течении расплавов полимеров в каналах экструзионных головок. Автор работы [127] исследовал неизотермическое течение нелинейно вязких расплавов полимеров в конически-цилиндрических каналах экструдера.

Как мы уже знаем, существует еще одна разновидность экструдеров под названием боуден-экструдеры (см. рис. 4.5). Конструктивное отличие от обычных принтеров заключается в разделении составных частей экструдера и связи их с помощью полой тефлоновой трубки. Пластик проталкивается колд-эндом с помощью трубки в хот-энд, где плавится и выталкивается на платформу. В данном случае это позволяет снять часть лишнего веса с осей и перенести их в недвижимую часть, что позволяет увеличить скорость и точность печати при высокой

скорости, поэтому, несмотря на все недостатки, конструкция остается достаточно популярной.

Но существуют и недостатки. Трубка порождает множество сложностей. Самый основной из них – так называемый гистерезис, или зависимость системы от ее текущего состояния (запаздывание), т.е. при начале печати на определенный отрезок времени подача пластика в хот-энд будет меньше, а после ее конца некоторое время будет продолжаться. Это происходит из-за того, что пластик сжимается в начале «горячей» части механизма, а тефлоновая трубка многократно усиливает этот эффект. Чтобы нивелировать этот процесс, используют датчики давления и тщательную настройку механизма. Кроме того, использование нити больших диаметров также снижает данную проблему, так как они являются менее гибкими и могут преодолеть этот эффект.

Гистерезис порождает еще одну проблему – провисание пластика между частями конструкции. Так происходит, потому что экструдер, закончив печатать одну часть и перемещаясь к другой, не выдавливает пластик. Но из-за эффекта гистерезиса пластик все же выдавливается. Борются с этим ретрактом (**retract**) или затягиванием части филамента обратно. Также использование боуден-экструдера почти лишает вас возможности печатать гибкими материалами. Технически это возможно, но на практике требует предельно низких скоростей и постоянного контроля. Однако большая скорость печати является большим преимуществом, поэтому конструкция заслуживает внимания.

Функция печати несколькими материалами кратно утяжеляет и усложняет экструдер, тем усиливает дефекты при печати, часто значительно уменьшает рабочую область, а иногда значительно увеличивает стоимость. Но разными цветами можно печатать и одним экструдером. Заметим, что при прочих равных боуден предпочтительнее.

Если фидер и печатающая головка разнесены, расход экструдированного пластика определяется менее точно, нить имеет возможность «пружинить» в трубке подачи. Ретракт нужен

более быстрый и длинный, присутствует задержка подачи филамента после ретракта. Зато скорость перемещений сопла без заметных вибраций выше за счет меньшей подвижной массы.

Если фидер и печатающая голова совмещены, узел двигается весь. Точность количества подаваемого пластика выше, вес выше, инерция движения выше, вибраций больше (см. рис. 4.5).

Фидер состоит из следующих элементов (рис. 4.6): приемная трубка; прижимной механизм; подающая шестерня; подающий мотор.

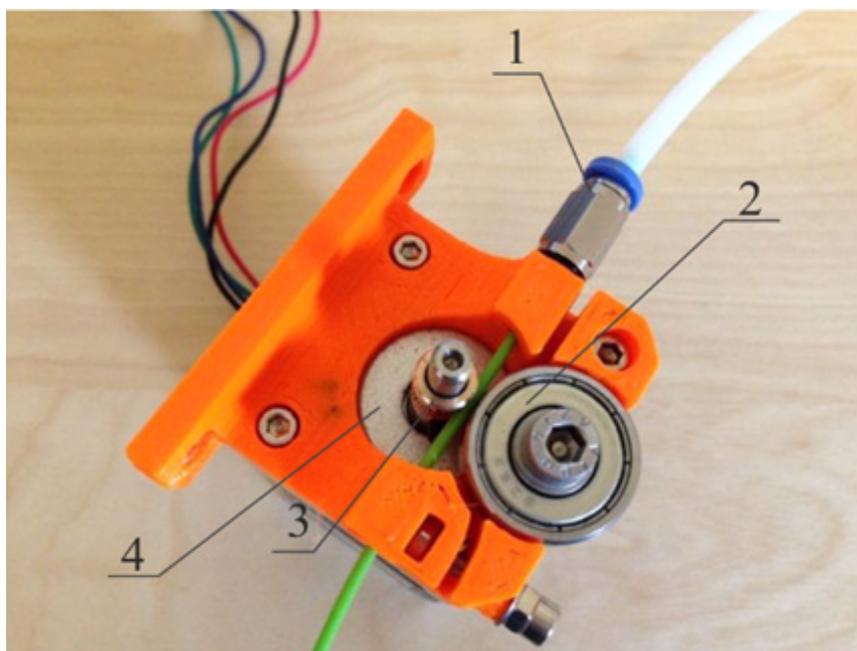


Рис. 4.6. Внешний вид фидера 3D-принтера:
1 – приемная трубка; 2 – прижимной механизм;
3 – подающая шестерня; 4 – подающий мотор

Фидеры бывают с редуктором и без. Безредукторные проще, но подача филамента происходит микропорциями.

На редукторном фидере точность и плавность подачи филамента значительно выше, подача осуществляется надежнее.

Печатающая головка состоит из следующих элементов (рис. 4.7):

- приемная гайка (для боуден-экструдера);
- радиатор охлаждения;
- радиатор;
- термобарьер (горло);
- датчик температуры;
- нагревательный блок;
- сопло.

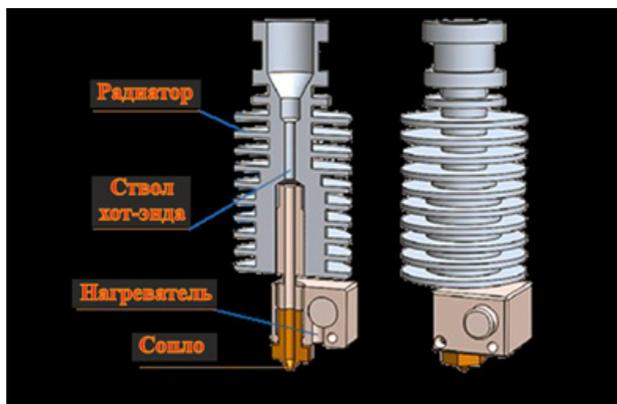


Рис. 4.7. Внешний вид и конструкция печатающей головки 3D-принтера

Часть головки от сопла до горла обычно называется – хот-энд (hot-end), а от горла до радиатора – колд-энд (cold-end).

Сопло – деталь с отверстием, через которое проходит вытекающий пластик. Оно делается съемным и несъемным, причем первый вариант представляется более предпочтительным. Все дело в том, что, несмотря на относительную универсальность сопла размером 0,4 мм, съемный вариант позволяет выполнять задачи, требующие очень маленького или очень большого сопла.

Маленькое сопло – идеальный вариант, если модель имеет маленькие детали, так как будет печатать более аккуратно. Абсолютным плюсом можно назвать и то, что толщина минимально возможного слоя и стенок модели тоже уменьшается вместе с маленьким соплом. С другой стороны, маленькое сопло увеличивает время, необходимое на печать модели, имеет тенденцию забиваться и требует более качественного ухода, нежели большое.

Большие сопла чаще всего используются в случаях, когда скорость важнее качества. Это звучит не так странно, если помнить, что отдельные модели могут печататься больше суток и при этом что-то еще может пойти не так. Крайним случаем большого диаметра сопла являются volcano hotend с увеличенной зоной расплава для обеспечения скоростной печати. Такие хот-энды обладают возможностью установить сопла больше 1 мм.

Самыми распространенными размерами для 3D-принтера можно назвать диаметры от 0,3 до 0,5 мм. Хотя никто не мешает вам сделать сопло самому или найти другие варианты. Только не забывайте правильно настраивать оборудование!

Не менее важно для конечного результата и разрешение печати, а именно толщина отдельного слоя (мы же помним, что модели печатаются послойно). Этот параметр определяется на этапе слайсинга модели и традиционно измеряется в микронах (в тысячных долях миллиметра). Современные принтеры способны печатать вплоть до толщины в 50 микрон (0,05 миллиметра!) и даже меньше, однако стандартным минимальным разрешением остается 100 микрон. Важно также отметить, что размер сопла и разрешение печати – взаимосвязанные параметры, логично, что будет почти невозможно напечатать огромным соплом тонкий слой.

Сопло обычно изготавливают из латуни (рис. 4.8). Сейчас это самые распространенные сопла. Одна из основных функций сопла – это установка расхода филамента, поэтому их делают с разными диаметрами отверстий для разной толщины выдавливаемой нити пластика. Латунные сопла имеют зна-

чительный недостаток – они страдают от абразивов, несколько сотен грамм металл-наполненного филамента значительно увеличивают диаметр их выходного отверстия.



Рис. 4.8. Сопла различной конструкции для FDM принтеров

Изготавливают сопла также и из других конструкционных материалов. Например, из закаленной стали или из титановых сплавов. Эти сопла обычно чуть холоднее, чем температура термоблока, зато устойчивее к абразивам. Латунные сопла с рубиновыми или сапфировыми отверстиями наиболее долговечны в эксплуатации (рис. 4.9). Рубин (он же красный корунд) – второе после алмаза вещество по шкале твердости, потому от абразивов рубин страдает меньше иных материалов.

Бывают сопла-смесители (рис. 4.10), бывают с датчиками температуры внутри – это дорогие и не самые востребованные пока аксессуары.



Рис. 4.9. Корундовое сопло с для 3D-принтера

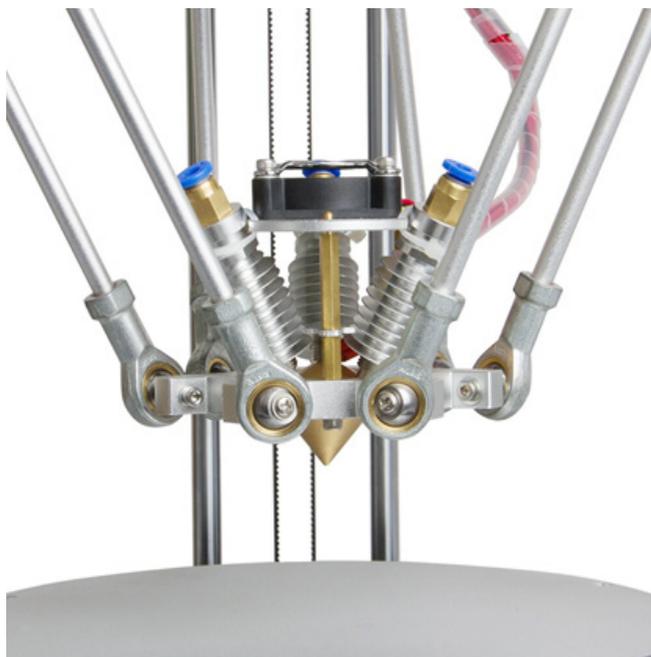


Рис. 4.10. Пример сопла смесителя для 3D принтера

Также нужно уделить внимание допустимому объему детали, изготавливаемой с помощью FFF-печати.

Термоблок – алюминиевый, латунный или медный блок, передающий тепло от нагревателя к соплу и пластику. В него крепятся картридж нагревателя и датчик температуры (см. рис. 4.4).

Термобарьер (горло) служит для разграничения горячей и холодной зон. Предотвращает появление пластиковых пробок в канале подачи пластика. Термобарьер бывает цельнометаллический – стальной для ABS – подобных пластиков и из титанового сплава универсальный. С тефлоновой трубкой внутри – универсальный. Со сквозным отверстием 4,1 мм – для прямого соединения с трубкой подачи bowden – универсальный. Также различают горла для филаментов диаметрами 1,75 мм и 3 мм.

Производительность хот-энда – важная характеристика принтера, напрямую зависящая от мощности нагревательного картриджа, а также от площади контакта термоблока с соплом.

Для больших объемов экструдированного пластика существует экструдер Volcano с большим термоблоком и длинными соплами. Он незаменим при печати толстыми слоями, через сопло с большим диаметром. Экструдер E3D V6 с горлом под трубку – самый беспроблемный экструдер для бытового применения.

Пробка в сопле. Это неполадка, мимо которой вы не пройдете, появляется достаточно часто – в сопле накапливается мусор/пыль и забивает сопло. Бывает сопло забивается полностью, бывает лишь частично, что вредит равномерной подаче пластика и создает недоэкструзию и кляксы, портит качество печати. Происходят засоры с завидной регулярностью. Хорошо помогает в борьбе с пылью небольшой тканевый фильтр на филамент перед экструдером.

Пробка в печатающей головке FDM-принтера проявляется как недоэкструзия, прищелкивание фидера, пропуски слоев, выгрызание подающей шестерней пластика из филамента.

Вариант 1 – объемная пробка (термобарьер/радиатор не справился с производительностью нагревательного блока, пластик расплылся в колд-энде и там застыл). Необхо-

димо прогреть хот-энд выше рабочей температуры и выдернуть пробку. Если не помогло, снимать хот-энд и чистить колд-энд.

Вариант 2 – пробка между соплом и горлом. Это некорректно собранный хот-энд, между горлом и соплом присутствует ненужных зазор. Необходима пересборка.

Вариант 3 – посторонние тела в сопле. Это может быть пыль, шерсть домашних животных, инородные вкрапления в филаменте. Требуется снятия сопла и чистки.

Разбирать хот-энд надо на горячую. Необходимо зафиксировать термоблок гаечным ключом и затем открутить сопло. Теперь можно выключить нагрев и вытолкнуть пробку, откусить ее и вытащить филамент из экструдера. Сопло можно прокалить в пламени газовой горелки (получается чище) или стеариновой свечи (выходит грязнее), а затем почистить спиртом, ватой, тонкой проволокой и зубочисткой. Собирать хот-энд можно холодным, но окончательно притянуть сопло к горлу надо горячим.

Если вы снимали термоблок с горла, то сначала необходимо вкрутить горло, а затем прижимать к горячему горлу сопло. Это поможет избежать появления пробки по варианту 2.

Известна также техника «атомик пул» по холодной очистке засора в сопле. Засоренное сопло прогревается до 60–130 °С, после этого филамент освобождается от прижима подающей шестерни (для директ-экструдеров). И затем филамент плоскогубцами выдергивается из сопла вместе с засором.

4.1.2.3. Платформа FFF-принтера

Итак, нить успела пройти в экструдер и расплавиться. Место, куда она выдавливается, называется **рабочей платформой**, ранее мы кратко уже упоминали этот элемент принтера, называя его столом, при рассмотрении конструкции принтера в целом. Используются оба названия. При том, что рабочая платформа не является настолько же высокотехнологичным элементом принтера, как экструдер, все равно она требует пристального внимания.

Какой платформа должна быть? Она должна быть ровной и параллельной координатной плоскости, в которой располагаются горизонтальные оси движения принтера. Если экструдер будет цеплять платформу или лить пластик на расстоянии 5–10 см от нее, образуя великолепный узор из нитей, то проку от такой печати будет мало.

Решается этот вопрос с помощью калибровки платформы. Часто платформы хорошо калибруются уже на заводе, но если вы много печатаете либо создаете свой принтер по чертежам RepRap, то вам придется делать это самому. Обычно это происходит так: экструдер, выполняя команды программы, прижимается в разных точках платформы (обычно по углам), а вы корректируете расстояние платформы до него, вручную приподнимая ее. Необходимое расстояние от платформы до экструдера может замеряться как с помощью листов бумаги (примерно 100 микрон), так и специальными инструментами от производителя.

Вроде бы проще, чем платформа, ничего быть не может. Действительно, в самом простом исполнении это просто кусок стекла или алюминия. А вот при добавлении самой возможности калибровки используется система, похожая на бутерброд, нижняя часть используется в качестве крепления элементов для перемещения рабочей платформы, верхняя – рабочего столика, т.е. места, куда будет попадать пластик.

Платформы сейчас чаще всего делают подогреваемыми. Это делается с помощью специальной пластины, находящейся прямо под рабочим столиком, которая, нагреваясь сама, нагревает и столик.

С некоторыми пластиками можно без особых проблем работать и без подогреваемой платформы, но ABS, а также целый ряд других материалов обладает двумя неприятными особенностями: высокой температурой экструзии и высоким процентом усадки, что приводит к двум следствиям: быстрому остыванию модели и ее деформации. Если первое следствие весьма очевидно, то второе нуждается в пояснении. Деформация происходит, если слои остывают неравномерно, ведь тогда они не-

равномерно и усаживаются. То есть нашей целью становится обеспечение равномерного остывания, и начать стоит с самого низа – рабочей платформы, для этого и требуется ее подогрев. А еще столик иногда делается съёмным для удобства снятия модели.

Столик не является очень уж высокотехнологичной частью принтера, но интересен в другом аспекте, а именно: в каком материале выполнен. Технически для этой роли может использоваться что угодно, хоть кусок хлеба, хоть лист бумаги, но некоторые материалы считаются более подходящими, например, **стекло**.

Стекло, кажется, идеально подходит для платформы. И самым главным его достоинством можно назвать то, что оно... бьется! Это не так странно, как звучит, если переформулировать: стекло невозможно погнуть, а любые его повреждения будут сразу заметны. При печати слоем в 50–100 микрон даже самое небольшое искажение может свести на нет попытку создать качественную модель. В случае со стеклом такое искажение нельзя будет не заметить.

Другим плюсом можно назвать доступность. Купить стекло, а потом вырезать кусок нужных размеров несложно. Если же вы не сможете сделать это самостоятельно, вам вырежут в стекольной мастерской, это недорого.

Наконец, платформа из стекла не деформируется при нагревании, в отличие, например, от металлов. Это также означает, что в процессе печати ваш столик остается идеально ровным. Стекла для платформы должны быть достаточно большой толщины (от 3 мм), но излишняя толщина не нужна. Если ваша платформа подогревается, при толстом стекле нельзя сделать это равномерно. Да и излишнее увеличение веса принтера из-за тяжелого стекла нам ни к чему.

Печатать на простом стекле не так удобно, так как оно не любит температуры выше 100 °С. Кроме того, обычное стекло имеет свойство трескаться при смене температур, а это значит, что и остывание должно быть равномерным. Можно печатать на защитном стекле, из которого делаются, напри-

мер, градусники (оно выдерживает температуры до 200 °С). Третий вариант – боросиликатное стекло, которое используется, например, в каминах, почему бы не взять его в качестве рабочей платформы?

Существует еще множество видов стекол, часть из которых подходит и нам, однако большинство печатников использует самые обыкновенные, которые обеспечивают достаточное качество и легкодоступны, а из-за небольшой цены их не жалко выкинуть при наличии повреждений.

Следующими по распространенности материалами для платформы являются **металлы**. Из металлов самым популярным материалом является алюминий. Дешевый и легкий, он хорошо подходит почти для любых конструкций. Неплохими вариантами могут также считаться сталь и медь, но они все же не так популярны.

Металл прочнее, чем стекло, он не разобьется и не треснет от нагрева, у него есть большой минус – он гнется. Возможно, вам покажется, что это несущественно (ну кто в здравом уме будет пытаться его погнуть?), но не все так просто.

Металл может гнуться прямо во время печати, так как при нагреве расширяется. Для того чтобы избежать этого, часто используются толстые листы, которые ограничивают этот процесс. В целом же проблемы неравномерности платформы при хорошей калибровке обычно не часто всплывают, а учитывая, что лист алюминия прогревается лучше и равномернее стекла, металлы не такой плохой выбор, как может показаться.

В качестве стола часто используется **акрил**. Оргстекло тоже является достаточно распространенным материалом, в основном из-за цены. Другим плюсом оргстекла является удобство обработки: в отличие от стекла, которое необходимо резать специальными устройствами, оргстекло в кустарных условиях можно обрезать даже самой обыкновенной пилой. Наконец, оно обеспечивает хорошую адгезию пластика.

Из минусов можно выделить легкость повреждения акриловых рабочих столиков: в отличие от обычного стекла органический вариант легко царапается. Несколько царапин

не сильно отразятся на качестве печати, но если панель серьезно повреждена, то ее, скорее всего, придется заменить.

Кроме того, как и металлы, акрил расширяется при нагреве. Нивелируется эффект точно так же – увеличением толщины листа. Но и здесь надо знать меру. Даже учитывая то, что акрил сравнительно легкий материал, излишняя толщина не даст ему прогреться равномерно, и, как следствие, не позволит обеспечить качественную печать.

Бывают платформы и из других пластиков. Пластмассы не получили такого широкого распространения, как другие материалы, но тоже могут успешно применяться в качестве рабочей платформы. Такими материалами могут являться, например, поликарбонат или полиэфиримид.

Пластики обладают самыми разнообразными свойствами, поэтому дают самые разнообразные результаты. К сожалению, пластмассы не являются в достаточной мере часто используемыми материалами в самодельных принтерах, а производители, использующие подобные материалы, обычно не распространяются о том, что именно они используют.

Но не стоит отчаиваться, три указанных выше материала с лихвой покроют большинство ваших фантазий, и пластики вам, скорее всего, не понадобятся.

Иногда платформу делают **перфорированной** (рис. 4.11), с множеством отверстий по всей плоскости. Первый слой пластика попадает в них, что обеспечивает надежную фиксацию модели на рабочей поверхности. Это и является несомненным плюсом данного метода. К сожалению, он имеет и существенный минус. Первый слой модели приходится печатать с рафтом (рис. 4.12), чтобы именно он (слой) попадал в отверстия, а модель потом можно было легко отделить. Конечно, это не является обязательным, но позволяет сохранить хорошее качество в большинстве случаев, в отличие от печати без рафта.

Перфорированные платформы сложнее в чистке и уходе: они требуют вымачивания в ацетоне или других растворителях каждый раз после печати. Это рождает серьезное требование к функционалу принтера: платформа должна легко

4.1. ЭКСТРУЗИЯ МАТЕРИАЛА – FFF (FDM)

сниматься, а потом так же легко ставиться обратно. Стоит ли говорить, что на большинстве принтеров такая процедура потребует дополнительной калибровки? Словом, применение перфорированных платформ является достаточно спорным моментом и, скорее, делом вкуса, так как упрощает и одновременно усложняет печать.

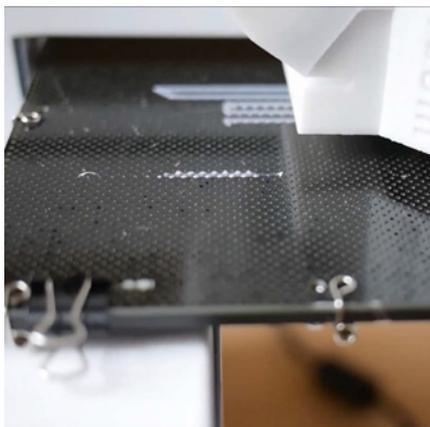


Рис. 4.11. Перфорированная платформа

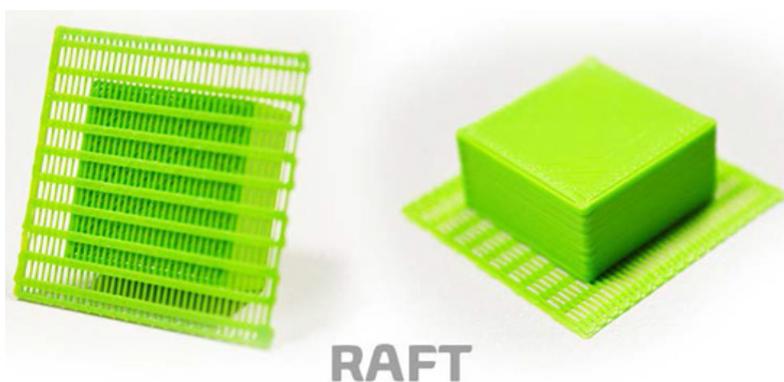


Рис. 4.12. Рафт – подложка, которая генерируется слайсером под печатаемой моделью

Для качественной печати платформа должна обладать свойством адгезии к пластику филамента. **Адгезия** – прилипание пластика к платформе. Все дело в том, что далеко не всегда пластик прилипает, а если прилипает, то может и отлипнуть впоследствии. Если это происходит, то модель смещается, нарушается процесс печати, и вы получаете горстку лапши из пластика вместо того, что хотели получить. Чтобы добиться этого эффекта прилипания, было придумано невероятное количество любительских и специальных средств. Прилипание обеспечивается одним из следующих способов или несколькими сразу:

- подогреваемая платформа;
- обычный клей PVA;
- синяя малярная лента;
- капроновая лента;
- пиво;
- лак для волос;
- специальный лак для принтеров;
- сахарный сироп;
- специальная адгезивная пленка;
- раствор пластика.

4.1.2.4. Кинематическая система принтера FFF/FDM-технологии

При экструзии филамента через нагретое сопло филамент выдавливается на стол принтера. Если бы фидер принтера был неподвижен относительно стола, то филамент бы застывал, образуя на столе принтера некоторое подобие полимерной свечи. Но принтер устроен так, что фидер движется относительно стола по заданной траектории, образуя наплавлением полимера необходимую деталь. Движение и позиционирование обеспечивает кинематическая система принтера.

Сейчас существуют два основных метода позиционирования экструдера: это так называемое перемещение в декартовых координатах (см. рис. 4.3) и метод, которым пользуются дельта-принтеры (рис. 4.13).

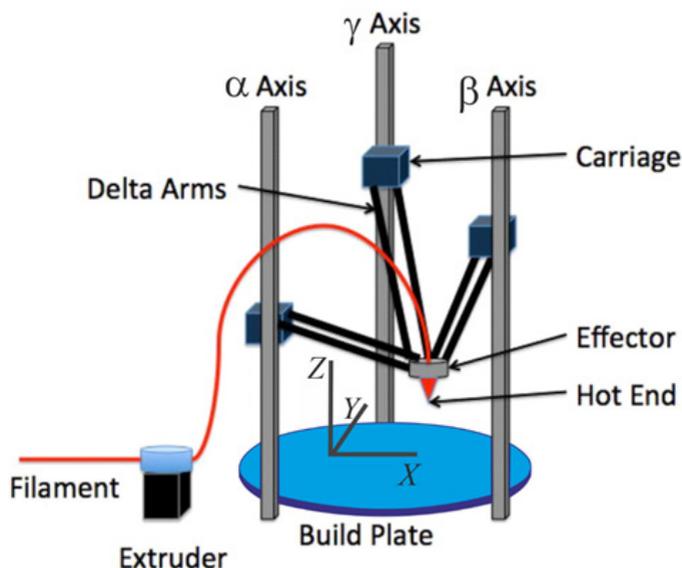


Рис. 4.13. Система координатных осей дельта-принтера. За точку начала координат принимается центр поверхности рабочего стола. Башни принято называть альфа, бета и гамма

Декартовы координаты известны большинству по школьному курсу геометрии. Построение трехмерных фигур происходит с использованием трех осей: X и Y , отвечающих за длину и ширину фигуры, и Z , отвечающей за высоту.

Когда мы говорим о принтере с декартовой системой координат, мы имеем в виду, что каждая из его частей движется по одной или нескольким из осей. Но так как в данной конструкции движимых частей может быть всего две: платформа и экструдер, то и количество вариантов ограничено. Итак, что мы можем придумать:

1) платформа движется по одной из осей, экструдер движется по другой и в высоту;

2) платформа движется только в высоту; экструдер движется по двум осям;

- 3) экструдер движется по одной из осей, платформа – по другой и в высоту;
- 4) платформа фиксирована, движется только экструдер;
- 5) платформа движется в плоскости, экструдер в высоту.

Последние два варианта можно смело отбросить как достаточно экзотические и сконцентрироваться на первых трех, которые можно встретить в огромном количестве коммерческих и самодельных принтеров.

Конструкция Y-bed; XZ-head. Движение платформы по одной из осей. Такой дизайн принтеров является одним из самых популярных (наравне с XY-head) вследствие следующих положительных сторон:

- конструкция получается достаточно простой;
- принтер можно сделать компактным (при условии открытого корпуса). Но говоря об этом, стоит помнить, что компактность эта чисто визуальная: вам все же потребуется платформа в 2 раза больше, чем максимальный размер модели;
- можно легко удешевить конструкцию.

При этом нужно понимать, что такая конструкция приобрела популярность в первую очередь из-за удачного дизайна принтера RepRap Mendel, Prusa Mendel и последующей его модификации Original Prusa i3 MK3S. В целом же такой принтер имеет целый ряд ограничений.

Конструкция в изначальном варианте не предназначена для печати высокотемпературными пластиками. Мы помним, что ABS-пластик, например, требует равномерного остывания. Конструкция же не предполагает наличия закрытого корпуса, не говоря уже о прогревании модели для равномерного остывания. Вопрос может быть частично решен с помощью «аквариума» из акрила, стекла или пластика, накладываемого поверх принтера, либо корпуса, что нивелирует, пускай и визуальную, компактность.

Другая важная проблема – движение платформы. При больших скоростях и большом размере самой модели ее может срывать с платформы. Речь, конечно, не идет, например,

о перфорированных платформах или идеальной адгезии, но проблема имеется, причем она становится более существенной с ростом размера самой модели. В любом случае данная конструкция накладывает определенные ограничения на скорость печати и размер модели. В целом же конструкция, не лишенная недостатков, остается достаточно популярной.

Конструкция YZ-bed; X-head. Движение экструдера только по одной из осей. Такая конструкция сложнее предыдущей и не так хорошо представлена на рынке. Она получает все преимущества и недостатки предыдущей, плюс, конечно же, приятную эстетичность принтера. Самыми видными представителями данной категории являются принтеры «UP!», но не стоит забывать и про таких игроков, как 3D Systems.

Конструкция Z-bed; XY-head. По аналогии можно понять, что это значит движение платформы только в высоту. При печати движется только экструдер, а платформа остается неподвижной. Неподвижна и деталь, так что у вас будет меньше проблем с адгезией к платформе, а также серьезных ограничений по скорости печати и размеру детали.

Наконец, такие принтеры действительно удобно делать закрытыми с максимальным использованием пространства, и именно такими вариантами они в основном представлены.

Но не все так просто, и нам придется рассмотреть эту конструкцию подробнее. Все дело в том, что она имеет варианты исполнения, которых несметное множество, но если вы решите купить или создать принтер, то, скорее всего, столкнетесь с одним из следующих четырех.

Первый вариант – с двигателями на осях. Один или два двигателя находятся на оси и двигают каретку экструдера, прокручивая ремни. Сами же оси двигаются благодаря статичным двигателям у основания.

Вариант можно смело назвать несколько устаревшим и уступающим другим. Из минусов можно отметить необходимость двигать вместе с кареткой тяжелые двигатели, что приводит к замедлению скорости печати. Самым ярким представителем считался MakerBot Replicator (а также бесчислен-

ные его клоны) вплоть до пятого поколения, когда перешел на H-bot. Тем не менее такая механика активно (и с хорошими результатами) используется и сейчас.

Второй вариант часто называется по имени принтера Ultimaker (Ultimaker style gantry). Это одна из трех «серьезных» версий. Более того, Ultimaker не просто так считается одним из самых быстрых принтеров – не без помощи кинематики.

В данной конструкции статичные двигатели прокручивают ремни, проталкивающие каретки по валам. Каретки, в свою очередь, перемещают экструдер. Такая конструкция значительно дороже и сложнее в реализации, но в данном случае двигатели сняты с осей, что позволяет ощутимо увеличить скорость печати и повысить качество при ее увеличении. Тем не менее данную конструкцию можно признать достаточно сложной: она включает множество ремней и имеет особые требования к качеству валов. А мы знаем, что, чем сложнее конструкция, тем больше может сломаться.

Третий вариант называется Hbot. Он основан на двух двигателях, вынесенных на корпус принтера, соответственно, не влияющих на скорость печати (рис. 4.14).

Необходимо обратить внимание на схему. Внизу расположены два двигателя. Если они двигаются в одну сторону, то каретка перемещается по оси X , если они двигаются в разные стороны, то она перемещается по оси Y . Если же один из двигателей остается фиксированным, то каретка движется по диагонали. Эта система достаточно сложна для понимания, но если понять ее принцип, то все становится достаточно очевидным. Так или иначе схожую механику используют множество коммерческих принтеров, например, Makerbot (с пятого поколения) или Stratasys Mojo.

У H-bot'а есть свои «профессиональные болезни». Все дело в том, что силы в конструкции при движении по оси X противонаправлены, и если конструкция хлипкая, то она уже не может давать необходимой точности. Поэтому для него используются прочные рельсовые направляющие вместо валов.

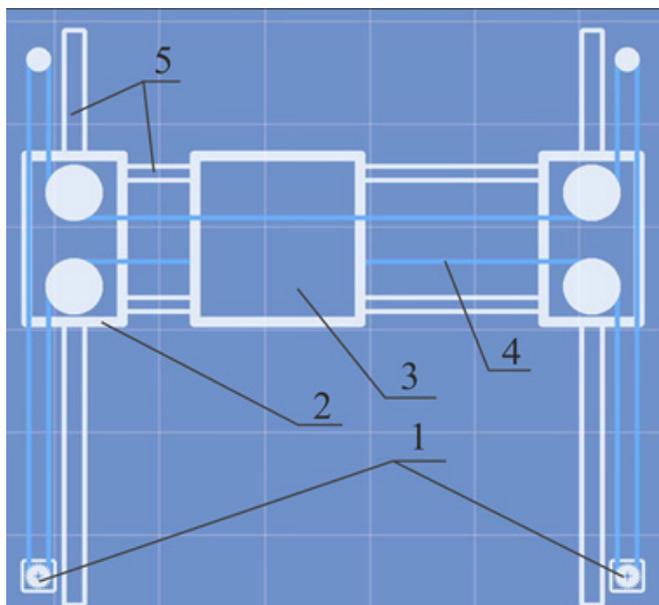


Рис. 4.14. Схема расположения каретки, двигателей и приводящих ремней в 3D-принтерах Hbot:
 1 – двигатели, приводящие в движение ремни; 2 – каретки, передвигающиеся по вертикальным направляющим;
 3 – каретка с соплом принтера; 4 – ремни, приводящие в движение каретки; 5 – направляющие для движения кареток

Четвертый вариант называется CoreXY и является усовершенствованной версией первого (рис. 4.15). Здесь используются два ремня, а силы более сбалансированы и не гнут раму. Взамен мы получаем более сложную конструкцию и два ремня вместо одного. CoreXY распространена даже меньше, чем H-Bot, из коммерческих моделей можно отметить, например, AirWolf Axiom, которые вообще отдельно подчеркивают кинематику своего принтера. Зато можно обнаружить множество свободных дизайнов на вики RepRap. На картинке кажется, что ремни пересекаются, в трехмерном пространстве такого не происходит.

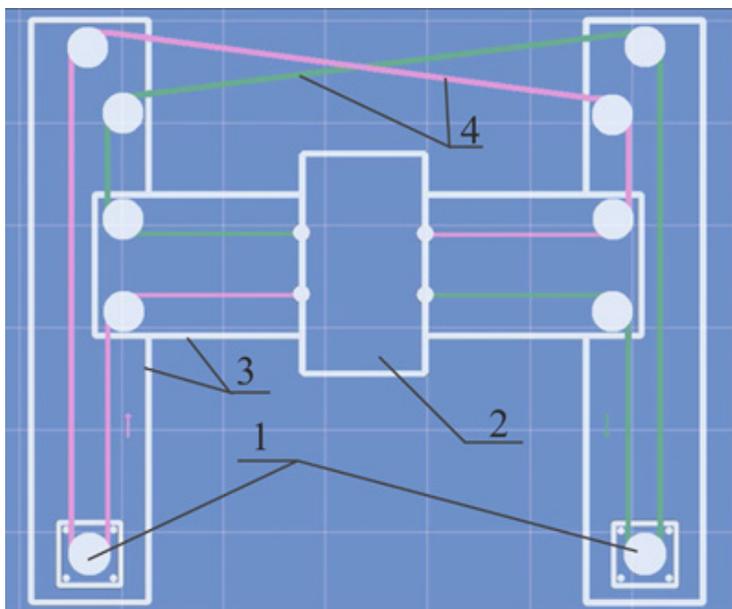


Рис. 4.15. Схема расположения каретки, двигателей и приводящих ремней в 3D-принтерах CoreXY:
 1 – двигатели, приводящие в движение ремни; 2 – каретка с соплом принтера; 3 – каретки, передвигающиеся по вертикальным направляющим; 4 – ремни, приводящие в движение каретки

Необходимо отметить, что не стоит выбирать принтер только по кинематике. Скажем, есть прекрасные YZ-bed машины, великолепно справляющиеся со своими задачами, хотя их кинематику и можно назвать несколько ограниченной. Если же мы говорим о Z-bed машинах, то существует множество (и их большинство) хороших принтеров с двигателем на оси X. Выходит так, потому что, когда мы говорим о качестве печати, то мы имеем в виду в первую очередь качественную сборку и хорошее качество отдельных компонентов. Все это имеет большее значение, нежели выбранная система.

4.1.2.5. Дельта-принтеры для 3D-печати

Дельта-принтеры, пожалуй, наиболее востребованы в сообществе, которое связано с 3D-печатью. Дельта-принтеры круто и эффектно выглядят, а также хорошо себя показывают при печати, являясь второй по распространенности системой (рис. 4.16).



a

б

Рис. 4.16. Внешний вид дельта-принтера:
a – отчетливо видны башни, рычаги, печатающая головка и стол; *б* – дельта-принтер с соплом – смесителем трех стренг филамента

Конструкция дельта-принтеров взята с дельта-роботов, которые очень хорошо себя показали в областях, где нужна высокая точность и скорость, например, в упаковочной промышленности. Для создания 3D-модели данный принтер использует рычаги, закрепленные на каретках. Каретки свободно перемещаются по осям вокруг круглой платформы, изменяя положение экструдера, закрепленного на рычагах. Выглядит дельта-принтер примерно так, как показано на рис. 4.16.

Также 3D-принтеры типа дельта имеют еще множество достоинств. Они тихие, быстрые и легко строят высокие объекты. Им очень подходит боуден-экструдер, так как в данном случае облегчение конструкции существенно влияет на скорость (при наличии кулеров для своевременного охлаждения модели).

Имеют они и свои недостатки. Во-первых, они сложнее в построении и настройке, есть множество нюансов, например, необходимость идеальной параллельности направляющих и повышенные требования к материалам корпуса. Математическая модель для печати существенно сложнее, да и само направление не так хорошо разработано, как в случае с традиционными «декартовыми» принтерами, так что никогда не знаешь, где может закрасться ошибка. Если модель оснащена боуденом, то она автоматически приобретает и все его недостатки, такие как, например, невозможность печати гибкими материалами.

Обычно все довольны работой дельта-принтеров, особенно если речь идет об уже показавшей себя модели. Но самостоятельное создание дизайна такого принтера может быть проблематичным.

4.1.2.6. Корпуса и рамы FFF/FDM 3D-принтеров

Конструкция корпуса еще проще, чем платформы, поэтому и описывать его можно таким же образом. Корпусы различаются по материалу изготовления и типу.

К корпусу 3D-принтера есть несколько существенных требований. Самое основное из них – устойчивость: если при пе-

чати принтер будет покачиваться из стороны в сторону, то и качестве невозможно обеспечить. Вторым требованием можно назвать прочность. Третьим будет цена. Материала на корпус всегда будет уходить достаточно много, и его цена всегда будет существенно влиять на конечную цену продукта. Итак, исходя из выбранных требований, можно отметить несколько материалов, ставших классическими:

- дерево. Как отмечают производители Ulitmaker, дерево обладает хорошими характеристиками для своей цены (рис. 4.17). Оно достаточно прочное, хорошо убирает вибрации и, самое главное, дешевое;

- металл, как правило, выбирается в ситуациях, когда прочность важнее цены. Металл тяжелее дерева и делает принтер устойчивым. К сожалению, он значительно увеличивает себестоимость принтера;

- пластмассы мы привыкли ассоциировать с чем-то ненадежным, но это далеко не всегда так. Некоторые виды пластмасс показывают хорошие характеристики при сравнительно небольшом весе (а этот параметр тоже очень важен в сфере настольных принтеров). Таким является, например, полиамид.

Необходимо отметить, что важен не только материал, из которого изготавливают корпус принтера, но и его качество, качество сборки и толщина корпуса. Понятно, что лист алюминия толщиной 0,5 мм будет служить меньше и даст худшие результаты, нежели лист дерева 6 мм. Если речь идет не о профессиональных принтерах с термокамерой, материал не имеет большого значения.

Корпус может быть открытого или закрытого типа. Это напрямую зависит от кинематики: X-head или ZX-head идеальны для открытых корпусов, хотя и существуют исключения. Принтеры XY-head обычно поставляются с закрытым корпусом.

Закрытый корпус нужен, когда используется капризный ABS-пластик, который плавится при высоких температурах, а остывать должен медленно и равномерно. Печатать им в открытом корпусе возможно, но любой поток воздуха мо-

жет запросто изменить геометрию модели. PLA тоже не любит сквозняки, но менее требователен к температурному режиму. Существенным минусом закрытого корпуса можно назвать сложность доступа к деталям для их замены и к платформе для снятия модели (хотя существуют принтеры со съемными платформами).

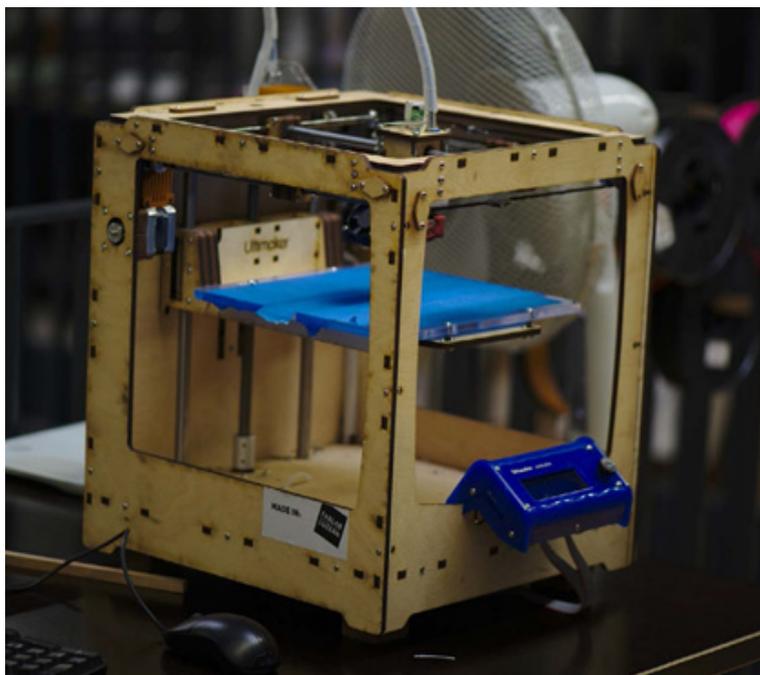


Рис. 4.17. Корпус принтера Ultimaker, сделанный из дерева

Следующим улучшением является термокамера (рис. 4.18), которую не встретишь у домашних непрофессиональных принтеров.

Подогрев воздуха во время печати – это то, что не могут позволить себе большинство производителей, и то, что редко делается в самодельных принтерах RepRap (хотя кое-что и существует).

4.1. ЭКСТРУЗИЯ МАТЕРИАЛА – FFF (FDM)



Рис. 4.18. Принтеры с термокамерами

Наличие термокамеры существенно повышает качество печати, не позволяя пластику усаживаться, пока процесс не закончен, и таким образом значительная часть деформаций устраняется. Другая важная причина использовать принтеры с закрытой термокамерой – это лучшая адгезия между слоя-

ми, отсюда лучший внешний вид и лучшие физико-технические свойства отпечатанных моделей.

Термокамера защищена патентами, но если даже не принимать это во внимание, то может возникнуть целый ряд проблем.

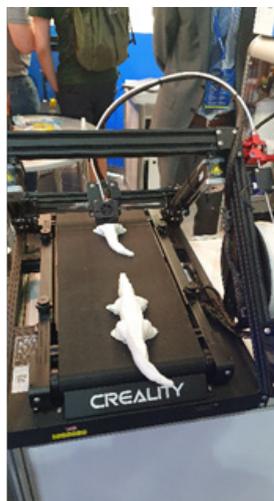
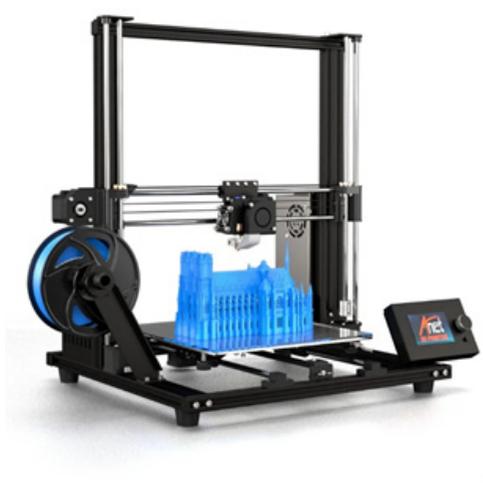


Рис. 4.19. Настольные 3D-принтеры

Во-первых, для печати тем же ABS-пластиком требуется нагрев камеры до 70–90 °С или даже выше. Если в камере в этот момент будет находиться электроника, которая и так часто перегревается, то это серьезно скажется на времени ее жизни. Скорее всего, она выйдет из строя через 12–13 часов. Соответственно первым и самым важным, что вам потребуется для создания термокамеры, будет изоляция элементов, имеющих тенденцию к перегреванию.

Второй проблемой является поддержание стабильно высокой и равномерной температуры. Даже 70 °С достаточно высокая температура, что уж говорить об использовании действительно высокотемпературных пластиков. Так как температура снаружи явно не дотягивает до подобных значений,

нам потребуется изолировать камеру от внешнего мира. Причем чем лучше изоляция, тем меньшей мощности нагреватели можно использовать и тем больших температур достигать. Равномерность обеспечивается с помощью контроля циркуляции воздуха внутри камеры, что тоже требует серьезных расчетов и обеспечивается с помощью вентиляторов.

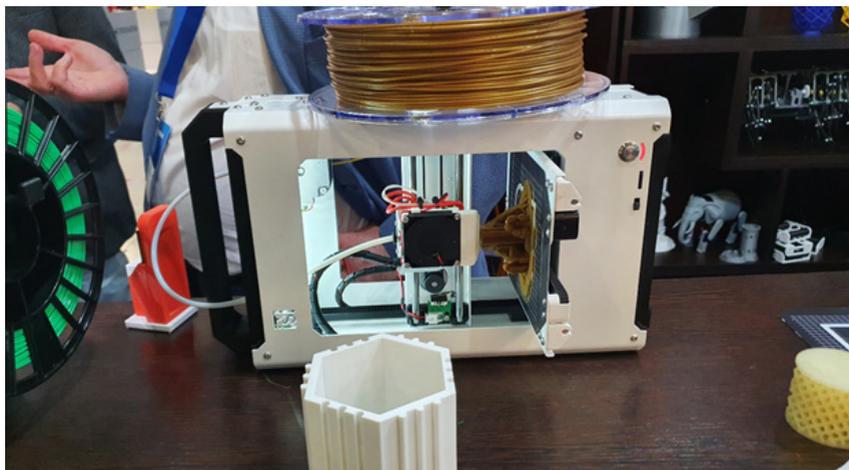


Рис. 4.20. Настольный мини 3D-принтер

Средний настольный принтер обычно может предложить область печати размером не более $200 \times 200 \times 200$ мм (рис. 4.19, 4.20). Более крупные промышленные машины располагают областью печати в пределах $1000 \times 1000 \times 1000$ мм. Для очень больших деталей, пожалуй, лучшим решением будет разделить проект на составляющие компоненты, которые после печати могут быть собраны.

4.2. Аддитивное производство с помощью шнековой экструзии гранулированного материала

Аддитивное производство с использованием экструдированного материала – один из наиболее многообещающих методов быстрого прототипирования, позволяющий продемонстрировать новые дизайнерские идеи и сократить цикл разработки продукта. При этом процессе изготавливаются прототипы путем экструзии материала в расплавленном состоянии через обогреваемую фильеру (сопло) по заданной схеме на платформу. В этом процессе можно использовать различные типы материалов, включая полимер, цемент, гипс и воск.

4.2.1. Некоторые ограничения, присущие 3D-печати с помощью экструзии филамента

Материал для послойного наращивания должен экструдироваться непрерывно, стабильно и при постоянной температуре во время процесса изготовления слоев. «Непрерывно» означает, что экструзия не должна прерываться, когда сопло сканирует путь осаждения; «стабильно» подразумевает стабильную величину экструзии и точную геометрию расплавленного материала; постоянная температура должна поддерживаться для обеспечения качества соединения между дорожками наплавления расплава.

Моделирование методом послойного наплавления (FDM), рассмотренное нами ранее, является ведущей технологией быстрого прототипирования, которая включает послойное наплавление экструдированного материала через сопло с использованием филамента исходного материала с катушки. Процесс подачи материала FDM осуществляется двумя фрикционными колесами, вращающимися в обратном направлении, чтобы протолкнуть нить в нагретое сопло. Благодаря преимуществам простой конструкции и легкости управления он широко используется в большинстве систем наплавления. Но слабые

стороны этого метода также очень очевидны, сила экструзии ограничена поверхностной прочностью филамента на сжатие и площадью контакта между фрикционными колесами и филаментом. Недостаточное трение приведет к проскальзыванию подачи, а слишком большое сжимающее усилие, приложенное к филаменту, может привести к разрыву нити, и то, и другое повлияет на качество экструзии.

По мере увеличения размера детали проблема длительного времени сборки и деформации детали становится критической. В настоящее время объем экструзии большинства машин FDM составляет от 12 до 17 кг/ч, изготовление крупногабаритной детали займет несколько дней. Внутренние напряжения, возникающие в результате сжатия осажденных волокон в одном слое, могут повлиять на точность размеров прототипа, вызвать деформацию прототипа, включая деформацию основы и расслоение или растрескивание внутреннего слоя. Подобные проблемы качества существуют и в других процессах быстрого прототипирования. Многие ученые исследовали внутренние напряжения. Авторы работы [135] построили математическую модель деформации основы прототипа для анализа каждого из влияющих факторов. Авторы работы [136] обсуждали, как шаблон сканирования лазера в стереолитографии (SLA) влияет на результирующее отклонение детали. В работе [137] авторы изучали динамику образования связи между полимерными нитями с помощью термического анализа и экспериментов по спеканию в разных условиях, и та же группа провела более глубокое исследование механизмов, которые контролируют образование связи в различных условиях процесса [138].

4.2.2. Устройство полимерного экструдера

Чтобы избежать большинства дефектов на этапах экструзии материала в системе на основе нитей, была предложена одношнековая экструзионная система для 3D-печати с использованием полимерных гранул вместо филамента.

Шнековая экструзия получила широкое распространение в промышленности по производству полимеров из-за ее чрезвычайно хороших характеристик при обработке пластических масс.

Рассмотрим принципиальную схему полимерного экструдера (рис. 4.21) и кратко проанализируем процесс экструзии полимера.

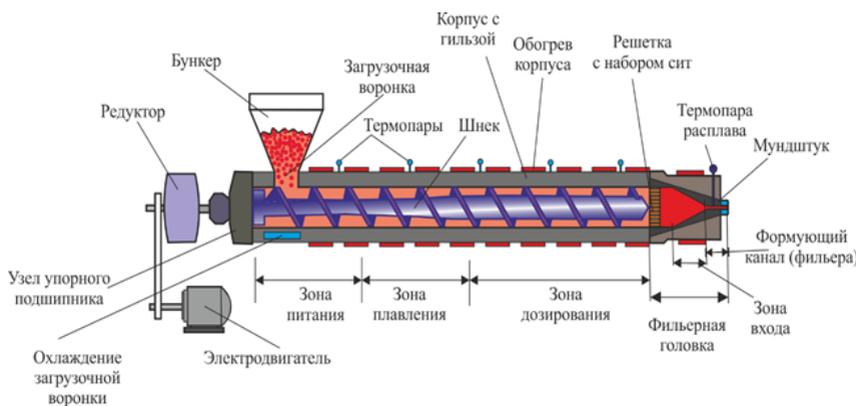


Рис. 4.21. Принципиальная схема полимерного экструдера

Экструдер состоит из шнека (червяка), вращающегося внутри цилиндрического корпуса, в который, как правило, запрессована гильза с азотированной, закаленной и термообработанной поверхностью. Обогрев корпуса осуществляется нагревателями, объединенными в несколько зон. Некоторые части корпуса могут охлаждаться. На выходе из корпуса устанавливается головка с профилирующим инструментом (фильерная головка), которая соединяется с корпусом экструдера посредством адаптера. Иногда адаптер рассматривают как часть фильерной головки. Между шнеком и адаптером располагается решетка с пакетом сеток. Корпус устанавливается на станине. Осевое усилие воспринимается блоком упорных подшипников. Привод шнека осуществляется от регулируемого электродвигателя через шестеренчатый редуктор.

Экструзионный материал поступает на переработку в виде гранул. Гранулы термопластичного материала загружаются в бункер и через загрузочное отверстие поступают к шнеку. При вращении червяка гранулы двигаются вдоль шнека, расплавляются, расплав продавливается через решетку, за которой в отдельных случаях устанавливается пакет сеток. Затем расплав проходит через конический конфузор (адаптер) в фильерную головку, в которой установлен профилирующий инструмент.

Шнек (червяк) – основной рабочий орган экструдера. Он забирает непластицированный материал (гранулы) от загрузочной воронки, пластицирует его и равномерно подает в виде однородного расплава к головке. Продвигаясь по каналу шнека, материал разогревается как за счет теплоты, выделяющейся вследствие вязкого трения (диссипации механической энергии), так и за счет теплоты, подводимой от расположенных на корпусе экструдера нагревателей. Вследствие уплотнения из материала удаляется захваченный вместе с гранулами воздух, и удельный объем композиции уменьшается. Для компенсации уменьшения удельного объема композиции канал шнека выполняют с уменьшающимся объемом витка. Поэтому глубина канала шнека на выходе всегда меньше, чем на входе.

По свойствам процессов, протекающих на каждом участке шнека, его обычно можно разделить по длине на три основные зоны (рис. 4.21): зона питания (или загрузочная зона) – участок, на котором перерабатываемый материал находится в твердом состоянии; зона сжатия (или зона плавления) – участок, на котором почти полностью происходит плавление перерабатываемого материала; зона дозирования – участок, на котором перерабатываемый материал находится в вязкотекучем состоянии.

4.2.3. Качественный анализ работы полимерного экструдера

В зоне питания полимер в виде гранул поступает через загрузочную воронку (рис. 4.21) в винтовой канал шнека и ув-

лекается им за счет разницы сил трения между полимером и стенкой цилиндра, а также между полимером и стенками винтового канала шнека. По мере движения полимера по шнеку в нем развивается высокое гидростатическое давление. Силы трения, возникающие на контактных поверхностях при движении полимера, создают работу трения. Выделяющееся при этом тепло идет на нагрев полимера.

При нормальном температурном режиме вначале образуется достаточно длинная пробка полимера, которая проталкивается силами трения по винтовому каналу. Длина пробки должна быть достаточно большой для того, чтобы сила, развиваемая вследствие градиента давления, могла протолкнуть пробку через зону плавления. По мере того, как пластик движется по винту, он плавится по следующему механизму. Первоначально на стенках цилиндра образуется тонкая пленка расплавленного материала. При вращении винт соскабливает эту пленку, и расплавленный пластик движется по передней поверхности винта. Когда он достигает сердцевины винта, он снова поднимается вверх, создавая вращательное движение перед передней кромкой винта. Первоначально лопасть шнека содержит твердые гранулы, но они имеют тенденцию уноситься в ванну расплава за счет вращательного движения. Поперечное сечение, в котором толщина пленки расплава начинает превосходить зазор между внутренней стенкой цилиндра и гребнем винта шнека, можно считать концом зоны питания и началом зоны плавления.

По мере вращения шнека материал проходит дальше по цилиндру, и все больше и больше твердого материала уносится в ванну расплава до тех пор, пока в конечном итоге между лопастями шнека не останется только расплавленный материал. В пределах зоны плавления полимерная пробка расплавляется под действием тепла, подводимого от стенок корпуса, и тепла, выделяющегося в тонком слое расплава за счет работы сил вязкого трения.

Сечение экструдера, в котором твердая пробка полностью расплавляется, считается началом зоны дозирования. Тече-

ние расплава в зоне дозирования происходит под действием сил вязкого трения, развивающихся вследствие относительного движения шнека и стенок цилиндра, аналогично течению жидкости в винтовых насосах.

В начале зоны дозирования температура расплава равна температуре плавления полимера. Продвигаясь в зоне дозирования, полимер продолжает нагреваться как за счет подвода теплоты извне, так и за счет теплоты, выделяющейся вследствие интенсивной деформации сдвига. Одновременно происходит процесс гомогенизации расплава. Осуществляется окончательное плавление мелких включений и выравнивание температурного поля, что необходимо для нормальной работы формирующего инструмента, а, следовательно, и всего экструдера.

Более подробно движение полимера в каналах шнекового экструдера представлено в монографиях [139, 140]. В монографии [141] представлен широкий ряд конструкций формирующего оборудования шнековых экструдеров.

Ламинарное течение высоковязких расплавов полимеров с постоянными свойствами в каналах формирующего оборудования полимерных экструдеров рассматривалось в работах [142–170] и двухтомной монографии [171, 172]. Теплообмен в каналах экструзионных головок сложной формы при вынужденном ламинарном течении высоковязкой жидкости с постоянными свойствами рассмотрен в работах [173–190].

Теплообмен и теплопередача при вынужденном неизотермическом течении расплавов термопластичных полимеров в фильерных каналах экструзионных головок рассмотрен в работах [123–127, 191–216].

4.2.4. Современное состояние 3D-печати методом экструзии из гранул

Применение метода шнековой экструзии в процессе сплошного наплавления – это не просто копирование, поскольку сопло должно поддерживать определенную скорость ска-

нирования во время процесса осаждения, для этого требуется, чтобы вес и объем экструзионного блока находились в определенных диапазонах для компактности и работоспособности всего устройства. Ключевым компонентом системы является экструзионный шнек. В сочетании с цилиндром шнек предназначен для преобразования твердого материала в расплавленный и, наконец, для эффективного перекачивания материала в фильеру. Чтобы добиться хороших характеристик экструзии, шнек для системы моделирования расплавленными гранулами (Fused Pellet Modelling, FPM) должен иметь три различные функциональные секции, аналогичные секциям в машинах для переработки и экструзии полимеров: загрузочную секцию, секцию плавления и дозирующую секцию.

Секция загрузки является первым элементом шнека, где полимерные гранулы вводятся в шнек, широкий шаг и малый диаметр шнека могут обеспечить максимальный объем подачи и силу трения для продвижения материала вперед. Секция плавления (или секция сжатия) – это место, где происходит большая часть плавления полимера. Это часть шнека, которая «переходит» от глубины подачи к глубине дозирования и в которой происходит работа с полимером, вызывающая плавление. В этой части шнека основание шнека постепенно становится мельче, выталкивая материал к стенке нагретого цилиндра, где происходит плавление. И последнее, но не менее важное: дозирующая, или нагнетательная, секция шнека – это место, где плавление полимера завершается и происходит откачка для преодоления напора.

Такая 3D-печать может быть экономически более выгодной чем FDM/FFF-печать, поскольку полностью исключает стадию производства филамента. Отметим, что экструзия гранулированного материала для 3D-печати иногда обозначается следующими терминами: моделирование расплавленных слоев (Fused Layer Modelling, FLM), производство расплавленными гранулами (Fused Granula Fabrication, FGF), полимерное аддитивное производство (Polymer Additive Manufacturing, PAM).

Авторы работы [217] разработали систему трехмерной печати методом послойного наплавления из расплава на основе шнекового экструдера и экспериментально оценили различные полимеры в форме гранул для трехмерной печати. В работе [218] показана система 3D-печати плунжерного типа для использования полимеров в форме гранул, на которой выполнена оценка деградации полимера, непрерывности его плавления и рассмотрены аспекты точности поверхности прототипа для различных материалов. Авторы работы [219] разработали новую систему высокоскоростной экструзионной 3D-печати с помощью полимерных гранул. Авторы работы [220] сконструировали и создали крупномасштабный двухступенчатый шнековый принтер для моделирования послойного наплавления из гранул. Экспериментальные и аналитические оценки позволили сделать вывод, что изготовленный 3D-принтер способен печатать модели из гранул различных полимерных материалов при гораздо меньших затратах по сравнению с методом печати на основе филамента.

Некоторые полимеры чувствительны к нагреванию, что приводит к трудностям при их использовании для печати, поскольку температуры термического разложения накладываются на технологические параметры печати. Авторы работы [121], объединили несколько этапов процесса экструзионной 3D-печати непосредственно из гранул вместе, что значительно снизило риск термического воздействия. Поливиниловый спирт, один из термочувствительных полимеров, был протестирован для экструзионной 3D-печати из гранул и показал хорошие результаты.

Эластомерные полимеры недостаточно жесткие для FFF/FDM печати с помощью филамента. В работе [122] показано, что экструзионная 3D-печать с использованием сырья в формах гранул может преодолеть эту трудность и квалифицировать эластомеры, подобные этиленвинилацетату, как пригодные для аддитивной обработки. Авторы работы [223] показали, что 3D-печать моделей больших размеров непо-

средственно из гранул выгодна как из экономических соображений, так и из соображений времени выполнения заказа. Экструзионная 3D-печать из гранул также оказалась перспективным подходом к переработке полимерных отходов [224]. Хотя в названных первоначальных попытках был достигнут определенный прогресс, проблемы оставались; экструдер для гранул является таким же сложным, как система литья под давлением, и в дальнейшем возникает дополнительная сложность с точки зрения кинематической схемы 3D-принтера и позиционирования печатающей головки.

Авторы работы [225] выявили ряд недостатков, связанных с экструзионной 3D-печатью полимерных гранул. Одной из основных признанных проблем была необходимость преодоления явления «моста», когда полимер захватывает воздух во время процесса пластификации, что приводит к нестабильности и прерывистости потока материала. Это также может вызвать неконтролируемый поток расплава на кончике фильеры. Конечным результатом является неравномерная структура волокна и, как следствие, потеря контроля качества печати. В работе [226] авторы для решения этих проблем предложили систему с двумя шнеками, когда первый шнек в основном втягивает гранулы и проталкивает их в зону нагрева. Затем пластифицированная масса полимера накапливается в промежуточной камере, откуда полимер выдавливается из фильеры (сопла) вторым дозирующим винтом. Промежуточные ступени потока полимера имели вентиляционные отверстия для отвода газов, если таковые были.

Авторы работ [227, 228] разработали двухступенчатую экструзионную систему для печати гранулированными полимерами, но в их конструкции процесс подачи гранул, нагрева и пластификации происходит в автономной системе, в то время как расплавленный полимер переносится на печатающую головку с помощью гибкого нагретого трубчатого конвейера. Авторами показано, что такое разделение нагрева гранул и динамики послойного наплавления модели снижает эффект «мостика». Они также продемонстрировали, что проблемы печати

гранул полимера можно преодолеть с помощью простых технологических инноваций, что дало дополнительный импульс оценке возможностей использования различных полимеров в экструзионной печати в форме гранул.

Принципиальная схема современного 3D-принтера, печатающего методом экструзии из гранул, представлена на рис. 4.22. Процесс экструзии в этом принтере аналогичен процессу экструзии в полимерном экструдере (см. рис. 4.21). Отличием является то, что ось загрузочной воронки составляет угол с осью шнека меньше чем 90° .

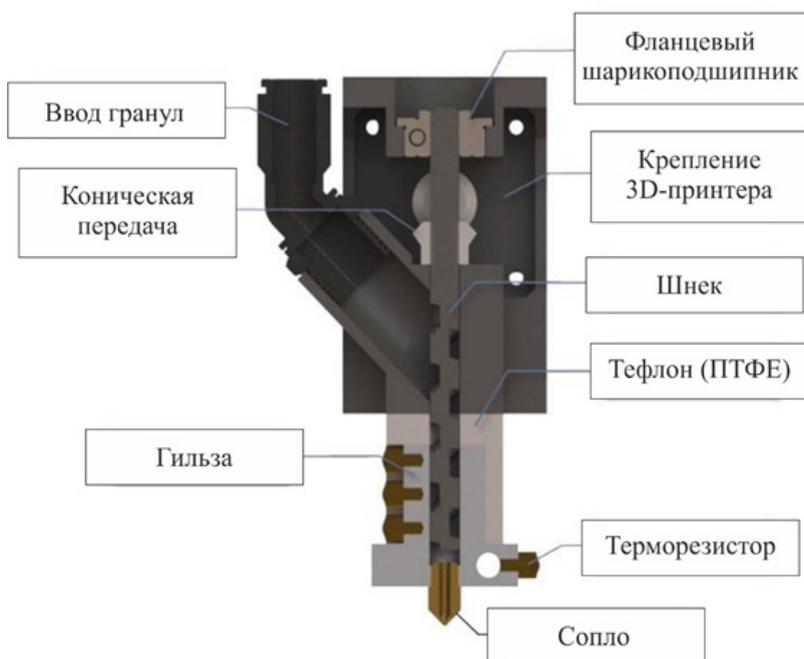


Рис. 4.22. Принципиальная схема 3D-принтера, печатающего с помощью экструзии материала из гранул

В работе [229] представлен 3D-принтер, печатающий из гранул материала с использованием четырех шнековых

экструдеров (рис. 4.23). На данном 3D-принтере можно использовать четыре различных материала для печати одной детали или использовать сырье различных цветов. Отличительной особенностью принтера является то, что ось всех экструдеров направлена под углом к вертикали.

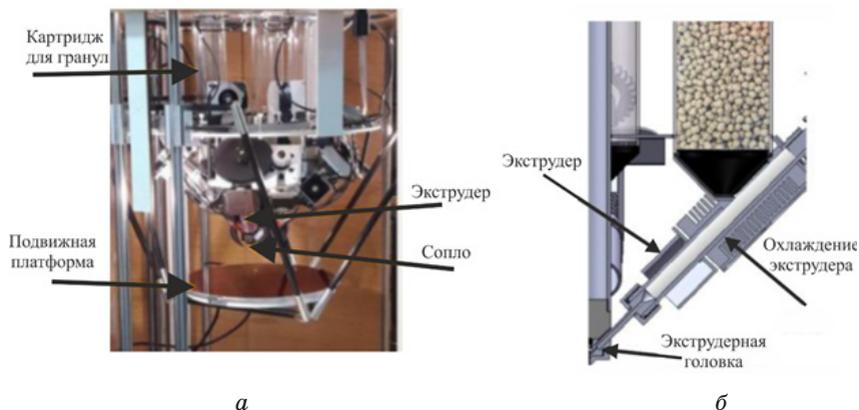


Рис. 4.23. 3D-принтер с четырьмя шнековыми экструдерами: *а* – общий вид устройства; *б* – техническое решение расположения шнековых экструдеров

В последнее время появилось интересное техническое решение, в котором шнековый экструдер для печати материалом из гранул управляется роботом [230] (рис. 4.24). Такое устройство может быть использовано для печати сложных пространственных объектов (рис. 4.25). В настоящее время единственным недостатком такого 3D-печатающего устройства является его стоимость.

На рис. 4.26 показаны гранулы различных полимеров для печати на 3D-принтере со шнековым экструдером, а на рис. 4.27 представлены гранулы термопластичного полиуретана, полученные на высокопроизводительной экструзионной головке подводного гранулирования [231]. Данный полимер широко используется для экструзионной 3D-печати.

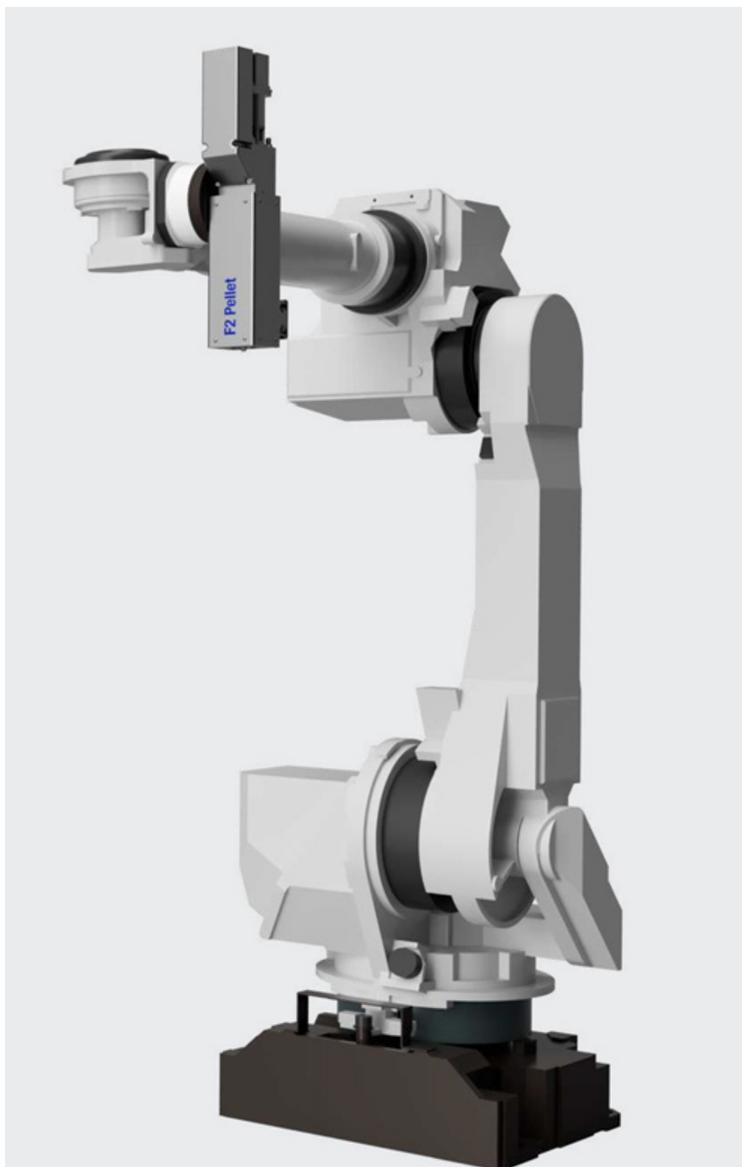


Рис. 4.24. Общий вид робота с установленным шнековым экструдером для печати из гранулированного материала



Рис. 4.25. Печать объемной детали 3D-принтером со шнековым экструдером, которой полностью управляет робот: *а* – общий вид устройства; *б* – шнековый экструдер и сопло, через которое продавливается расплавленный полимер



Рис. 4.26. Разноцветные гранулы различных полимеров для 3D-печати на 3D-принтере со шнековым экструдером



Рис. 4.27. Гранулы термопластического полиуретана, который часто используется при 3D-печати

Контрольные вопросы

1. Что такое филамент?
2. Расскажите о технологии экструзии филамента.
3. Поясните формирование детали при печати на FFF/FDM 3-D принтере.
4. Назовите основные конструкции FFF/FDM 3D-принтеров.
5. Какие материалы используются для изготовления стола FFF/FDM 3D-принтера?
6. Какую роль играют экструдеры FFF/FDM 3D-принтеров?
7. Поясните устройство экструдера Бодена.
8. Поясните особенности устройства экструдера Уэйда.
9. Дайте основные конструкционные особенности печатающих головок FFF/FDM 3D-принтеров.

10. Расскажите о характерных особенностях компоновки экструдеров для FFF/FDM 3D-принтеров.

11. Что такое платформа для печати на FFF/FDM 3D-принтерах?

12. Что такое сопло для FFF/FDM 3D-принтера?

13. Дайте основные особенности кинематических схем FFF/FDM 3D-принтеров.

14. Из чего изготавливают корпуса FFF/FDM 3D-принтеров?

15. Расскажите об устройстве дельта-принтеров для 3D-печати.

16. Каковы основные ограничения для 3D-печати с помощью экструзии филамента?

17. Каковы особенности и значение 3D-печати непосредственно из гранулированного материала?

18. Поясните устройство шнекового экструдера.

19. Приведите характеристики 3D-принтеров со шнековой экструзией.

ГЛАВА 5. Особенности FFF/FDM печати

5.1. Искривление слоев при FFF/FDM печати

Искривление FFF/FDM-деталей появляется из-за неравномерного их охлаждения.

Вследствие этого происходит неоднородная деформация напечатанного материала, возникают различные стягивания и расширения. Эта деформация в крайних зонах (рис. 5.1) создает внутреннюю концентрацию напряжения, которая может привести к искривлению или сжатию. Подогреваемая платформа наряду с хорошей адгезией играет ключевую роль в удержании FFF/FDM-детали на месте и уменьшает вероятность искривления или сжатия (рис. 5.2).

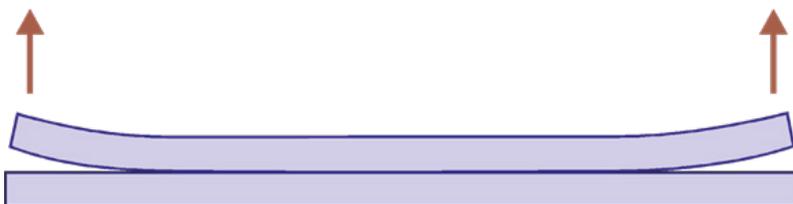


Рис. 5.1. Схематичное изображение искривления краев напечатанной FFF/FDM-детали

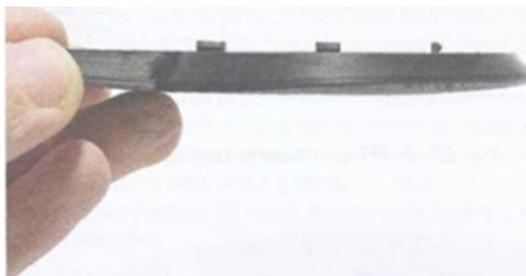


Рис. 5.2. Деформированная FFF/FDM-деталь, напечатанная из ABS-пластика

5.2. Межслойная адгезия

Межслойная адгезия, или сцепление, – это важная составляющая процесса FFF-печати. Когда филамент выходит, он должен сцепиться с предыдущими напечатанными слоями и затвердеть, чтобы образовать твердую целостную деталь.

Для того чтобы этого достичь, филамент вдавливаются в предыдущие слои. Горячий выходящий материал снова разогревает и расплавляет ранее напечатанные слои. Сила, направленная вниз, и частичное расплавление нижележащего материала позволяют сцепить новый слой с предыдущими. Также это означает, что FFF-филамент фактически укладывается в форме овала, а не круга (рис. 5.3).

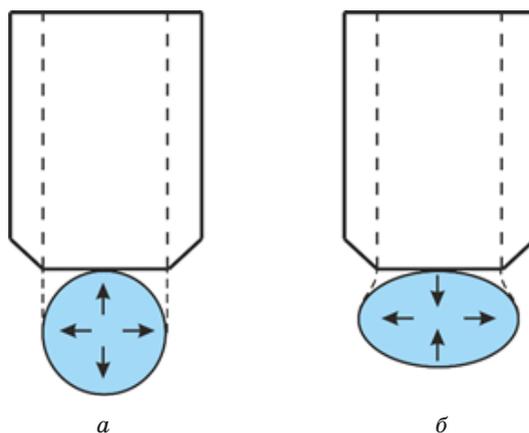


Рис. 5.3. FFF/FDM-экструзия материала в профиле:
а – теоретический профиль экструзии; *б* – реальный
 профиль экструзии

По причине того, что слои печатаются овалами, соединения между слоями напоминают бороздки (рис. 5.4). Это создает концентрации напряжений, от чего при большой нагрузке могут появляться разрывы, а также провоцирует характерное анизотропное поведение, появление более неровной поверхности деталей и видимой слоистости (рис. 5.5).

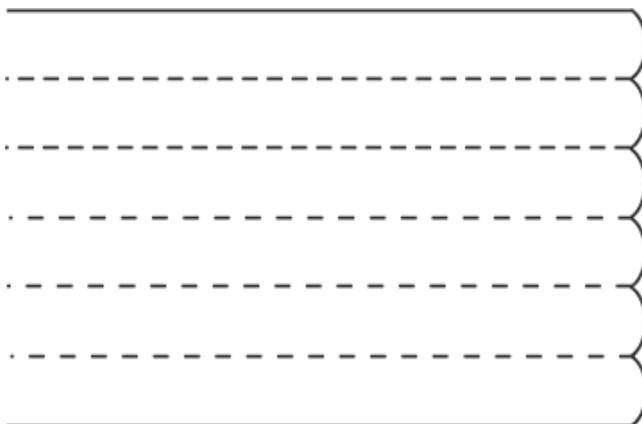


Рис. 5.4. FFF/FDM-составление слой за слоем. Слои округляются на краях, а бороздки создают концентрации напряжения на границе слоя



Рис. 5.5. Явно заметные линии слоев на напечатанных методом FFF/FDM-экструзии деталях

5.3. Поддержки для печатаемых деталей на FFF/FDM-принтерах

FFF-детали в процессе печати могут нуждаться в поддержках. Поддержки необходимы для любых нависающих элемен-

тов, уклон которых менее 45° по отношению к плоскости основания, как показано на рис. 5.6.

Новые слои нельзя укладывать на воздух, нужны твердые опоры, для того чтобы строить поверх них. В тех местах, где нет слоя, добавляется опора. Это позволяет печатать элементы там, где без опор это было бы невозможно. Поддержка – это неплотная решетчатая структура, которая удаляется после печати.

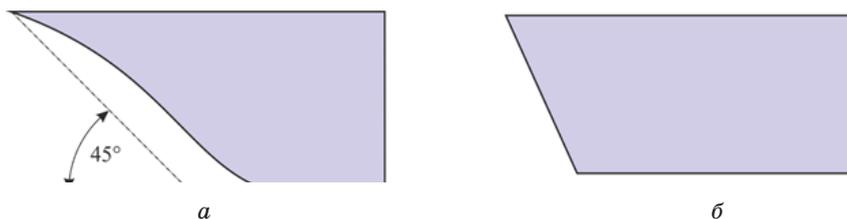


Рис. 5.6. Требования к поддержкам при FFF/FDM-печати: *a* – поддержка необходима, когда угол нависания детали меньше 45° ; *б* – если угол нависания больше 45° , то поддержки не требуются

Хотя печать нависающих менее чем на 45° элементов и возможна (благодаря свойственной плавленому филаменту адгезии), тем не менее качество наклонной поверхности при этом страдает. Можно не соблюдать ограничение в 45° , если необходимо быстро напечатать деталь для подгонки по размерам или для выверения формы. Чтобы получить точные напечатанные детали с гладкой поверхностью, рекомендуется соблюдать ограничение.

Побочным эффектом наличия поддержки является ее неблагоприятное воздействие на контактирующую с ней поверхность, которое приводит к неровностям.

В большинстве случаев требуется постобработка, если нужна гладкая поверхность. Важно порассуждать над этим фактором при определении расположения детали на рабочей платформе. Лучшей практикой будет уменьшение контакта с лицевыми поверхностями.

5.4. Растворимые поддержки при FFF-печати

Множество FFF-принтеров поддерживают двойную экструзию (две печатающие головки) и способны печатать детали из двух материалов. С такими принтерами поддержки можно напечатать из растворимого материала (чаще всего из PLA-пластика или HIPS (полистирола)), как видно на рис. 5.7.

Вследствие того, что поддержка растворяется в воде или другом растворителе вместо механического отделения, поверхность напечатанного, соприкасающаяся с поддержкой, обладает непревзойденным качеством. Применение растворимой поддержки зачастую повышает стоимость печати из-за стоимости растворимого филамента и увеличения времени печати.



Рис. 5.7. FFF/FDM-деталь, напечатанная из PLA-пластика (серая), демонстрирующая растворимую PVA-поддержку (белая)

5.5. Заполнение области печати в FFF/FDM-технологии

FFF-детали обычно не печатаются цельными. Для экономии на материале и сокращения времени изготовления детали печатаются с внутренней неплотной структурой, которая характеризуется заполнением (рис. 5.8). Доля заполнения – это

параметр, который можно регулировать в зависимости от применения детали. Если нужна прочность, детали можно печатать цельными на 80 %. Если модель будет применяться для тестирования формы и соответствия, доля заполнения может снизиться до 10 %, что позволяет изготовить деталь быстрее и дешевле. Обычно в FFF-печати используют долю заполнения 20 %.

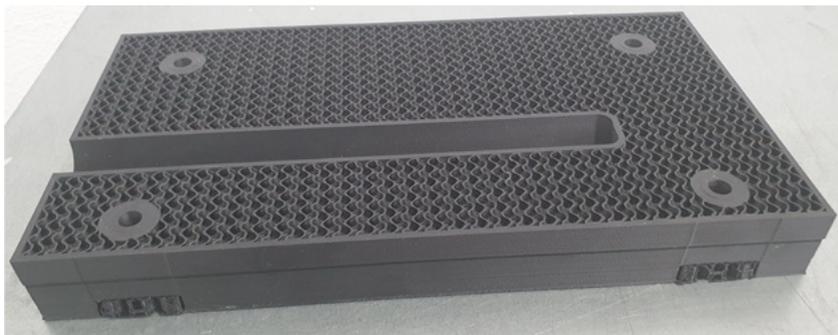


Рис. 5.8. Внутренняя геометрия FFF/FDM-детали

Геометрия заполнения также влияет на характеристики FFF-детали. Типовыми геометриями заполнения являются треугольники, прямоугольники и сотообразные ячейки. Некоторые слайсеры позволяют регулировать плотность и геометрию заполнения по всей детали.

5.6. Точность FFF-печати

Технология FFF позволяет изготавливать детали слой за слоем, укладывая термопластик на подложку. Во время этого процесса разные части детали охлаждаются по-разному, и внутреннее напряжение провоцирует небольшую деформацию деталей, приводящую к искривлению или сжатию. Большие детали или тонкие элементы особенно рискуют оказаться подверженными искривлению из-за большой температурной разницы. Некоторые решения вроде печати рафтов (слой-основа,

напечатанная на платформе, для дальнейшего возведения детали), подогреваемых платформ и закругления на местах острых краев и углов могут помочь уменьшить вероятность их появления. Некоторые отклонения в размерах указаны в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Сводная таблица точности в размерах FFF/FDM-печати

Параметр	Описание
Погрешность размеров	$\pm 0,5$ % (нижний предел $\pm 0,5$ мм). Направление Z обычно более точное в размерах
Сжатие/искривление	Термопластики, которые нуждаются в более высокой температуре печати, подвержены большим рискам искажения. Поведение сжатия тяжело предсказать, и оно зависит от проекта, поэтому здесь часто невозможно сформулировать рекомендации
Основные требования по поддержкам	Необходимы для изготовления точных деталей. Нужны для элементов, свисающих под углом меньше чем 45° и перемычек длиннее 20 мм

5.7. Материалы для FFF/FDM-печати

FFF/FDM-печать использует термопластики в форме филамента на катушках. Диаметр филамента обычно составляет 1,75 или 2,85 мм. Филамент диаметром 2,85 мм в обиходе иногда называют 3-миллиметровым филаментом. Стандартом бытовых принтеров является 1,75 мм.

FFF/FDM-филаменты являются одними из самых дешевых материалов, применяемых в 3D-печати (1500–3000 руб. за килограммовую катушку), в то же время некоторые высокопроизводительные филаменты, такие как РЕЕК, могут стоить до 30 000 руб. за килограмм. Особенностью FFF-печати является то, что филаменты для нее доступны в большом разнообразии цветов.

Главное правило использования термопластиков состоит в следующем: чем лучше необходимые качества материала для проектирования, чем выше температура, которая необхо-

дима для доведения до пластичного состояния, тем сложнее материал, необходимый для печати. Более высокие температуры повышают вероятность искривления или деформации в процессе печати, так как детали охлаждаются на повышенных показателях, что приводит к более интенсивным внутренним концентрациям напряжения.

На рис. 5.9 представлено распределение термопластических материалов, применяемых при 3D-печати в зависимости от их свойств и широты использования.

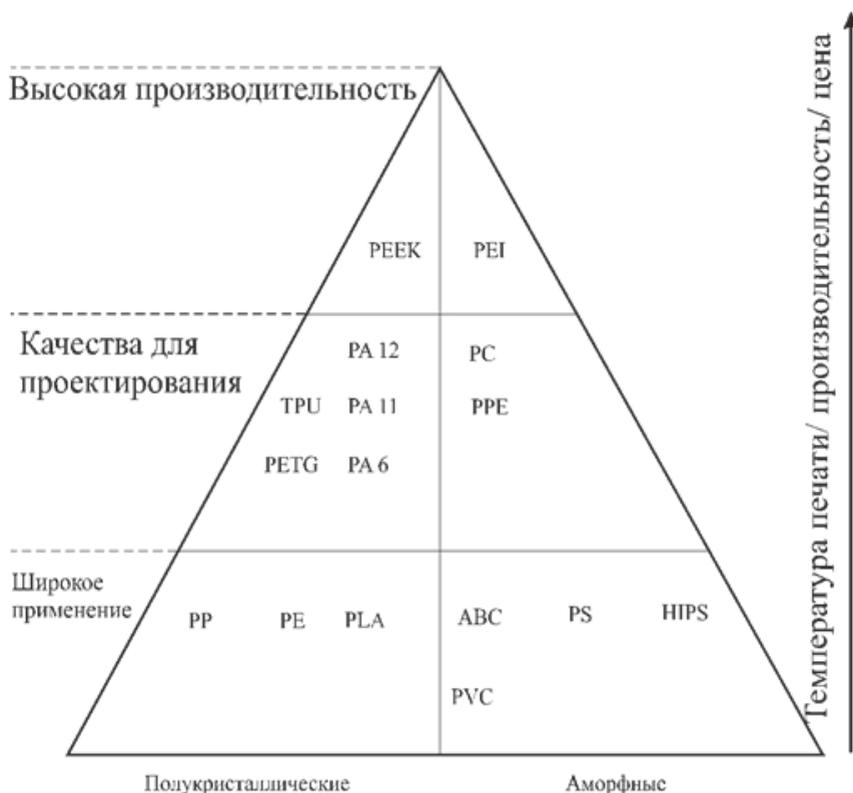


Рис. 5.9. Пирамида термопластических материалов

ABS или PLA размещаются в основании пирамиды и считаются несложными материалами в печати, в то же время такие термопластики, как PEEK и PEI, обладают отменными качествами для проектирования, но чаще всего печатаются при помощи производственных машин, которые способны строго контролировать среду печати.

В табл. 5.2 представлены некоторые из самых распространенных FFF-термопластиков и основные характеристики, связанные с ними.

Таблица 5.2

Распространенные FFF-материалы

Материал	Торговые марки	Характеристики
ABS-пластик	Esun. Stratasys. Ultimaker	Хорошие механические характеристики. Хорошая температурная сопротивляемость. Склонный к искривлению
PLA-пластик	ColorFab (PLA/PHA). Formfutura. Innofil. PoLymaker. ULTimaker	Самый распространенный пластик в 3D-печати. Удобный в печати. Меньше ударная прочность, растяжимость и температурная сопротивляемость, чем у ABS
Нейлон (PA)	Stratasys. Taulman3D. Ultimaker	Подходит для печатных изделий конечного назначения. Хорошая гибкость. Хорошая химическая стойкость
PETG-пластик	ColorFabb (XT) eSun	Хорошая ударная и химическая прочность. Хорошие термические свойства. Склонный к искривлению
TPU	Ninjabflex. Ultimaker TPU 95A Polymaker Polylex	Гибкие и резиноподобные детали. Хорошая растяжимость. Непросто обеспечить точность печати
PEI	Stratasys (ULTEM)	Хорошее отношение прочности к весу. Огне- и химически стойкий. Высокая стоимость

5.8. Свойства филаментов, применяемых для FFF/FDM-печати

Одним из важнейших свойств полимеров для 3D-печати является **вилка температуры печати** и, как следствие, – может ли принтер обеспечить эту температуру. Так, например, пластик PLA ставит самые легкие требования по температуре – стол может быть, как холодный, так горячий, но не более 60 °С. Экструдер должен быть нагрет по крайней мере до 180 °С. А вот ABS требует температуру стола не ниже 90 °С, а лучше 110 °С. Температура экструдера для печати ABS должна быть не менее 235 °С. Такие температуры могут быть недостижимы для стола или будут постепенно разрушать тефлоновые компоненты внутри экструдера. Важно заранее знать возможности принтера и следить за его состоянием либо заменить неподходящие детали более высокотемпературными.

Печать при температуре ниже рекомендуемой может не позволить слоям склеиться. При повышении температуры текучесть пластика возрастает. Это необходимо для печати на больших скоростях. Но при этом становится труднее сохранять форму отпечатка, а также эффективно останавливать подачу пластика. И тут требуется достаточная мощность системы охлаждения отпечатка. При превышении температуры выше рекомендованной пластик разрушается, теряет свой цвет и зачастую становится твердым. Это приводит к появлению пробки и соответственно вызывает необходимость чистки хот-энда.

Следующий важный параметр для печати – это **температурная усадка**. Сильная усадка отрывает отпечатанные модели от рабочего стола, искривляет слои и делает невозможной качественную прочную печать. Для успешной печати такими пластиками надо приложить определенные усилия: предотвратить появление сквозняков, организовать вокруг рабочего стола принтера термокамеру.

Третье свойство филаментов это – **эластичность**. Некоторые пластики настолько эластичны, что с трудом продавли-

ваются в боуден-экструдер, почти не поддаются ретракту, оставляют много волокон на холостых перемещениях печатающей головки и требуют директ-экструдер для приемлемого качества. Другие же терпимо печатаются и на директе, и на боудене.

С точки зрения эксплуатационных свойств пластмассы подразделяются на твердые/эластичные, прочные/хрупкие, прозрачные/непрозрачные, термостойкие, с низким трением, с хорошей и плохой обрабатываемостью и др. Можно найти пластмассы со специальными цветовыми эффектами, с матовой поверхностью, фосфоресцирующие, люминесцентные. Различные пластмассы могут быть растворены в различных растворителях, часто с ядовитым, резким запахом, и поверхность может быть сглажена. Не все пластмассы окрашиваются доступными средствами.

5.9. Свойства наиболее популярных пластмассовых филаментов

PLA – это хорошо известный и распространенный термопластичный полимерный материал, применяющийся для экструзии. PLA – очень твердый и прочный полимер, неэластичный совсем, под достаточной нагрузкой рвется и ломается с минимальными растяжениями. По этой причине тяжело поддается механической обработке. Но при 60–70 °C уже размягчается и претерпевает деформацию. Это термопласт на основе полилактатной кислоты. Полимер проявляет биосовместимость и в оптимальных условиях полностью биоразлагаем. Его температура стеклования зависит от полимерной смеси, но обычно составляет от 45 до 65 °C.

Благодаря этим свойствам PLA является легко обрабатываемым материалом: он показывает низкое поглощение водяного пара, стойкость к истиранию, гладкую и твердую поверхность, а также стойкость цвета и устойчивость к ультрафиолетовому излучению. Кроме того, у него низкий коэффициент теплового расширения.

Для применений, где требуются высокие механические свойства, PLA можно обрабатывать и смешивать с различными волокнами. Он также может быть смешан со второй полимерной фазой для достижения различных объемных или поверхностных свойств. Также существует возможность добавить к полимеру другие армирующие элементы и тем самым изменить его физико-механические свойства.

PLA наименее требовательный к принтеру и может быть хорошо напечатан почти на любом аппарате. Очень любит обдув. Под действием ультрафиолета разрушается. Еще одной особенностью этого пластика является его тягучесть под постоянной нагрузкой. Хорошо окрашивается акриловыми красками.

Цена на сырье за 1 кг PLA составляет около 350–700 руб. и 1500–2100 руб. за 1 кг филамента. Таким образом, он дороже, чем стандартный полиолефин, который стоит около 70–210 руб./кг [128].

ABS – очень популярный для печати синтетический полимер, состоящий из трех мономеров: акрилонитрила, 1,3-бутадиена и стирола. В зависимости от соотношения трех мономеров, свойства полимеризованного ABS различаются и могут быть изменены и отрегулированы в соответствии с предполагаемым применением. По сравнению с PLA рабочая температура намного выше из-за более высокой температуры стеклования, которая находится в диапазоне 100–120 °С. В случае необходимости печатать на температурах выше 40 °С следует использовать ABS вместо PLA, чтобы убедиться, что оставшиеся механические свойства могут выдерживать нагрузки. Температура плавления также зависит от соотношения трех мономеров и составляет от 210 С до 260°С. В отличие от PLA ABS демонстрирует улучшенные механические свойства и большую прочность. Требуется самого минимального обдува во время печати. Пластик прочный. Шлифуется отлично. Растворяется, сглаживается, сплавляется ацетоном. Прекрасно окрашивается акриловыми красками. Совокупность свойств делает этот материал наиболее универсальным для любых задач и применений.

Помимо этих преимуществ ABS также имеет некоторые недостатки по сравнению с PLA. Он разрушается от ультрафиолета. На морозе становится хрупким, но устойчив к высоким температурам. Коэффициент теплового расширения ABS намного выше. Поэтому обработка ABS отличается от обработки PLA и часто приводит к большим проблемам при использовании обычного принтера для экструзии материалов. Помимо проблем с высокой усадкой необходимы высокие температуры обработки. Также важно использовать нагретую платформу для печати. В противном случае детали теряют сцепление с платформой, что приводит к невозможности печати.

Машины для экструзии материалов, оптимизированные для обработки ABS, имеют платформы со специальным покрытием или платформы с высокой шероховатостью поверхности. Это помогает улучшить привязку объекта к платформе сборки, а также поддерживать более высокую общую температуру детали и замедлять процесс охлаждения. Таким образом термическое остаточное напряжение сводится к минимуму.

С точки зрения затрат ABS примерно такой же дорогой, как PLA: цены на filament ABS находятся в диапазоне 1500–3000 руб./кг [129–131].

PETG – чуть более тугоплавкий материал, чем PLA. Имеет меньшую вязкость. Потому более требователен к правильной настройке принтера и к качеству комплектующих. Материал менее прочный и более гибкий. PETG классно выглядит прозрачным! Также он прост в печати. Окрашивается с трудностями.

Ассортимент пластиков и их разновидностей колоссальный. Даже перечисленные три типа имеют различные модификации, изменяющие их базовые свойства, например, ABS+ с низкой усадкой пригоден для печати без термокамеры.

5.9. Полимерные материалы с наполнителем для экструзии материалов

Помимо использования различных полимерных материалов, есть возможность изменять свойства детали с помощью

добавок и наполнителей. В результате получается композитный материал с особыми свойствами (часто с анизотропным поведением). Были исследованы различные наполнители (например, песок, кирпич, металлические порошки, пластификаторы). Эти наполнители в основном используются для изменения внешнего вида и поверхности производимой детали. Помимо этих наполнителей к полимерной матрице также могут быть добавлены армирующие элементы для улучшения механических свойств, таких как прочность и жесткость. Такие армирующие элементы могут быть изготовлены из волокон (например, стекла, арамида, углерода и целлюлозы), синтетических наполнителей различной формы (например, талька, графена) и даже биосовместимых/биоразлагаемых наполнителей (например, дерева, бамбука, пробки, картона, целлюлозы). С учетом большого разнообразия полимерных материалов и наполнителей конечные свойства печатных деталей могут быть адаптированы и оптимизированы для соответствия предполагаемому применению.

Тем не менее существуют некоторые ограничения относительно наполнителей полимерных материалов, используемых для экструзии. Нить расплавляется внутри печатающей головки и проталкивается через специально разработанное отверстие матрицы диаметром от 0,2 до 1,0 мм. Соответственно существуют требования к максимальному размеру наполнителей в зависимости от размера установленной матрицы. Несоблюдение этого требования может привести к значительному снижению потока материала или полной блокировке фильеры наполнителем.

Кроме того, обработка армированных или наполненных полимерных материалов связана с более высоким истиранием экструдера, хот-энда и фильеры. Это приводит к значительно более высокому износу и, как следствие, сокращению интервалов обслуживания этих компонентов. Помимо высоких затрат на материалы по индивидуальному заказу (часто до 7000 руб./кг) необходимо также учитывать стоимость печати, а также дополнительные расходы на техническое обслуживание машины.

Кроме того, при обработке наполненных или армированных полимерных материалов требуются хорошая научная подготовка в областях реологии, прочности, адгезии и теплопередачи, поскольку они демонстрируют различную текучесть материала, поведение склеивания и анизотропную теплопроводность. Они также различаются параметрами печати, которые необходимо регулировать на 3D-принтере для достижения хороших результатов [132–134].

Существуют еще специальные филаменты особого назначения – водорастворимые/расплавляемые: **PVA**, **WAX**. Они применяются для печати литевых форм, водорастворимых поддержек, нависающих частей модели.

Некоторые филаменты активно впитывают влагу из воздуха. При печати эта влага испаряется, образуя пузыри. Филамент из **ABS** и **PLA**, когда напитывается влагой, становится ломким. Выдавливаемая нить пластика получается кривой, местами вздутой. Принтер может останавливать подачу пластика, появляются волоски и дефекты на поверхности. Отпечатки получаются менее красивые. Такой филамент желательно сушить при температуре 30–50 °С в течение нескольких часов. В целом же филаменты лучше хранить в герметичной емкости вместе с порцией силикагеля или в полиэтиленовых пакетах с зип-локом. При отсутствии других возможностей катушку пластика можно просушить на горячем столе принтера, или в овощесушилке, или в духовке/аэрогриле (неприменимо для **PLA**).

5.10. Постобработка деталей после FFF-печати

Основные способы постобработки в FFF-печати представлены в табл. 5.3. Для всех методов важно продумать, как размеры детали в целом могут измениться с применением постобработки (к примеру, как шлифование отразится на процессе сбора деталей, когда будет необходима плотная посадка).

Таблица 5.3

Распространенные типы постобработки для FFF-печати

Тип обработки	Обработка	Описание
Обязательный	Удаление поддержек	Если проект предполагает поддержки, то они должны быть удалены после печати. Поддержки либо отрезаются, либо отламываются. Поверхность, с которой поддержки соприкасались, обычно нуждается в шлифовке, если необходима гладкая поверхность. В случае двойной экструзии поддержки могут быть растворены без потерь в качестве поверхности
Обработка поверхности	Шлифование	Применяемые в FFF-печати материалы можно шлифовать. Рекомендуется легкая шлифовка мелкозернистой наждачной бумагой (600 или более), так как некоторые FFF-пластики мягкие
	Заполнение зазоров	Заполнение зазоров является решением для достижения гладкой поверхности FFF-деталей. Для заполнения малых брешей подходящим вариантом будет эпоксидная смола. Шпаклевка применяется для больших пустот или поверхностей. После отверждения заполнения поверхность шлифуется
Соединение	Холодная сварка	Холодная сварка ABS – это распространенный метод соединения двух деталей. Ацетон применяется для «сплавления» деталей, обеспечивая крепкое соединение. Это популярное решение для конструкций, которые необходимо разделить на более мелкие детали из-за ограничений по объему. Соединение шлифуется после высыхания
Эстетический	Полировка	После шлифовки к поверхности применяется полироль для пластика. Полировка может оказаться неприменимой к конструкциям с мелкими фигурными элементами

Тип обработки	Обработка	Описание
	Грунтовка и покраска	Грунтовка и покраска – очень распространенный метод постобработки для FFF/FDM. Аналогично полировке, чем лучше поверхность подготовлена, тем лучше она будет выглядеть после покраски. Шлифование наждачной бумагой с зернистостью 600 обеспечит пригодную поверхность. Грунтовка наносится в два тонких слоя перед покраской (если нужно). Для покраски подойдет обычная аэрозольная краска, она обеспечит гладкую и качественную поверхность, если ее правильно нанести в несколько слоев
	Покрытие металлом	На FFF-детали может наноситься проводящее покрытие, затем они могут подвергнуться процессу покрытия металлом для получения металлизированной поверхности
	Сглаживание паром	Сглаживание паром является техникой постобработки, которая обычно ассоциируется с ABS-детальями. Детали помещаются в камеру и подвергаются обработке парами ацетона в течение короткого промежутка времени. Пары растворяют внешнюю поверхность детали, что придает поверхности гладкий, полированный вид. В зависимости от степени сглаживания — это может привести к некоторой потере детализации
	Покрытие эпоксидной смолой	Покрытие эпоксидной смолой обеспечивает FDM-детали твердым и гладким верхним покрытием. Чаще всего для этой техники покрытия FDM-деталей применяются двухкомпонентные эпоксидные смолы. Как и в других техниках, в качестве начального этапа рекомендуется шлифование поверхности. Затем применяется эпоксидная смола в несколько слоев, чем достигается покрытие нужной толщины

5.11. Преимущества и ограничения FFF/FDM-печати

Низкая стоимость материалов и оборудования, как и простота управления, обеспечивают FFF-печати конкурентную стоимость при производстве произвольных деталей из термопластика. Зачастую FFF-печать – это первое, с чем люди знакомятся, и она представляет собой самую широкую базу установленного оборудования из 3D-принтеров по всему миру. FFF-печать, которая имеет в распоряжении множество материалов, является самым популярным выбором для быстрого прототипирования, так же как и для других функциональных применений, некоммерческих в своем большинстве.

Основные ограничения FFF-печати связаны с анизотропной природой деталей. Многослойная природа FFF-печати влечет за собой то, что детали существенно менее крепкие в одной из плоскостей. Расположение детали во время печати влияет на то, насколько крепкой она будет в каждой плоскости. Для проектировщика важно понимать дальнейшее применение и то, как направление печати влияет на производительность детали.

Доля заполнения также влияет на прочность детали. Большинство принтеров производят детали с 20 % заполнения. Более высокий показатель заполнения придаст детали прочность, но также и увеличит время и стоимость печати.

Послойный метод печати подразумевает, что FFF-детали обладают видимыми линиями слоев и зачастую нуждаются в какой-либо форме постобработки, если нужна гладкая поверхность.

5.12. Промышленная и настольная FFF-печать

Технология FFF-печати применяется и в бюджетных настольных 3D-принтерах (рис. 5.10), на высокотехнологичных настольных принтерах с термокамерой и двойной экструзией (рис. 5.11). Хотя принтер, показанный на рис. 5.11,

позиционируется как настольный, по сути, он является промышленным и используется в промышленном производстве (рис. 5.12).



Рис. 5.10. Настольный FFF-принтер

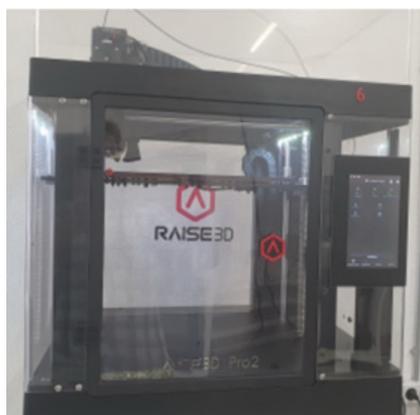


Рис. 5.11. Высокотехнологичный настольный принтер с термокамерой и двойной экструзией



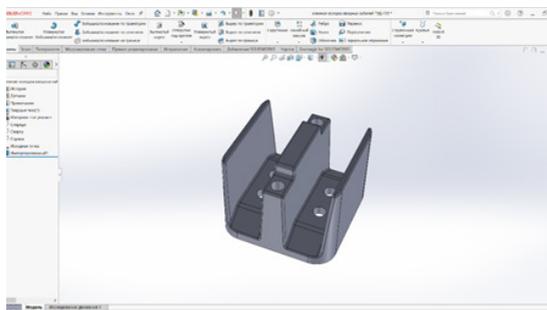
Рис. 5.12. Высокотехнологичные настольные принтеры с термокамерой и двойной экструзией в компании ООО «АТ 2050» используются для промышленного производства

FDM-печать используется и на производственном высокотехнологичном промышленном оборудовании (рис. 5.13). Большинство бюджетных FFF/FDM-принтеров технически подобны своим высокотехнологичным промышленным аналогам, но их потенциальные возможности различаются.

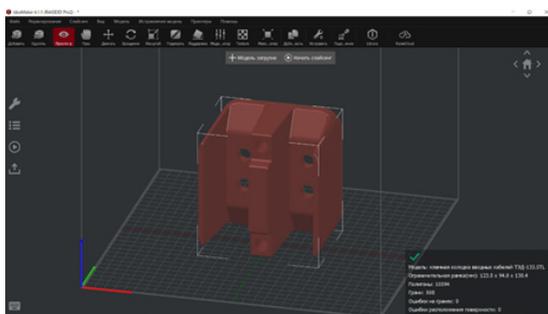


Рис. 5.13. Промышленные FDM-принтеры Siemens

5.12. ПРОМЫШЛЕННАЯ И НАСТОЛЬНАЯ FFF-ПЕЧАТЬ



a



б



в

Рис. 5.14. Этапы печати клеммной колодки вводных кабелей на 3D-принтерах компании ООО «АТ 2050»:
a – обработанная скан-модель; *б* – работа слайсера;
в – напечатанная на 3D-принтере деталь

Главными различиями промышленной и настольной FFF/FDM-печати являются количество и ассортимент доступных материалов. Производственные машины способны печатать из тех же стандартных термопластиков, что и настольные машины, но тем не менее также способны печатать детали из более продвинутых, сложных в печати термопластиков, приведенных в верхней части пирамиды на рис. 5.9.

Промышленные FFF-принтеры используют строго контролируемую среду и способны автоматически настраивать параметры принтера для приспособления к материалу печати. Контролируемая среда, в частности, предполагает, что детали печатаются в закрытом пространстве с регулируемыми температурой и влажностью. Это уменьшает показатель времени, за которое детали охлаждаются, ограничивая возможность искривления или деформации. Большинство производственных машин также используют двойную экструзию, позволяя печатать поддержку из растворяемого материала.

Благодаря контролируемой среде производственные машины в основном изготавливают детали с большей точностью и более качественным воспроизведением. Объемы изготовления у производственных машин также больше, что позволяет производить детали больших размеров или множество малых деталей за один ход. По этой причине промышленные машины применяются в диапазоне от малых до средних промышленных масштабов.

Этапы выполнения печати на 3D-принтерах компании ООО «АТ 2050» RAISE 3D клеммной колодки представлены на рис. 5.14.

Настольные FFF-принтеры доступны по цене и могут предложить быстрый метод 3D-печати. Точность печати у настольных машин приемлемая для широкой области применения.

По мере совершенствования аппаратных средств, материалов и программного обеспечения расстояние между промышленной и настольной FFF-печатью сокращается. Несмотря на нововведение промышленных машин в виде закрытой камеры, настольные FFF-принтеры тоже являются высокоточными машинами, способными к двойной экструзии (для

составления растворимой поддержки или мультиструйной печати), производящими детали промышленного качества на рабочем столе. К тому же настольные 3D-принтеры позволяют более тщательно контролировать параметры печати в сравнении с промышленными машинами, что делает их идеальными для прототипирования.

5.13. Типичные области применения FFF/FDM-печати

FFF-печать служит быстрым, бюджетным прототипирующим и проверяющим конструкцию инструментом. Она также служит созданию функциональных деталей, в основном для некоммерческого применения. Некоторые наиболее распространенные области применения представлены в ниже.

Формы для литья по выплавляемым моделям. Обладая низкой стоимостью материалов и доступной геометрией печати, FFF-печать становится подходящим решением для литья по выплавляемым моделям. Благодаря тому, что структура заполнения, печатаемая внутри FFF-деталей, не цельная, становится возможным применение меньшего количества материала, что облегчает выжигание модели из формы в рамках процесса отливки (рис. 5.15).

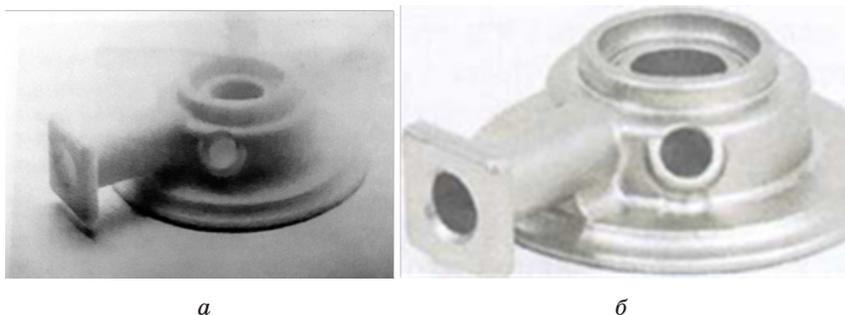


Рис. 5.15. Шаблон, созданный FFF-печатью (а); конечная металлическая деталь, отлитая по выплавляемой модели (б)

Печать корпусов для электроники. Корпуса для электроники являются одним из самых распространенных применений FFF-печати (рис. 5.16). FFF позволяет проектировщику создавать прототипы или конечные конструкции в течение нескольких часов, а также делает этот процесс более дешевым по отношению к традиционным методам изготовления. У корпусов, созданных посредством 3D-печати, можно эффективно проверить геометрию конструкции и применимость для их печати нескольких материалов, которые могут использоваться для конечного применения.

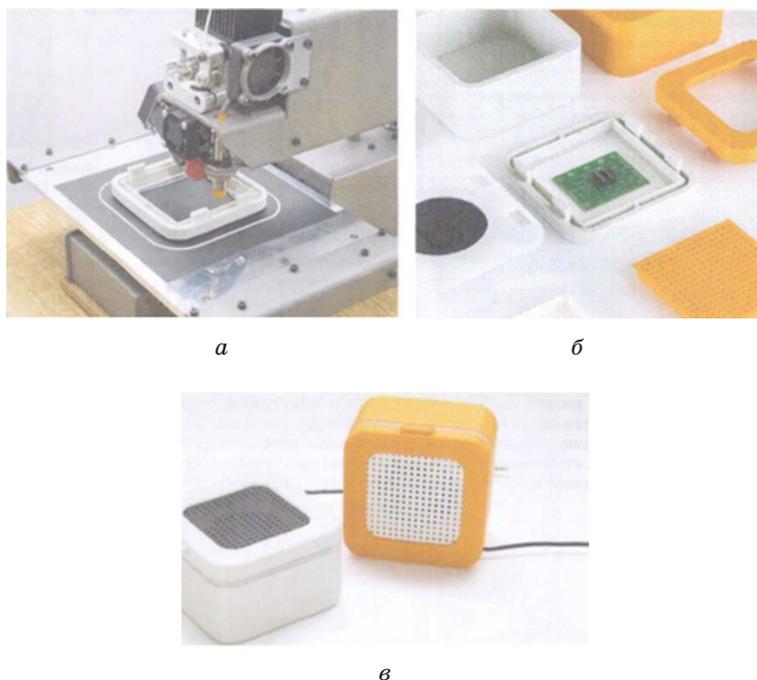


Рис. 5.16. Печать на настольном FFF-принтере с защелкивающимися соединениями: *а* – крышка корпуса динамика в процессе печати; *б* – разобранный портативный динамик из пластиковых деталей, напечатанных на настольном FFF-принтере; *в* – готовые собранные динамики, напечатанные из PLA

Тестирование формы и соответствия. Тестирование формы и соответствия применяется для того, чтобы продемонстрировать геометрию и предоставить тактильную обратную связь проектировщику. FFF-печать позволяет создавать изгибы и естественные формы, которые было бы трудно изготовить, прибегая к традиционным техникам изготовления.

Монтажные и крепежные приспособления. Широкие возможности изготовления нестандартных изделий и сложность исполнения, которую предоставляет FFF-печать для проектирования, с учетом скорости и точности печати позволяют применять ее для создания захватывающих, монтажных и установочных приспособлений.

5.14. Новые разработки в технологии FFF/FDM-печати

В сравнении с другими технологиями, представленными в этой книге, технология FFF/FDM – самая простая и ясная в применении. Существуют некоторые новшества в области FFF/FDM-печати, которые позволяют расширить границы ее применения.

Непрерывное плавление нити – Markforged. В сущности, непрерывное плавление нити (Continuous Filament Fabrication, CFF) от Markforged – это та же технология FFF/FDM. Отличие состоит лишь в добавлении второй печатающей головки, которая укрепляет печатаемый нейлон, укладывая непрерывную нить из углеродного волокна, кевлара или стеклопластика между слоев (рис. 5.17).



Рис. 5.17. Непрерывные нити углеродного волокна, армирующие нейлоновую деталь

Эти длинные непрерывные нити снижают нагрузку на весь объект, что придает функциональной детали прочность, позволяя извлекать максимальную выгоду из свойств композитных материалов. Инженеры могут точно проанализировать и установить плотность и схему укладывания выбранного материала в печатаемую деталь (рис. 5.18).

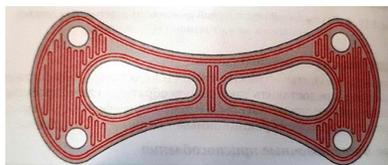


Рис. 5.18. Используя ПО от Markforged Eiger, пользователи могут определять пути, по которым будут укладываться углеродное волокно (красное) и нейлон (серый) на каждом слое в детали

5.15. Металлическая FFF/FDM-печать – Metal X от Markforged и Desktop Metal DM Studio

Металлическая FFF-печать – это новейшая разработка на рынке настольных принтеров. Большой спрос на быструю, бюджетную 3D-печать металлических деталей вызывает появление новых технологий.

Metal X (машина от Markforged) печатает пластиковым филаментом, наполненным металлическим порошком. После печати деталь спекается в камере, что приводит к выгоранию пластика и связыванию металлического порошка, и в результате получается стойкая металлическая деталь (рис. 5.19). Этот процесс является аддитивным производством методом атомной диффузии (Atomic Diffusion Additive Manufacturing, ADAM), и он подобен способу изготовления функциональных металлических деталей струйной печатью связующим веществом, который раскрывается в ниже.



Рис. 5.19. Нейлоновые прототипы тормозных рычагов, изготовленные при помощи 3D-печати на принтере Markforged с разными типами материалов укрепления. Сверху вниз: нейлон без укрепления, укрепленный стеклопластиком нейлон, укрепленный кевларом нейлон, укрепленный углеродным волокном нейлон и укрепленная углеродным волокном деталь из филамента Onyx

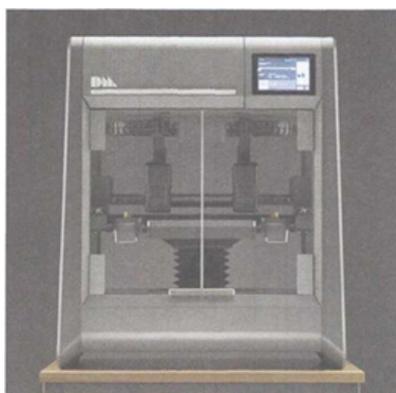


Рис. 5.20. 3D-принтер Desktop Metal DM Studio

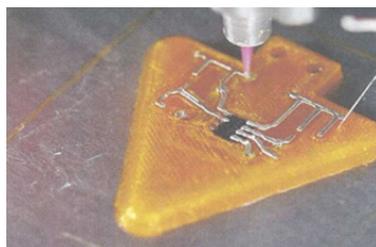
Конкурентом Metal X представлен Desktop Metal DM Studio. Как и Metal X, DM Studio (рис. 5.20) также выкладывает первичные детали слой за слоем с применением нагрева и экструзии особо сформированных металлических стренг. Детали позднее спекаются для выжигания пластика и формирования цельной металлической детали.

5.16. Интеграция электронных схем – Voxel8 DK

Принтер Voxel8 DK размещает проводящую пасту, наполненную металлом и термопластичным полимером, и позволяет печатать детали с интегрированной электроникой. Этот уникальный метод печати несколькими материалами позволяет печатать детали с уложенными проводящими дорожками и электронными схемами или интегрированными батарейками (рис. 5.21).



a



б

Рис. 5.21. Функциональные сцепные рычаги, изготовленные на принтере Metal X (*a*), панель и электросхема, печатаемые одновременно на Voxel8 (*б*)

Некоторые принтеры позволяют печатать качественные металлические крепления (рис. 5.22).

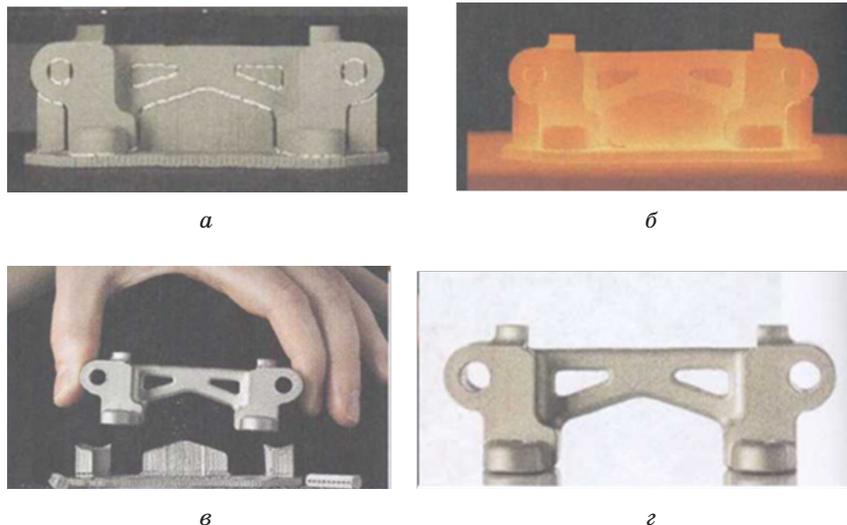


Рис. 5.22. Функциональное металлическое крепление, изготовленное принтером Desktop Metal DM Studio:
а – деталь прямо на рабочей платформе; *б* – деталь, раскаленная для удаления связующего вещества;
в – деталь с удаленными структурами поддержки после спекания; *г* – готовая деталь

Контрольные вопросы

1. Какие особенности FFF/FDM-печати вы знаете?
2. Охарактеризуйте многослойную адгезию.
3. В каких случаях необходимо печатать поддержки вместе с печатаемой моделью?
4. Какие бывают поддержки?
5. Какова точность FFF/FDM-печати?
6. Приведите характеристики материалов для FFF/FDM-печати.

7. Назовите свойства наиболее популярных пластмассовых филаментов.

8. Какие наполнители используются для наполнения филаментов?

9. Назовите особенности постобработки напечатанных с помощью FFF/FDM-принтеров деталей.

10. Какими преимуществами и ограничениями обладает FFF/FDM-печать?

11. Назовите типичные области применения FFF/FDM-печати.

12. Назовите особенности металлической FFF/FDM-печати.

ГЛАВА 6. Полимеризация в резервуаре (ванночке) – SLA/DLP

В технологии полимеризации в резервуаре используется фотополимерная смола, находящаяся в резервуаре, которая отверждается под воздействием света. Самые частые способы применения полимеризации в резервуаре – это SLA (стереолитография) и DLP (цифровая светодиодная проекция), которые в общей структуре нашего изложения показаны на рис. 6.1. В силу того, что в обеих этих технологиях применяются подобные способы изготовления деталей, для упрощения они будут рассматриваться как аналогичные, когда будут обсуждаться такие темы, как постобработка или преимущества и ограничения различных технологий 3D-печати.

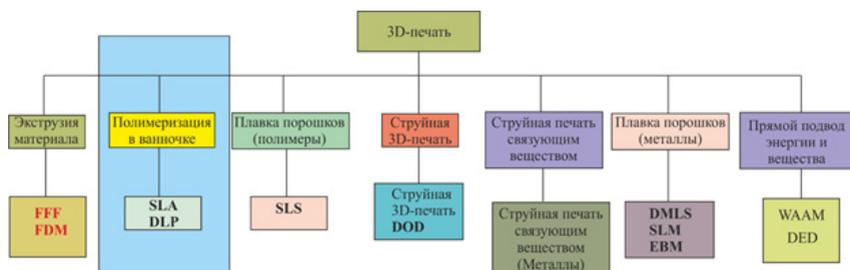


Рис. 6.1. Выделение SLA/DLP 3D-печати в общей классификации 3D-печати

6.1. Технологии полимеризации в резервуаре

6.1.1. Стереолитография (SLA)

Технология SLA известна тем, что является исторически одной из первых технологий 3D-печати. В первой главе мы уже упоминали, что само понятие «стереолитография» было введено Чарльзом Халлом, который запатентовал технологию

в 1986 г. и основал компанию 3D Systems для ее коммерческого использования.

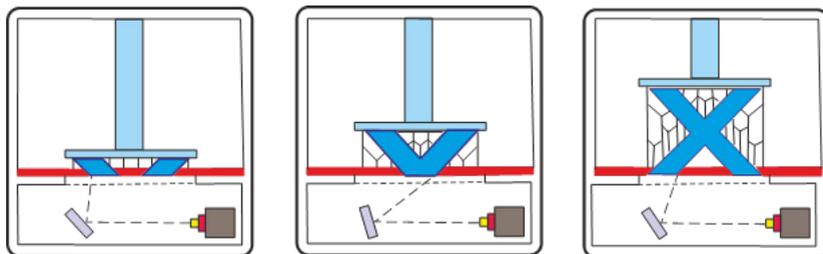


Рис. 6.2. Схема печати полимеризацией в ванночке

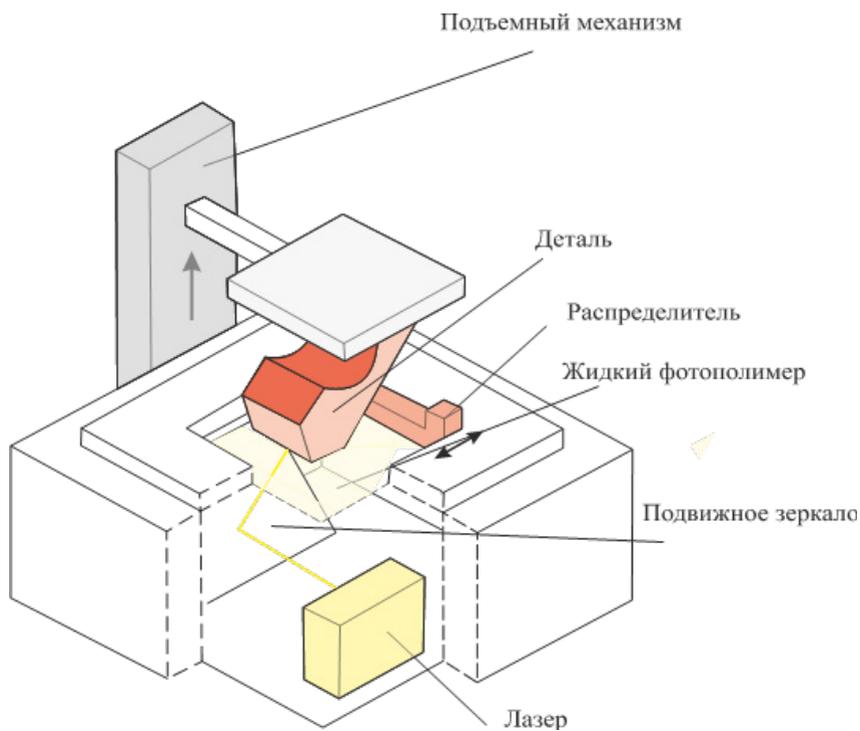


Рис. 6.3. Принципиальная схема SLA-принтера

В процессе применяются сканирующие зеркала (расположенные по одному на осях X и Y) для быстрого наведения лазера на пространство резервуара, которое является областью печати, чтобы отверждать смолу в ходе работы (рис. 6.2). Этот процесс разделяет слой за слоем всю печать детали на ряд точек и линий, передаваемых зеркалами в качестве координат. Большинство SLA-машин применяют твердотельные лазеры для отверждения деталей. Характерное устройство и принцип работы принтера SLA показаны на рис. 6.3.

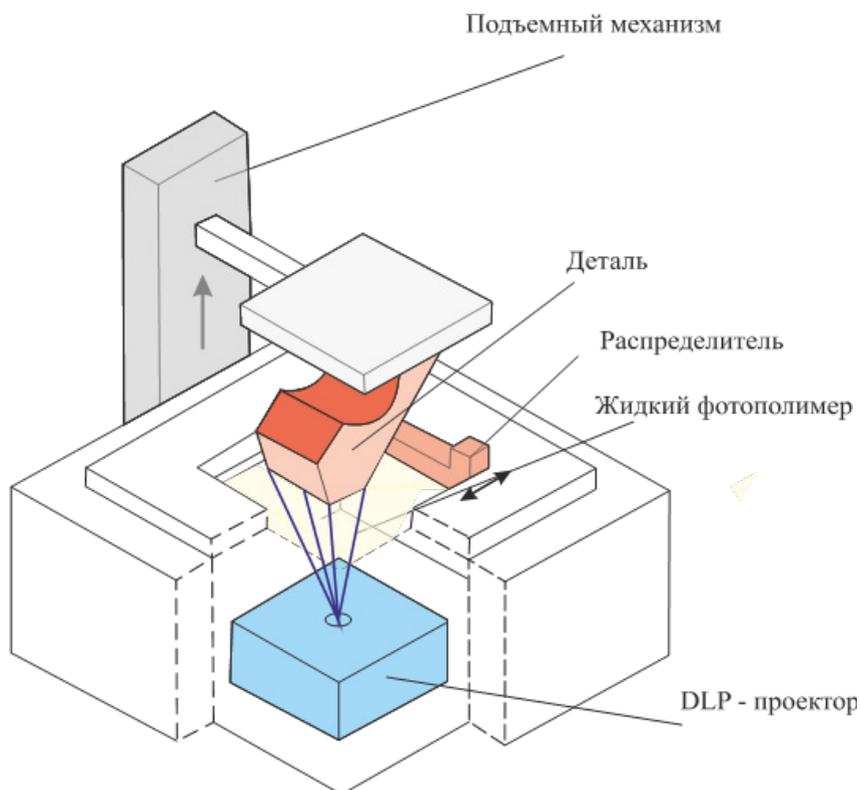


Рис. 6.4. Схематическое представление DLP-принтера

6.1.2. Цифровая светодиодная проекция (DLP)

Технология DLP следует аналогичному с SLA методу изготовления деталей. Основное отличие состоит в том, что DLP использует цифровую светодиодную проекцию для облучения сразу всего слоя или для нескольких облучений в случае больших деталей (рис. 6.4). Так как проектор является цифровым экраном, изображение каждого слоя составлено из квадратных пикселей, что в итоге формирует слой из маленьких прямоугольных параллелепипедов, называемых **вокселями**.

Печать с использованием технологии DLP затрачивает меньше времени по сравнению с SLA-печатью, так как за один раз облучается целый слой, вместо продолжительного просвечивания лазером области поперечного сечения. Свет проецируется на смолу при помощи светодиодных (LED) экранов или источника (лампы) УФ-излучения, направленных на поверхность печати цифровым микрозеркальным устройством (Digital Micromirror Device, DMD).

DMD представляет собой ряд микрозеркал, которые управляют направлением проекции света и формируют световую структуру на поверхности печати.

6.1.3. SLA против DLP

Основопологающее различие между технологиями SLA и DLP лежит в типе источника света, применяемого для отверждения смолы. SLA-принтеры используют точечный лазер, в то время как DLP-принтеры применяют воксельный подход. Если рассматривать с точки зрения разрешения, то стандартные DMD располагают разрешением в 1024×780 пикселей, тогда как стандартные SLA-принтеры пользуются лазерной точкой размером 130–150 микрон (зависит от размеров машины).

Недостатком применения лазера в SLA-печати является длительность обхода области сечения в сравнении с деталью, напечатанной DLP-принтерами, которые способны облучать сразу целую область сечения (зависит от размера детали).

А это значит, что при печати одинаковых деталей DLP быстрее справляется, чем SLA.

Заметим, что в качестве источника света для облучения смолы в настоящее время используются также и LCD-дисплеи повышенной мощности. Такой принтер в компании ООО «АТ 2050» используется для печати промышленных изделий (рис. 6.5).



Рис. 6.5. 3D-принтер для полимеризации полимера в резервуаре, источником света в котором является LCD-дисплей. Печатает деталь сверху вниз

6.2. Характеристики SLA/DLP-принтеров

6.2.1. Параметры принтера

В отличие от параметров FFF/FDM-принтеров, параметры машин для полимеризации в резервуаре в большинстве своем фиксированные и не могут быть изменены. Обычно немногочисленными вводными данными являются расположение детали и поддержки, толщина слоя и сам материал, все это определяется на стадии обработки слайсером. Как правило, принтеры автоматически задают настройки, основываясь на типе используемого материала.

Толщина слоя и разрешение источника света (размер точки или разрешение проектора) обуславливают качество поверхности и точность детали. Большинство принтеров, печатающих по технологии полимеризации в ванночке, изготавливают детали с толщиной слоя 25–100 микрон.

Для получения очень маленьких, подробно детализированных отпечатков существует возможность смены линз DLP-проектора для получения более тонкого луча лазера. Это позволяет печатать меньшие слои с большей скоростью и детализацией.

6.2.2. Печать в направлениях снизу вверх и сверху вниз

Машины для полимеризации в ванночке способны изготавливать модели в двух отличных направлениях снизу вверх и сверху вниз, как показано на рис. 6.6. SLA- и DLP-принтеры поставляются с обеими конфигурациями, конструкция которых варьируется в зависимости от производителя.

6.2.2.1. Печать снизу вверх

У принтеров, печатающих снизу вверх, источник света расположен ниже резервуара для смолы с прозрачным дном. Изначально рабочая платформа расположена так, чтобы присут-

ствовало лишь одно утолщение между основанием резервуара и платформой. Источник света (лазер, УФ-лампа или LED-экран) облучает тонкий слой смолы, отверждая ее. Специальное покрытие предупреждает прилипание смолы к основанию ванночки. С отверждением и прилипанием первого слоя к рабочей платформе принтер производит отделение первого облученного слоя от основания и поднимает платформу на высоту **одного** слоя (как изображено на рис. 6.7). В зависимости от типа машины этот шаг может сопровождаться отслаиванием, проскальзыванием, вращением или встряской ванночки.

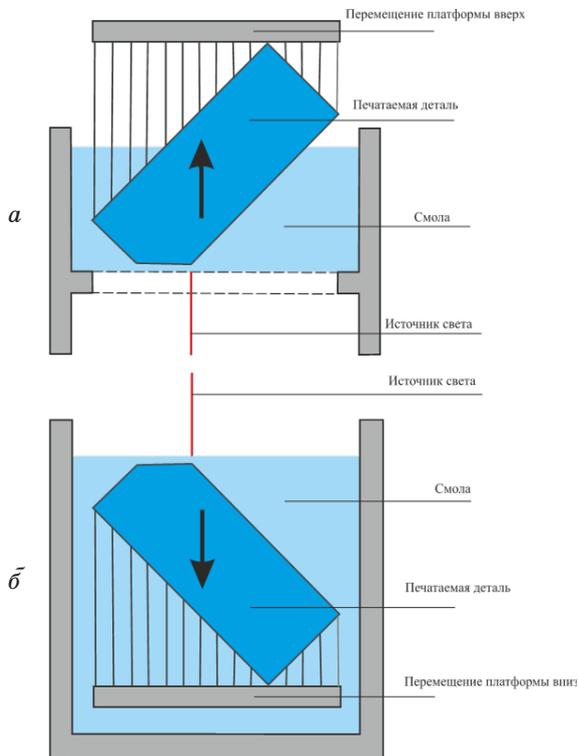


Рис. 6.6. Фотополимерная печать снизу вверх (а) и сверху вниз (б)

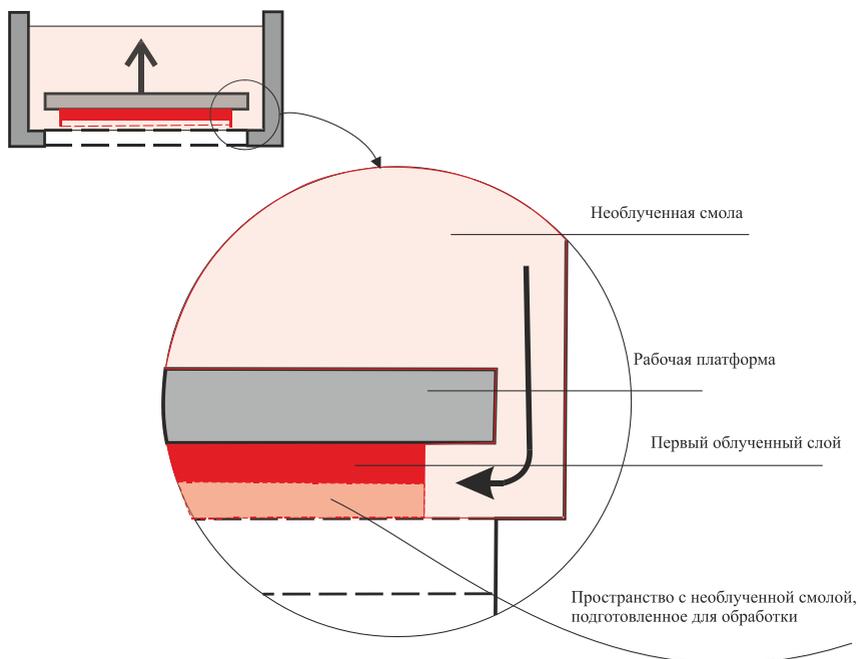


Рис. 6.7. Рабочее пространство принтера, печатающего снизу вверх

После стадии отделения новый необлученный слой заполняет пустоту. Некоторые из машин, работающих по такой технике, используют щетку для распределения слоя смолы по основанию резервуара, чтобы обеспечить равномерное распределение, перемешать смолу и удалить любые остатки (отвердевшие частицы смолы).

Затем процесс повторяется с поднятием платформы на одну толщину слоя и отделением нового облученного слоя от основания резервуара до тех пор, пока печать детали не будет завершена (рис. 6.8, 6.9).

Для успешной печати по технологии снизу вверх критически важно снизить воздействие на новые напечатанные слои в стадии отделения.

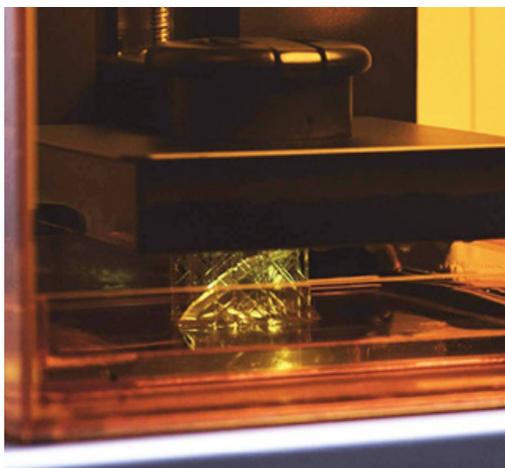


Рис. 6.8. Модель, печатаемая снизу вверх на настольном принтере SLA. Свет лазера отчетливо виден на детали



Рис. 6.9. Завершенная модель, напечатанная из прозрачной смолы, со все еще прикрепленными поддержками

Стадия отделения создает области повышенного напряжения рядом с тонким краем лезвия, которые могут спровоцировать порчу детали и искривление, когда деталь прилипает ко дну ванночки вместо рабочей платформы. Принтеры, работающие снизу вверх, обычно имеют покрытие против прилипания (чаще PDMS/FEP), нанесенное на основание ванночки, которое способствует успешности стадии отделения, но оно также нуждается в периодической смене для полноценной работы. Щетка может в этом случае дополнительно поспособствовать окислению PDMS/FEP, уменьшая степень прилипания ко дну.

Сравнительные свойства принтеров, печатающих снизу вверх, приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Преимущества и недостатки принтеров, печатающих снизу вверх

Свойства	Описание
Преимущества	Требует малое количество смолы, так как деталь вытягивается из ванночки, это означает, что сама машина может быть меньших размеров. Легко контролировать толщину слоя
Недостатки	Требует регулярной замены окошка или ванночки для поддержания оптимальных условий печати. Повышенные шансы на сбой печати из-за стадий отделения и воздействия силы гравитации (веса детали). Детали должны составляться под углом, что увеличивает время печати и ее стоимость.

6.2.2.2. Печать сверху вниз

У принтеров, печатающих сверху вниз, источник света расположен выше рабочей платформы. Исходное положение рабочей платформы находится у поверхности смолы в ванночке, где платформа покрыта тонким ее слоем. Источник света облучает тонкий слой смолы. После отверждения первого слоя рабочая платформа спускается на толщину одного слоя, смола покрывает предыдущий слой, и процесс повторяется (рис. 6.10).

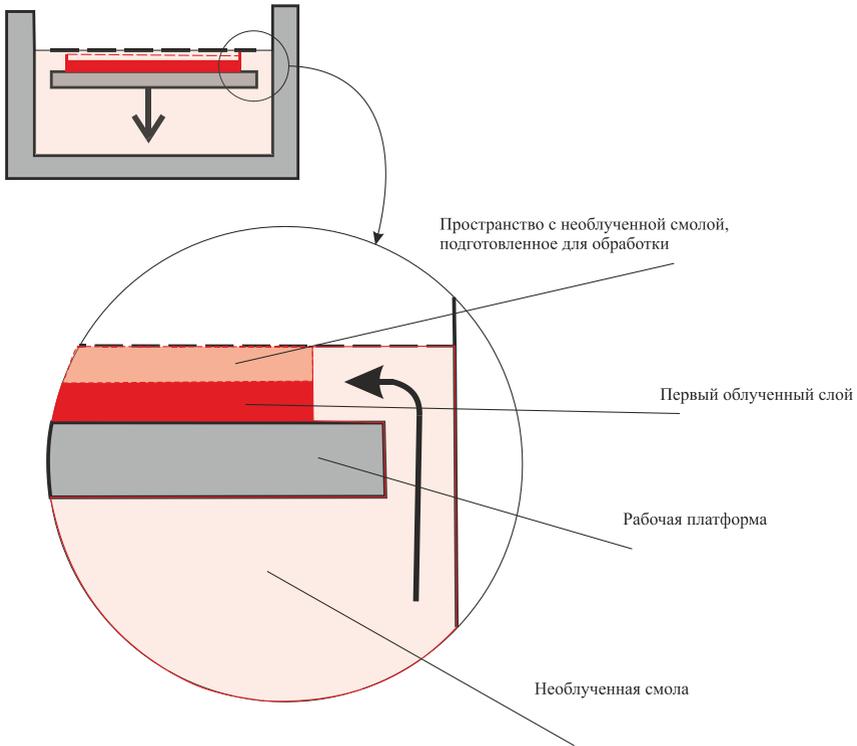


Рис. 6.10. Рабочее пространство принтера, печатающего сверху вниз

В ходе печати рабочая платформа опускается все глубже в ванночку. По завершении работы деталь окажется полностью погружена в смолу. Деталь затем достается из ванночки и снимается с рабочей платформы.

Подобно тому, как и у машин, работающих по предыдущей технике, первый слой является самым критичным в печати. Необходимо, чтобы этот слой успешно крепился к рабочей платформе.

Для печати сверху вниз важно равномерно покрыть смолой рабочую поверхность после каждого смещения рабочей поверхности вниз. Для этого машине нужно убедиться

в достаточном уровне вязкости, и зачастую принтеры это осуществляют с применением патентованных материалов. Некоторые машины используют щетку, распределяющую слой необработанной смолы по поверхности, одновременно с лазером, определяющим отношение поверхности смолы к рабочей поверхности.

Платформам необходимо медленно погружаться в смолу для предупреждения появления пузырьков воздуха, потому как это пагубно влияет на качество печати. Также платформы чаще всего делают перфорированными, чтобы уменьшить разрушительные силы, воздействующие на них. Сравнительные свойства принтеров, печатающих сверху вниз, приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Преимущества и недостатки принтеров, печатающих сверху вниз

Свойства	Описание
Преимущества	<p>Более быстрый процесс печати по причине того, что отпечаток не нуждается в отделении от рабочей поверхности после завершения каждого слоя.</p> <p>Силы, воздействующие на отпечаток, намного меньше, чем у принтеров, работающих снизу вверх.</p> <p>Оттого, что детали не нужно составлять под углом, они нуждаются в меньшем количестве поддержек.</p> <p>Такие принтеры считаются более надежными</p>
Недостатки	<p>Размеры машины больше, так как необходимо большее количество смолы.</p> <p>Толщина слоя смолы между поверхностью и верхом детали должна систематически контролироваться.</p> <p>Замена смолы является сложным процессом, а смена картриджей – дорогое занятие</p>

При полимеризации в ванночке критическим является расположение детали на рабочей платформе и выбор поддержек при печати. На рис. 6.11 показаны правильно напечатанные детали на SLA-принтере с еще не отделенными поддержками. На рис. 6.12 показаны два различных крепления детали на рабочей платформе.



Рис. 6.11. Детали, напечатанные на SLA-принтере, печатающем снизу вверх, с прикрепленными поддержками

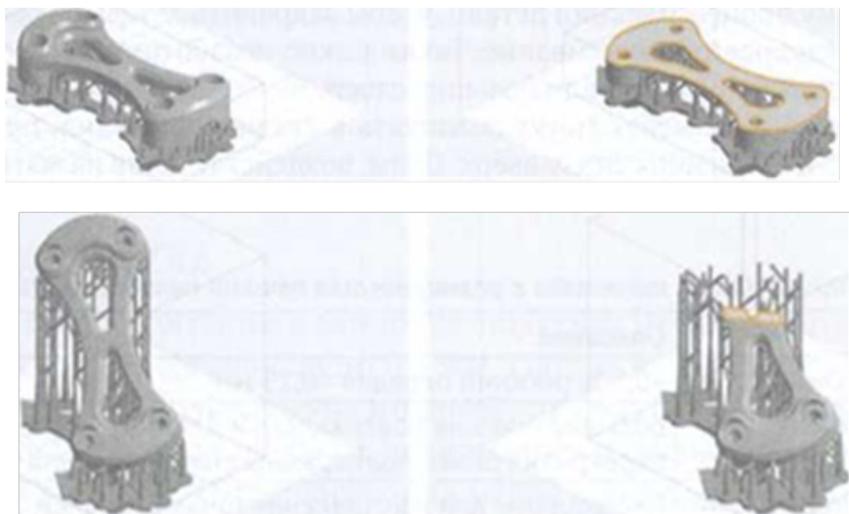


Рис. 6.11. Неверно расположенная деталь, демонстрирующая большую площадь поперечного сечения: *а* – напечатанная деталь; *б* – в процессе печати; правильное расположение детали с сокращенной площадью поперечного сечения: *в* – напечатанная деталь; *г* – деталь в процессе печати

6.3. Структуры поддержки при SLA-печати

Как почти во всех технологиях 3D-печати, при полимеризации в резервуаре используются структуры поддержки. Положение и количество поддержек сильно зависит от типа используемого принтера. Для принтеров, печатающих сверху вниз, требования к поддержкам аналогичны тем, которые предъявляются в FFF-печати для нависающих элементов и перемычек, нуждающихся в материале, который будет их поддерживать и позволит им быть точно напечатанными.

Для принтеров, печатающих снизу вверх, поддержка формируется сложнее. Большие горизонтальные поверхности (рабочие слои) могут оказаться под сильным воздействием во время отделения отпечатка от ванночки. Если стадия отделения окажется неудачной, печать может сорваться. С учетом этого детали печатаются под углом, и, следовательно, сокращение количества поддержек не является приоритетом.

6.4. Точность размеров при SLA/DLP печати

Одной из основных проблем, связанных с точностью деталей, изготовленных при помощи полимеризации в резервуаре, является скручивание, особенно свойственное большим плоским поверхностям. Под воздействием источника света каждый слой стягивается при отверждении. Когда один слой затвердевает на ранее отвердевшем (и стянувшимся) слое, между слоями появляется напряжение, в итоге появляется скручивание. Важно использовать поддержку для подверженных этому процессу секций детали, чтобы закрепить деталь на рабочей платформе и предупредить скручивание. Также важно позаботиться о расположении деталей и сокращении площади больших слоев.

Расхождения в размерах могут возникать в стадии отделения, применяемой в принтерах, печатающих снизу вверх. Силы, воздействующие на мягкий отпечаток, могут спровоцировать его изгибание. Это явление может нарастать по мере составления слоев. Характерные погрешности при SLA-печати приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

**Сводная таблица точности в размерностях печати
полимеризацией в ванночке**

Параметр	Описание
Погрешность размеров	$\pm 0,5$ % (нижний предел $\pm 0,15$ мм)
Сжатие/ искривление	Большие плоские поверхности и длинные неподдерживаемые перекрытия более подвержены стягиванию или искривлению
Требования по поддержкам	Необходимы для изготовления точных деталей

Смолы с высокими показателями гибкости (менее плотные) подвержены большому риску искривления в работе и могут не подойти для применения, когда необходима точность.

6.5. Материалы, использующиеся для SLA/DLP-печати

В отличие от FFF/FDM-печати полимеризация в резервуаре применяет реактопласты для изготовления деталей. Полимер поступает в форме вязкой жидкости и облучается лазером. Стоимость смолы может различаться в зависимости от применения, к примеру, стандартная смола стоит около 50 долл. США за литр, тогда как литьевая смола для высокодетализированной печати может стоить до 400 долл. США за литр. Для SLA/DLP-печати доступные цвета смол ограничены. Также фотополимерные смолы имеют ограниченный срок хранения (обычно год при правильном хранении).

При изготовлении деталей полимеризацией в ванночке крайне важно правильно облучить деталь УФ-светом. Эта процедура закрепит ее оптимальные свойства. Информация об оптимальном времени УФ-облучения предоставляется в спецификации смолы соответствующим производителем.

В табл. 6.4 приведены некоторые распространенные смолы для полимеризации в ванночке и их основные характеристики.

Таблица 6.4

Наиболее распространенные материалы для полимеризации в ванночке

Материал	Торговые марки	Характеристики
Стандартный	Formlabs Grey, VisiJet FTX Gray, Somos NeXt	Гладкая поверхность. Крошится
Прозрачный	Formlabs Clear, WaterClear Ultra, Accura ClearVue	Прозрачный
Литьевой	Moonray Castable Resin, VisiJet FTX Cast, DWS DC100, Accura CastPro	Низкий процент содержания остатков горения после выжигания
Крепкий/долговечный	Formlabs Tough Resin, Accura PEAK, Somos 9110, Accura Xtreme	Высокая плотность. Подобен на ABS или PP
Высокотемпературный	Somos ProtoTherm, Accura 48 HTR, VisiJet SL HiTemp, Formlabs High Temp Resin	Температурная сопротивляемость. Подходит для изготовления инструментов для литья и термоформования
Стоматологический	Detax Freeprint, VisiJet e-Stone, Formlabs Dental SG Resin	Биологически совместимый. Износостойкий. Дорогостоящий
Гибкий	Carbon 3D EPU 40, Formlabs Flexible Resin	Резинообразная гибкость. Не подходит для отпечатков, требующих высокой точности

6.6. Постобработка моделей, изготовленных на SLA/DLP принтерах

Принтеры для полимеризации в ванночке способны печатать детализированные отпечатки с размером элементов до 0,3 мм. Одним из ограничений этой технологии является то, что большинству моделей для печати требуется прикрепление поддержек. Они оставляют следы на поверхности и неровности. Поэтому рациональным будет располагать поддержки на менее видимой части модели.

Полимеризация в ванночке имеет широкий ряд возможностей финишной обработки, самые распространенные

из которых приведены в табл. 6.5. Правильно применяя методы постобработки, детали, изготовленные по этой технологии, можно обрабатывать до совершенно гладкой поверхности, характерной для деталей, изготовленных литьем под давлением (рис. 6.13).

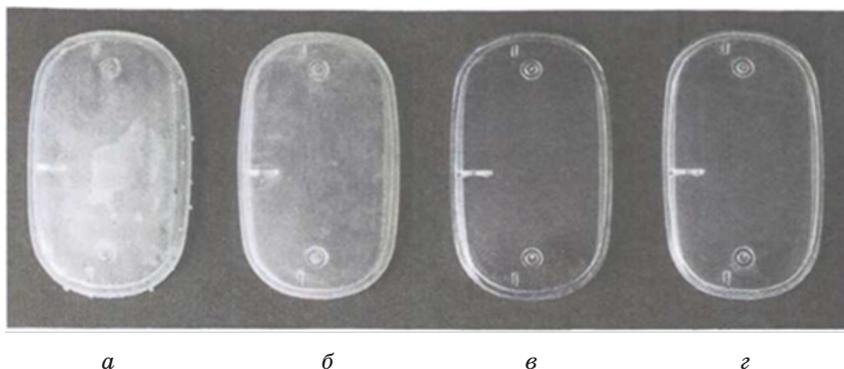


Рис. 6.13. Крышка корпуса электронного прибора из прозрачной смолы, показанная в нескольких стадиях постобработки: *а* – базовое удаление поддержек; *б* – мокрая полировка; *в* – нанесение акрилового лака, защищающего от ультрафиолета; *г* – полированная крышка

Таблица 6.5

Распространенные типы постобработки для печати полимеризацией в ванночке

Тип	Обработка	Описание
Обязательный	Удаление поддержек	Полимеризация в резервуаре всегда предполагает печать поддержек из того же материала, что и модель. Поддержка печатается как ряд башнеобразных структур, сужающихся на конце для облегчения удаления в дальнейшем. Поддержки, как правило, отламываются вручную или, отрезаются кусачками. После этого обычно на поверхности напечатанного остаются небольшие выступы

Окончание табл. 6.5

Тип	Обработка	Описание
Обработка поверхности	Шлифование/ мокрая шлифовка	Потому как поверхность изделия после печати полимеризацией в резервуаре получается гладкой, в шлифовке зачастую нуждаются только области, к которым была прикреплена поддержка. Рекомендуется наждачная бумага с зернистостью 600. Мокрая шлифовка нужна в тех областях, где видны линии печати, или там, где необходимо добиться такого же качества поверхности, как и в литевом прессовании
Эстетический	Покрытие минеральным маслом	Минеральное масло позволяет скрыть любые белые/светлые точки, придавая изделию приятный ровный вид поверхности. Обычно оно применяется после шлифования (не мокрого) и оставляет глянцевую поверхность. Такое покрытие хорошо подходит для механических деталей, уменьшает трение и смазывает соприкасающиеся поверхности
	Покраска с распылением	Такая покраска помогает скрыть линии слоев, что зачастую снимает необходимость шлифовки лицевой части модели. Также покраска защищает модель от пожелтения, ограничивая количество УФ-облучения. Обычно применяются цветные краски или прозрачный акрил. Не рекомендуется красить изделия, напечатанные из гибкой смолы
	Полировка	Полировка изделий после печати полимеризацией в резервуаре возможна, но применима в большинстве случаев к деталям с простой геометрией (в идеале к таким большим плоским поверхностям, как циферблаты часов или прозрачные корпуса). Это достаточно трудоемкий процесс, в котором необходимо продолжительно шлифовать поверхность рядом листов наждачной бумаги, постепенно повышая значение их зернистости (до 2000). Затем поверхность обрабатывается полировальным составом для пластика. Если все сделать правильно, то можно добиться полностью прозрачной поверхности для деталей, напечатанных из прозрачных смол

6.7. Преимущества и ограничения SLA/DLP-печати

Главными преимуществами печати полимеризацией в ванночке являются гладкая поверхность, высокая точность и детальность, которые эта технология может воплотить. Возможность создавать гладкую поверхность делает технологию SLA наиболее подходящей для изготовления прототипов для литья. По этой же причине можно часто встретить применение SLA в визуальных моделях, для которых желаемая гладкая поверхность (фигурки, корпуса, портативные продукты и т.д.). Полимеризация в ванночке также является одной из самых точных в размерах методов 3D-печати, идеально подходящей для изделий, усложненных деталями, в которых необходимо соблюдать точные погрешности и создавать замысловатые элементы (например, в ювелирной или стоматологической индустрии).

Самым серьезным ограничением SLA-печати выступают свойства фотополимеров, используемых для печати. Фотополимеры хрупкие, не обладают ударопрочностью и износостойкостью деталей, изготовленных литьем под прессом, что ограничивает их использование в качестве функциональных деталей. Детали, созданные при помощи технологии SLA/DLP, также имеют ограниченный срок службы. Они претерпевают потерю механических свойств с течением времени и приходят в негодность под прямыми лучами света. Для продления срока их службы применяют специальные покрытия. Только лишь из-за ограничения по материалам технологии полимеризации в ванночке не были широко использованы для функционального применения.

6.8. Промышленная и настольная печать полимеризацией в резервуаре

Как и у FFF/FDM-печати, основным различием между промышленной и настольной печатью полимеризацией в резервуаре является среда печати. Промышленные машины исполь-

зуют более контролируемую среду, чтобы лучше управлять поведением смолы во время печати, точку лазера малого размера или более высокое DMD-разрешение (а значит, способны выполнять более точное прототипирование деталей) и работают с более широкой номенклатурой материалов для печати.

К преимуществу технологии полимеризации в резервуаре относится масштабируемость. И хотя большинство настольных SLA-принтеров примерно одинаковы в размерах, промышленные машины значительно различаются. SLA-принтеры имеют очень мало ограничений при масштабировании печати (не считая увеличение времени печати). Это в свое время позволило создать одни из самых крупных 3D-принтеров, которые являлись именно SLA-машинами.

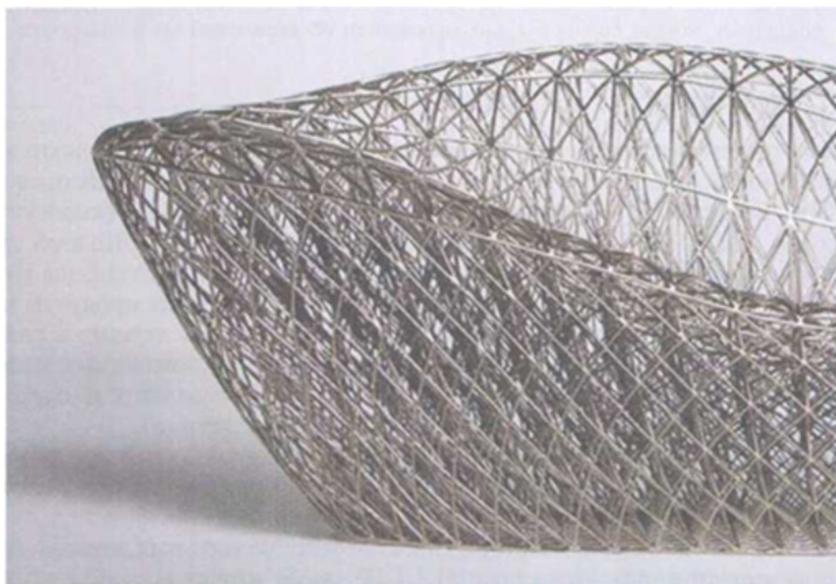


Рис. 6.14. На промышленных принтерах, печатающих полимеризацией в резервуаре, можно напечатать изделия самых больших объемов по сравнению с другими технологиями 3D-печати. Напечатанная кушетка, способная удержать человека массой до 100 кг

Большинство промышленных принтеров работают по конфигурации сверху вниз (потому как при работе снизу вверх в стадии отделения силы воздействия на изделие значительно возрастают при создании больших моделей) и печатают в больших резервуарах для смолы (что продемонстрировано размером детали на рис. 6.14).

Промышленные машины применяют более широкий ряд материалов, подходящих для специфичного проектирования, которые зачастую поставляются для конкретного принтера. Они обычно имеют небольшие различия в свойствах, что позволяет инженерам выбрать именно тот материал, который подойдет в конкретном случае.

Настольные принтеры могут изготавливать детали с точностью в 100–250 микрон, в то время как промышленные машины достигают точности изготовления в 10–30 микрон. Более высокие показатели точности отражаются на качестве поверхности напечатанных моделей.

Уровень точности и качество поверхности, которые достигаются при печати на настольных принтерах, позволяют использовать SLA/DLP-технологии для широкого применения. Для крупных же (полноразмерных прототипов) или детализированных изделий, которые нуждаются в высоком уровне точности (медицинских или стоматологических), или для средних объемов серийного производства (ювелирное дело) больше подходит печать на промышленных принтерах.

6.9. Распространенные области применения SLA/DLP-технологии

Изделия, созданные при помощи полимеризации в резервуаре, больше всего подходят для визуального представления и прототипирования, в которых необходимы гладкая поверхность и высокая точность. Некоторые из самых распространенных случаев применения печати полимеризацией в резервуаре представлены ниже.

Формы для промышленного литья. Гладкая поверхность, создаваемая по технологии полимеризации в резервуаре, зачастую нужна в производстве прототипов для промышленного литья. Эта технология позволяет дизайнерам быстро напечатать новый вариант для рассмотрения без необходимости предварительного инвестирования в дорогостоящие инструменты.

Ювелирное дело (литье по выплавляемой модели). Технология полимеризации в резервуаре регулярно используется в ювелирном производстве для литья по выплавляемой модели. Точность и замысловатые элементы, которые технология может воспроизвести, вместе с гладкостью поверхностей получаемых моделей делают ее идеально подходящей для ювелирной промышленности.

Стоматологическое использование. Стоматология также переняла печать полимеризацией в резервуаре для ряда применений (рис. 6.15, а). Технология используется для производства моделей, хирургических шаблонов, инструментов, коронок и мостовидных протезов. Способность произвести изделия с высокой точностью и детализированностью и количество доступных материалов (в частности, стоматологические и литьевые смолы) позволяют назвать технологии полимеризации в резервуаре по-настоящему прорывными для стоматологической промышленности.

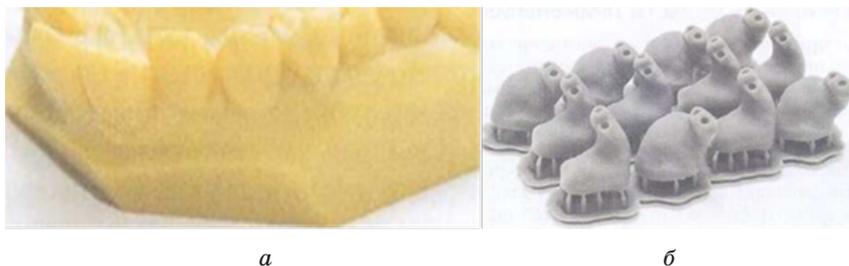


Рис. 6.15. Стоматологическая модель, напечатанная с применением 3D-сканирования ротовой полости пациента (а); партия заказных слуховых аппаратов, напечатанных на SLA/DLP-принтере (б)

Слуховые аппараты. Еще одно успешное применение полимеризации в резервуаре связано с интенсивными разработками, благодаря которым сейчас более 10 000 000 людей носят слуховые аппараты, изготовленные при помощи SLA/DLP-технологий. Возможность печатать обтекаемые и органичные поверхности (рис. 6.14, б), необходимые для слуховых протезов, по цене, более низкой, нежели при помощи традиционных техник, привела к тому, что сегодня примерно 97 % всех слуховых аппаратов изготавливаются при помощи печати полимеризацией в резервуаре.

6.10. Новые разработки в SLA/DLP-технологиях

Непрерывная прямая световая проекция (Continuous Direct Light Processing, CDLP) производит детали по методу, подобному DLP, но полагается на продолжительное движение рабочей платформы по оси Z (вверх). Одна компания, которая коммерчески использует эту технологию 3D-печати, называется Carbon. Технология этой компании Digital Light Synthesis, которая подобна CDLP, реализуется процессом, называемым непрерывной проекционной печатью с жидким интерфейсом (Continuous Liquid Interface Production, CLIP).

Принтеры Carbon M-Series применяют фотополимер вместе с кислородопроницаемым окошком для создания «мертвой зоны» необлученной смолы на дне ванночки. В итоге получается, что дно модели никогда не прилипает к ванночке и больше нет нужды в стадии отделения, необходимой при работе большинства SLA/DLP-принтеров, печатающих снизу вверх. Это значительно ускоряет процесс печати, так как нет необходимости останавливаться и отделять модель от платформы после создания каждого слоя. Также это означает, что изделия получают внутренне изотропными благодаря тому, что слои не создаются независимо во время печати. Принтеры Carbon печатают исключительно снизу вверх (рис. 6.16).



Рис. 6.16. 3D-принтер Carbon M2

Контрольные вопросы

1. Расскажите о технологиях 3D-печати, которые используются при полимеризации в резервуаре.
2. Расскажите о технологиях 3D-печати с помощью стереолитографии.
3. Расскажите о технологиях 3D-печати с помощью светодиодной проекции.
4. Приведите характеристики SLA/DLP-принтеров.
5. Какие преимущества и какие недостатки у печати снизу вверх?

6. Какие преимущества и какие недостатки у печати сверху вниз?

7. Опишите структуру поддержек при SLA/DLP-печати.

8. Как соблюдается пространственная точность при SLA/DLP-печати?

9. Какие материалы применяются при печати с помощью стереолитографии?

10. Каковы основные преимущества и ограничения SLA/DLP-печати?

11. Назовите наиболее распространенные области применения SLA/DLP-печати.

ГЛАВА 7. Технология плавки порошков (полимеры) – SLS

Технология плавки порошков в рассматриваемой классификации показана на рис. 7.1. В технологиях плавки порошков применяется тепловой источник, чтобы вызвать сплавление частиц порошка в конкретном положении в области печати для создания твердой детали. Большинство технологий плавки порошков используют механизмы подачи и разравнивания порошка по мере составления детали, в результате чего завершенная деталь оказывается заключенной в порошке, который используется для печати.

Эта глава посвящена применению технологии плавки полимерных порошков. В следующих главах будет рассмотрена эта технология применительно к металлическим порошкам.

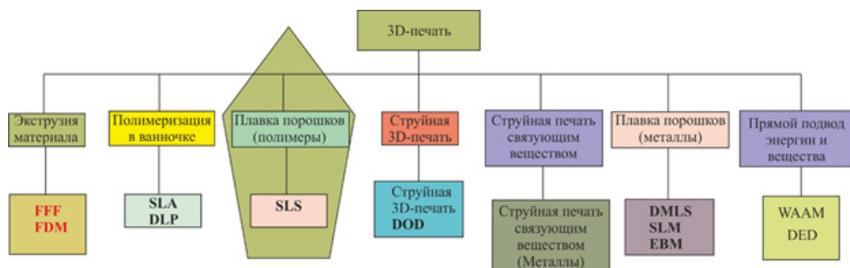


Рис. 7.1. Выделение SLS 3D-печати в общей классификации 3D-печати

7.1. Технологии плавки порошков, изготовленных из полимеров

В контексте использования технологии 3D-печати с использованием плавки полимерных порошков для изготовления деталей на этот процесс ссылаются как на выборочное лазерное спекание (Selective Laser Sintering, SLS) или просто лазерное спекание (LS).

Процесс SLS-печати начинается с прогрева лотка с полимерным порошком без достижения температуры плавления полимера. Распределитель помещает очень тонкий слой порошкового материала (обычно 0,1 мм) на рабочую платформу. Газовый лазер начинает сканировать поверхность. Лазер выборочно плавит порошок и отверждает секции, расположенные в слое поперечного сечения изделия (рис. 7.2). Как и в SLA, лазер направляется в правильное положение двумя сканирующими зеркалами (рис. 7.3). Когда вся секция обработана, рабочая платформа спускается на одну толщину слоя.

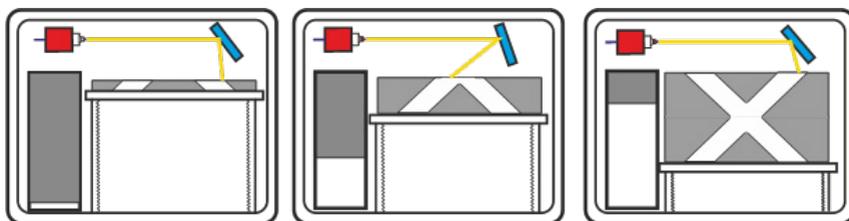


Рис. 7.2. Принципиальная схема процесса SLS-печати

Распределитель размещает новый слой порошка поверх недавно обработанного слоя, и лазер снова начинает сканировать и плавить следующую секцию изделия поверх ранее затвердевшей. Этот процесс повторяется, пока изделие не будет изготовлено полностью.

Нерасплавленный материал остается на своем месте, чтобы поддерживать модель во время ее производства слой за слоем, что позволяет не использовать поддерживающие структуры. Это одно из самых главных преимуществ SLS-печати по сравнению другими технологиями 3D-печати.

В итоге получается лоток, наполненный порошком и изготовленными деталями. Так как таким образом можно создать несколько изделий одновременно, то этот процесс можно применять для производства партиями. Большая часть исходного порошка остается пригодным для повторного использования, поэтому полное заполнение лотка позволит использовать боль-

ше материала и сократить расходы. Положение и размещение моделей подстраивается под степень заполнения лотка во время каждой печати.

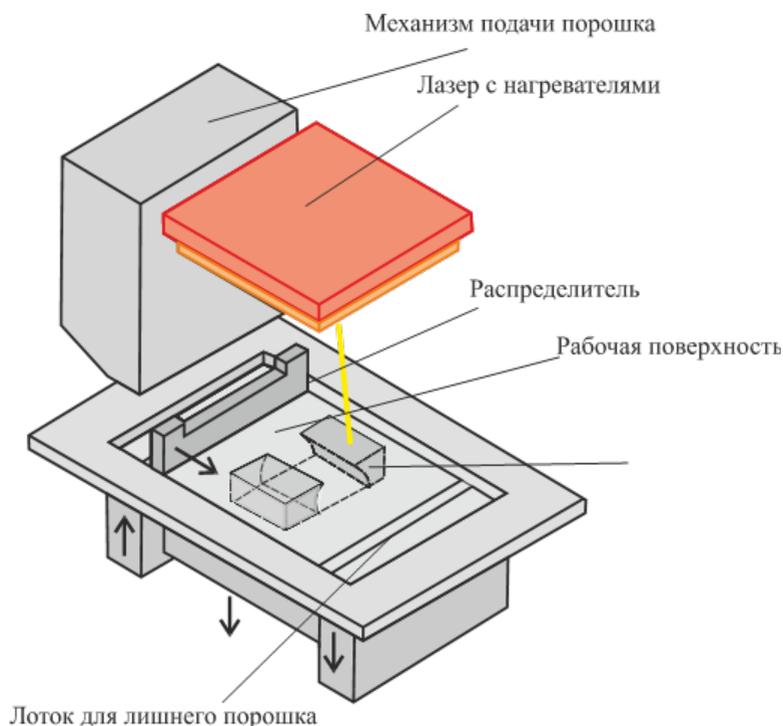


Рис. 7.3. Принципиальное изображение SLS-принтера

По завершении печати и при охлаждении лотка и моделей лоток открывается. Целые модели извлекаются из нерасплавленного порошка и очищаются воздушным компрессором и струйной обработкой абразивным материалом. Нерасплавленный порошок собирается и используется повторно. Изделия получаются готовыми к применению или проходят постобработку для улучшения внешнего вида. Конечно, существует некоторое ограничение на повторное использование полимерного порошка, о чем будет сказано ниже.

7.2. Характеристики SLS-принтеров

7.2.1. Параметры SLS-принтера

Существует множество параметров, определяющих качество печати на SLS-принтерах. Размер точки луча лазера и толщина слоя в основном определяют точность печати и качество поверхности изделия. Большинство SLS-изделий печатаются со стандартной толщиной отверждаемого слоя в 100 микрон (0,1 мм).

Геометрия частиц порошка и их размер также влияет на свойства конечного продукта. Чем меньше дисперсность порошка, тем более гладкой получается поверхность изделия, но появляются проблемы с переносом и распылением во время распределения нового слоя. Крупный порошок легко переносится, но неблагоприятно влияет на качество поверхности и допустимые размеры элементов.

Поверхность SLS-изделий обычно матовая и зернистая на ощупь (рис. 7.4). В отличие от большинства технологий 3D-печати лучшее качество приобретает нижняя поверхность изделия.



Рис. 7.4. Деталь, напечатанная на SLS-принтере, с характерным белому нейлону внешним видом.

При приближении изделия наблюдается зернистость поверхности

Оптимальные настройки принтера обычно задаются компанией – производителем принтеров. Поэтому принтеры автоматически подстраиваются под тип материала, заданный оператором. SLS-принтеры автономно работают во время фаз разогрева, печати и охлаждения, участие оператора при этом необходимо только для загрузки и разгрузки лотков и для мониторинга печати.

7.2.2. Наполнение лотков в SLS-принтерах

Важным фактором при планировании SLS-печати является эффективная группировка моделей в доступном объеме печати. Все SLS-принтеры имеют фиксированный размер лотка, в котором печатаются модели. Высота лотка определяет время печати. Если, имея высоту лотка в 300 мм, оператор настроит толщину слоя на 100 микрон, то цикл печати будет состоять из 3000 слоев ($300/0,1$) независимо от количества деталей и полноты используемого объема.

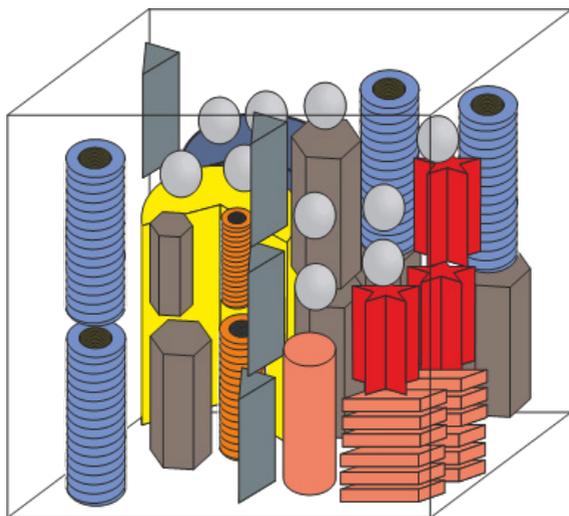


Рис. 7.5. Пример использования ПО для оптимизации заполнения лотка

По этой причине наиболее рациональным будет максимально плотно заполнение лотка. Принтеры поставляются с ПО, которое анализирует печатаемые модели и выявляет оптимальное расположение в объеме лотка, чтобы убедиться в том, что он настолько плотно заполнен моделями, насколько это возможно. С другой стороны, операторы и сами могут расположить модели с помощью программ (рис. 7.5). Многие операторы пользуются обеими возможностями. Это увеличивает время подготовки печати SLS-изделий, потому как изготовителям придется ждать начала печати, пока программа полностью не заполнит полезный объем лотка.

Лотки обычно наполняются до 5 мм от края. Средний объем печати чаще всего составляет 300×300×300 мм, большие машины располагают объемом до 750×550×550 мм.

7.2.3. Адгезия слоев при SLS-печати

Как и все методы 3D-печати, SLS создает изделия послойно, слой за слоем. Адгезия между слоями крайне важна для достижения надежности и целостности изделия. Предварительный разогрев порошка для печати, после которого следует воздействие сплавляющим лазером, приводит к сплавлению частиц в различных направлениях. В итоге получаются практически однородные изделия. Свойства продукта SLS из стандартного PA12 отображены в табл. 7.1. Эти данные соответствуют материалам большинства поставщиков.

Таблица 7.1

Прочность деталей из PA12, напечатанных по технологии SLS, в разных направлениях

Показатель	X-Y-направление	Z-направление
Прочность на растяжение, МПа	48	42
Модуль растяжимости, МПа	1650	1650
Удлинение при разрыве, %	12	4

Изотропия является преимуществом SLS-изделий, созданных из одного материала, в то время как добавление сложных частиц (наподобие стекла или углерода) придаст модели свой-

ства анизотропности (иногда до 40 % в направлении печати). Это нужно учитывать при выборе SLS-материалов для конкретного применения.

7.3. Точность размеров при SLS-печати

Как и в FFF/FDM-процессе, SLS-изделия тоже подвержены стягиванию и искривлению во время печати. При сплавлении каждого слоя происходит его наплавление на предыдущий остывающий слой. Охлаждение провоцирует сужение нового слоя, вытягивая кверху нижележащий слой. В худшем случае деталь может скрутиться кверху и столкнуться с распределителем во время фазы распределения порошка. По этой причине рекомендуется располагать большие плоские детали под углом или вертикально, чтобы сократить площадь поперечного сечения каждого слоя.

Для предупреждения возможного искривления и сокращения моделей во время печати SLS-принтеры применяют подогрев, который увеличивает температуру порошка почти до температуры плавления. Тем не менее это способно привести к перепадам температур в больших SLS-моделях, в то время, когда нижние слои уже охладились, а верхние слои еще нагреты до больших температур. Погрешности при SLS-печати показаны в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Сводная таблица точности SLS-печати

Параметр	Описание
Погрешность пространственных размеров	$\pm 0,3$ % (нижний предел $\pm 0,3$ мм)
Сжатие/искривление	Сжатие обычно происходит в 3,0–3,5 % случаев, но большинство поставщиков услуг SLS-печати ссылаются при этом на причины, деформаций находятся в фазе подготовки к 3D-печати
Особые требования по поддержкам	Не требуются

Одним из ключевых моментов в SLS-печати является стадия охлаждения. Чтобы избежать вероятности искривления, модели оставляют постепенно остывать в лотке (иногда до 50 % от всего времени печати) перед извлечением.

7.4. Материалы, применяемые при SLS-печати

Лучше всего для технологии плавки порошков подходят материалы с низкой теплопроводностью, так как они показывают более стабильное поведение на этапе спекания. В лазерном спекании полимеров для изготовления моделей почти всегда применяется только один полимер – полиамид (PA). Полиамидным изделиям свойственна продолжительная стабильность и хорошая химическая устойчивость, а самым распространенным промышленным полиамидом является нейлон. Стоимость SLS-порошка может варьироваться в зависимости от материала, стандартный нейлон PA12 стоит 50–60 долл. США за килограмм. SLS-порошки в основном поставляются в белом, сером или черном цвете, но изделия из них можно красить в большое количество различных цветов. Как и во всех типах производства, работающих с порошками, при печати с мелкозернистыми порошками нужно позаботиться о средствах, необходимых для обращения с любыми формами легкой порошковой пудры. Частицы, которые могут рассеяться в воздухе, провоцируют респираторные проблемы в том случае, если не были предприняты меры безопасности. Некоторые материалы для SLS-печати приведены в табл. 7.3.

Чтобы улучшить механические свойства, тепловую/химическую устойчивость SLS-моделей или придать им другой внешний вид, нейлон можно смешивать с иными материалами, такими как алюминий, стекло, углерод и графит, формируя композитный порошок.

Процесс SLS-печати позволяет использовать повторно часть не расплавленного порошка без значительных потерь в механических свойствах.

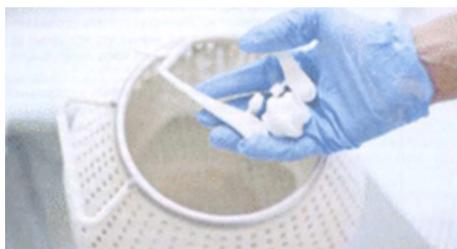
Таблица 7.3

Распространенные SLS-материалы

Материал	Торговые марки	Характеристики
Нейлон 12	EOS Baiaпce 2200, 30 Systems Dura-Form PA	Бюджетный. Хорошие механические свойства. Матовая рыхлая поверхность
Алюмид	EOS Alumide	Металлический внешний вид. Термическая сопротивляемость
PA-GF (наполненный стеклом)	3D Systems Dura-Form ProX GF, EOS PA 3200 GF	Высокая прочность. Хорошее отношение прочности к весу. Износостойкость

7.5. Постобработка изделий, полученных при SLS-печати

SLS-изделия печатаются с высокой размерной точностью, обладают большой прочностью и зачастую используются как конечные изделия. Из-за природы процесса плавки порошков поверхность SLS-моделей приобретает зернистый внешний вид. Постобработка SLS-изделий часто применяется (рис. 7.6) с использованием ряда техник и типов обработки поверхности, приведенных в табл. 7.4.



a



б

Рис. 7.6. Демонстрация постобработки SLS-изделий:
a – удаление порошка; *б* – галтование

Таблица 7.4

Распространенные типы постобработки для SLS

Тип обработки	Обработка	Описание
Обязательный	Удаление порошка	Изделия извлекаются из камеры печати, и весь порошок удаляется с изделия сжатым воздухом. Поверхность подвергается абразивной обработке пластиковой дробью для удаления оставшегося после плавления порошка, прилипшего к поверхности. Поверхность по природе технологии рыхлая, подобная среднезернистой наждачной бумаге (полуматовая, слегка зернистая поверхность). Такая поверхность обладает лучшими качествами для покраски и лакировки
Обработка поверхности	Галтование	Для достижения более гладкой текстуры поверхности изделия можно галтовать в барабанах с полирующими материалами или на вибрационном станке. В барабан помещается керамическая крошка, которая колеблется, соприкасаясь с объектом и постепенно истирая его внешнюю поверхность до полированного вида. Этот процесс оказывает влияние на размеры изделия и скругляет острые края. Такая обработка не рекомендуется для детализированных изделий и замысловатых элементов
Эстетический	Окрашивание	Самый быстрый и экономный способ покрыть SLS-модели цветом – это применить красители. Пористая структура SLS-изделий идеально подходит для окрашивания. Изделие погружается в горячую ванну. Использование ванны с красителем помогает полностью покрасить внутренние и внешние поверхности. Обычно краситель проникает на глубину около 0,5 мм, а это значит, что исходный цвет изделия обнажится только после продолжительного изнашивания

Окончание табл. 7.4

Тип обработки	Обработка	Описание
	Покраска и лакирование	<p>SLS-изделия можно покрывать аэрозольной краской и/или лаком (глянцевым либо прозрачным). С помощью лакирования можно добиться различных типов поверхности, таких как поверхности с выраженным глянцем или металлическим отблеском. Покрытие лаком также улучшит показатели износостойкости, поверхностной твердости, водонепроницаемости и защитит изделие от отпечатков и пятен. С учетом пористой природы SLS-отпечатков для получения конечной поверхности рекомендуется применять лаковое покрытие в четыре-пять тонких слоев вместо одного толстого.</p> <p>Это ускоряет высыхание и не позволяет краске или лаку оставлять подтеки</p>
Функциональный	Повышение водонепроницаемости	<p>Правильно сплавленные SLS-детали будут обладать некоторой степенью водонепроницаемости. Для усиления этого свойства можно применять различные покрытия. Наилучшие результаты показало применение силиконов и винилакрилатов. Полиуретан не рекомендуется для использования в качестве водонепроницаемого покрытия SLS-изделий. Если необходима полная водонепроницаемость, то рекомендуется покрытие полным погружением</p>
	Покрытие металлом	<p>SLS-детали можно гальванизировать. Нержавеющую сталь, медь, никель или их комбинации, золото и хром можно помещать на поверхность деталей, чтобы улучшить их прочность или проводимость. Изделия очищаются, и затем на их поверхность помещают слой проводящего материала. После этого изделия проходят традиционные процедуры покрытия металлом. Пластик может служить структурой поддержки или быть термически удален, чтобы получились изделия с тонкими стенками от 25 до 125 микрон в толщину</p>

7.6. Преимущества и ограничения при SLS-печати

Лучшим образом SLS-печать подходит для производства прочных функциональных деталей со сложной геометрией. С учетом изотропных свойств и высокой точности печати (хотя и не такой, как при полимеризации в резервуаре или струйной 3D-печати) SLS-технологии часто находят применение в производстве изделий для конечного использования. Еще одним преимуществом SLS является то, что печать изделий не требует наличия поддерживающих структур. А это значит, что поддержки после печати не нужно удалять, и изделие в итоге приобретает соответствующий внешний вид всей поверхности в силу отсутствия неблагоприятного воздействия, оказываемого на поверхность, соприкасающуюся с поддержками, как в FFF- и SLA-печати.

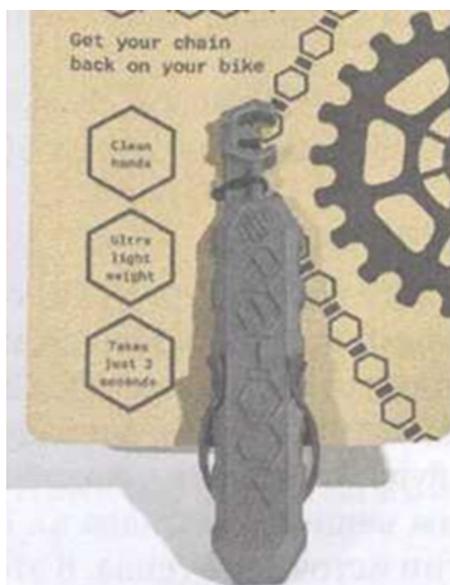


Рис. 7.7. SLS-печать была применена для среднесерийного производства захватов для велосипедной цепи

Самым большим недостатком SLS-печати является то, что стоимость промышленных SLS-принтеров достигает около 250 тыс. долл. США, а для обслуживания таких принтеров требуются высококвалифицированные операторы и усовершенствованные меры по обращению с материалом. По этой причине время подготовки печати может оказаться большим, чем в других технологиях 3D-печати.

Немалую часть подготовки к SLS-печати занимают стадии разогрева и охлаждения, что приводит к тому, что печать моделей размерами 300×300×300 мм может длиться около 20–24 часов плюс дополнительные 12 часов для охлаждения изделий перед началом постобработки.

Сейчас многие машины позволяют извлекать лотки для порошка, чтобы разогреть/остудить их вне машины, что повышает эффективность. После печати SLS-модели обладают зернистой матовой поверхностью, и для устранения этой зернистости требуется дополнительная постобработка, что также увеличивает общее время изготовления детали.

7.7. Наиболее распространенные области применения SLS-печати

Многосторонность SLS-процессов открывает технологии возможности применения в различных областях. Некоторые наиболее общие способы применения обсуждаются далее.

7.7.1. Изготовление функциональных деталей

Наиболее важным преимуществом SLS-печати является возможность вовлечения в процесс прочных, функциональных материалов. Из-за этого SLS часто применяется для производства деталей, которые будут подвержены большим нагрузкам при их использовании по назначению. Технология SLS позволяет работать со сложной геометрией, которую можно воспроизвести из хорошо известных материалов, например из PA12.

7.7.2. Особенности мелкосерийного производства изделий

Технология SLS-печати предоставляет возможность бюджетного мелкосерийного производства функциональных деталей для выверения их конструкции и производительности. Благодаря тому, что SLS-печать всегда происходит в полностью запрограммированной лотке, целый набор деталей может быть изготовлен за один ход, что позволяет достичь экономии за счет объема печати изделий заданных размеров (меньше теннисного мяча), как на рис. 7.7.

7.7.3. Печать сложных каналов (с полым профилем)

Природа SLS-печати позволяет создавать такие изделия с полым профилем, которые невозможно изготовить с помощью технологий, использующих поддержки. Технология SLS-печати идеально подходит для мелкосерийного производства сложных систем каналов и трубопроводов (рис. 7.8). В отсутствие традиционных проектных ограничений SLS-печать скорее приспособлена к созданию изделий для узкого применения, чем для широкого производства.



Рис. 7.8. Изготовленная с помощью SLS-печати функциональная система каналов, применяемая в автоиндустрии

7.8. Перспективы новых разработок в SLS-технологиях

Компания Hewlett-Packard не так давно начала заниматься 3D-печатью, представив их собственную технику после почти десятилетних исследований и разработок. Несмотря на то что их технология слегка отличается от SLS, ее применение аналогично, поэтому она и представлена здесь.

К тому же многие компании работают над настольной технологией SLS-печати, новичком среди которых выступили Formlabs вместе с их SLS-принтером Fuse 1.

7.9. Печать с помощью мультиструйной плавки – HP

Принтер мультиструйного сплавления компонентов (Multi Jet Fusion, MJF) от HP печатает методом, подобным технологиям плавки порошков, но с добавлением еще одной стадии к процессу: стадии использования специального компонента для обозначения (детализации) области сплавления порошка. Сначала порошок помещается на рабочую область. Затем компонент детализации выборочно применяется к тем участкам, где частицы будут сплавлены, подобно тому, как это реализуется в струйной печати связующим веществом (будет рассмотрена далее). Компонент спекания совершенствует поглощение энергии теплового источника. В это же время применяется локализованный компонент детализации. Он сокращает объем плавки на краях модели, для того чтобы получить элементы с четкими и гладкими краями. Рабочая область затем подвергается тепловому воздействию для спекания и скрепления частиц порошка. Тепловой источник линейно обрабатывает печатаемую модель, вместо того чтобы делать это точечно. Затем процесс повторяется слой за слоем, пока полное составление модели не будет завершено.

Считается, что MJF-принтер печатает на 25 % быстрее по сравнению с традиционными SLS-принтерами благодаря

значительному сокращению времени охлаждения и способу доставки тепловой энергии. Будущие поколения принтеров HP также обещают выпускать способными к полноцветной печати моделей, основанной на цвете связующего, помещаемого на порошок (как в струйной печати связующим веществом).

Скорость печати принтера вместе со способностью создавать функциональные полимерные детали с хорошими механическими свойствами выдвинет MJF от HP в разряд конкурентоспособных решений для мелко- или среднесерийного производства (рис. 7.9).



Рис. 7.9. Скобы и корпус двигателя на электрическом скейтборде, напечатанные на принтере HP 304200

7.10. Настольные SLS-принтеры Shareboot SnowWhite, Sintarec, Sinterit и Formlabs Fuse 1

В число недавних разработок, позволяющих вывести на рынок конкурентоспособные настольные SLS-решения, входят Shareboot SnowWhite, Sintarec S1, Sinterit Lisa и самая последняя – Formlabs Fuse 1 (рис. 7.10).

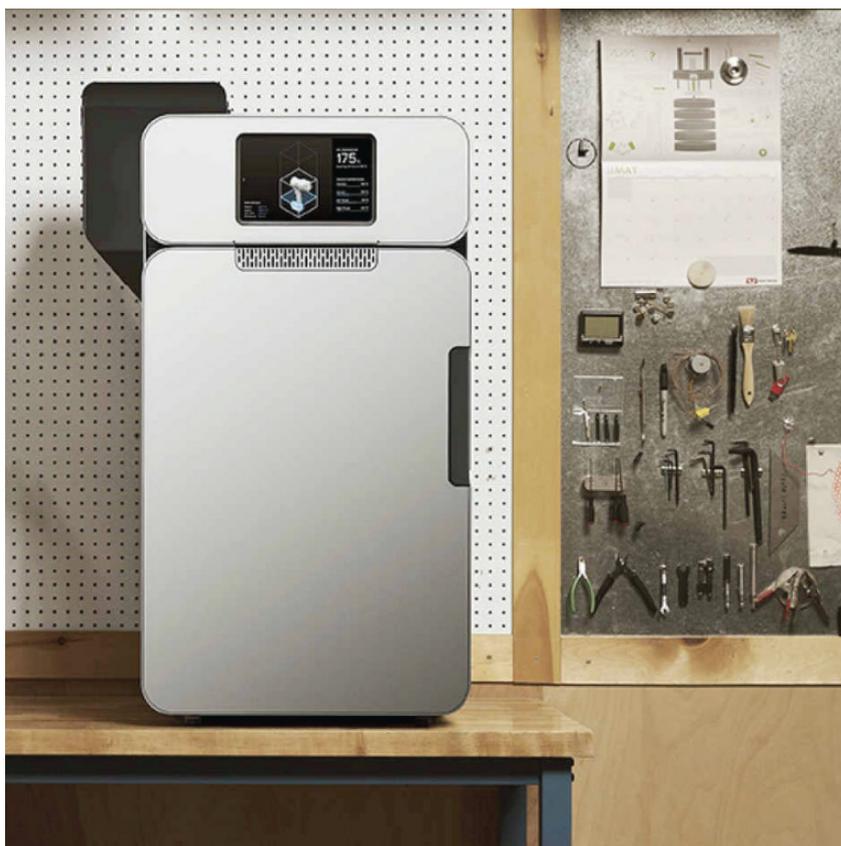


Рис. 7.10. Настольный SLS-принтер Formlabs Fuse 1

Отличительной чертой этих SLS-принтеров настольных размеров является применение волоконных лазеров, которые требуют меньших затрат и энергии, чем углекислые лазеры, используемые в машинах от таких производителей, как 3D Systems.

И хотя эти технологии потенциально многообещающие, на данный момент слишком рано обсуждать влияние этих принтеров на 3D-индустрию в целом.

Заметим, что порошковый материал в процессе SLS становится отходом после прохождения нескольких производственных циклов, поскольку материал не используется для производства продукта и подвергается термодинамической деградации. Стоимость производства порошкового материала является основной статьей затрат в процессе SLS. Устойчивый метод использования этих отходов в FDM – это их преобразование в филаменты. Они могут даже обеспечить лучшую отделку продукта при FDM, поскольку порошковый материал представляет собой высококачественный полимер, используемый в SLS. С учетом всех необходимых инвестиций и затрат на эксплуатацию предлагаемая методология обеспечивает устойчивое и экономичное решение, если SLS и FDM объединены [232]. В работе [233] авторы представили использование трех различных типов термопластов (ABS, PLA и HIPS) с немного разными механическими и термическими свойствами для производства мультиматериалов с использованием FDM. Изготовленные мульти-материалы обладают лучшими механическими свойствами, чем однокомпонентные/базовые полимерные материалы. Авторы заявили, что будущее AT – это мультиматериалы, способные обеспечить устойчивые решения с улучшенными механическими свойствами, которые удовлетворяют потребности потребителя.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о технологии плавки полимерных порошков.
2. Что такое выборочное лазерное спекание?
3. Поясните принципиальное устройство SLS-принтера.
4. Расскажите об основных характеристиках SLS-принтеров и их особенностях печати.
5. Какие материалы применяются при SLS-печати?
6. Какие существуют особенности постобработки изделий после SLS-печати?
7. Какие основные области применения SLS-печати?

ГЛАВА 8. Краткое описание технологии струйной 3D-печати (DOD)

Технология струйной печати в рассматриваемой классификации показана на рис. 8.1. Часто струйную 3D-печать часто сравнивают с двумерной печатью красками. Модели по данной технологии послойно изготавливаются с применением фотополимеров или капель смолы, которые отвердевают под воздействием света. Особенности процесса струйной 3D-печати позволяют наносить на одно и то же изделие несколько видов материалов. Это свойство часто применяется для составления поддерживающих структур из материалов с различными свойствами во время печати.

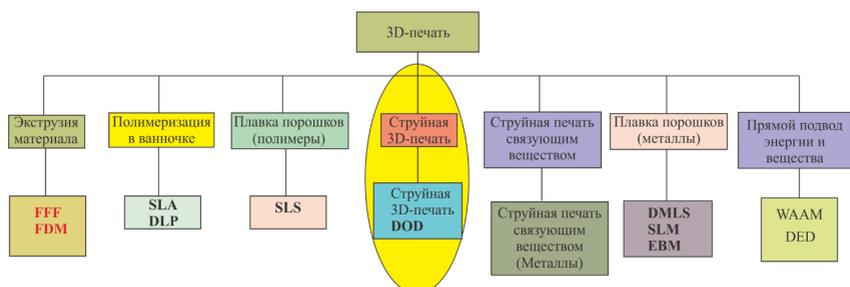


Рис. 8.1. Выделение SLS 3D-печати в общей классификации 3D-печати

8.1. Технологии струйной 3D-печати

Принтеры для струйной 3D-печати работают подобно обычным струйным принтерам, но вместо одного слоя чернил печатается множество слоев один поверх другого для создания цельного изделия. Печатающая головка принтера впрыскивает сотни крошечных капель фотополимера и облучает их ультрафиолетовым светом. После размещения и облучения слоя рабочая платформа спускается на одну толщину слоя, и процесс повторяется, пока не будет составлено все изделие.

В отличие от многих технологий 3D-печати, которые размещают, облучают или сплавляют материал печати по технологии точечного покрытия (единственная точка следует по маршруту для покрытия всей области поперечного сечения, за исключением MJF-технологии), операции струйной 3D-печати помещают материал на необходимую поверхность с постоянным расходом (рис. 8.2). По этой причине принтеры струйной 3D-печати способны печатать множество деталей за один ход, не изменяя скорость печати. Если детали правильно расположены и работа каждого линейного хода печати оптимизирована, то струйная 3D-печать позволяет создавать изделия намного быстрее, чем с помощью других технологий 3D-печати.

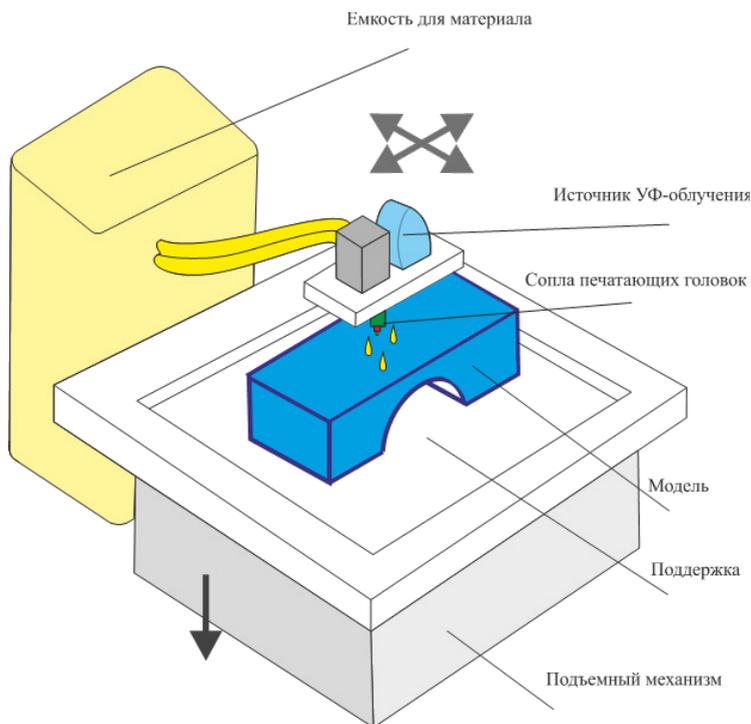


Рис. 8.2. Принципиальная схема принтера струйной 3D-печати

Процессы струйной 3D-печати нуждаются в поддержках, которые печатаются из растворимого материала одновременно с изделием, а затем удаляются в стадии постобработки. Струйная 3D-печать – одна из немногих технологий, которая может предложить одновременное применение множества материалов и полноцветную печать. Последовательность появления детали при струйной 3D-печати показана на рис. 8.3.

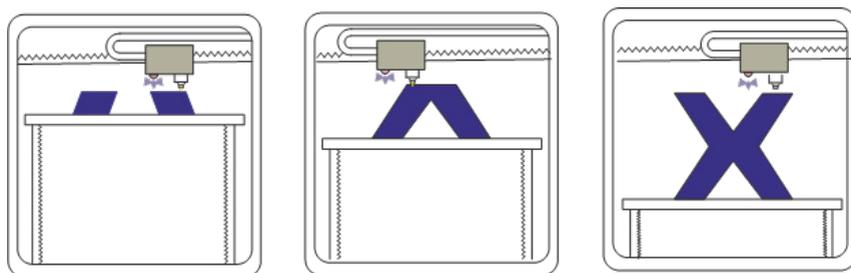


Рис. 8.3. Принципиальная схема процесса струйной 3D-печати

8.2. Метод печати – подача по требованию

Принтеры, работающие по технологии подачи по требованию (Drop On Demand, DOD), используют две печатающие головки: одну для размещения материала печати (обычно воскообразного) и другую для растворимого материала поддержки (рис. 8.4). Подобно другим АТ-технологиям, DOD-печать следует определенному маршруту и послойно размещает материал, за несколько перемещений составляя секции поперечного сечения модели (в отличие от линейного размещения в технологии струйной 3D-печати).

DOD-принтеры также применяют летучий резец, который снимает тонкий слой с рабочей области после изготовления каждого слоя для обеспечения идеально ровной поверхности перед печатью последующего слоя. Технология DOD обычно используется для производства воскообразных форм для ли-

тъя по восковым моделям / по выплавляемым моделям и для изготовления моделей.



Рис. 8.4. Растворимый материал поддержки (*а*), охватывающий выплавляемую форму для литья при высокоточном производстве сложных элементов; восковое кольцо после удаления поддержек (*б*)

По причине того, что DOD чаще применяется для производства литейных моделей, останавливаться на этой технологии далее не будем.

8.3. Параметры принтеров, применяемых при струйной 3D-печати

Принтеры струйной 3D-печати впрыскивают материал печати или поддержки для создания изделий. Размер капли (напрямую связанный с диаметром сопла печатающей головки принтера) и толщина слоя влияют на качество поверхности и размер наименьших элементов изделия. Струйная 3D-печать является одной из самых точных форм 3D-печати и способна производить изделия с толщиной слоя 16 микрон и даже меньше, что позволяет создавать очень гладкую поверхность. Для предупреждения засорения и закупоривания печатающей головки из-за малого диаметра сопла важно своевременно обслуживать головку. Обычно машины оснащают системами, которые чистят сопла, или опциями уведомления о необходимости очистки.

Также важно, чтобы материал печати пребывал в жидкой форме, для того чтобы успешно впрыснуть его на рабочую область. Многие машины струйной 3D-печати разогревают смолу до оптимальной температуры (обычно около 30–60 °С), чтобы контролировать текучесть фотополимера во время печати.

Как и в SLA- и SLS-принтерах, машины струйной 3D-печати автоматически подстраивают параметры, основываясь на свойствах, используемого для печати материала.

Размеры принтеров струйной 3D-печати закрывают типоразмерный ряд от настольных систем до больших промышленных систем (рис. 8.5).



Рис. 8.5. Принтер Stratasys Objet100 Plus демонстрирует размеры некоторых струйных 3D-принтеров

8.4. Поддержки при струйной печати

Одним из основных преимуществ струйной 3D-печати является печатать двумя различными материалами: первый материал – основной для изделия, а второй – для растворимых поддержек.

Это означает, что, в отличие от других методов 3D-печати, при которых поддержки удаляются вручную, струйная 3D-печать позволяет растворять поддержки и небольшим взбалтыванием отделять их от модели. После правильной постобработки можно получить поверхность без каких-либо следов поддержек.

Недостатком здесь служит необходимость печати цельных поддержек (а не решеток и башен, как в FFF и SLA технологиях), что приводит к повышенному потреблению материала, а, следовательно, и к увеличению времени и стоимости печати. Печать такого типа поддержек позволяет применять более гибкий подход к расположению модели, чем в других технологиях 3D-печати, работающих с поддержками. Но располагать поддержки следует так, чтобы уменьшить их количество.

8.5. Матовая и глянцевая струйная печать

Струйная 3D-печать позволяет создавать матовые или глянцевые изделия (рис. 8.6). При матовой поверхности принтер нанесет тонкий слой материала поддержки на всю поверхность модели, независимо от ее расположения или структурных требований (рис. 8.7). При глянцевой поверхности материал поддержки будет использован только в тех местах, где он необходим (нависающие элементы, уклоны и т.п.).



Рис. 8.6. Продукт струйной 3D-печати, материал Tango Black (эластичный), напечатан наполовину глянцевым, наполовину матовым, что отображает различия в формировании поверхности изделия



а



б

Рис. 8.7. Матовый корпус для вентилятора, покрытый поддерживающим материалом (*а*), корпус вентилятора после удаления поддержки и постобработки (*б*)

Преимуществами печати глянцевой поверхности являются гладкая и блестящая поверхность в частях модели, напечатанных без поддержек, и сокращение потребления материалов в составлении отпечатка. Недостатком же является неоднородность качества поверхности модели и некоторое скругление острых краев и углов на лицевых поверхностях.

Преимуществами печати матовой конфигурации являются точность напечатанной модели в целом и однородная поверхность. Недостатки включают избыточное расходование материала, увеличенное время отделения поддержки и более мягкую поверхность. Эта мягкость способна ослабить малые или тонкие элементы модели.

8.6. Соблюдение точности размеров при струйной 3D-печати

Струйная 3D-печать считается самой точной формой 3D-печати. Из-за отсутствия высокой температуры в процессе печати (кроме предварительного разогрева смолы до необходимой температуры печати) искривление и стягивание этой технологии не свойственны. Потери в точности печати начинают проявляться с увеличением размеров изделия из-за стягивания фотополимеров во время их отверждения. Этот эффект сильнее проявляется при печати больших изделий. Большинство проблем с размерами связаны с элементами и тонкими стенками, которые напечатаны без учета спецификаций принтера. В струйной 3D-печати поддержки печатаются цельной структурой из мягкого вспомогательного материала, который растворяется и удаляется после печати. Цельная структура поддержки, соприкасающаяся с поверхностями модели, обеспечивает высокую точность печати этих поверхностей.

Следует принимать меры предосторожности при обращении с изделиями, напечатанными посредством струйной 3D-печати, потому как они могут искривиться и измениться в размерах под воздействием температуры окружающей среды, влажности или солнечного света.

8.7. Основные материалы, используемые при струйной 3D-печати

Как и при SLA-печати, при струйной 3D-печати для изготовления изделий применяются смолы фотополимерных реактопластов. Смола разбрызгивается крошечными каплями на рабочую платформу и облучается УФ-светом. По этой причине материалы для струйной 3D-печати должны обладать хорошей текучестью для успешного разбрызгивания в форме капель. В большинстве случаев это реализуется разогревом смолы (до 30–60 °С в зависимости от принтера и материала) в процессе печати. В отличие от остальных технологий 3D-печати, струй-

ной 3D-печати всегда требуется наличие двух различных смол: одной для основного материала печати модели и другой для материала поддержек. Некоторые материалы, часто используемые в струйной печати, приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Наиболее применяемые материалы в струйной 3D-печати

Материал	Торговые марки	Характеристики
Стандартный	Vero, VeroBlue, VisiJet M2, VisiJet CR, full color prints/ полноцветная печать	Жесткий прозрачный пластик. Имитирует литые изделия. Хрупкий
Гибкий	Tango, VisiJet M2-E	Широкий ряд доступных параметров гибкости. Настраиваемая склероскопическая твердость. Недостаточная растяжимость по сравнению с традиционными материалами
Подобный полипропилену (ПП)	Rigur, VisiJet M5 Black	Имитирует ПП-изделия. Хороший показатель прочности на изгиб. Хрупкий
Подобный ABS	Digital ABS, VisiJet M3-X	Высокая термостойкость. Применяется для мелкосерийного литья по выплавляемым моделям. Хрупкий
Литьевой	VisiJet M3 DentCast, VisiJet M3 Procast, InduraCast Wax	Выжигается без остатков. Подходит для точного литья
Высокотемпературный	RGD525, VisiJet M3-X	Превосходный показатель температуры тепловой деформации. В 1,5 раза выше, чем у ABS
Прозрачный	VeroClear, VisiJet M2, VisiJet CR	Возможно посредством постобработки достичь 100% -й прозрачности
Разрешенный для медицинских целей	MED 610, VisiJet M3 Crystal	Стерилизуемый. Краткосрочная биосовместимость. Подходит для ряда стоматологических и медицинских областей применения

В струйной 3D-печати применяются сотни крошечных отверстий для впрыскивания материала печати, поэтому по этой технологии возможно изготовление моделей из нескольких материалов, каждый из которых применен в определенной точке. Такой подход также реализуется при печати с цветными картриджами для производства полноцветных моделей.

Картриджи со смолой, используемые в струйной 3D-печати, обычно поставляются производителями принтеров, килограмм смолы стоит около 300–1000 долл. США.

8.8. Особенности постобработки в струйной 3D-печати

Продукты струйной 3D-печати (после удаления поддерживающего материала) обладают лучшим естественным качеством поверхности, чем изготовленные по всем другим технологиям 3D-печати. Поэтому чаще всего постобработка таких изделий связана с покраской или применением покрытий для улучшения внешнего вида (рис. 8.8). Некоторые распространенные техники постобработки изделий струйной 3D-печати приведены в табл. 8.2.

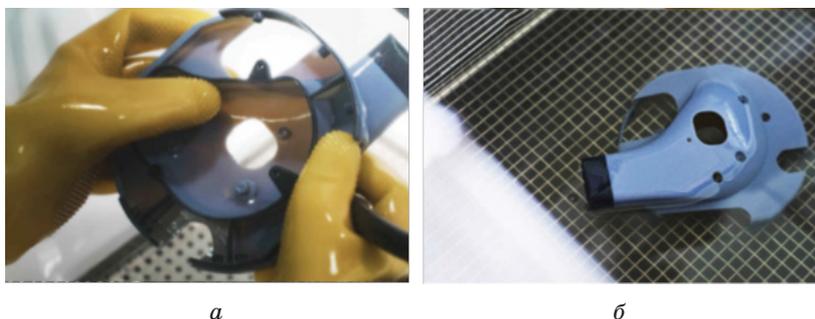


Рис. 8.8. Корпус вентилятора, напечатанный из нескольких материалов, после удаления поддержек с помощью водяного пистолета (а), финальная стадия постобработки корпуса вентилятора; изделие очищается в вибрирующей ванночке (б)

Таблица 8.2

Типичные методы постобработки в струйной печати

Тип постобработки	Обработка	Описание
Обязательный	Удаление поддержек	В струйной 3D-печати применяется материал поддержки, растворимый в воде. Сначала модель держат в воде холодной или комнатной температуры для размягчения поддерживающего материала перед удалением вручную. Для небольших и труднодоступных областей применяется обработка струей воды под давлением (рис. 8.8). Хрупкие изделия необходимо очищать воздушным компрессором на низких показателях давления. Затем изделия выдерживают в растворе гидроксида натрия для удаления с поверхности остатков поддержки и после промывают водой
Обработка поверхности	Шлифование	Изделия струйной 3D-печати обычно нуждаются в шлифовании в том случае, если затем наносится какое-либо покрытие. Изделия шлифуются наждачной бумагой с зернистостью 320 до гладкого состояния поверхности, готового к покраске
Эстетический	Окрашивание	Окрашивание изделий струйной 3D-печати обычно применяется к прозрачным и светопропускающим изделиям, для того чтобы изменить их внешний вид, сохраняя прозрачность. Изделия погружаются в водную цветную смесь для окрашивания
	Покраска	После шлифования на поверхность наносится грунтовый слой (рекомендуется лаковая основа или краска) перед покраской. Грунтование обеспечит превосходную поверхность для сцепления с краской. После этого изделие покрывается краской в несколько тонких слоев

Окончание табл. 8.2

Тип постобработки	Обработка	Описание
Функциональный	Прозрачное покрытие	Прозрачное покрытие наносится на поверхности изделий для усиления их свойств износостойкости. Как и с покраской, рекомендуется предварительное шлифование. Лаковое прозрачное покрытие необходимо нанести в несколько слоев. Если использовать еще и краску, то такая комбинация покрытий значительно увеличит срок службы изделий струйной 3D-печати
	Покрытие металлом	Изделия покрываются металлом для придания декоративного вида или получения износостойкой твердой оболочки. После шлифования на поверхность изделия наносится проводящий материал. Затем изделие проходит через стандартные процедуры покрытия металлом

8.9. Основные преимущества и ограничения струйной 3D-печати

Струйная 3D-печать обладает тремя важными преимуществами. Во-первых, эта технология создает почти однородные модели, так как слои отверждаются в течение всего процесса печати. Во-вторых, продукты струйной 3D-печати обладают довольно гладкой поверхностью, сравнимой с поверхностью литых моделей. И наконец, струйная 3D-печать – самая точная в размерах форма 3D-печати. Все это объясняет причину того, что эту технологию часто применяют для изготовления реалистичных нефункциональных прототипов, довольно точно представляющих конечные изделия.

Как и при SLA-печати, которая также применяет фотополимеры в изготовлении изделий, самым важным ограничением струйной печати являются слабые механические свойства изделий, выраженные в их хрупкости. Отпечатанные по этой

технологии изделия непрочные без таких материалов для других технологий, как нейлон или ABS. Хрупкая природа акриловых смол – препятствие для функционального тестирования. Низкая деформационная теплостойкость также может стать проблемой для большинства реальных тестов или областей функционального применения. В случае использования эластичных материалов недостаточная растяжимость не позволит в полной мере использовать изделие для тестирования в областях применения, в которых необходима эластичность.

Струйная 3D-печать – один из самых дорогостоящих методов 3D-печати по сравнению с другими технологиями из-за высокой стоимости материалов. В отличие от FFF-печати или SLA-печати, в которых поддержки печатаются с решетчатой структурой, струйная 3D-печать может позволить только цельную структуру, что может привести к большому количеству отходов и увеличению и без того больших расходов на материалы.

8.10. Наиболее распространенные области применения струйной 3D-печати

Возможность создавать гладкую поверхность и обеспечивать точность печати вместе с широким выбором доступных материалов позволяют использовать струйную 3D-печать для изготовления очень реалистичных прототипов, достаточно точно повторяющих прототипируемое изделие. Самые типичные области применения струйной 3D-печати описаны ниже.

Цветные визуальные прототипы. Как говорилось ранее, одним из самых явных преимуществ струйной 3D-печати является высокий уровень детализации и полноцветная печать моделей, которые точно отображают конечное изделие. Это позволяет проектировщикам получить уникальные сведения о внешнем виде конечного изделия.

Модели для медицины. С огромной скоростью растет применение струйной печати для изготовления моделей для медицинского применения. Изделия, напечатанные с помощью струйной 3D-печати с учетом специфичных данных пациента,

предоставляют медикам замечательную возможность взглянуть на анатомию пациента с другой перспективы. Медицинские модели играют важную роль в обучении и подготовке медиков для осуществления медицинских процедур и применяются скорее для демонстрации и обучения, чем в качестве функциональных изделий.

Прототипы для литья по выплавляемым моделям. Благодаря способностям струйной 3D-печати печатать гладкую поверхность с высокой детализацией эта технология часто встречается в процессах выверения конструкций для литья по выплавляемым моделям. Изделия могут быть быстро напечатаны и дают возможность проектировщикам проверить допустимость зазоров, посадку, сборку и форму до вложения в дорогостоящее оборудование.

Мелкосерийное литье по выплавляемым моделям. Имитация с помощью ABS – материала, часто используемого в мелкосерийном производстве форм для литья (как показано на рис. 8.8 и 8.9). Благодаря термостойкости ABS и способности струйной 3D-печати к точному воспроизведению сложной геометрии технология все чаще применяется для литьевой промышленности.

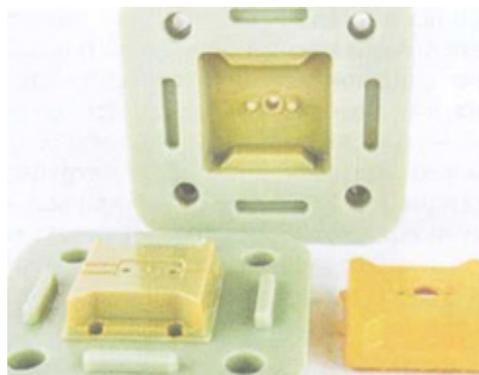


Рис. 8.8. Форма для мелкосерийного литья, напечатанная из имитации ABS, применяемая для создания серии корпусов для датчиков

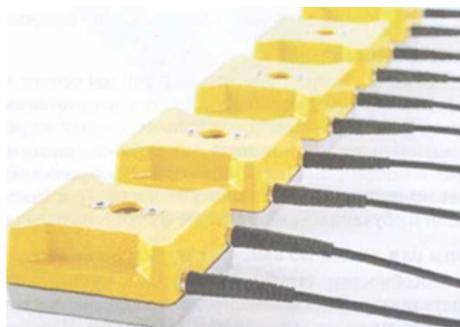


Рис. 8.9. Конечные собранные корпуса датчиков, отлитые по модели

8.11. Новые разработки для технологии струйной печати

При струйной 3D-печати наночастицами (Nano Particle Jetting, NPJ) применяется жидкость, содержащая металлические наночастицы или наночастицы поддержки, загружаемая в принтер посредством картриджа. Эти частицы размещаются на рабочей поверхности крайне тонкими слоями, подобно технологии струйной 3D-печати. Воздействие высоких температур в камере печати приводит к связыванию металлических частиц и испарению жидкости, в результате чего получается металлическая модель. После эти частицы сплавляются в термокамере для создания модели с максимальной плотностью.

Изготовление моделей таким способом обладает тремя основными преимуществами: легко удаляемые поддержки дают возможность применять свободное проектирование, малый размер частиц позволяет легко печатать маленькие сложные элементы, картриджная система принтеров способствует безопасному обращению с материалом (в отличие от систем, работающих с порошком, где обращение с материалом вызывает ряд сложностей). На данный момент обсуждение области применения этой новой технологии является преждевременным.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Расскажите о технологии струйной 3D-печати.
2. Поясните принципиальное устройство 3D-принтера для струйной 3D-печати.
3. Каковы основные преимущества и недостатки струйной 3D-печати?
4. Назовите наиболее распространенные области применения струйной 3D-печати.
5. Назовите основные материалы, используемые в струйной 3D-печати.
6. Каково использование наночастиц в струйной 3D-печати?
7. Каковы особенности постобработки в струйной 3D-печати?

ГЛАВА 9. Технология струйной печати связующим веществом

Технология струйной печати связующим веществом в рассматриваемой классификации показана на рис. 9.1. Струйная печать связующим веществом – это хорошо развитая и широко применяемая технология 3D-печати. Здесь связующий агент послойно помещается на порошкообразный материал для формирования модели. Слои скрепляются друг с другом, и получается цельная модель. Струйную печать связующим веществом можно представить в двух видах: песчаная печать и металлическая печать.

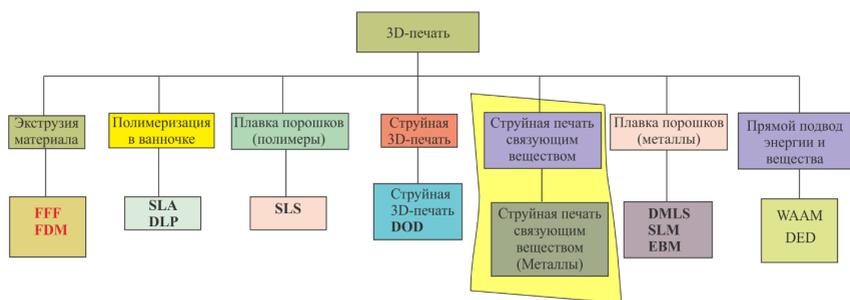


Рис. 9.1. Выделение печати связующим веществом в общей классификации 3D-печати

9.1. Технологии струйной печати связующим веществом

Печать по данной технологии подобна SLS-печати с разницей в необходимости наличия слоя порошка на рабочей платформе. В отличие от SLS-печати, в которой для плавления порошка применяется лазер, в струйной печати связующим веществом печатающая головка перемещается, размещая на порошковой поверхности капли связующего вещества (обычно 80 микрон в диаметре) и тем самым связывая частицы

порошка для создания каждого слоя изделия. После завершения печати слоя платформа опускается, и новый слой порошка распределяется на только что напечатанном слое. Этот процесс повторяется до полного составления изделия.

Затем изделие оставляется в порошке до затвердения и укрепления. Позднее изделие извлекается из лотка, и приставший порошок снимается с помощью воздушного компрессора.

9.1.1. Струйная печать связующим веществом с песком

Песочная печать является бюджетным методом изготовления моделей из песка (чаще используются песчаник и гипс). Самые типичные методы песочной печати описаны ниже (рис. 9.2, 9.3).

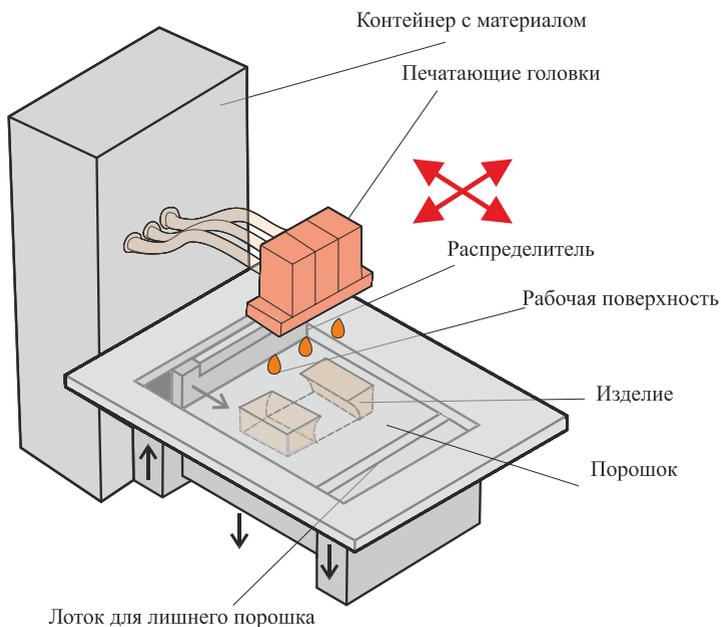


Рис. 9.2. Схема принтера струйной печати связующим веществом

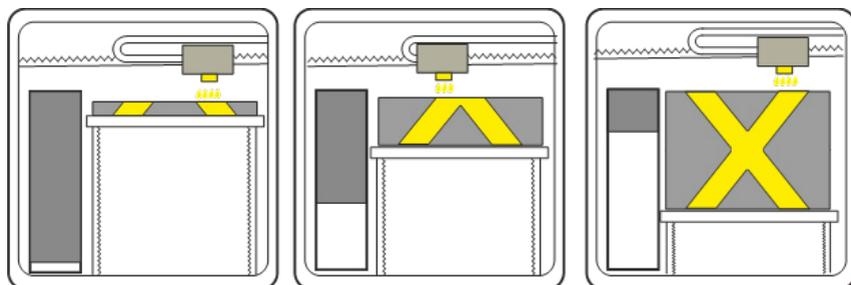


Рис. 9.3. Принципиальная схема процесса струйной печати связующим материалом



Рис. 9.4. Полноцветный отпечаток, изготовленный с применением песчаника для струйной печати связующим материалом

9.1.2. Полноцветные модели при струйной печати связующим веществом

Для полноцветной печати демонстрационных моделей изделия используются гипсовые или РММА (полиметилметакрилатные) порошки вместе с жидкостью со связующим агентом. Печатающая головка впрыскивает связующий агент, тогда как вспомогательная печатающая головка впрыскивает краску, что позволяет производить полноцветные модели

(рис. 9.4). После полного отверждения модели извлекаются из неспрессованного порошка и очищаются. Для улучшения механических свойств изделия подвергаются пропитке. Существует ряд доступных пропиток, применение каждой из которых дает свой результат. Вдобавок к этому покрытия могут использоваться для расширения многообразия цветов.

9.1.3. Печать песчаных стержней и форм для отливки

Струйная печать связующим веществом также часто используется в производстве песчаных форм и стержней для последующей отливки в них металлических деталей. Стержни и формы обычно печатаются из песочных материалов, но тем не менее искусственный песок (кремниевый) пригоден для узких областей применения. После печати стержни и формы извлекаются из камеры печати и очищаются от приставшего песчаного материала. Формы после этого обычно уже готовы для литья. После литья форму разламывают и достают конечную металлическую деталь.

Основным преимуществом песчаных форм и стержней для отливки с использованием струйной печати связующим веществом является способность процесса относительно экономно изготавливать большие, сложные геометрии. Процесс обычно хорошо интегрируется в существующие процессы субтрактивного производства или литья без каких-либо особенных требований.

9.1.4. Струйная печать связующим веществом С МЕТАЛЛОМ

Струйная печать связующим веществом используется также для изготовления металлических изделий. Металлический порошок связывается с помощью полимерного связующего агента. Производство металлических изделий с применением струйной печати связующим веществом позволяет изготавливать модели со сложной геометрией, которые невозможно создать с использованием традиционных техник производства.

Функциональные металлические изделия можно создавать посредством дополнительных вспомогательных процессов, описанных ниже. Стоимость и качество конечного изделия обычно определяют наиболее подходящий для области применения вспомогательный процесс. Без этих дополнительных шагов изделия будут обладать слабыми механическими свойствами.

Пропитывание. С самого начала частицы металлического порошка связываются связующим агентом, чтобы получить промежуточное состояние изделия. После полного отверждения они извлекаются из порошка и помещаются в термокамеру, где связующее вещество сжигается и оставляет пустоты во всей модели (примерно 60 % плотности). Затем используется бронза для заполнения этих пустот капиллярным воздействием (рис. 9.5), что придает модели большую плотность (выше 90 %) и прочность. Тем не менее металлические продукты струйной печати связующим веществом в основном обладают более слабыми механическими свойствами, чем металлические продукты плавки порошков (рассмотрены в следующей главе).



Рис. 9.5. Изделия из нержавеющей стали, покрываемые порошком для пропитки. Бронзовая пропитка показана слева

Сплавление. Также можно применять и способ, не предполагающий пропитывания. После завершения печати промежуточные изделия отверждаются в печи, что позволяет позднее использовать их по назначению. Изделия сплавляются в термокамере для достижения высокой плотности (более 97 %). Неравномерное стягивание может проявиться во время стадии сплавления и должно учитываться при проектировании.

9.2. Характеристики принтеров для струйной печати связующим веществом

9.2.1. Основные параметры принтера для струйной печати связующим веществом

Струйная печать связующим веществом обладает эффективной комбинацией характеристик SLS-принтеров и струйной 3D-печати, в ней применяется порошковый материал и используется печатающая головка, которая впрыскивает связующий агент, чтобы в итоге получить цельную модель. Точность и качество поверхности зависят от заданных толщины слоя, размера капли, размера частиц порошка и геометрии. Как и в SLS-печати, в струйной печати связующим веществом не требуется печать поддержек, так как изделия окружены порошком во время процесса печати. Это сокращает время на постобработку и количество расходуемого за ход печати материала.

9.2.2. Прочность изделий

Одним из ограничений струйной печати связующим веществом является прочность изделий (без применения вспомогательных процессов пропитывания или сплавления). Даже после применения упрочняющей пропитки изделия демонстрируют незначительные показатели прочности и относительной растяжимости по сравнению с изделиями, выполненными плавкой порошков. Обычно отпечатки струйной печати связующим веществом используются как функциональные

только после вспомогательной обработки, такой как пропитка или сплавление (за исключением литья в песчаные формы).

9.2.3. Заполнение лотка для порошка

Как и в SLS-печати, в струйной печати связующим веществом используются лотки для порошка, чтобы изготавливать модели. Но в отличие от SLS-технологии модели печатаются без применения высоких температур, что избавляет от сложностей, связанных с неравномерным охлаждением, приводящим к искривлению или перекосам. Это также позволяет легко создавать множество моделей за один ход печати. В случае металлических изделий это дает возможность осуществлять мелко- и среднесерийное производство перед вспомогательными процессами пропитывания или сплавления. Большие машины струйной печати связующим веществом имеют самый большой объем печати из всех технологий 3D-печати (до 1800×1000×700 мм), которые применяются для создания литьевых форм.

9.3. Точность размеров при струйной печати связующим веществом

Полноцветные изделия из песчаника производятся с толщиной слоя в 100 микрон, в то время как стержни и формы печатаются с толщиной слоя от 240 до 380 микрон. Можно воспользоваться некоторыми принтерами, которые способны печатать слои в 50 микрон, если необходима гладкая поверхность. Но это увеличивает стоимость и время печати.

Благодаря отсутствию теплового воздействия изделия демонстрируют хорошую стабильность размеров.

Стягивание связано только со вспомогательными процессами пропитки или сплавления. Тепловое сжатие, связанное с процессом пропитки, зачастую непредсказуемо и неравномерно проявляется во время стадии охлаждения. Сжатие обычно проявляется в диапазоне от 0,8 до 2,0 % (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Сводная таблица точности размеров изделий струйной печати связующим веществом

Параметр	Описание
Погрешность размеров	$\pm 0,2 \%$ ($\pm 0,3$ мм при печати с песком)
Сжатие/искривление	Сжатие происходит только при пропитке или сплавлении. Следует предполагать погрешность в 1,5 % при проектировании, если планируется применение вспомогательного процесса при изготовлении металлических изделий
Основные требования к подержкам	Не требуются

9.4. Наиболее распространенные материалы, использующиеся при струйной печати связующим веществом

По технологии струйной печати связующим веществом создаются изделия с использованием порошка и связующего агента. Порошки поставляются из разнообразных материалов, и выбор конкретного материала определяется конечной областью применения (табл. 9.2). В отличие от процесса SLS-печати 100 % несвязанного порошка можно использовать повторно.

Таблица 9.2

Распространенные материалы для струйной печати связующим веществом

Материал	Торговые марки	Характеристики
Песчаник	VisiJet PXL, Z Corp, VoxeUet	Очень низкая относительная растяжимость. Очень жесткий. Полноцветные демонстрационные модели
Материал из нержавеющей стали и бронзы	ExOne 420, ExOne 316	Отличные механические свойства. Можно подвергать механической обработке

Окончание табл. 9.2

Материал	Торговые марки	Характеристики
Нержавеющая сталь (спеченная)	ExOne 316L, ExOne 17-4	Коррозионно устойчивая. Отличные механические свойства
Инконельный сплав (спеченный)	ExOne IN Alloy 625	Хорошая термостойкость. Отличные механические свойства. Высокая химическая стойкость
Карбид вольфрама (спеченный)	ExOne	Очень твердый Применяется для изготовления режущих инструментов
Кремниевый песок	ExOne, VoxeUet	Превосходно подходит для применения в области литья в песчаные формы

9.5. Постобработка после струйной печати СВЯЗУЮЩИМ ВЕЩЕСТВОМ

Постобработка изделий струйной печати связующим веществом ограничена из-за типа материалов, используемых в процессе. Изделия всегда некоторое время пребывают в порошке после печати, чтобы связующий агент полностью затвердел. И песчаная, и металлическая струйная печать связующим веществом требуют удаления прилипшего порошка с изделия после извлечения из лотка (рис. 9.6), обычно при помощи воздушного компрессора.

Металлические изделия, которые были подвергнуты таким вспомогательным процессам, как пропитка или сплавление, можно обрабатывать стандартными техниками, применимыми к металлическим изделиям.

Большинство песчаных стержней и форм обычно нуждаются только в удалении лишнего приставшего порошка, и затем они уже сразу готовы для литья. Некоторые связующие материалы не требуют термической постобработки в целях упрочнения.

Полноцветные модели обычно погружаются в пропитку или покрываются ей для улучшения механических свойств.

По причине того, что струйная печать связующим веществом предоставляет возможность полноцветной печати, изделия обычно не нуждаются в покраске. Но их можно покрывать прозрачным лаком для улучшения износостойкости и придания их поверхности гладкости.



Рис. 9.6. Удаление приставшего песка с продукта струйной печати связующим веществом

9.6. Основные преимущества и недостатки струйной печати связующим веществом

Основным преимуществом струйной печати связующим веществом является то, что в процессе не используется никакое тепловое воздействие, а это означает, что изделия не подвер-

жены остаточному напряжению, которое может быть спровоцировано быстрым нагревом или охлаждением. От того, что процесс не использует тепловые источники для создания моделей, снижается стоимость контроля и управления печатью и появляется возможность печати крупных изделий.

Связующие агенты, применяемые для связывания песчаного или металлического порошка, недорогие. Для песчаных стержней и форм применяется недорогой кремнистый песок. Порошки, используемые в металлической печати, значительно увеличивают ее стоимость. Но если сравнивать, то струйная печать связующим веществом обходится значительно (на один-два порядка) дешевле плавки металлических порошков. Эта технология также позволяет печатать крупные изделия (например, формы для литья металлов).

Главным ограничением струйной печати связующим веществом являются механические свойства изделий. Компоненты, извлеченные прямо после печати, довольно хрупкие. Всегда необходим вспомогательный процесс, если требуется, чтобы изделие стало функциональным. Природа процесса также подразумевает зернистость поверхности изделия.

9.7. Наиболее распространенные области применения струйной печати связующим веществом

Рассмотрим самые распространенные области применения струйной печати связующим материалом.

9.7.1. Полноцветные модели

Несмотря на то, что полноцветные продукты струйной печати связующим веществом обычно нефункциональные, способность печати в цвете открывает множество возможностей для их практического применения. Полноцветная печать позволяет создавать реалистичные прототипы, которые показывают внешний вид конечного изделия до осуществления литья

на производстве. Изделия также можно использовать для выявления областей градиентов напряжения, что позволяет проектировщикам взглянуть на прочность и применимость будущего изделия с различных точек зрения.

9.7.2. Струйная печать связующим веществом песчаных форм для литья

Производство крупных песчаных форм для литья является одной из основных областей применения струйной печати связующим веществом. Низкая стоимость и большая скорость процесса делают его идеально подходящим для построения сложных конструкций литьевых форм, которые сложно или даже невозможно реализовать с применением традиционных техник (рис. 9.7).



Рис. 9.7. Сборка песчаной формы из нескольких элементов для литья автомобильного блока цилиндров

9.7.3. Функциональные металлические изделия

Вспомогательные процессы, применяемые в струйной печати связующим веществом (сплавнение или пропитывание), позволяют производить достаточно прочные и функциональные металлические изделия (рис. 9.8). Доступность широкого ряда материалов и способность создавать сложные формы выделяют технологию в качестве эффективного решения для проектов, которые было бы слишком дорого или сложно реализовать традиционными методами.



Рис. 9.8. Статор насоса для нефти и газа, напечатанный из нержавеющей стали и пропитанный бронзой

Контрольные вопросы

1. Расскажите о технологии 3D-печати связующим веществом.
2. Каковы особенности устройства 3D-принтеров для печати связующим веществом?
3. Поясните особенности струйной печати связующим веществом с металлом.
4. Назовите основные особенности 3D-печати при производстве песчаных форм.
5. Как изготавливаются полноцветные модели при струйной печати связующим веществом?
6. Назовите наиболее распространенные материалы, используемые при струйной печати связующим веществом.
7. Какие существуют преимущества и недостатки технологии печати связующим веществом?

ГЛАВА 10. 3D-печать металлических изделий

Технология плавка порошков (металлы) – DMLS/SLM, EBM в рассматриваемой нами классификации показана на рис. 10.1. Для 3D-печати металлических изделий из металлического порошка используется тепловой источник, с помощью воздействия которого на порошок происходит сплавление металлических частиц порошка слой за слоем. Большинство технологий плавки порошков применяют механизмы для распределения порошка по мере наращивания изделия, что приводит к тому, что получившееся изделие заключено в металлическом порошке. Основные вариации технологии плавки порошков исходят из применения различных источников энергии (лазеры или электронно-лучевые трубки).

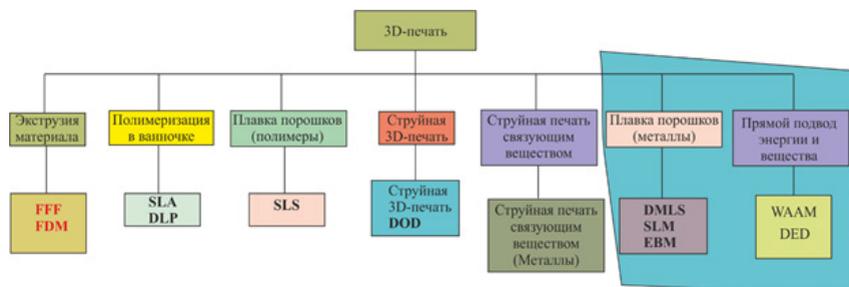


Рис. 10.1. Выделение DMLS/SLM, EBM 3D-печати в общей классификации 3D-печати

10.1. Технологии плавки металлических порошков

К данным технологиям относятся прямое лазерное спекание металлов (Direct Metal Laser Sintering, DMLS), выборочная лазерная плавка (Selective Laser Melting, SLM) и электронно-лучевая плавка (Electron Beam Melting, EBM).

Кратко рассмотрим современное состояние и существующие проблемы АП металлических изделий.

10.1.1. Аддитивное производство и дизайн металлических прототипов

Одной из основных особенностей АП является свобода проектирования. Однако, чтобы гарантировать качество и надежность продуктов АП, на самой стадии проектирования уже следует вводить несколько новых правил проектирования. Авторы работы [232] предложили новую числовую цепочку, основанную на новой методологии проектирования моделей для АП. Эта новая числовая цепочка была предложена для аддитивного лазерного производства тонкостенных металлических деталей. Основная цель этой работы – минимизировать разрыв между САД-моделью и соответствующей изготовленной деталью. Этот новый метод включает несколько этапов: ориентацию детали, функциональную оптимизацию и оптимизацию производственного пути. Этап ориентации детали предполагает определение расчетной площади. Этап функциональной оптимизации включает определение оптимальной геометрии детали, которая будет исходной геометрией детали. Последним этапом в этой методологии является определение оптимальных производственных путей, благодаря которым создается производственная программа вместе с окончательной САД-моделью детали, которая и используется для изготовления модели.

В работе [233] авторы рассказали о расширенных свободах проектирования технических деталей, что дает им новый потенциал с новым проектом «Правила проектирования прямого производства». Это исследование сделало преимущества проекта доступными для различных групп пользователей. Поэтому был определен конкретный метод, а затем разработаны правила проектирования для моделирования наплавлением, лазерного спекания и лазерной плавки. Результаты подходящего дизайна для АП обобщены в каталоге правил проектирования.

В работе [234] обсуждали геометрическую свободу в дизайне, которая используется для значительного улучшения функциональности серийных продуктов путем замены обычных деталей деталями, выполненными с помощью АП. Для редизайна определены четыре критерия: интегрированный дизайн, индивидуализация, облегченный дизайн и эффективность. Отмечено, что для достижения успеха продукт должен быть улучшен как в технологическом, так и в экономическом направлении. С экономической точки зрения инвестиции в изменение конструкции и процесса должны окупаться либо за счет снижения производственных затрат, либо за счет преимуществ в течение всего срока службы продукта за счет полного использования геометрической свободы при редизайне, что может привести к впечатляющему увеличению производительности. Это открывает новые перспективы в разработке продукта.

Авторы статьи [235] указывают на преимущества технологии аддитивного слоя (ALM) для снижения веса впускных или выпускных клапанов двигателей внутреннего сгорания. Технология компьютерной томографии использовалась в качестве инструмента обратного проектирования. Гибридный производственный маршрут был предпочтен для снижения стоимости производства части клапана с помощью ALM. Но авторы говорят о необходимости дальнейших исследований, чтобы присоединить полый шток обычного производства к головке клапана, производимой по ALM с помощью сварки трением.

10.1.2. Влияние технологических параметров на аддитивное производство и маршрутизация производства металлических компонентов

В работе [236] авторы внедрили микро-LAAM (лазерное аддитивное производство) в послойном производстве суперсплавов на никелевой основе IN100, которые имеют плохую свариваемость, что приводит к растрескиванию и пористости. Дефекты были устранены путем оптимизации, а наплавление

без трещин достигается с минимальным подводом теплоты. Нагретый образец наблюдали с помощью EBSD (электронная дифракция обратного рассеяния) и обнаружили три размера фазы: 0,5–1,0 мкм, 0,1–0,3 мкм, 10 мкм. После измельчения зерна было обнаружено, что предел прочности на растяжение и предел текучести выше, чем в аэрокосмической спецификации 5397 для материала IN100.

Авторы работы [237] использовали гибридную технику производства для изготовления образца титанового сплава TC11 при исследовании микроструктуры, микротвердости и прочности на разрыв и обнаружили, что изготовленный образец состоит из трех типичных зон без каких-либо лазерных дефектов в титановом сплаве. Обнаруженные зоны – это зона аддитивного производства (LAMZ); зона деформируемой подложки (WSZ) и зона склеивания. Также обнаружено, что зона LAMZ имеет сверхтонкую микроструктуру с волнообразными границами, которые приводят к улучшенным характеристикам растяжения в зоне термического влияния (ЗТВ, heat-affected zone, HAZ), вызванной быстрым охлаждением, но без рекристаллизации или роста зерен, обнаруженных в ЗТВ, из-за теплового воздействия в области $\alpha + \beta$ зона микроперехода имеет грубую к-подобную первичную α и тонкую β микроструктуру, и образец TC11, изготовленный из материала, имеет предел прочности на разрыв 1 033 713 МПа и относительное удлинение $6,8 \pm 0,2 \%$, а разрушение происходит в подложке, что показывает, что механические свойства зоны соединения лучше, чем у подложки. Обнаружено, что микротвердость в переходной зоне заметно увеличивается от микротвердости в зоне WSZ до микротвердости в зоне LAMZ.

Авторы [238] изготовили градиентный структурный материал (GSM) TA2/TA15 с использованием процесса аддитивного производства (LAAM), исследовали химический состав, микроструктуру и микротвердость непосредственно осажденного GSM и обнаружили, что почти равноосные зерна представляют собой микроструктуру видманштеттенских α -реек, где объемная доля β -фазы увеличивается, а объемная доля

α -фазы уменьшается. Часть, содержащая крупные столбчатые зерна, была разделена на четыре наплавленных слоя с шириной 3000 мкм, мелкая микроструктура корзиночного переплетения, микротвердость градиентной зоны увеличивается от части TA2 к части TA15 от 173 до 400 за счет упрочнения твердого раствора и упрочнения границ зерен.

В работе [239] были смоделированы температурные поля при аддитивном производстве AlSi10 Mg с помощью SLM и с использованием FEM и исследовано влияние мощности лазера и скорости сканирования на SLM. Авторы обнаружили, что скорость охлаждения немного увеличилась с $2,13 \cdot 10^6$ град/с до $2,97 \cdot 10^6$ град/с, когда мощность лазера увеличилась со 150 до 300 Вт, но когда скорость сканирования увеличилась со 100 до 400 мм/с, значительно увеличилась с $1,25 \cdot 10^6$ град/с до $6,17 \cdot 10^6$ град/с после повторения различных комбинаций, было обнаружено, что прочное металлургическое соединение между соседними полностью плотными слоями было достигнуто при мощности лазера 250 Вт и скорости сканирования 200 мм/с из-за большей глубины ванны расплава.

Авторы статьи [240] попытались создать легкий материал для промышленного применения. В этой работе основное внимание уделялось маломощному волоконному лазеру, возможности получения высокопрочных алюминиевых сплавов и специально разработанной порошковой системе с различными размерами частиц в частицах Al и Cu/Zn. Было обнаружено, что их размер не изменился в процессе смешивания. Благодаря этой индивидуальной композиции Al – Cu/Al – Zn, способной создавать композицию алюминиевого сплава во время лазерной плавки, на линиях плавления не было замечено верхнего слоя хрупкого твердого окисления, что очень перспективно для дальнейшего развития многослойного процесса производства реактивных материалов. Полученные аддитивные слои, характеризующиеся тонкой микроструктурой с гомогенно растворенными интерметаллическими фазами в металлической матрице, имеют большой потенциал для улучшения эксплуатационных свойств конечного производимого продукта.

Обработка алюминия и его сплавов с помощью селективной лазерной плавки по-прежнему является сложной задачей. Порошки алюминиевых сплавов обладают плохой текучестью, высокой отражательной способностью и высокой теплопроводностью по сравнению со сталями и титановыми материалами [241]. Более того, трудности с удалением оксидных слоев, пористости и трещин являются основными проблемами для SLM-порошков алюминиевых сплавов [240]. Большинство исследований в настоящее время сосредоточено на SLM-сплавов AlSi10 Mg и AlSi12 Mg (сплавы серии 6000). Основные параметры процесса показаны на рис. 10.2 [241]. Таким образом, проблема обработки порошков алюминиевых сплавов с помощью аддитивного производства еще ожидает решения.

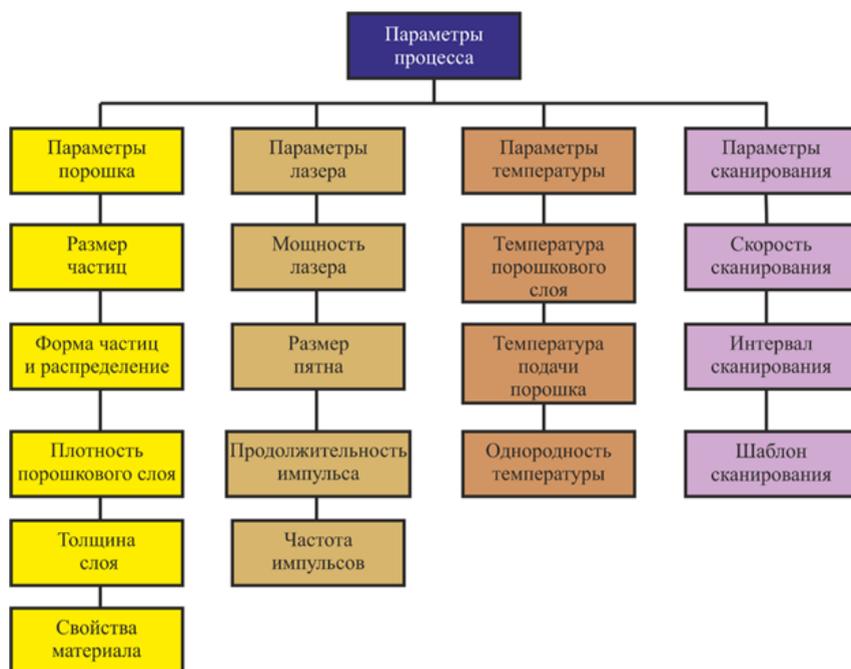


Рис. 10.2. Технологические параметры процессов SLM аддитивного производства

Выполненный анализ исследовательских работ показал проблемы, с которыми сталкивается аддитивное производство металлов при проектировании и контроле параметров процесса. Результаты анализа позволяют сделать следующие выводы.

Новые правила проектирования для аддитивного производства изделий из металлов созданы для обеспечения повторяемости и надежности продуктов, изготовленных с использованием методов АП.

Исследования в области дизайна для АП металлов находятся в начальной стадии, и некоторые из этих исследований активно обсуждаются. Необходимо сфокусировать особое внимание на правилах проектирования для АП с помощью электронно-лучевых приборов.

Недостаточно обсуждаются различные исследовательские работы по производству металлических компонентов посредством аддитивного производства с использованием различных металлов.

Значительное количество исследовательских работ основано на лазерном АП, а не на электронно-лучевой плавке. Большой пробел в этой области должен быть восполнен соответствующими исследовательскими работами.

АП деталей из алюминиевых сплавов по-прежнему является сложной задачей, и в этой области необходимы дальнейшие исследования.

10.1.3. Прямое лазерное спекание металлов (DMLS) и выборочная лазерная плавка (SLM)

И прямое лазерное спекание металлов (DMLS), и выборочная лазерная плавка (SLM) изготавливают методом, аналогичным SLS. Основным отличием, служит то, что DMLS и SLM применяются для производства металлических изделий (рис. 10.3, 10.4).

DMLS не расплавляет металлический порошок, а нагревает его до той степени, в которой частицы смогут связаться на молекулярном уровне. SLM применяет лазер для получения пол-

ностью сплавленного металлического порошка, формирующего однородное изделие. Это значит, что детали обладают одной температурой плавления (недостижимой в сплавах). Это главное различие между DMLS и SLM: первая изготавливает модели из металлических сплавов, а последняя – из однокомпонентных металлов, таких как титан.

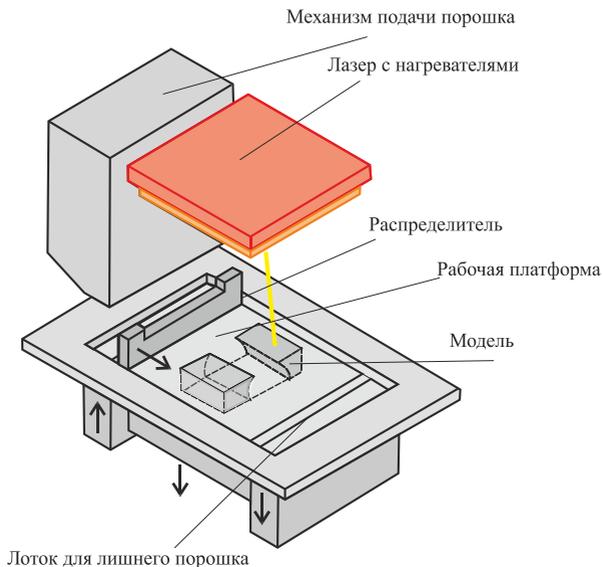


Рис. 10.3. Принципиальное устройство DMLS/SLM-принтера

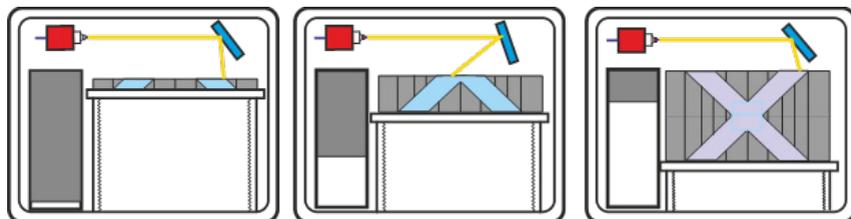


Рис. 10.4. Принципиальная схема процесса DMLS/SLM-печати

В отличие от SLS-, DMLS- и SLM-процессам необходимо наличие поддержек, для того чтобы предупредить возможные искажения, несмотря на то что окружение порошком создает физическую поддержку. Изделия DMLS/SLM подвержены риску искривления из-за остаточного напряжения, возникающего во время печати под воздействием высоких температур. Изделия, все еще находящиеся на рабочей платформе, также обычно подогревают для уменьшения влияния напряжений на изделие после печати.

Национальный центр промышленного дизайна и инноваций 2050.ЛАБ при Университете МИСИС применяет в своих разработках промышленный принтер SLM 280 2.0, который работает по технологии селективного лазерного плавления (рис. 10.5). Данный принтер используется для единичного и мелкосерийного производства сложных металлических изделий из нержавеющей и инструментальной стали, алюминиевых, титановых сплавов, титана, инконелей, кобальт-хрома. Для печати используется металлический порошок (рис. 10.6).



Рис. 10.5. 3D-принтер по металлу SLM Solutions SLM 280 2.0

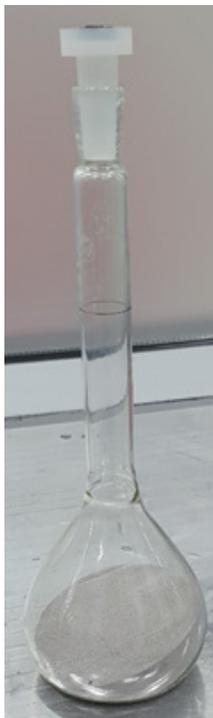


Рис. 10.6. Металлический порошок из нержавеющей стали для 3D-принтера SLM 280 2.0

10.1.4. Электронно-лучевая плавка (EBM)

В отличие от других технологий плавки порошков, электронно-лучевая плавка (Electron Beam Melting – EBM) применяет высокоэнергетический электронный луч вместо лазера (фотоны), для того чтобы вызвать сплавление частиц металлического порошка.

Сфокусированный электронный луч обрабатывает тонкий слой порошка, приводя к локальному плавлению и связыванию определенной секции поперечного сечения. Эти слои составляют, пока не получится цельная модель.

По сравнению с SLS и DMLS технология EBM обладает весьма превосходящим показателем скорости благодаря более высокой интенсивности энергии. Тем не менее минимальный размер элемента, размер частиц порошка, толщина слоя и поверхность обычно больше. EBM-изделия производятся в вакууме, и процесс можно осуществлять только над проводящими материалами.

В данной главе мы будем рассматривать в основном DMLS/SLM-процессы, хотя большинство их характеристик также применимы и для EBM.

10.2. Характеристики принтера для плавки металлических порошков

10.2.1. Параметры принтера

Как и в SLS, точность и качество печати поверхности DMLS/SLM-изделий обеспечиваются размером лазерного пятна, геометрией порошка и толщиной слоя. Металлические аддитивные системы производства не работают автоматически, а требуют работы высококвалифицированных операторов. Большинство машин металлического аддитивного производства применяются в промышленности и нуждаются в строгом управлении, калибровке, мерах по обращению с материалом, постобработке и техобслуживанию. Общий вид еще одного принтера для печати металлом показан на рис. 10.7.

10.2.2. Поддержки

В отличие от других технологий плавки порошков, DMLS/SLM-принтерам необходимо печатать поддержки (рис. 10.8). По причине применения высоких температур и послойной природы составления изделия в технологии появляется потребность в поддерживающих структурах, для того чтобы они сцепляли нестабильную геометрию с рабочей платформой и выступали в качестве поглотителя тепла для термической

энергии. Поэтому наличие поддержек важно предусматривать при проектировании для металлической печати (это обсуждается более подробно в дальнейших разделах).



Рис. 10.7. DMLS-принтер Concept Laser M2

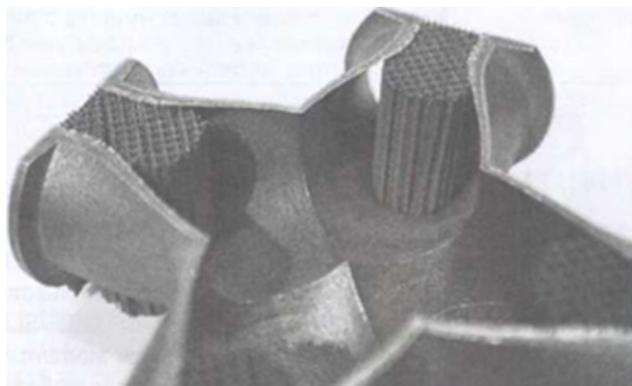


Рис. 10.8. SLM-отпечаток со все еще прикрепленными поддержками, демонстрирующий сложную решетчатую геометрию поддержек

10.2.3. Управление качеством поверхности изделий при печати

Некоторым конструкциям необходимо обеспечить гладкую поверхность с лицевой стороны. Если необходимо добиться гладкой поверхности, то обычно требуется постобработка. Существует несколько способов, которые можно применять при выборе расположения изделия, для того чтобы получить улучшенное качество поверхности.

Верхние поверхности будут обладать более острыми краями и лучшим качеством поверхности по сравнению с нижними.

На уклонных поверхностях наблюдается заметный «ступенчатый» эффект, который зависит от толщины слоя. В общем случае, чтобы избежать «лесенки», необходимо создавать изделия с уклонами больше чем 20° по отношению к горизонту. Показатель рыхлости поверхности сразу после печати принимает значение примерно в $8,75 \text{ Ra mm}$ в зависимости от материала, толщины слоя и расположения поверхности.

10.3. Соблюдение точности размеров в DMLS/SLM-технологиях

DMLS/SLM применяют лазер для выборочного спекания или плавления металлического порошка в процессе изготовления изделий. Во многом подобно SLS металлическая послойная печать происходит в контролируемой раскаленной среде машин промышленных размеров. Применяемое в процессе послойное составление вместе с очень высокими температурами создает экстремальные тепловые градиенты, в результате которых изготавливаются изделия. Точность DMLS/SLM-печати показана в табл. 10.1.

Несмотря на эти напряжения, металлические изделия обладают довольно высокой размерной точностью. Изделия создаются на цельной платформе и затем удаляются с нее после завершения процесса печати (обычно с помощью резки).

Таблица 10.1

Сводная таблица точности DMLS/SLM-печати

Параметр	Описание
Погрешность размеров	$\pm 0,1 \%$
Сжатие/искривление	Изделия подвержены высокому риску стягивания или искривления. Крепления и поддержки применяются для сокращения вероятности их появления
Требования по опоркам	Необходимы для достижения высокой степени точности печати

10.4. Материалы для 3D-печати плавкой металлических порошков

В технологиях DMLS и SLM применяются металлические порошки. Потому как частицы порошка частично либо полностью плавятся (в зависимости от процесса), то, в принципе, любой спекаемый металл можно использовать для изготовления металлических изделий посредством технологий DMLS/SLM.

В процессе DMLS/SLM-печати можно производить модели из ряда металлов, включая алюминий, нержавеющую сталь, титан, сплав кобальта-хрома и инконель (рис. 10.9). Также в ювелирном производстве используются такие драгоценные металлы, как золото, платина, палладий и серебро.

Преимущества каждого из материалов мы не будем здесь рассматривать, но теплопроводность каждого материала играет важную роль в процессе сплавления при формировании цельной модели. Как правило, при проектировании утонченных деталей, высокой детализации или необходимости допусков в узких пределах надлежащими материалами являются нержавеющая сталь или титан из-за их относительно низкой теплопроводности.

Высокая стоимость металлических порошков является одним из самых основных недостатков DMLS/SLM-технологий, к примеру порошок из нержавеющей стали 316L стоит 350–450 долл. США за килограмм.



Рис. 10.9. Металлические детали, напечатанные из порошков различных металлов на 3D-принтере SLM 280 2.0

10.5. Особенности постобработки изделий после DMLS/SLM-технологий

Постобработка DMLS/SLM-изделий является распространенной практикой, можно применять ряд техник и методов обработки поверхности, некоторые из них представлены в табл. 10.2.

Таблица 10.2

Типичные методы постобработки для DMLS/SLM

Тип	Обработка	Описание
Обязательный	Термообработка	Термическая обработка изделий DMLS/SLM-печати применяется для ослабления остаточного напряжения и изменения некоторых свойств материалов, например, твердости. Технология и процессы аналогичны тем, что применяются в традиционном металлургическом производстве. В процессе используется управляемое нагревание и охлаждение до нужных показателей температуры. Применяемые техники обычно стремятся уменьшить свойства пористости и улучшить другие качества. Термообработка также помогает сократить объем микроскопических полостей или трещин и добиться зернистой структуры, подобной обработанным изделиям, созданным в процессе субтрактивного производства
	Удаление поддержек	Удаление поддержек значительно увеличивает стоимость металлического изделия. В отличие от FFF или SLA, где поддержки можно просто отломать вручную, в DMLS/SLM-поддержки могут быть только отрезаны или выломаны. Поверхность, с которой соприкасалась поддержка, нуждается в значительной обработке наждачной бумагой или шлифовальной машинкой
	Удаление лишнего порошка	Как и во всех технологиях плавки порошков, весь лишний порошок необходимо счищать с отпечатка после извлечения его из лотка
Обработка поверхности (желательно, но не необходимо)	Станочная обработка	Станочные инструменты, которые можно отыскать в современных магазинах, способны обрабатывать изделия до или после операций термообработки. Проблемой может стать фиксация сложного изделия, и это то, на чем нужно заострять внимание на этапе проектирования. Для отделения изделий от подложки перед дальнейшей обработкой можно использовать режущие инструменты, такие как пилы, хотя идеально для этой работы подойдут электроэрозионные станки. Станочные инструменты, например, станки для CNC-фрезеровки и токарные станки, позволяют удалить лишний материал с изделий и придадут им конечную форму. Вдобавок станочные инструменты могут применяться для подготовки поверхностей к дополнительной полировке

Окончание табл. 10.2

Тип	Обработка	Описание
	Абразивная обработка пластиком	Абразивная обработка пластиком позволяет операторам улучшить свойство однородности горизонтальных и вертикальных поверхностей. Этот шаг может предварять другие виды обработки поверхности. После абразивной обработки пластиком показатель рыхлости может улучшиться до 2–4 Ra mm
	Покрытие металлом	Желательно использовать покрытие металлом для улучшения характеристик изделия. Улучшениями могут быть коррозионная и термостойкость, усиленная прочность и твердость, проводимость и эстетика
	Полировка	Электрическая или ручная полировка может применяться для достижения конечного качества поверхности. Необходимо подходить к процессу с осторожностью, чтобы не спровоцировать усиление поверхностного напряжения, которое может привести к появлению трещин
	Микрообработка	Микрообработка и полировка могут использоваться для поверхностей, к которым предъявляются высокие требования, таких как лопасти газотурбинных двигателей, для того чтобы улучшить показатели коррозионной стойкости и уменьшить трение. С помощью микрополировки можно добиться качества поверхности с показателем рыхлости менее чем в 1 Ra mm

10.6. Основные преимущества и недостатки DMLS/SLM-технологий

10.6.1. Общие особенности методов DMLS/SLM 3D-печати

Одним из преимуществ процессов DMLS/SLM является возможность изготовления сложных уникальных моделей, которым необходим высокий уровень детализации или исполнения геометрии, которого невозможно достичь традиционными методами производства. В этих процессах обычно применяется топологическая оптимизация или облегчение конструкции

(аэрокосмическая и автомобильная промышленность) либо органическая геометрия (медицина и стоматология). Изделия также выполняются из устоявшихся материалов, поведение которых хорошо известно.

Основными ограничениями, связанными с DMLS/SLM, являются стоимость и размеры печати. Стоимость 3D-принтеров и материалов очень высока. Именно поэтому традиционные техники изготовления могут оказаться самым эффективным решением по цене для некоторых областей применения, к примеру, DMLS/SLM не подходит для производства типовых шайб и крепок или больших изделий, обычно собираемых из нескольких частей.

Другим ограничением является размер печати. Даже самые крупные 3D-принтеры для металлической печати могут предложить малый объем печати по сравнению с размером изделия, изготовленного распространенными методами производства (табл. 10.3). Также проектирование для металлической 3D-печати изделий требует определенного понимания процесса.

Таблица 10.3

Таблица сравнения результатов создания металлических изделий посредством плавки порошков и струйной печати связующим веществом (значения усредненные и могут варьироваться в зависимости от используемых принтера и материалов)

Показатель	Плавка порошков	Струйная печать связующим веществом
Погрешность	±0,1 мм	0,2 мм
Максимальный размер изделия	25×15×15 см	40×40×75 см
Преимущества/недостатки	Высокая точность. Замечательные механические свойства. Высокая стоимость. Ограниченный размер отпечатка	Низкая стоимость. Очень крупные изделия. Механические свойства не настолько хороши. Ограниченная точность

Одним из самых распространенных мифов о DMLS/SLM является то, что любую деталь или любой металлический объект, сконструированный для традиционных методов производства, можно изготовить при помощи DMLS/SLM 3D-печати. Если изделие изначально было спроектировано для традиционного производства, тогда, вероятнее всего, оно является неподходящим кандидатом для 3D-печати. При проектировании для DMLS/SLM зачастую полезно принять во внимание то, как 3D-печать можно интегрировать в традиционное производство, чтобы они работали синергически. К примеру, одна сложная и важная секция проекта должна быть напечатана, а другие секции попроще произвести на станке с ЧПУ, и затем они должны быть собраны.

10.6.2. Плавка металлических порошков или струйная печать связующим веществом

При выборе между технологиями плавки порошков и струйной печати со связующим веществом придется исходить из соотношения цены и точности размеров, а также учитывать механические свойства. Металлическая струйная печать связующим веществом может оказаться до 10 раз дешевле, чем плавка порошков, но тем не менее погрешности и механические свойства будут не настолько хорошими.

К тому же если размер проекта превышает размер печати для плавки порошков, но выбор стоит только среди технологий 3D-печати, то единственным конкурентоспособным по цене вариантом для изготовления металлических изделий будет струйная печать связующим веществом.

10.7. Распространенные области применения технологий DMLS/SLM

DMLS/SLM больше всего подходит для областей применения, которым необходимы фундаментальные преимущества 3D-печати (возможность производства мелкосерийных слож-

ных изделий), в частности для областей применения и геометрии, которые недостижимы для традиционных методов производства.

10.7.1. Стоматологическое применение

Технология DMLS/SLM стала популярным решением для стоматологической индустрии, а непосредственная металлическая печать коронок и мостов – обыденным явлением (рис. 10.10). Возможность печатать изделия напрямую из металла уменьшает время на подготовку к литьевому процессу, и к тому же способность производить сотни образцов за один ход печати ускоряет процесс конечного изготовления. Как и в медицинском применении, большая степень свободы проектирования и высокая стоимость DMLS/SLM-печати позволяют использовать ее скорее для изготовления уникальных изделий, чем для крупносерийного производства повторяющихся компонентов.

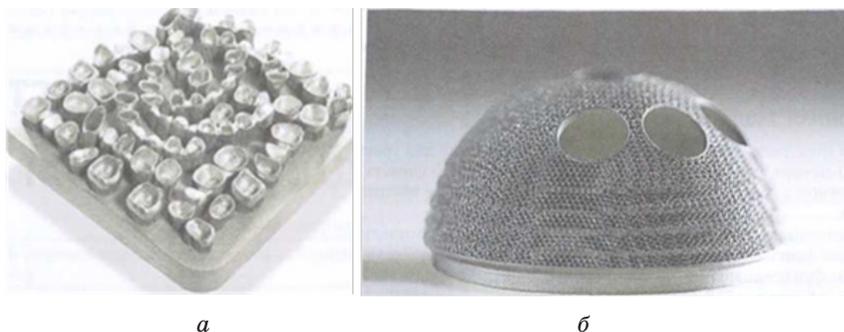


Рис. 10.10. Металлические коронки и основания мостов, изготовленные за один ход печати (а); металлический протез вертлужной впадины (б)

10.7.2. Медицинское применение

Медицинская индустрия стала активно использовать металлическую 3D-печать практически сразу после ее появле-

ния. Сейчас любой идеально подходящий для анатомии пациента проект можно напечатать, и ему можно придать любые характеристики поверхности (например, пористость) для содействия сращению костей и улучшения результатов лечения (рис. 10.10). DMLS/SLM может предложить применение ряда медицинских стерилизуемых металлов. Сегодня высокая стоимость DMLS/SLM-печати предполагает использование технологии исключительно в мелкосерийном сильно адаптированном производстве изделий.

10.7.3. Аэрокосмическая и автомобильная области применения

Для тех типов промышленности (таких как аэрокосмическая, железнодорожная и автомобильная), где важным проектным параметром является уменьшение веса, DMLS/SLM – идеальное решение. DMLS/SLM обладает довольно малым количеством ограничений для технологии, способной составлять геометрии, которые ранее было очень дорого или невозможно производить. Это позволяет изготавливать очень прочные детали, сделанные из высокопроизводительных материалов (таких как титан или алюминиевые сплавы) и обладающие сложной геометрией.

10.8. Электродуговое наращивание

Среди существующих технологий аддитивного производства электродуговое наращивание (Wire arc additive manufacturing, WAAM) представляет интерес в связи с тем, что это относительно новая малоизвестная аддитивная технология, отличающаяся большой производительностью и высокими механическими свойствами получаемых изделий. К недостаткам этой технологии можно отнести неровную поверхность напечатанной модели, что вызвано физикой процесса выращивания, а именно электродуговой наплавкой проволоки.

10.8.1. DED-технология

В целом технологический процесс выращивания детали схож с процессами DED (Directed Energy Deposition) [242]. В DED-технологиях формирование слоя производится путем подачи строительного материала и энергии непосредственно в зону расплавления (рис. 10.11).

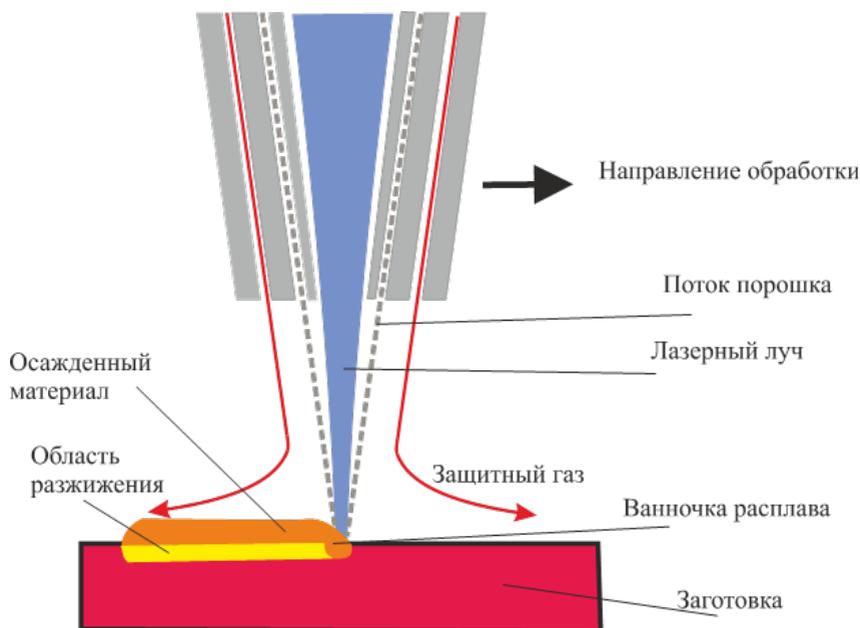


Рис. 10.11. Принципиальная схема формирования наращиваемого слоя по DED-технологии

Принцип данной технологии заключается в изготовлении изделий путем подачи металлического порошка и энергии в оплавляемую область заготовки. Основной рабочий орган машин – это сопловой аппарат для коаксиальной наплавки, представляющий собой агрегат, в котором расположены система фокусировки лазера, система охлаждения, система подачи материала, а также возможно наличие элементов си-

стемы управления (датчики, видеокамеры и т.д.). В зависимости от сочетания параметров построения детали коэффициент использования материала может варьироваться от 0,2 до 0,9 (т.е. от 20 до 90 % материала, поступившего через сопловые отверстия системы подачи, фактически формируют деталь).

Последовательность изготовления модели данным способом выглядит следующим образом:

- с помощью программного обеспечения создаются оптимальные траектории движения напыляющей головки для получения качественной детали. Параметры лазерного излучения и подачи порошкового материала подбираются в соответствии с типом используемого материала, геометрии изделия и т.д.;

- напыляющая головка перемещается в точку начала напыления;

- подача порошка начинается через форсунки, которые создают поток порошка, сходящийся в некоторой точке, отдаленной от самой головки;

- из центра головки исходит лазерное излучение, проходящее через точку схождения потоков металлического порошка;

- лазерный луч расплавляет поверхность подложки, на которую происходит напыление, образуя небольшую ванну расплава. Порошок, доставляемый в эту область, попадает в жидкий металл;

- после затвердевания ванны расплава образуется дорожка нанесенного металла.

Управление параметрами наносимой дорожки может производиться как вручную, так и через данные САПР-системы. Напыление, как правило, происходит в инертной атмосфере аргона, в которой контролируется содержание кислорода. Требования по содержанию кислорода варьируются в зависимости от типа используемого материала. Этот метод позволяет изготавливать изделия с особой микроструктурой, образующейся благодаря высоким скоростям затвердевания металла.

Материалы, полученные с помощью газопорошковой наплавки, обладают высокими механическими свойствами. Подбор оптимальных параметров процесса позволяет получать сплошную структуру материала, а использование систем контроля процесса наплавки снижает вероятность образования дефектов и повышает точность процесса. Процесс использует множество материалов, таких как сплавы на основе железа, титана, никеля, алюминия и др. В технологии DED обычно используется лазер мощностью до нескольких киловатт и большим по сравнению с селективным лазерным плавлением диаметром пятна, что обеспечивает высокую скорость изготовления деталей.

Технологии, использующие непосредственную подачу исходного материала в область расплава заготовки, используются как для создания новых изделий, так и для ремонта уже существующих. В отличие от технологий, предусматривающих выращивание изделия внутри порошка, такие технологии обладают большей производительностью, позволяют получать функционально-градиентные изделия (изделия из нескольких материалов либо с плавным переходом), но имеют ограничения при изготовлении тонких стенок и сложной геометрии изделий. Также качество поверхности у технологий с непосредственной подачей материала оказывается ниже чем у технологий DMLS/SLM, EBM.

Процесс позволяет изготавливать изделия из нескольких материалов, например если элементы прототипа изделия состоят из различных материалов или элементы проектируемого изделия должны состоять из различных конструкционных материалов. Также существует возможность изготавливать функционально-градиентные изделия с плавным переходом состава материала от одного элемента к другому или осуществлять *in situ* синтез сплавов. Технология позволяет производить ремонт, модификацию, восстановление и добавление элементов к существующим деталям различной геометрии.

10.8.2. WAAM-принтер

В WAAM-технологии перед началом выращивания с использованием компьютера трехмерная модель изделия (CAD) разбивается на плоскости, в каждой из которых строится путь движения робота, осуществляющего наплавку, что записывается в соответствующую программу (CAM). Предварительно проводится ряд тестов, позволяющих оценить размер одного наплавочного валика в зависимости от используемых технологических параметров процесса (скорость наплавки, сила тока, напряжение дуги и т.д.), геометрия валика учитывается при построении траектории движения робота в каждом из слоев, после чего программа движения робота переносится на робота и производится сам процесс наплавки. Параллельно разрабатывается стратегия механической обработки изделия (фрезеровки), которая также становится управляющей программой фрезерного станка (CAM), по которой поверхность изделия доводится до необходимого качества.



Рис. 10.12. Опытный образец WAAM-принтера

На рис. 10.12 показан опытный образец принтера, использующего WAAM-технологию. Данный принтер использует электродуговую наплавку материала при изготовлении модели. Строительным материалом является металлическая проволока.

Разработан принтер для печати крупногабаритных металлических объектов.

На рис. 10.13 показаны напечатанные на этом принтере небольшие объекты – ваза и сапожок.



Рис. 10.13. Небольшие модели, напечатанные на опытном WAAM-принтере. Модели представлены без постобработки

На рис. 10.14 показана скульптурная композиция «Огнеборец», к которой была применена постобработка.

На рис. 10.15 представлена садово-парковая скульптура «Рудокопы», напечатанная на опытном WAAM-принтере. Для обеих скульптурных композиций было сначала выполнено 3D-сканирование реальных объектов и людей. Затем была проведена стандартная обработка слайсером, и уже после этого выполнена печать на принтере.



Рис. 10.14. Скульптурная композиция «Огнеборец», напечатанная на опытном WAAM-принтере



Рис. 10.15. Скульптурная композиция «Рудокопы», напечатанная на опытном WAAM-принтере

Контрольные вопросы

1. Какие бывают технологии плавки металлических порошков?
2. Какие существуют особенности аддитивного производства и проектирования металлических прототипов?
3. Как могут влиять технологические параметры DMLS/SLM-процессов на аддитивного производство?
4. Поясните принципиальное устройство DMLS/SLM 3D-принтера.
5. Назовите основные характеристики 3D-принтера для печати с помощью плавки металлических порошков.
6. Какие материалы используются в 3D-печати с помощью плавки металлических порошков?
7. Назовите основные преимущества и недостатки DMLS/SLM-технологий.
8. Назовите особенности постобработки изделий после DMLS/SLM-технологий.
9. Каково соблюдение точности размеров в DMLS/SLM-технологиях?
10. Что такое плавка металлических порошков и струйная 3D-печать связующим веществом?
11. Расскажите о DED-технологии.
12. Что такое печать с помощью электродугового наращивания?
13. Назовите особенности WAAM 3D-принтера.

ГЛАВА 11. Основные правила для правильного выбора технологии 3D-печати

В предыдущих главах вы изучили информацию, необходимую для принятия решения о выборе технологии 3D-печати для определенной области применения. Эта глава послужит кратким руководством для быстрого принятия решений по всем технологиям, которые были рассмотрены ранее.

Для сравнения технологий 3D-печати, рассмотренных выше, может быть использована табл. 11.1. Для того чтобы сделать эту таблицу более эффективной, ниже представлены некоторые высокоуровневые упрощения.

Технологии разделены на категории по возможности с их помощью изготавливать изделия для функциональных или демонстративных целей.

С точки зрения производства функциональных полимерных изделий рекомендуется сравнивать технологии FFF/FDM и SLS, так как у SLS преобладающие свойства, но в другой ценовой категории. Для крайне сложных функциональных изделий, скорее всего, SLS окажется единственным вариантом.

Для нефункциональных изделий, в которых важна эстетика, рекомендуется сравнивать SLA/DLP со струйной 3D-печатью (полимерные реактопласты), где струйная 3D-печать имеет преимущество в качестве поверхности и точности размеров, но у нее значительно более высокие ценовые диапазоны.

И наконец, для металлических изделий рекомендуется сравнивать струйную печать связующим веществом и DMLS/SLM (металлические порошки), опять же в основном их следует рассматривать в соотношении цены и свойств. Струйная печать связующим веществом может оказаться на порядок дешевле, чем плавка порошков, но погрешность размеров и механические свойства изделий не настолько различаются. Если физический размер изделия более крупный, чем объем печати, предусмотренный для DMLS/SLM, то струйная печать связующим веществом здесь окажется единственным вариантом.

Следует заметить, что существует большое множество ситуаций, в которых эти обобщенные правила неприменимы, к примеру, в функциональном применении SLA/DLP-изделий или струйной 3D-печати либо бюджетного визуального прототипирования с использованием FFF/FDM. Но, как правило, их надежно можно рассматривать как начальную точку для выбора необходимой технологии.

Таблица 11.1
Сводная таблица особенностей технологий 3D-печати

Параметр	FFF	SLA/DLP	SLS
Группа материалов	Термопластичный филамент	Фотополимерная смола	Термопластичный порошок
Типичные материалы	PLA. ABS. PEI. TPU	Стандартная. Литьевая. Прозрачная. Высокотемпературная	Нейлон 6. Нейлон 11. Нейлон 12
Точность размеров	0,5 % (нижний предел)	±0,5 % (нижний предел)	±0,3 % (нижний предел)
	±0,5 мм)	±0,15 мм)	±0,3 мм)
Необходимость поддержек	Да, доступны растворимые	Да	Нет
Преимущества	Низкая стоимость. Функциональные изделия (некоммерческие)	Гладкая поверхность. Высокая детализация элементов	Функциональные изделия, хорошие механические свойства. Сложная геометрия
Недостатки	Ограниченная точность размеров для малых изделий. Напечатанные слои часто различимы на поверхности	Хрупкость, не подходит для механических изделий	Увеличенное время на подготовку. Более высокая стоимость для изделий функционального назначения

Продолжение табл. 11.1

Параметр	FFF	SLA/DLP	SLS
Распространенные области применения	Корпусы для электроники. Выверение формы и соответствия. Монтажные и установочные приспособления. Шаблоны для литья	Полимерные прототипы для промышленного литья. Ювелирное дело (литье прессовани-ем). Стоматологическое применение. Слуховые аппараты	Функциональ-ные полимерные изделия. Сложные каналы (полые конструк-ции). Мелкосерийное производство
Параметр	Струйная 3D-печать	Струйная печать связующим веще-ством	DMLS/SLM
Группа материалов	Фотополимерная смола	Песчаный или металлический по-рошок	Металлический порошок
Типичные материалы	Стандартная. Литьевая. Прозрачная. Высокотемпера-турная	Нержавейка/брон-за Полноцветный песчаный кремний (литье в песчаные формы)	Алюминий. Нержавеющая сталь. Титан
Точность размеров	$\pm 0,1$ мм	$\pm 0,2$ мм (металл) или $\pm 0,3$ мм (песок)	$\pm 0,1$ мм
Необходимость поддержек	Растворимые	Нет	Да
Преимущества	Наилучшее каче-ство поверхности. Полноцветная пе-чат из нескольких материалов	Низкая стоимость. Большой объем печати. Функциональные металлические из-делия	Самые прочные, функциональные изделия. Сложная геометрия
Недостатки	Хрупкость, не под-ходит для функци-ональных изделий. Более высокая сто-имость для визу-ального применения по сравнению с SLA/DLP	Механические свой-ства не настолько хороши, как в плав-ке металлических порошков	Малый объем печати. Самая высокая стоимость среди всех рассматри-ваемых техно-логий

Окончание табл. 11.1

Параметр	FFF	SLA/DLP	SLS
Распространенные области применения	Полноцветные прототипы. Прототипы для промышленного литья. Мелкосерийное производство литевых форм. Медицинские модели	Функциональные металлические изделия. Полноцветные модели. Литье в песчаные формы	Функциональные металлические изделия (аэрокосмическая и автомобильная промышленность). Медицина. Стоматология

Контрольные вопросы

1. Назовите параметры сравнения технологий 3D-печати.
2. Охарактеризуйте типичные материалы, используемые в различных технологиях 3D-печати.
3. Назовите характерные области применения различных технологий 3D-печати.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие информационных технологий ускорило переход к новому технологическому укладу – Индустрии 4.0. Но фактически существование и развитие Индустрии 4.0 сильно зависит от возможностей аддитивного производства. Для развития Индустрии 4.0 необходимо распространение аддитивных технологий по множеству регионов, фабрик, заводов и предприятий, вплоть до отдельных хозяйств и пользователей. Поэтому потребность в 3D-печати различными материалами с применением подходящих технологий будет возрастать, и подготовка специалистов, владеющих современными методами проектирования для решения производственных задач с помощью 3D-печати, которые могут самостоятельно принимать решения о печати, выполнять подбор необходимых технологий и материалов для изготовления функциональных изделий, является актуальной задачей, которую необходимо решать ускоренными темпами. И предлагаемая книга окажет неоценимую помощь в решении задачи подготовки специалистов, осуществляющих переход к новому технологическому укладу – Индустрии 4.0.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Industrie 4.0 Working Group, 2013, “Securing the Future of German Manufacturing Industry – Recommendations for Implementing the Strategic Initiative,” acatech, Munich, Germany, accessed Aug. 28, 2016, http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf.

2. Шваб К. Четвертая промышленная революция. – М.: Эксмо, 2016. – 138 с.

3. Tao F., Cheng Y., Zhang L., Nee A. Y. C. Advanced Manufacturing Systems: Socialization Characteristics and Trends // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2017. – Vol. 28. – P. 1079–1094.

4. Buyya R., Yeo C.S., Venugopal S., Broberg J., Brandic I. Cloud Computing and Emerging IT Platforms: Vision, Hype, and Reality for Delivering Computing as the 5th Utility // Future Generation Computer Systems. – 2009. – Vol. 25. – No 6. – P. 599–616.

5. Li B.H., Zhang L., Wang S.L., Tao F., Cao J.W., Jiang X.D., Song X., Chai X.D. Cloud Manufacturing: A New Service-Oriented Manufacturing Model // Computer Integrated Manufacturing Systems. – 2010. – Vol. 16. – No 1. – P. 1–8.

6. BITKOM, VDMA, and ZVEI, 2016, “Implementation Strategy Industrie 4.0, Report on the results of the Industrie 4.0 Platform”, ZVEI, Frankfurt, Germany, accessed Aug. 28, 2016, <http://www.zvei.org/Publikationen/Implementation-Strategy-Industrie-40-ENG.pdf>.

7. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios // IEEE 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). – 2016. Jan. 5–8. – P. 3928–3937.

8. Rümman M., Lorenz M., Gerbert P., Waldner M., Justus J., Engel P., Harnisch M. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries // The Boston Consulting Group, Boston, MA, accessed Aug. 28, 2016. – https://www.bcg-perspectives.com/content/articles/engineered_products_project_business_industry_40_future_productivity_growth_manufacturing_industries/.

9. Leitão P., Colombo A.W., Karnouskos S. Industrial Automation Based on Cyber-Physical Systems Technologies: Prototype Implementations and Challenges // *Computers in Industry*. – 2016. – Vol. 81. – P. 11–25.

10. Monostori L. Cyber-Physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 17. – P. 9–13.

11. Wang L., Tomgren M., Onori M. Current Status and Advancement of Cyber-Physical Systems in Manufacturing // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2015. – Vol. 37. – Pt. 2. – P. 517–527.

12. Lee J., Bagheri B., Kao H.A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems // *Manufacturing Letters* – 2015. – Vol. 3. – P. 18–23.

13. Radziwon A., Bilberg A., Bogers M., Madsen E.S. The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 69. – P. 1184–1190.

14. Shrouf F., Ordieres J., Miragliotta G. Smart Factories in Industry 4.0: A Review of the Concept and of Energy Management Approached in Production Based on the Internet of Things Paradigm // *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. – 2014. – Dec. 9–12. – P. 697–701.

15. Wang S., Wan J., Li D., Zhang C. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook // *International Journal of Distributed Sensor Networks*. – 2016. – <https://doi.org/10.1155/2016/3159805>.

16. Munera E., Poza-Lujan J.L., Posadas-Yagüe J.L., Simo J., Blanes J.F., Albertos P. Control Kernel in Smart Factory Environments: Smart Resources Integration // *IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. – 2015. – June 8–12. – P. 2002–2005.

17. Brettel M., Friederichsen N., Keller M., Rosenberg M. How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective // *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*. – 2014. – Vol. 8. – No 1. – P. 37–44.

18. Veza I., Mladineo M., Gjeldum N. Managing Innovative Production Network of Smart Factories // IFAC Papers On Line. – 2015. – Vol. 48. – No 3. – P. 555–560.

19. Lee J., Kao H.A., Yang S. Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment // Procedia CIRP. – 2014. – Vol. 16. – P. 3–8.

20. Yin S., Kaynak O. Big Data for Modern Industry: Challenges and Trends // Proceedings of the IEEE. – 2015. – Vol. 103. – No 2. – P. 143–146.

21. Gölzer, Philipp; Cato, Patrick; and Amberg, Michael. Data Processing Requirements of Industry 4.0 - Use Cases for Big Data Applications // ECIS. – 2015. – Research-in-Progress Papers. Paper 61. – https://aisel.aisnet.org/ecis2015_rip/61.

22. Pisching M.A., Junqueira F., Santos Filho D.J., Miyag P.E. Service Composition in the Cloud-Based Manufacturing Focused on the Industry 4.0 // Technological Innovation for Cloud-Based Engineering Systems (IFIP Advances in Information and Communication Technology Series. – 2015. – Vol. 450. Springer International Publishing. Cham, Switzerland. – P. 65–72.

23. Yue X., Cai H., Yan H., Zou C., Zhou K. Cloud-Assisted Industrial Cyber-Physical Systems: An Insight // Microprocessors and Microsystems: Embedded Hardware Design (MICPRO) – 2015. – Vol. 39. – No 8. – P. 1262–1270.

24. Zolotova I., Bundzel M., Lojka T. Industry IoT Gateway for Cloud Connectivity // Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth (IFIP Advances in Information and Communication Technology Series). – 2015. – Vol. 460. Springer International Publishing, Cham, Switzerland. – P. 59–66.

25. Yen C.T., Liu Y.C., Lin C.C., Kao C.C., Wang W.B., Hsu Y.R. Advanced Manufacturing Solution to Industry 4.0 Trend Through Sensing Network and Cloud Computing Technologies // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). – 2014. – P. 1150–1152.

26. Helo P., Suorsa M., Hao Y., Anussornnitisarn P. Toward a Cloud-Based Manufacturing Execution System for Distributed Manufacturing // Computers in Industry. – 2014. – Vol. 65. – No 4. – P. 646–656.

27. Schuh G., Potente T., Varandani R., Hausberg C., Fränken B. Collaboration Moves Productivity to the Next Level // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 17. – P. 3–8.

28. Paelke V. Augmented Reality in the Smart Factory: Supporting Workers in an Industry 4.0 Environment // *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)* Sept. – 2014. – Sept. – P. 16–19. – DOI: 10.1109/ETFA33519.2014.

29. Toro C., Barandiaran I., and Posada J. A Perspective on Knowledge Based and Intelligent Systems Implementation in Industrie 4.0 // *Procedia Computer Science*. – 2015. – Vol. 60. – P. 362–370.

30. Varghese A., Tandur D. Wireless Requirements and Challenges in Industry 4.0 // *International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*. – 2014. – Nov. 27–29. – P. 634–638.

31. Peniak P., Franekova M. Open Communication Protocols for Integration of Embedded Systems within Industry 4 // *International Conference on Applied Electronics (AE)*. – 2015, Sept. – Vol. 8–9. – P. 181–184.

32. Adeyeri M.K., Mpofo K., Olukorede T.A. Integration of Agent Technology into Manufacturing Enterprise: A Review and Platform for Industry 4.0 // *2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)*. – 2015, Mar. – Vol. 3–5. – P. 1–10. – DOI: 10.1109/IEOM.2015.7093910.

33. Weyer S., Schmitt M., Ohmer M., Gorecky D. Towards Industry 4.0-Standardization as the Crucial Challenge for Highly Modular, Multi-Vendor Production Systems // *IFAC Papers On Line* – 2015. – Vol. 48. – No 3. – P. 579–584.

34. Bornschlegl M., Drechsel M., Kreitlein S., Bregulla M., Franke J. A New Approach to Increasing Energy Efficiency by Utilizing Cyber-Physical Energy Systems // *11th Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (WISES)*. – 2013, Sept. – Vol. 10–11.

35. Gorecky D., Schmitt M., Loskyll M., Zühlke D. Human-Machine-Interaction in the Industry 4.0 Era // *12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. – 2014, July 27–30. – P. 289–294.

36. Gorecky D., Khamis M., Mura K. Introduction and Establishment of Virtual Training in the Factory of the Future //

International Journal of Computer Integrated Manufacturing. – 2017. – Vol. 30. – Issue 1. – P. 182–190. –

37. Schuh G., Gartzzen T., Rodenhauser T., Marks A. Promoting Work-Based Learning through INDUSTRY 4.0 // Procedia CIRP. – 2015. – Vol. 32. – P. 82–87.

38. Xu X. From Cloud Computing to Cloud Manufacturing // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2012. – Vol. 28. – No 1. – P. 75–86.

39. Tao F., Cheng Y., Xu L.D., Zhang L., Li, B.H. CCIoT-CMfg: Cloud Computing and Internet of Things-Based Cloud Manufacturing Service System // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2014. – Vol. 10. – No 2. – P. 1435–1442.

40. Adamson G., Wang L., Holm M., Moore P. Cloud Manufacturing – A Critical Review of Recent Development and Future Trends // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. – 2017. – Vol. 30. – Issue 4–5. – P. 347–380. – Published online: 14 Apr 2015. – <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1031704>.

41. Wu D., Greer M.J., Rosen D.W., Schaefer D. Cloud Manufacturing: Strategic Vision and State-of-the-Art // Journal of Manufacturing Systems. – 2013. – Vol. 32. – No 4. – P. 564–579.

42. He W., Xu L. A State-of-the-Art Survey of Cloud Manufacturing // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. – 2015. – Vol. 28. – No 3. – P. 239–250.

43. Li B.H., Zhang L., Ren L., Chai X.D., Tao F., Luo Y.L., Wang Y.Z., Yin C., Huang G., Zhao X.P. Further Discussion on Cloud Manufacturing // Computer Integrated Manufacturing Systems. – 2011. – Vol. 17. – No 3. – P. 449–457.

44. Luo Y.L., Zhang L., He D.J., Ren L., Tao F. Study on Multi-View Model for Cloud Manufacturing // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 201–203. – P. 685–688.

45. Fan W.H., Xiao T.Y. Integrated Architecture of Cloud Manufacturing Based on Federation Mode // Computer Integrated Manufacturing Systems. – 2011. – Vol. 17. – No 3. – P. 469–476.

46. Ren L., Zhang L., Wang L., Tao F., Chai X. Cloud Manufacturing: Key Characteristics and Applications // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. –

2017. – Vol. 30. – Issue 6. – P. 501–515. – Published online: 04 Apr 2014. – DOI: 10.1080/0951192X.2014.902105.

47. Tao F., Zhang L., Guo H., Luo Y.L., Ren L. Typical Characteristics of Cloud Manufacturing and Several Key Issues of Cloud Service Composition // Computer Integrated Manufacturing Systems. – 2011. – Vol. 17. – No 3. – P. 477–486.

48. Tao F., Cheng J., Cheng Y., Gu S., Zheng T., Yang H. SDM-Sim: A Manufacturing Service Supply – Demand Matching Simulator Under Cloud Environment // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2017. – Vol. 45, No. 6. – P. 34–46. – <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.07.001>.

49. Luo Y., Zhang L., Tao F., Ren L., Liu Y., Zhang Z. A Modeling and Description Method of Multidimensional Information for Manufacturing Capability in Cloud Manufacturing System // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. Vol. 69. – No 5–8. – P. 961–975.

50. Wang X.V., Xu X.W. An Interoperable Solution for Cloud Manufacturing // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2013. – Vol. 29. – No 4. – P. 232–247.

51. Tao F., Zhang L., Liu Y., Cheng Y., Wang L., Xu X. Manufacturing Service Management in Cloud Manufacturing: Overview and Future Research Directions // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2015. – Vol. 137. – No 4. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4030510>.

52. Yin C., Huang B.Q., Liu F., Wen L.J., Wang Z.K., Li X.D., Yang S.P., Ye D., Liu X.H. Common Key Technology System of Cloud Manufacturing Service Platform for Small and Medium Enterprises // Computer Integrated Manufacturing Systems. – 2011. – Vol. 17. – No 3. – P. 495–503.

53. Zhan D.C., Zhao X.B., Wang S.Q., Cheng Z., Zhou X.Q., Nie L.S., Xu X.F. Cloud Manufacturing Service Platform for Group Enterprises Oriented to Manufacturing and Management // Computer Integrated Manufacturing Systems. – 2011. – Vol. 17. – No 3. – P. 487–494.

54. Lu Y., Xu X., Xu J. Development of a Hybrid Manufacturing Cloud // Journal of Manufacturing Systems. – 2014. – Vol. 33. – No 4. – P. 551–566.

55. Yu C., Xu X., Lu Y. Computer-Integrated Manufacturing, Cyber-Physical Systems and Cloud Manufacturing-Concepts and Relationships // *Manufacturing Letters*. – 2015. – No 6. – P. 5–9.

56. Herterich M.M., Uebernickel F., Brenner W. The Impact of Cyber-Physical Systems on Industrial Services in Manufacturing // *Procedia CIRP*. – 2015. – Vol. 30. – P. 323–328.

57. Zawadzki P., Żywicki K. Smart product design and production control for effective mass customization in the industry 4.0 concept // *Management and production engineering review*. – 2016. – Vol. 7. – No 3. – P. 105–112.

58. Liu Y., Xu X. Industry 4.0 and Cloud Manufacturing: A Comparative Analysis // *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 139. – No 3. – P. 1–8. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4034667>.

59. Wang L., Wang G. Big Data in Cyber-Physical Systems, Digital Manufacturing and Industry 4.0 // *International Journal of Engineering and Manufacturing*. – 2016. – Vol. 6. – No 4. – P. 1–8. – DOI: 10.5815/ijem.2016.04.01.

60. Thompson M.K., Moroni G., Vaneker T., Fadel G., Campbell R.I., Gibson I., Bernard A., Schulz J., Graf P., Ahuja B., Martina F. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 65. – Issue 2. – P. 737–760. – DOI: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.

61. Singh S., Ramakrishna S., Singh R. Material issues in additive manufacturing: A review // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2017. – Vol. 25. – No 1. – P. 185–200. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.11.006.

62. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 117. – P. 371–392. – <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>.

63. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review // *International Materials Reviews*. – 2016. – Vol. 61. – Issue 5. – P. 361–377. – <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>.

64. Grigoriev A., Polozov I., Sufiiarov V., Popovich A. In-situ synthesis of Ti₂AlNb-based intermetallic alloy by selective laser

melting // *Journal of Alloys and Compounds*– 2017. – Vol. 704. – P. 434–442.

65. Tang M., Pistorius P.C. Oxides, porosity and fatigue performance of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting // *International Journal of Fatigue*. – 2017. – Vol. 94, Part 2. – P. 192–201.

66. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // *International Materials Reviews*. – 2016. – Vol. 61. – Issue 5. – P. 315–360. – <https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649>.

67. Khoo Z.X., Teoh J.E. M., Liu Y., Chua C.K., Yang S., An J., Leong K.F., Yeong W.Y. 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2015. Vol. 10. – Issue 3 – P. 103–122. – <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054>.

68. Zarek M., Layani M., Eliazar S., Mansour N., Cooperstein I., Shukrun E., Szlar A., Cohn D., Magdassi S. 4D printing shape memory polymers for dynamic jewellery and fashionwear // *Virtual and Physical Prototyping*.. – 2016. – Vol. 11. – Issue 4. – P. 263–270. – DOI: 10.1080/17452759.2016.1244085.

69. Kim K., Zhu W., Qu X., Aaronson C., McCall W.R., Chen S., Sirbuly D.J. 3D optical printing of piezoelectric nanoparticle-polymer composite materials // *ACS Nano*. – 2014. – Vol. 8, No. 10, – P. 9799–9806. – <https://doi.org/10.1021/nn503268f>.

70. Rossiter J., Walters P., Stoimenov B. Printing 3D dielectric elastomer actuators for soft robotics // *SPIE Conference Proceedings*. – *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. – Published in *SPIE Proceedings*. – 2009. – Vol. 7287. – (6 April 2009); DOI: 10.1117/12.815746.

71. G. Qi, D.K. Conner, Q.H. Jerry, D.L. Martin. Active Origami by 4D Printing // *Journal of Smart Materials and Structure*. – 2014. – Vol. 23. – P. 1–15. Article ID: 094007. – <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/9/09400>.

72. Raviv D., Zhao W., McKnelly C., Papadopoulou A., Kadambi A., Shi B., Hirsch S., Dikovsky D., Zyracki M., Olguin C., Rasakar R., Tibbits S. Active Printed Materials for Complex Self-Evolving Deformations // *Scientific Reports*. – 2014. – Vol. 4, Article number: 7422. – P. 1–8. DOI: 10.1038/srep07422.

73. MacCurdy R., Katzschmann R., Kim Y., Rus D. Printable Hydraulics: A Method for Fabricating Robots by 3D Co-Printing Solids and Liquids // 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA): Stockholm, Sweden, May 16–21. – 2016. – P. 3878–3885.

74. MacDonald E., Salas R., Espalin D., Perez M., Aguilera E., Muse D., Wicker, R.B. 3D printing for the rapid prototyping of structural electronics // IEEE Access. – 2014. – Vol. 2. – P. 234–242. – DOI: 10.1109/ACCESS.2014.2311810.

75. Ota H., Emaminejad S., Gao Y., Zhao A., Wu E., Challa S., Chen K., Fahad H.M., Jha A.K., Kiriya D., Gao W., Shiraki H., Morioka K., Ferguson A.R., Healy K.E., Davis R.W., Javey A. Application of 3D Printing for Smart Objects with Embedded Electronic Sensors and Systems // Advanced Material Technologies. – 2016. – Vol. 1. – P. 1–22. DOI: 10.1002/admt.201600013.

76. MacDonald E., Wicker R. Multiprocess 3D printing for increasing component functionality // Science. – 2016. – Vol. 353. – Issue 6307. – P. 1512–1520.

77. Labonnote N., Ronnquist A., Manum B., Ruther P. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities // Automation in Construction. – 2016. – Vol. 72. – P. 347–366. – DOI: 10.1016/J.AUTCON.2016.08.026.

78. Vanderploeg A., Lee S.E., Mamp M. The Application of 3D Printing Technology in the Fashion Industry // International Journal of Fashion Design, Technology and Education. – 2017. – Vol. 10. – Issue 2. – P. 170–179. – <https://doi.org/10.1080/17543266.2016.1223355>.

79. Godoi F.C., Prakash S., Bhandari B.R. 3d Printing Technologies Applied for Food Design: Status and Prospects // Journal of Food Engineering. – 2016. – Vol. 179. – P. 44–54. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025.

80. Goulas A., Friel R.J. 3D printing with moon dust // Rapid Prototyping Journal. – 2016. – Vol. 22. – Issue 6. – P. 864–870. – <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2015-0022>.

81. Cesaretti G., Dini E., De Kestelier X., Colla V. and Pambaguan, L. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology // Acta Astronautica. –

2014. – Vol. 93. – P. 430–450. – <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034>.

82. Kading B., Straub J. Utilizing in-situ resources and 3D printing structures for a manned Mars mission // *Acta Astronautica*. – 2015. – Vol. 107. – P. 317–326. – <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.11.036>.

83. Gardan J. Additive manufacturing technologies: state of the art and trends // *International Journal of Production Research*. – 2016. – Vol. 54. – Issue 10. – P. 3118–3132. – <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1115909>.

84. Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C.B., Wang C.C. L., Shin Y.C., Zhang S., Zavattieri P.D. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering // *Computer-Aided Design*. – 2015. – Vol. 69. – P. 65–89.

85. Kumar S., Sarang T., Sanat P., Santosh A., Bobade M., Tiwari S.K., Pande S., Agrawal S., Bobade S.M. Selection of selective laser sintering materials for different applications // *Rapid Prototyping Journal*. – 2015. – Vol. 21. – Issue 6. – P. 630–648.

86. Wang F., Williams S., Colegrove P.A., Antonysamy A.A. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V // *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*. – 2013. – Vol. 44. – P. 968–977. DOI: 10.1007/s11661-012-1444-6.

87. “xJet Technology” 2017. [Online]. Available: <https://www.xjet3d.com/technology>. [Accessed: 30-Oct-2022].

88. “Markforged MetalX” 2017. [Online]. Available: <https://markforged.com/metal-x/>. [Accessed: 27-Oct-2022].

89. “Single Pass Jetting” 2017. [Online]. Available: <https://www.desktopmetal.com/products/production/>. [Accessed: 30-Oct-2022].

90. Duda T., Raghavan L.V. 3D Metal Printing Technology. // *IFAC-PapersOnLine*. – 2016. – Vol. 49. – Issue 29. – P. 103–110. – <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.111>.

91. Grasso M., Colosimo B.M. Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review // *Measurement Science and Technology*. – 2017. – Vol. 28. – No 4.

92. Manogharan G., Wysk R., Harrysson O., Aman R. AIMS – a metal additive-hybrid manufacturing system: system ar-

chitecture and attributes // *Procedia Manufacturing*. – 2015. – Vol. 1. – P. 273–286.

93. Kerbrat O., Mognol P., Hasco t J.Y. A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing // *Computers in Industry*. – 2011. – Vol. 62. – Issue 7. – P. 684–692. – <https://doi.org/10.1016/j.compind.2011.04.003>.

94. Flynn J.M., Shokrani A., Newman S.T., Dhokia V. Hybrid additive and subtractive machine tools – research and industrial developments // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2016. – Vol. 101. – P. 79–102. – <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007>.

95. Lee W.C., Wei C.C., Chung S.C. Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – Vol. 214. – Issue 11. – P. 2366–2374. – <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.004>.

96. Boschetto A., Bottini L., Veniali F. Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2016. – Vol. 41. – P. 92–101. – <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.03.004>.

97. Du W., Bai Q., Zhang B. A Novel Method for Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing of Metallic Parts // *Procedia Manufacturing*. – 2016. – Vol. 5. – P. 1018–1030. – <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.067>.

98. Hai-ou, Z., Wang, R., Liang, L. and Gui-lan, W. HDMR technology for the aircraft metal part // *Rapid Prototyping Journal*. – 2016. – Vol. 22, No. 6. – P. 857–863. – <https://doi.org/10.1108/RPJ-05-2015-0047>.

99. Zhu Z., Dhokia V.G., Newman S.T. A novel process planning approach for hybrid manufacturing consisting of additive, subtractive and inspection processes // *Proceedings of 2012 IEEE international conference on industrial engineering and engineering management (IEEM2012): Hong Kong, China*. – 2012. – P. 1617–1621.

100. Zhu Z., Dhokia V.G., Newman S.T. The development of a novel process planning algorithm for an unconstrained hybrid manufacturing process // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2013. – Vol. 15. – P. 404–413.

101. Zhu Z., Dhokia V., Newman S.T. A novel decision-making logic for hybrid manufacture of prismatic components based on existing parts // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2017. – Vol. 28. – No. 1. – P. 131–148.

102. Kunke M., Watschke H., Vietor T. A New Methodological Framework for Design for Additive Manufacturing // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2016. – Vol. 11. – No. 1. – P. 3–19. – <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.113937>.

103. Salonitis K. Design for additive manufacturing based on the axiomatic design method // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 87. – Issue 1-4. – P. 989–996. – <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8540-5>.

104. Asadollahi-Yazdi E., Gardan J., Lafon P. Multi-objective optimization approach in design for additive manufacturing for fused deposition modeling // *Rapid Prototyping Journal*. – 2019. – Vol. 25. – No 5. – P. 875–887. – <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2018-0186>.

105. Tang Y., Zhao Y.F. A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance // *Rapid Prototyping Journal*. – 2016. – Vol. 22. No. 3. – P. 569–590. – <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2015-0011>.

106. Gardan N., Schneider A. Topological Optimization of Internal Patterns and Support in Additive Manufacturing // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2015. – Vol. 37. Part 1. – P. 417–425. – <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.07.003>.

107. Dbouk T. A review about the engineering design of optimal heat transfer systems using topology optimization // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 112. – P. 841–854. – <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.134>.

108. Zhu J., Zhou H., Wang C., Zhou L., Yuan S., Zhang W. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2021. – Vol. 34. – Issue 1. – P. 91–110. – <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020>.

109. Delfs P., Töws M., Schmid H.-J. Optimized build orientation of additive manufactured parts for improved surface quality and build time // *Additive Manufacturing. Special Issue on Modeling & Simulation for Additive Manufacturing*. –

2016. – Vol. 12, Part B. – P. 314–320. – <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.06.003>.

110. Junk S., Kuen C. Review of Open Source and Freeware CAD Systems for Use with 3D-Printing // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 50. – P. 430–435. – <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.174>.

111. Yaman U., Butt N., Sacks E., Hoffmann C. Slice coherence in a query-based architecture for 3D heterogeneous printing // *Computer-Aided Design*. – 2016. – Vol. 75–76. – P. 27–38. – <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.02.005>.

112. Huang Y., Leu M.C., Mazumder J., Donmez A. Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations // *Journal of Manufacturing Science Engineering*. – 2015. – Vol. 137. – Issue 1. – Article number 014001. – <https://doi.org/10.1115/1.4028725>.

113. Rayna T., Striukova L. From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation // *Technological Forecasting and Social Change*. – 2016. – Vol. 102. – P. 214–224. – <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023>.

114. Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C.B., Wang C.C.L., Shin Y.C., Zhang S., Zavattieri P.D. The Status, challenges, and future of Additive Manufacturing in engineering // *Computer-Aided Design*. – 2015. – Vol. 69. – P. 65–89. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.

115. Spoerk M., Savandaiah C., Arbeiter F., Sapkota J., Holzer C. Optimization of mechanical properties of glass-spheres-filled polypropylene composites for extrusion-based additive manufacturing // *Polymer Composites*. – 2019. – Vol. 40. – Issue 2. – P. 638–651. – <https://doi.org/10.1002/pc.24701>.

116. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges // *Composites Part B: Engineering*. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196. – <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.

117. Carneiro O.S., Silva A.F., Gomes R. Fused deposition modeling with polypropylene // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 83. – P. 768–776. – <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.053>.

118. Pedersen D.B. Additive Manufacturing Multi Material Processing and Part Quality Control. // Technical University of Denmark. PhD dissertation. – 2013. – 247 p.

119. Sadikalmahdi Abdella, Souha H. Youssef, Franklin Afinjuomo Yunmei Song, Paris Fouladian. 3D Printing of Thermo-Sensitive Drugs. Review. // Pharmaceutics. – 2021. – Vol. 13. – Issue 9. 1524. – <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13091524>.

120. Barnatt C. 3D Printing. – Third Edition. – First published by ExplainingTheFuture.com. – UK. – 2016. – 191 p.

121. ASTM F2792-12. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. – 2012.

122. Madla C.M., Trenfield S.J., Goyanes A., Gaisford S., Basit A.W. 3D printing technologies, implementation and regulation: an overview // Basit A.W., Gaisford S. (Eds.). 3D Printing of Pharmaceuticals. – Springer International Publishing. – 2018. – P. 21–40.

123. Ponomarenko V.G., Potebnya G.F., Ulyev L.M. Peculiarities of flow and heat exchange of the high-viscosity liquids in cylindrical canal // Fluid mechanics of Soviet research. – 1985. – Vol. 14. – No 4. – P. 40–50.

124. Ульев Л.М. Течение и теплообмен высоковязкой жидкости в круглом конфузоре // Теоретические основы химической технологии. – 1992. – Т. 26. – № 2. – С. 243–253.

125. Ульев Л.М. Неизотермическое течение расплавов термопластичных полимеров в круглых формирующих каналах // Теоретические основы химической технологии. – 1995. – Т. 29. – № 3. – С. 233–241.

126. Ulyev L.M. The pressure – Flow Characteristic of Circular Molding Channels with a Nonisothermal flow of thermoplastic polymers // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 1996. – Vol. 69. – No 4. – P. 473–480.

127. Ульев Л.М. Неизотермическое течение расплавов термопластичных полимеров в коническо-цилиндрических фильерах // Теоретические основы химической технологии. – 1996. – Т. 30. – № 6. – С. 583–590.

128. Ning F., Cong W., Qiu J., Wei J., Wang S. Additive Manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling // Composite Part B. –

2015. – Vol. 80. – P. 369–378. <http://dx.doi.org/10.1016/j.composite.sb.2015.06.013>.

129. Wu P., Wang J., Wang X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry // Automation in construction. – 2016. – Vol. 68. – P. 21–31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atom.2016.04.005>.

130. Goyanes A., Amornrat U.D., Wang H., Basist A.W., Gaisford S. 3D Scanning and 3D Printing as Innovative Technologies for Fabrication Personalized Topical Drug Delivery Systems // Journal of Controlled Release. – 2016. – Vol. 234. – No 6. – P. 41–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.05.034>.

131. Raasch J., Ivey M., Aldrich D., Nobes D.S., Ayranci C., Characterization of Polyurethane Shape Memory Polymer Processed by Material extrusion // Additive Manufacturing. – 2015. – Vol. 8. – P. 132–141. – <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.004>.

132. Vaezi M., Yang S. 2 – Freeform fabrication of nanobiomaterials using 3D printing, Woodhead Publishing // Rapid Prototyping of Biomaterials. Principles and Applications (Ed. Narayan R.). – 2014. – P. 16–74. <http://dx.doi.org/10.1533/9780857097217.16>.

133. Birtchnella T., Böhmeb T., Gorkinc R. 3D printing and the third mission: The university in the materialization of intellectual capital // Technological Forecasting and Social Change. – 2017. – Vol. 123. – P. 240–249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2016.03.014>.

134. Kida T., Ohta T., Kondo K., Akashi M. Fabrication of poly(vinyl alcohol)s (PVAs) nanotubes through the fusion of nanocapsules composed PVAs multilayer films // Polymer. – 2014. – Vol. 55. – Issue. 12. – P. 2841–2847. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2014.04.043>.

135. Wang T.M., Xi J.T., Jin Y. A model research for prototype warp deformation in the FDM process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2007. – Vol. 33. – No 11–12. – P. 1087–1096.

136. Jayanthi S., Keefe M., Gargiulo E.P. Studies in stereolithography: influence of process parameters on curl distortion

in photopolymer models. Solid Freeform Fabrication Symposium 1994. – Austin: University of Texas, 1994. – P. 250–258.

137. Bellehumeur C., Li L., Sun Q. et al. Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process // Journal of Manufacturing Processes. – 2004. – Vol. 6. – No 2. – P. 170–178.

138. Sun Q., Rizvi G.M., Bellehumeur C.T. et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments // Rapid Prototyping Journal. – 2008. – Vol. 14. – No 2. – P. 72–80.

139. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.

140. Янков В.И., Первадчук В.П., Боярченко В.И. Процессы переработки волокнообразующих полимеров (методы расчета). – М.: Химия, 1989. – 320 с.

141. Каплун Я.Б., Ким В.С. Формующее оборудование экструдеров. – М.: Машиностроение. – 1969. – 160 с.

142. Ульев Л.М. Медленные течения в коаксиальных конических каналах // Вестник ХГПУ. – Вып. 7. 4.2. Механика. Машиностроение. – 1997. – С. 22–31.

143. Ульев Л.М. Медленные течения между соосными коническими поверхностями // Инженерно-физический журнал. – 1998. – Т. 71. – № 6. – С. 1092–1098.

144. Ульев Л.М. Медленные течения в коаксиальных конических щелях переменной ширины // Вестник ХГПУ. – Вып. 34. – 1999. – С. 3–8.

145. Ульев Л.М. Развитие ламинарного диффузорного течения в конической щели постоянной ширины // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2000. – № 1. – С. 57–69.

146. Ульев Л.М. Решение задачи ламинарного течения между коническими поверхностями с общей вершиной при частичном учете инерционных свойств // Вестник НТУ «ХПИ». – 2001. – № 3. – С. 224–235.

147. Ulyev L.M. Laminar heat transfer in diffuser flow in a coaxial conical channel in the case of boundary conditions of the first kind // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2001. – Vol. 74. – No. 1. – P. 26–34.

148. Ульев Л.М. Влияние кривизны границ на ламинарное установившееся течение в кольцевом коническом канале постоянной ширины // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2001. – № 1. – С. 34–44.

149. Ульев Л.М. Приближенное решение задачи ламинарного течения в каналах с малой конусностью // Вестник ХГПУ. – Вып. 49. – 1999. – С. 109–112.

150. Ульев Л.М. Медленные конфузورные течения в соосных конических каналах переменной ширины // Вестник НТУ «ХПИ». – 2002. – № 3. – С. 122–130.

151. Ульев Л.М. Решение задачи ламинарного диффузорного течения в соосном коническом канале постоянной ширины с частичным учетом инерционных свойств // Вестник НТУ «ХПИ». – 2002. – № 6. – С. 66–71.

152. Ulyev L.M. Solution of Slow Steady State Flow Problem in a Constant Width Channel with Taking into account curvature distinction of its Boundaries // 15th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA'2002, Praha, 2002, Summaries Vol. 3. Fluid Flow. Multiphase System. Praha. – 2002. – P. 178–179. (Paper No P5. 102. P. 11).

153. Ульев Л.М. Влияние инерционных свойств на распределение давления при ламинарном конфузорном течении в соосном коническом канале постоянной ширины // Вестник НТУ «ХПИ». – 2002. – Выпуск 9. – Т. 1. – С. 88–94.

154. Ульев Л.М. Ламинарное диффузорное течение в соосном коническом канале переменной ширины с частичным учетом сил инерции // Вестник НТУ «ХПИ». – 2003. – Выпуск 17. – С. 143–153.

155. Ульев Л.М. Развитие ламинарного диффузионного течения в соосных конических каналах постоянной ширины // ИТЕ. – 2003. – № 2. – С. 47–57.

156. Ульев Л.М. Ламинарное диффузорное течение в секториальном канале постоянной ширины с частичным учетом инерциальных свойств // Вестник НТУ «ХПИ». – 2003. – Вып. 11. – Т. 2. – С. 122–131.

157. Ульев Л.М. Длина начального гидродинамического участка при ламинарном диффузорном течении в соосных кони-

ческих каналах постоянной ширины // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2003. – № 4. – С. 56–64.

158. Ульев Л.М. Диапазон чисел Рейнольдса, в котором ламинарное диффузорное течение в соосном коническом канале с линейно меняющейся шириной можно считать безынерционным // Вестник НТУ «ХПИ». – 2003. – № 13. – С. 103–111.

159. Ульев Л.М. Особенности ламинарного течения в секториальном диффузоре с переменной шириной вдоль канала // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2004. – № 1. – С. 25–35.

160. Ульев Л.М. Приближенное решение задачи ламинарного течения в соосном коническом диффузоре с общей вершиной границ // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2004. – № 2. – С. 60–65.

161. Ульев Л.М. Приближенное решение задачи ламинарного течения в соосном коническом конфузоре с общей вершиной его границ // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2004. – № 3. – С. 30–38.

162. Ulyev L.M. Hydrodynamic entrance length with the laminar diffuser flow in the constant width conic channel // 16th International Congress of Chemical and Process Engineering. CHISA 2004. 22–26 August 2004. Praha. Czech Republic. Summaries. – Vol. 3. Hydrodynamic Process. – P. 1126–1127. (Paper No 0587)

163. Ульев Л.М. Особенности распределения давления и его расчета при ползущем течении жидкости в коническом диффузоре // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2004. – № 4. – С. 31–37.

164. Ульев Л.М. Система гидродинамических уравнений, описывающих ламинарное течение в соосных конических каналах постоянной ширины // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2005. – № 1. – С. 9–20.

165. Ульев Л.М. Классификация соосных конических каналов // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2005. – № 2. – С. 55–62.

166. Ульев Л.М. Ламинарное конфузорное течение в соосном коническом канале переменной ширины с частичным учетом сил

инерции // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2005. – № 3. – С. 29–36.

167. Ульев Л.М. Оценка перепада давления на начальном гидродинамическом участке ламинарного течения в соосном коническом диффузоре // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2005. – № 4. – С. 11–28.

168. Ульев Л.М. Развитие ламинарного диффузорного течения в соосном коническом канале с неоднородным начальным профилем скорости // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2006. – № 2. – С. 8–29.

169. Ульев Л.М. Приближенное решение задачи ламинарного диффузорного течения аномально вязкой жидкости в кольцевом коническом канале // Вестник НТУ «ХПИ». – 2001. – № 20. – С. 107–116.

170. Ульев Л.М. Приближенное решение задачи ламинарного течения аномально вязкой жидкости в кольцевом коническом конфузоре // Механика та машинобудування. – 2001. – № 1, 2. – С. 13–23.

171. Ульев Л.М. Ламинарные течения в соосных конических каналах. Т. 1. – Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ». – 2006. – 660 с.

172. Ульев Л.М. Ламинарные течения в соосных конических каналах. Т. 2. – Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ». – 2006. – 760 с.

173. Ульев Л.М., Товажнянский Л.Л. Теплообмен при ламинарном течении между коаксиальными эквидистантными коническими поверхностями. Диффузорное течение // Вестник ХГПУ. – Выпуск 10. – 1998. – С. 3–12.

174. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении в кольцевых конических каналах переменной ширины // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сборник научных трудов ХГПУ. Выпуск. 6. Ч. 3. Харьков, 1998. – С. 509–513.

175. Ульев Л.М. Ламинарный теплообмен для четных граничных условий первого рода при диффузорном течении в коническом зазоре // Вестник ХГПУ. – Выпуск. 47. – 1999. – С. 7–15.

176. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении в коническом зазоре с граничными условиями первого рода // Вестник ХГПУ. – Выпуск. 56. – 1999. – С. 37–52.

177. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении в коаксиальном коническом канале с переменной температурой внутренней стенки канала // Сборник научных трудов «Авиационно-космическая техника и технология». – Выпуск. 9. Тепловые двигатели и энергоустановки. Харьков: ХАИ, 1999. – С. 165–178.

178. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном течении в коаксиальных конических конфузорах для граничных условий первого рода // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 1999. – № 2. – С. 40–52.

179. Ульев Л.М. теплообмен при диффузорном течении в соосных конических зазорах для граничных условий первого рода с линейным изменением температуры стенок вдоль течения // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 1999. – № 4. – С. 45–59.

180. Ульев Л.М. Ламинарный теплообмен для нечетных граничных условий первого рода при диффузорном течении в коническом зазоре // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сборник научных трудов ХГПУ. – Выпуск. 7. – Ч. 4. Харьков: ХГПУ, 1999. – С. 110–118.

181. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении жидкости в коаксиальных конических каналах // Теоретические основы химической технологии. – 2000. – Т. 34. – № 1. – С. 16–24.

182. Ульев Л.М. Длина участка термической стабилизации при ламинарном теплообмене в соосных конических каналах постоянной ширины // Вестник ХГПУ. – Выпуск 98. – 2000. – С. 137–141.

183. Ульев Л.М. Решение задачи ламинарного теплообмена для диффузорного течения в соосных конических каналах при произвольном непрерывном изменении температуры стенок вдоль течения // Вестник ХГПУ. – Выпуск 89. – 2000. – С. 81–88.

184. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении в конической щели для граничных условий первого рода и произвольном распределении температуры на входе // Вестник ХГПУ. – Выпуск 105. – 2000. – С. 113–124.

185. Ulyev L.M. Laminar heat transfer in the constant width coaxial conic channels // CHISA'2000, Praha, 2000, Summaries Vol. 3. Mechanical and Heat Transfer. Processes and Equipment. Praha. – 2000. – P. 197. (Paper No P1. 129. P.20).

186. Ульев Л.М. Ламинарный теплообмен при расходящемся течении в коническом зазоре с кусочно-дифференцируемым распределением температуры на границах // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2000. – № 3. – С. 20–36.

187. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном диффузорном течении в коаксиальных конических зазорах для условий первого рода с заданным изменением температуры стенок вдоль течения // 4-й Минский Международный форум по тепло- и массообмену. 22–26 мая 2000 г. Т. 7. Теплообмен в реологических системах. – Минск, 2000. – С. 204–213.

188. Ульев Л.М. Ламинарный теплообмен при диффузорном течении жидкости в коаксиальном коническом канале с переменной температурой внутренней стенки // Теоретические основы химической технологии. – 2001. – Т. 35. – № 1. – С. 31–41.

189. Ульев Л.М. Ламинарный теплообмен при диффузорном течении в соосном коническом канале в случае граничных условий первого рода // Инженерно-физический журнал. – 2001. – Т. 74. – № 1. – С. 21–26.

190. Ульев Л.М. Теплообмен при медленном конфузорном течении в соосных конических каналах постоянной ширины для граничных условий первого рода и с учетом диссипации механической энергии // Интегровані технології та енергозбереження. – 2001. – № 3. – С. 64–81.

191. Пономаренко В.Г., Житинкин А.А., Потеня Г.Ф., Ульев Л.М. Гидравлическое сопротивление при неизотермическом течении высоковязкой ньютоновской жидкости в цилиндрическом канале // Промышленная теплотехника. – 1986. – Т. 8. – № 3. – С. 55–58.

192. Пономаренко В.Г., Потеня Г.Ф., Ульев Л.М. Определение оптимального режима работы фильеры гранулятора ТП // Тез. докл. VII республиканской конференции «Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств». – Львов, 1988. – С. 40–41.

193. Пономаренко В.Г., Потебня Г.Ф., Ульев Л.М. Течение и теплообмен расплавов термопластичных полимеров в круглом конфузоре // Тезисы докладов VII республиканской конференции «Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств». – Львов, 1988. – С. 95.

194. Ульев Л.М. Неизотермическое течение расплавов полимеров в коническо-цилиндрических фильерах // Тезисы докладов 4-й международной научной конференции «Методы кибернетики химико-технологических процессов». – М. – 1994. – С. 65–66.

195. Ульев Л.М. Интегроинтерполяционный метод расчета неизотермического течения Бингамовских жидкостей в круглых каналах // Тезисы докладов 4-й международной научной конференции «Методы кибернетики химико-технологических процессов». – М. – 1994. – С. 67–68.

196. Ульев Л.М. Напорно-расходная характеристика при неизотермическом течении высоковязких жидкостей в круглых каналах // Международная конференция «Математические методы в химии и химической технологии», ММХ-9: Сб. тез. – Ч. 4. Тверь, 1995. – С. 38–39.

197. Ul'ev L.M. Laminar Heat Transfer in a Liquid Flowing in a Diverging Conical Annular Channel with a Varied Inner-Wall Temperature // Theoretical Foundation of Chemical Engineering. – 2001. – Vol. 35, No. 1. – P. 28–38.

198. Ульев Л.М. Интегроинтерполяционный метод расчета неизотермического течения высоковязких Бингамовских жидкостей в круглых каналах // Международная конференция «Математические методы в химии и химической технологии», ММХ-9: Сб. тез. – Ч. 4. – Тверь, 1995. – С. 40–41.

199. Ульев Л.М. Интегроинтерполяционный метод расчета неизотермического течения вязкопластичных жидкостей в круглых каналах // Материалы международной научно-технической конф. «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье», microCAD'95. – Ч. 2. – Харьков, 1995. – С. 105.

200. Ульев Л.М., Андрийчук Н.Д. Особенности течения и теплообмена высоковязких жидкостей в конических конфузорах //

Международная конференция «Математические методы в химии и химической технологии», ММХ-10: Тезисы докладов – Тула, 1996. – С. 14–15.

201. Ulyev L.M. Pressure characteristic with non-isothermal flow of high viscosity liquids in circular confuser // 13th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA'98, Praha, 1998, Summaries Vol. 7. Microsymposium on Engineering Rheology, Fluid Flow, Mixing, Fluidization, Particulate Solids, Mechanical Separations. – P. 28.

202. Ульев Л.М. Особенности напорно-расходной характеристики при неизотермическом течении высоковязких жидкостей в круглых конфузорах. Ч. 5. Критерии неизотермичности // Вестник ХГПУ. – Выпуск 33. – 1999. – С. 83–88.

203. Ульев Л.М. Неизотермическое течение высоковязкой жидкости в круглом конфузоре // Тепломассообмен – ММФ-92. – Т. 6. Тепломассообмен в реологических системах. – Минск, 1992. – С. 61–65.

204. Ульев Л.М. Напорно-расходная характеристика при неизотермическом течении высоковязких жидкостей в цилиндрических каналах // Тепломассообмен – ММФ-96. – Т. 6. Тепломассообмен в реологических системах. – Минск, 1996. – С. 33–37.

205. Ульев Л.М. Неизотермическое течение высоковязких Бингамовских жидкостей в круглых каналах // Тепломассообмен – ММФ-96. – Т. 6. Тепломассообмен в реологических системах. – Минск, 1996. – С. 23–32.

206. Ульев Л.М. Особенности неизотермического формирования расплавов термопластичных полимеров в коническо-цилиндрических каналах // Тепломассообмен – ММФ-96. – Т. 6. Тепломассообмен в реологических системах. – Минск, 1996. – С. 18–22.

207. Ulyev L.M. Non-isothermal flow of high-viscosity melts of thermoplastic polymers in conic-cylindrical dies // 12th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA'96, Praha. – 1996. Paper No: P: 7. 114 [0270]. – P. 1–6.

208. Ulyev L.M. Pressure drop-flowrate characteristic for non-isothermal flow high-viscosity liquids in circular channel // 12th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA'96, Praha. – 1996. Paper No: P: 7. 115 [0273]. – P. 1–7.

209. Ulyev L.M. Non-isothermal Flow Melts of Thermoplastic Polymers in Conic-Cylindrical Dies // 5th World Congress of Chemical Engineering. July 14–18. – 1996, San Diego, California. New Developments in Polymer Processing. – Paper 79i.

210. Ulyev L.M. Pressure Drop-Flowrate Characteristic for Non-Isothermal Flow Melts of Thermoplastic Polymers in Circular Channels // 5th World Congress of Chemical Engineering. July 14–18. – 1996, San Diego, California. New Developments in Polymer Processing. – Paper 79j.

211. Ulyev L.M. Feature of confuser non-isothermal pressure drop-flowrate characteristic // International Meeting on Information Technology. KHARKOV 12–14 May 1997. – Vol. 5. – Kharkov, 1997. – P. 433–437.

212. Ulyev L.M. Pressure characteristic with non-isothermal flow of high viscosity liquids in circular confuser // 13th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA'98, Praha. – 1998, Summaries. – Vol. 7. Microsymposium on Engineering Rheology, Fluid Flow, Mixing, Fluidization, Particulate Solids, Mechanical Separations. – P. 28.

213. Ульев Л.М. Особенности напорно-расходной характеристики при неизотермическом течении высоковязких жидкостей в круглых конфузорах. Ч. 1. Метод исследования // Вестник ХГПУ. Выпуск 15. – 1998. – С. 3–13.

214. Ульев Л.М. Особенности напорно-расходной характеристики при неизотермическом течении высоковязких жидкостей в круглых конфузорах. Ч. 2. Течение в каналах с адиабатической стенкой // Вестник ХГПУ. Выпуск 15. – 1998. – С. 14–18.

215. Ульев Л.М. Особенности напорно-расходной характеристики при неизотермическом течении высоковязких жидкостей в круглых конфузорах. Ч. 3. Течение с теплообменом на границе. Малые углы раскрытия // Вестник ХГПУ. Выпуск 28. – 1999. – С. 26–32.

216. Ульев Л.М. Особенности напорно-расходной характеристики при неизотермическом течении высоковязких жидкостей в круглых конфузорах. Ч. 4. Течение с теплообменом на границе. Большие углы раскрытия // Вестник ХГПУ. Выпуск 28. – 1999. – С. 33–37.

217. Reddy B.V., Reddy N.V., Ghosh A. Fused deposition modelling using direct extrusion // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2007. – Vol. 2. – No 1. – P. 51–60.

218. Volpato N., Kretschek D., Foggiatto J.A., da Silva Cruz C.G. Experimental analysis of an extrusion system for additive manufacturing based on polymer pellets // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 81. – No (9–12). – P. 1519–1531.

219. Weng Z., Wang J., Senthil T., Wu L. Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 102. – P. 276–283.

220. Liu X., Chi B., Jiao Z., Tan J., Liu F., Yang W. A large-scale doublestage-screw 3 D printer for fused deposition of plastic pellets // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2017. – Vol. 134. – No 31. – <https://doi.org/10.1002/app.45147>.

221. Alaimo G., Marconi S., Costato L., Auricchio F. Influence of mesostructured and chemical composition on FDM 3D-printed parts // *Composites Part B: Engineering*. – 2017. – Vol. 113. – P. 371–380. – <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.019>.

222. Zhou Z., Salaoru I., Morris P., Gibbons G.J. Additive manufacturing of heat-sensitive polymer melt using a pellet-fed material extrusion // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Vol. 24. – P. 552–559. – <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.040>.

223. Kumar N., Jain P.K., Tandon P., Pandey P.M. Extrusion-based additive manufacturing process for producing flexible parts // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. – 2018. – Vol. 40. – Issue 3. – Article number: 143. – <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1068-x>.

224. Nieto D.M., López V.C., Molina S.I. Large-format polymer-ic pelletbased additive manufacturing for the naval industry // *Additive Manufacturing*. – 2018. – Vol. 23. – P. 79–85. – <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.07.012>.

225. Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J., Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective // *Composites Part B: Engineering*. – 2017. – Vol. 110. – P. 442–458. – <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.

226. Alexandre A., Cruz Sanchez F.A., Boudaoud H., Camargo M., Pearce J.M. Mechanical Properties of Direct Waste Printing of Polylactic Acid with Universal Pellets Extruder: Comparison to Fused Filament Fabrication on Open-Source Desktop Three-Dimensional Printers. // 3D Printing and Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 7. – Issue 5. – P. 237–247.

227. Khondoker M.A. H., Sameoto D.U.S. Patent Application No 16/178,281. 2020.

228. Khondoker M.A. H., Sameoto D. Direct coupling of fixed screw extruders using flexible heated hoses for FDM printing of extremely soft thermoplastic elastomers // Progress in Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 4. – Issue 3. – P. 197–209. – <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00088-4>.

229. Gonzalez-Gutierrez J., Cano S., Schuschnigg S., Kukla C., Sapkota J., Holzer C. Additive manufacturing of metallic and ceramic components by the material extrusion of highly-filled polymers: A review and future perspectives // Materials. – 2018. – Vol. 11. – No 5. – P. 840–856.

230. Wang Z., Liu R., Sparks T., Liou F. Large-Scale Deposition System by an Industrial Robot (I): Design of Fused Pellet Modeling System and Extrusion Process Analysis // 3D Printing and Additive Manufacturing. – 2016. – Vol. 3. – No 1. – <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0029>.

231. Пономаренко В.Г., Житинкин А.А., Запорожец О.Л., Ульев Л.М. и др. Погружное устройство для гранулирования термопластов // Авторское свидетельство № 1720868 СССР. 23. 03. 92. Бюл. № 11.

232. Kumar S., Czekanski A. Roadmap to sustainable plastic additive manufacturing, Materials // Today Communications. – 2018. – Vol. 15. – P. 109–113. – <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.02.006>.

233. Singh R., Kumar R., Farina I., Colangelo F., Feo L., Fraternali F. Multi-material additive manufacturing of sustainable innovative materials and structures // Polymers. – 2019. – Vol. 11. – Issue 1. – Article number: 62. – <https://doi.org/10.3390/polym11010062>.

234. Adama G.A. O., Zimmer D. Design for additive manufacturing – element transitions and aggregated structures // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2014. – No 7. – P. 20–28.

235. Klahn C., Leutenecker B., Meboldt M. Design for additive manufacturing – supporting the substitution of components in series products // *Procedia CIRP* 2014. – Vol. 21. – P. 138–143.

236. Cooper D., Thornby J., Blundell N., Henrys R., Williams M.A., Gibbons G. Design and manufacture of high performance hollow engine valves by additive layer manufacturing // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 69. – P. 44–55.

237. Bi G., Sun C-N., Chen H., Lan Ng. F., Cho Khin Ma C. Microstructure and tensile properties of superalloy IN100 fabricated by micro-laser aided additive manufacturing // *Materials & Design*. – 2014. – Vol. 60. – P. 401–408.

238. Zhu Y., Li J., Tian X., Wang H., Liu D. Microstructure and mechanical properties of hybrid fabricated Ti–6.5Al–3.5Mo–1.5Zr–0.3Si titanium alloy by laser additive manufacturing // *Materials Science and Engineering: A*. – 2014. – Vol. 607. – P. 427–434.

239. Qian T., Liu D., Tian X., Liu C. Wang H. Microstructure of TA2/TA15 graded structural material by laser additive manufacturing process // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2014. – Vol. 24. – P. 2729–2736.

240. Li Y., Gu D. Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder // *Materials & Design*. – 2014. – Vol. 63. – P. 856–867.

241. Bartkowiaka K., Ullricha S., Frick T., Schmidta M. New developments of laser processing aluminium alloys via additive manufacturing technique // *Physics Procedia*. – 2011. – Vol. 12. – P. 393–401.

242. Aboulkhair N.T., Everitt N.M., Ashcroft I., Tuck C. Reducing porosity in AlSi10 Mg parts processed by selective laser melting // *Additive Manufacturing*. – 2014. – No 1–4. – P. 77–86.

243. Priaronea P.C., Pagone E., Martinac F., Catalano A.R., Settineri L. Multi-criteria environmental and economic impact assessment of wire arc additive manufacturing // *CIRP Annals*. – 2020. – Vol. 6. – Issue 1 – P. 37–40. – <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.010>.

ГЛОССАРИЙ

Адгезия – сцепление поверхностей разнородных твердых и/или жидких тел. Адгезия обусловлена межмолекулярными взаимодействиями (ван-дер-ваальсовыми, полярными, иногда взаимной диффузией) в поверхностном слое и характеризуется удельной работой, необходимой для разделения поверхностей.

Аддитивное изготовление – процесс последовательного составления детали слой за слоем.

Аддитивные технологии – технологии создания изделия методом добавления материала; являются альтернативой методу «убирать лишнее».

Анизотропия – различие свойств среды (например, физических: упругости, электропроводности, теплопроводности, показателя преломления, скорости звука или света и др.) в различных направлениях внутри этой среды; в противоположность изотропии.

Аррениусовская зависимость – экспоненциальная зависимость константы скорости химической реакции от температуры.

Боуден-экструдер – экструдер с отделенным фидером в 3D-принтере.

Вилка температуры печати – диапазон температур, рекомендуемый для печати выбранным филаментом.

Воксель – объемный элемент полимеризации фотополимера при его облучении светодиодным экраном.

Галтование – деформационное упрочнение поверхностного слоя, технологический процесс механической обработки деталей при перемешивании с наполнителем, который может содержать абразив. Применяется для обработки – от шлифовки до финишной полировки – поверхности деталей из различных материалов, металлов, сплавов черных, цветных и драгоценных металлов, полимеров, стекла, керамики, минералов, дерева и др.

Гибкость – одна из важнейших характеристик полимеров, определяющих его основные микроскопические свойства: высокоэластические, релаксационные и термомеханические свойства полимеров, а также особенности свойств их растворов.

Гистерезис – запаздывание при начале печати и ее окончании в боуден-экструдерах.

Гранулы – комбинированные сухие сыпучие вещества и смеси или отдельные твердые дозированные и недозированные субстраты, спрессованные в виде крупинок шарообразной, неправильной кубической или цилиндрической формы.

Дельта-принтер – 3D-принтер, в котором позиционирование осуществляется движением кареток вдоль трех вертикальных башен.

Заполнение – характеристика внутренней структуры (плотности заполнения) детали.

Индукционный датчик приближения – относится к датчикам генераторного типа с использованием постоянного магнитного поля, применяется для проверки горизонтальности печатной плоскости 3D-принтера.

Индустрия 4.0 – переход всего мирового сообщества к новому, четвертому технологическому укладу.

Интернет – информационные и коммуникационные технологии.

Интернет вещей – концепция сети передачи данных между устройствами. Внутри ИВ люди могут общаться с «вещами», а «вещи» – между собой. ИВ объединяет устройства в компьютерную сеть и позволяет им собирать, анализировать, обрабатывать и передавать данные другим объектам через программное обеспечение, приложения или технические устройства. ИВ-устройства функционируют самостоятельно, хотя люди могут настраивать их или предоставлять им доступ к данным.

Интерфейс – общая граница, через которую передается информация. Под этим понятием обычно подразумевается со-

вокупность унифицированных технических и программных средств и правил (описаний, соглашений, протоколов), обеспечивающих одновременное взаимодействие устройств и/или программ в вычислительной системе или обеспечение соответствия систем.

Искривление детали – возникает из-за неравномерного и неоднородного охлаждения.

Лазер – квантовый генератор излучения.

Лазерная триангуляция – цифровое представление поверхности сканируемого объекта. Поверхность объекта аппроксимируется треугольниками, синтезируется STL-файл.

Листовое ламинирование – аддитивный процесс изготовления, в котором листы материала скрепляются для формирования детали.

Мембранный датчик давления – изготавливается из металлических дисков или гибких материалов. Корпус прибора изготавливается из материала, стойкого к рабочей среде, одна стенка у него отсутствует и вместо нее устанавливается мембрана. Внутри корпуса может иметься рабочее вещество известной плотности или быть вакуум. Используется для проверки горизонтальности печатной плоскости 3D-принтера.

Металлы – группа химических элементов, существующих в виде простых веществ, которые при нормальных условиях обладают характерными металлическими свойствами, такими как высокие тепло- и электропроводность, положительный температурный коэффициент сопротивления, высокая пластичность, ковкость и металлический блеск.

Механический датчик касания – щуп для проверки горизонтальности печатной плоскости 3D-принтера.

Мундштук – то же, что и **фильера**, сопло.

Нержавеющая сталь – легированная сталь (коррозионно-стойкая сталь), устойчивая к коррозии в атмосфере и агрессивных средах, обладающая термостойкими свойствами. Раз-

личные типы нержавеющей стали содержат углерод, азот, алюминий, кремний, серу, титан, хром, никель, медь, селен, ниобий и молибден.

Обдув – охлаждение только что напечатанного участка.

Облачное производство – модель для обеспечения повсеместного, удобного сетевого доступа по требованию к общему пулу настраиваемых производственных ресурсов (например, производственного программного обеспечения, производственного оборудования и производственных возможностей), которые могут быть быстро предоставлены и выпущены с минимальными усилиями руководства или взаимодействия с поставщиком услуг.

Обратное проектирование – создание цифровой 3D-модели прототипа с помощью 3D-сканирования.

Оптический датчик касания – прибор, используемый для проверки горизонтальности печатной плоскости 3D-принтера.

Отверждение – процесс, в результате которого происходит необратимое превращение жидких реакционноспособных олигомеров и/или мономеров в твердые неплавкие и нерастворимые сетчатые полимеры.

Пантограф – инструмент для переноса контура фотографии на полупрозрачный экран, обычно с увеличением размеров.

Песчаник – обломочная осадочная горная порода, представляющая собой однородный или слоистый агрегат обломочных зерен размером от 0,05 мм (по российским критериям) или от 0,0625 мм (по зарубежным критериям) до 2 мм (песчинки), связанных каким-либо минеральным веществом (цементом).

Печатающая головка – расплавляет филамент в нить заданной температуры и толщины.

Плавление – процесс перехода тела из кристаллического твердого состояния в жидкое, т.е. переход вещества из одного агрегатного состояния в другое.

Платформа – обычно элемент принтера с плоской поверхностью, к которому крепится печатаемая деталь.

Поддержки – опоры для возможности напечатать модели с висящими в воздухе элементами. Поддержки печатаются одновременно с самой моделью.

Полимеризация – процесс образования высокомолекулярного вещества (полимера) путем многократного присоединения молекул низкомолекулярного вещества (мономера, олигомера) к активным центрам в растущей молекуле полимера.

Полимеризация в резервуаре (ванночке) – аддитивный процесс изготовления изделий, в котором жидкий фотополимер в ванночке выборочно отверждается под воздействием света.

Полимеры – вещества, состоящие из мономерных звеньев, соединенных в длинные макромолекулы химическими или координационными связями.

Полирование – отделочная операция обработки металлических и неметаллических поверхностей. Суть полирования – снятие тончайших слоев обрабатываемого материала механическими, химическими, электролитическими методами или методами ионного облучения, придание поверхности малой шероховатости и зеркального блеска.

Порошок – сыпучий материал, образующийся в результате измельчения твердых веществ либо выделения твердой фазы из растворов или газовой фазы.

Постобработка – удаление поддержек в напечатанной детали и обработка поверхности.

Провайдер – компания – поставщик каких-либо интернет-услуг.

Производственные возможности – нематериальные и динамические ресурсы, которые представляют способность организации выполнять конкретную задачу или операцию с компетентностью.

Производственные системы – основанные на КФС Индустрии 4.0, они обладают высокой гибкостью, адаптивностью, возможностями реального времени и могут обеспечить прозрачность производственных процессов.

Прототип – исходная физическая модель.

Прототипирование – изготовление точных копий с исходной модели.

Пьезоэлектрический датчик касания (давления) – контрольно-измерительное устройство, используемое для точного измерения динамического давления.

Рафт – подложка, которая генерируется слайсером под печатаемой моделью для дополнительного крепления.

Реактопласты (термореактивные пластмассы) – пластмассы, переработка которых в изделия сопровождается необратимой химической реакцией, приводящей к образованию неплавкого и нерастворимого материала.

Реология – наука о деформации и течении.

Ретракт – втягивание филамента в сопло для свободного перемещения экструдера к следующей области печати.

Слайсер (slicer) – программное обеспечение для расчета движений экструдера и объемов подачи пластика.

Смесь – система, состоящая из двух или более веществ (компонентов смеси). Однородную смесь называют раствором (газовым, жидким или твердым), а неоднородную – механической смесью. Любую смесь можно разделить на компоненты физическими методами; изменение состава компонентов смеси при этом не происходит.

Смола – собирательное название аморфных веществ, относительно твердых при нормальных условиях и размягчающихся или теряющих форму при нагревании.

Сопло – калиброванная деталь экструдера для выхода линии пластика нужного диаметра (то же, что и **фильера, мундштук**).

Спекание – процесс получения твердых и пористых материалов (изделий) из мелких порошкообразных или пылевидных материалов при повышенных температурах и/или высоком давлении; часто при спекании меняются также физико-химические свойства и структура материала.

Сплав – макроскопически однородный металлический материал, состоящий из смеси двух или более химических элементов с преобладанием металлических компонентов.

Сплавление – получение сплава совместным расплавлением его компонентов.

Стереолитография – фотополимеризация жидкого полимера в ванночке с использованием ультрафиолетового лазера либо светодиода.

Стол – платформа для крепления печатаемой модели.

Стренга – непрерывная нить (или непрерывный жгут) полимера, выдавливаемого шнеком из фильеры экструзионной головки. Как правило, стренга круглая в поперечном сечении.

Струйная 3D-печать – аддитивный процесс изготовления, в котором капли материала выборочно помещаются и отверждаются на подложке.

Струйная печать связующим веществом – аддитивный процесс изготовления, в котором жидкое связующее вещество выборочно наносится на участки порошкового материала.

Субтрактивное изготовление – изготовление с применением режущих инструментов удаления (обработки) материала для получения конечной формы.

Температурная сопротивляемость – чувствительность физико-механических свойств полимера к изменениям температуры.

Температурная усадка – изменение объема и линейных размеров при охлаждении напечатанной детали.

Термобарьер (горло) – служит для разграничения горячей и холодной зон экструдера.

Термоблок – блок, передающий тепло от нагревателя к соплу и пластику.

Термокамера – теплоизолированная камера для поддержания высокой и стабильной температуры во всем объеме печати.

Термопласты – полимерные материалы, способные обратимо переходить при нагревании в высокоэластичное либо вязкотекучее состояние.

Топологическая оптимизация – метод получения наилучшей возможной геометрии/формы при удовлетворении определенных требований.

Ударная прочность – иногда называется ударной вязкостью, это один из важнейших механических параметров термопластов, характеризующий стойкость материалов к динамическим нагрузкам, а именно, способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки.

Удельная стоимость изготовления – стоимость производства одной детали.

«Умная» фабрика – производственное решение, которое обеспечивает такие гибкие и адаптивные производственные процессы, которые решают проблемы, возникающие на производственном объекте с динамическими и быстро меняющимися граничными условиями в мире возрастающей сложности.

Фидер – часть экструдера, подающий механизм, который отвечает за правильное количество выдавленного пластика.

Филамент (filament) – материал для выдавливания/наплавления через экструдер, обычно пластиковая нить (стренга).

Фильера – канал формирующего инструмента экструдера, проходя по которому, поток расплавленного термопласта формируется в изделие заданного профиля.

Формовочное изготовление – производство деталей путем отливки или другого формования (прессование, отливка, штамповка, выковка).

Формующая головка – то же, что и **экструзионная головка**.

Фотополимер – вещество, изменяющее свои свойства под воздействием света, чаще ультрафиолетового. До светового воздействия – в основном мягкий и светочувствительный материал.

Фотоскульптура – удаление глины в соответствии с контурами фотографий.

Химическая стойкость – одно из свойств стойкости полимера, характеризующее способность полимера противостоять воздействию агрессивных сред.

Холодная сварка – технологический процесс сварки давлением с пластическим деформированием соединяемых поверхностей заготовок без дополнительного нагрева внешними источниками тепла.

Червяк – то же, что и **шнек** в полимерном экструдере.

ЧПУ – числовое программное управление.

Шлифование (разг. шлифовка) – механическая или ручная операция по обработке материала: разновидность абразивной обработки, которая, в свою очередь, является разновидностью резания. Механическое шлифование обычно используется для обработки твердых и хрупких материалов в заданный размер с точностью до микрона.

Шнек – основной рабочий орган экструдера, который забирает непластицированный материал от загрузочной воронки, пластицирует его и равномерно подает в виде гомогенного расплава к головке экструдера.

Экструдер (extruder) (3D-печать) – часть 3D-принтера, подающая материал в требуемом количестве для печати детали.

Экструдер (переработка и производство полимеров) – машина, подготавливающая и нагнетающая расплав полимера к формирующему инструменту.

Экструдер Уэйда – экструдер в 3D-принтере, в котором двигатель связан с роликом не напрямую, а через большое колесо.

Экструзионная головка – узел экструдера, направляющий гомогенизированный расплав полимера, выходящий из цилиндра экструдера к выходному формирующему отверстию.

Экструзия – оформление изделия при продавливании материала в жидком состоянии через фильеру с последующим его отверждением.

Экструзия материала в 3D-печати – аддитивный процесс изготовления, в котором материал выборочно подается через сопло.

Эластичность – физическое свойство материала обратимо изменять размеры под действием механических напряжений.

3D-печать – частный случай аддитивных технологий.

Atomic Diffusion Additive Manufacturing, ADAM – производство методом атомной диффузии, которое подобно способу изготовления функциональных металлических деталей струйной печатью связующим веществом.

Binder Jetting, BJ – струйная печать связующим веществом. Аддитивный процесс изготовления, в котором жидкое связующее вещество выборочно наносится на участки порошкового материала.

Bowden – раздельная подача.

Continious Direct Light Processing, CDLP – непрерывная прямая световая проекция производит детали по методу, подобному DLP, но полагается на продолжительное движение рабочей платформы вверх.

Continious Filament Fabrication, CFF – непрерывное плавление нити. Это та же технология FFF/FDM. Отличие состоит лишь в добавлении второй печатающей головки, которая укрепляет печатаемый нейлон, укладывая непрерывную нить из углеродного волокна, кевлара или стеклопластика между слоев.

Continious Liquid Interface Production, CLIP – непрерывная проекционная печать с жидким интерфейсом.

Digital Light Processing, DLP – цифровая светодиодная проекция. Аддитивный процесс изготовления изделий, в котором жидкий фотополимер в резервуаре выборочно отверждается под воздействием света.

Digital Micromirror Device, DMD – печать цифровым микродзеркальным устройством.

Direct – прямая подача филамента.

Direct Energy Disposition, DED – прямой подвод энергии и материала. Формирование слоя производится путем подачи строительного материала и энергии непосредственно в зону расплавления.

Direct Metal Laser Sintering, DMLS – прямое лазерное спекание металлов. DMLS не расплавляет металлический порошок, а нагревает его до той степени, в которой частицы смогут связаться на молекулярном уровне.

Drop On Demand, DOD – подача по требованию. Используются две печатающие головки: одна для размещения материала печати (обычно воскообразного), а вторая для растворимого материала поддержки.

Electron Beam Melting, EBM – электронно-лучевая плавка. Аддитивный процесс изготовления, в котором тепловая энергия выборочно расплавляет участки слоя порошкового материала.

Fused Disposition Modelling, FDM – моделирование послойным наплавлением. Аддитивный процесс изготовления, в котором материал выборочно подается через сопло или жиклер (фильеру).

Fused Filament Fabrication, FFF – производство методом плавления филамента. Аддитивный процесс изготовления, в котором материал выборочно подается через сопло или жиклер (фильеру).

Fused Granula Fabrication, FGF – 3D-печать расплавленными гранулами. Гранулы загружаются непосредственно в экструдер.

Fused Layer Modelling, FLM – моделирование расплавленных слоев. 3D-печать с помощью гранулированного материала, который загружается непосредственно в экструдер.

Fused Pellet Modelling, FPM – моделирование расплавленными гранулами.

G-код – программа управления 3D-принтером.

Hybrid deposition and subsequent micro-rolling, HDMR – гибридное напыление и последующая микропрокатка.

Laminated Object Manufacturing, LOM – производство изделий посредством ламинирования. Аддитивный процесс из-

готовления, в котором листы материала скрепляются для формирования детали.

Laser Based Metal Deposition, LBMD – выборочное лазерное нанесение металла.

Laser Enineering Net Shaping, LENS – плавка путем создания формы лазером. Аддитивный процесс изготовления, в котором сконцентрированная тепловая энергия применяется для сплавления материалов по мере нанесения слоев.

Material Jetting, MJ – струйная 3D-печать. Аддитивный процесс изготовления, в котором капли материала выборочно помещаются и отверждаются на подложке.

Mutli Jet Fusion, MJF – от HP печатает методом, подобным технологиям плавки порошков, но с добавлением еще одной стадии к процессу: шага детализации компонента.

Nano Partilcle fetting, NPJ – струйная 3D-печать наночастицами, применяется жидкость, содержащая металлические наночастицы или наночастицы поддержки, загружаемая в принтер посредством картриджа.

Polymer Additive Manufacturing, PAM – полимерное аддитивное производство.

Raft – подложка, которая генерируется слайсером под печатаемой моделью.

Replicating Rapid Prototyper, RepRap – самовоспроизводящийся механизм для быстрого изготовления прототипов.

Retract – затягивание части нити обратно.

Selective laser melting, SLM – селективное лазерное плавление.

Selective Laser Sintering, SLS – выборочное лазерное спекание. Аддитивный процесс изготовления, в котором тепловая энергия выборочно расплавляет участки слоя порошкового материала.

Sheet Lamination, SL – листовое ламинирование.

Single Pass Jetting, SPJ – однопроходное струйное распыление связующего.

Stereolithography, SLA/STL – стереолитография – фотополимеризация жидкого полимера в ванночке с использованием ультрафиолетового лазера либо светодиода.

Ultrasonic Additive Manufacturing, UAM – ультразвуковое аддитивное изготовление.

Wire arc additive manufacturing, WAAM – электродуговая наплавка проволоки. Малоизвестная аддитивная технология, отличающаяся большой производительностью и высокими механическими свойствами получаемых изделий.

a- и b-фазы – структура сложных титановых сплавов.

g-фаза – упрочняющая фаза в металлических сплавах, определяющая их высокие жаропрочные свойства.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- α - и β - фазы – 262, 269
 γ - фаза – 339
3D-печать – 11, 16, 52, 61, 65,
70, 74, 78, 79, 80, 82, 85, 89,
99, 102, 107, 139, 152, 153,
154, 186, 230, 235, 236, 237,
238, 240, 242, 246, 247, 265,
283, 284, 292, 293, 295, 333,
335, 336, 337, 338
4D-печать – 80, 82, 85
- А**
Автомобиль – 20, 24, 72, 83
Автопилот – 21
Адаптер – 148, 149
Адгезия – 112, 113, 132, 143,
162, 221, 327
Аддитивное изготовление – 87,
105
Аддитивные технологии – 55,
58, 85, 90, 327
Акрил – 68, 82, 161129, 130,
134, 172, 207, 208
Акрилат – 14, 16
Акрилонитрил – 172
Альфа – 133
Алюминиевые сплавы – 285
Алюминий – 107, 129, 223, 278,
295, 330
АМП – аддитивное металличе-
ское производство – 14, 49,
54, 55, 56
Аналитика больших данных –
15, 21, 25, 31,
- Анизотропия – 89, 162, 174,
175, 178, 222
Антропологические послед-
ствия – 20
АП – аддитивное производство –
3, 4, 11, 14, 18, 31, 45, 47,
49, 55, 61, 62, 65, 89, 98,
146, 152, 266, 267, 271, 338
Аррениусовская зависимость –
118, 327
- Б**
Банк России – 21
Бета – 133
Бетон – 53
Бизнес-модель – 38, 43
Бизнес-партнер – 41
Боуден-экструдер – 116, 118,
119, 121, 140, 159, 171, 327
Бутадиен – 14, 172
- В**
Ванночка – 6, 12, 99, 101, 191,
192, 196, 197, 200, 201, 202,
204, 205, 206, 207, 209, 213,
244, 331, 333, 338
ВВП – внутренний валовый про-
дукт – 14, 23
Вилка температуры печати –
170, 327
Виртуальный мир – 25, 28, 31
Воксель – 194, 327
Время печати – 79, 129, 142,
172, 178, 200, 210, 213, 222,
235, 257, 273

- ВЧМ – взаимодействие человека и машины – 14, 35
- Высокотемпературный – 206, 243
- Вязкость – 173, 334
- Галтование – 224, 225, 327
- Гамма – 133
- Гибкость – 40, 41, 169, 206, 328, 331
- Гибридное облако – 39
- Гидравлические схемы – 51, 52
- Гильза – 148
- Гистерезис – 119, 328
- Глина – 63, 334
- Глобализация – 18, 19, 21, 24, 36, 44
- Гранулы – 5, 15, 147, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 328, 337
- Графит – 108, 223
- Давление – 87, 106, 112, 116, 118, 119, 150, 154, 207, 245
- Датчик температуры – 116, 121, 123, 125
- Декартовы координаты – 79, 132, 133
- Дельта-принтер – 132, 139, 140, 160, 328
- Дерево – 106, 141
- Деформация – 17, 51, 84, 89, 127, 128, 143, 147, 151, 161, 166, 168, 171, 182, 222, 243, 247, 268, 327
- Дисплей – 196
- Желатин** – 63
- Жидкий фотополимер – 64, 68, 101, 235, 239, 331
- Заготовка – 87, 88, 107, 286, 288
- Загрузочная воронка – 114, 155, 335
- Загрузочная зона – 149
- Заполнение – 5, 8, 165, 176, 217, 221, 257, 328
- Зона сжатия – 149, 152
- ИВ** – Интернет вещей – 14, 25, 28, 43, 62, 328
- ИКТ** – информационно-компьютерные технологии – 14, 22
- Индукционный датчик приближения – 112, 328
- Индустрия 4.0 – 3, 11, 18, 26, 27, 28, 29, 33, 34, 39, 40, 41, 44, 45, 46, 60, 328
- Инконельный сплав – 259, 278
- Интеграция – 6, 11, 28, 31, 32, 33, 34, 40, 44, 52, 61, 188
- Интернет – 11, 14, 22, 25, 28, 31, 32, 33, 35, 37, 38, 39, 43, 44, 45, 62, 74, 328
- Иу – Интернет услуг – 25, 28, 31, 33, 39
- Интерфейс – 15, 34, 36, 37, 213, 328
- ИПл – Интернет платформ – 14, 43

- ИПо – Интернет пользователей
14, 43
- Искривление – 5, 161, 167,
200, 205, 222, 242, 258,
278, 329
- Источник света – 101, 103, 104,
194, 195, 196, 197, 200, 204
- ИУст – Интернет устройств –
14, 22, 43
- Ка**мера плавления – 12
- Канал – 7, 104, 118, 125, 149,
150, 151, 229, 295, 314
- Капроновая лента – 132
- Карбид вольфрама – 259
- Катушка – 106, 110, 115, 146,
167, 175
- Качество – 9, 41, 49, 58, 60, 75,
80, 112, 125, 129, 130, 136,
138, 141, 143, 147, 164, 165,
202, 244, 255, 268, 275
- Качество поверхности – 60, 196,
211, 219, 238, 256, 277, 288,
295
- Квадрокоптер – 52
- Кибердвойник – 31
- Киберфизическая система – 11,
14, 25, 32, 47
- Киборг – 20
- Кинематическая система – 12,
- Классификация – 4, 11, 12, 44,
86, 99, 100, 106
- Клей – 14, 112, 113, 132
- Колд-энд – 114, 116, 117, 118,
121, 125, 126
- Конический конфузор – 149,
316
- Кремниевый песок – 174, 254,
259, 261
- Кулер – 140
- КФПС – киберфизическая про-
мышленная система – 14, 32
- КФС – киберфизическая систе-
ма – 14, 25, 28, 29, 31, 32,
34, 39, 40, 41, 43, 44, 62
- Л**азер – 9, 13, 15, 16, 17, 49, 54,
55, 57, 64, 67, 69, 92, 101,
102, 104, 107, 147, 193, 194,
196, 197, 199, 202, 205, 210,
216, 217, 219, 221, 223, 234,
261, 265, 266, 267, 268, 269,
270, 271, 273, 274, 275, 277,
286, 287, 288, 329
- Лазерная триангуляция – 329
- Лазерное 3D-сканирование – 92
- Лазерное спекание – 16, 54, 69,
216, 234, 265, 271, 337, 338
- Лазерный луч – 287
- Лак для волос – 132
- Ламинарное течение – 251, 316
- Ламинирование листов – 99
- Листовое ламинирование – 106,
329, 338
- Литье – 54, 87, 207, 209, 212,
248, 295, 296
- Лоток – 102, 217, 218
- М**анипулятор – 84
- Материалы – 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,
13, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 62,

- 80, 81, 82, 83, 84, 88, 95, 99, 105, 108, 128, 130, 159, 167, 169, 173, 174, 176, 205, 206, 215, 223, 224, 233, 234, 242, 243, 247, 250, 258, 259, 264, 278, 288, 292, 294, 295, 296
- Машиностроение – 20, 49, 54, 314
- Медицина – 280, 296
- Межмашинная коммуникация – 22
- Мембранные датчики давления – 112, 329
- Металл – 4, 6, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 49, 54, 55, 56, 57, 60, 62, 74, 83, 87, 99, 102, 104, 105, 107, 108, 117, 118, 123, 125, 128, 129, 141, 174, 177, 183, 186, 188, 189, 190, 216, 224, 226, 246, 249, 251, 254, 255, 257, 258, 259, 261, 263, 264, 265, 266, 267, 269, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 290, 292, 293, 295, 296, 327, 329
- Металло-нейлоновый порошок – 108
- Механизация – 18
- Механический датчик касания – 112, 329
- Микробатарея – 52
- Микрообработка – 281
- Микроструктура – 49, 60, 61, 265, 269, 287
- Модель – 31, 33, 35, 40, 43, 63, 68, 91, 93, 94, 122, 128, 130, 131, 132, 134, 140, 142, 147, 166, 181, 189, 199, 207, 209, 212, 213, 217, 230, 245, 249, 251, 256, 266, 274, 289, 330, 331, 332, 338
- Мощность лазера – 269, 288
- МСП – малые и средние предприятия – 14, 39
- Мультиструйная плавка – 12, 230, 320, 332
- Мундштук – 343
- Нагреватель – 12, 112, 115, 116, 121, 125
- Наплавление – 110, 132, 146, 222, 266, 267, 387
- Направленное энергетическое осаждение – 99
- Напыляющая головка – 287
- Научно-практические разработки – 18
- Неизотермическое течение – 118, 151, 312
- Нейлон – 106, 108, 114, 118, 169, 185, 186, 187, 219, 223, 224, 247, 294, 336
- Нейрохирургия – 74
- Нержавеющая сталь – 49, 226, 255, 258, 259, 263, 273, 274, 278, 295, 329
- НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки – 14, 76

- Нить – 106, 112, 113, 114, 119,
126, 146, 174, 175, 185, 330,
333, 334, 336
- Обдув** – 172, 330
- Область печати – 145
- Облачное производство – 26, 34,
35, 39, 40, 41, 44, 45, 330
- Облачные вычисления – 35, 38,
43, 47, 62
- Обрабатывающая промышлен-
ность – 26, 27, 39, 45
- Обратное проектирование – 90,
91, 92, 330
- Обтачивание – 88
- Общественное сознание – 18, 19
- Однородность поверхности –
241, 281
- Оптимизация – 14, 33, 60, 234,
281
- Оптический датчик касания –
112, 330
- Орхидея – 83
- Отверждение – 64, 89, 97, 101,
107, 176, 193, 194, 197, 200,
204, 242, 254, 255,
- Пантограф** – 63, 330
- Парадигма – 33
- ПВА – поливинилацетатный
клей – 14, 113
- ПдАП – проектирование для
аддитивного производства –
13, 58
- Пенализация – 59
- Песчаник – 252, 253, 257, 258,
330
- Печатающая головка – 12, 103,
112, 113, 114, 119, 120, 121,
139, 235, 251, 253, 256, 330
- Печатная плата – 52
- Пиво – 132
- Пицца – 53, 107
- Плавка металлических порош-
ков – 283, 292
- Плавление – 54, 99, 110, 116,
132, 146, 149, 151, 152, 162,
185, 216, 222, 256, 257, 259,
263, 265, 266, 267, 274, 288,
330,
- Плавление порошкового слоя –
99
- Пластик – 16, 48, 56, 67, 70, 72,
79, 97, 101, 106, 107, 108,
112, 113, 114, 116, 117, 118,
119, 120, 121, 122, 125, 127,
129, 130, 132, 134, 141, 143,
144, 150, 161, 165, 166, 167,
169, 170, 172, 173, 175, 176,
177, 182, 184, 185, 186, 187,
208, 225, 226, 243, 281, 332,
333, 334, 336
- Платформа – 29, 36, 43, 100,
101, 103, 104, 105, 110, 126,
127, 128, 130, 131, 132, 133,
134, 135, 142, 160, 161, 196,
200, 201, 202, 217, 231, 235,
252
- ПО – программное обеспече-
ние – 25, 28, 33, 35, 59, 74,
77, 182, 287, 330, 332, 335

- Погрешность размеров – 167,
205, 222, 258, 279, 282, 293
- Подающая шестерня – 120
- Подающее колесо – 116
- Подающий механизм – 114,
116, 334
- Подающий мотор – 120
- Поддержки – 29, 31, 33, 34, 43,
78, 94, 97, 163, 164, 165,
167, 176, 176, 182, 183, 189,
196, 199, 202, 203, 204, 205,
206, 207, 208, 222, 226, 227,
229, 237, 238, 239, 240, 241,
242, 245, 247, 249, 258, 273,
275, 276, 278, 280, 331, 337,
338
- Полиамид – 16, 143, 22315, 108,
172
- Полимер – 12, 14, 16, 17, 48, 50,
51, 54, 60, 64, 68, 67, 68, 74,
81, 83, 84, 97, 99, 101, 105,
106, 107, 108, 109, 112, 113,
118, 132, 146, 147, 148, 149,
150, 151, 152, 153, 154, 155,
156, 157, 170, 171, 172, 173,
174, 175, 188, 191, 192, 195,
196, 197, 202, 204, 205, 206,
207, 208, 209, 211, 212, 213,
214, 216, 217, 218, 223, 227,
231, 233, 234, 235, 239, 242,
246, 293, 295, 312, 327, 328,
330, 331, 333
- Полимер с памятью формы – 14,
50, 83, 85
- Полимеризация – 99, 101, 191,
205, 206, 207, 209, 331, 333,
338
- Полимеризация в резервуаре
(ванночке) – 12, 99, 101,
191, 192, 196, 197, 200, 201,
202, 204, 205, 206, 207, 209,
213, 244, 331, 333
- Полиметилметакрилат – 253
- Полировка – 176, 207, 208, 281
- Полиуретан – 17, 156, 159, 276
- Порошок – 102, 103, 106, 107,
108, 217, 218, 219, 223, 225,
230, 231, 252, 254, 265, 271,
273, 274, 278, 280, 287, 294,
295, 331, 337
- Постобработка – 11, 77, 97, 98,
164, 175, 191, 206, 224, 228,
244, 259, 277, 279, 290, 331
- Потенциал – 19, 27, 45, 46, 48,
51, 52, 60, 76, 180, 233, 266,
269
- ППФ – полимеры с памятью
формы – 14, 50, 51
- Прессование – 87, 295, 334
- Привод – 148
- Приемная гайка – 121
- Приемная трубка – 120
- Прижимной механизм – 120
- Пробка – 125, 126, 150
- Провайдер – 331
- Проектирование – 14, 58, 59,
61, 90, 91, 92, 249, 282, 330
- Проектор – 194, 196
- Производственные возможно-
сти – 35
- Производственные системы –
39, 40, 331

- Промышленная революция – 18, 25, 45, 46
- Пропитывание – 255, 263
- Прототип – 11, 56, 72, 89, 92, 99, 146, 147, 153, 184, 187, 209, 211, 212, 246, 247, 248, 261, 266, 288, 292, 295, 296, 330, 332
- Прототипирование – 66, 67, 91, 94, 146, 178, 183, 210, 211, 247, 294, 332
- Профиль – 63, 162, 229, 334
- Процесс – 12, 16, 19, 20, 24, 28, 29, 32, 33, 34, 41, 43, 44, 46, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 75, 76, 85, 88, 89, 90, 92, 94, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 107, 110, 119, 128, 129, 132, 143, 146, 147, 148, 149, 151, 152, 153, 154, 155, 162, 163, 166, 168, 173, 175, 177, 183, 184, 186, 193, 198, 200, 202, 203, 204, 208, 213, 216, 217, 222, 223, 224, 225, 228, 230, 233, 235, 237, 242, 246, 248, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 281, 282, 284, 285, 286, 288, 289, 292, 327, 329, 331, 338
- Прямая подача – 114, 336
- Пыль – 125, 126
- Пьезоэлектрики – 50, 112, 332
- Пьезоэлектрический датчик давления (давления) – 112, 332
- Пятиосевой принтер – 75, 76
- Рабочая область – 230
- Радиатор охлаждения – 117, 121, 125
- Раздельная подача – 114, 336
- Размер лазерного пятна – 275, 288
- Размер частиц – 249, 256
- Расплав – 54, 70, 87, 100, 101, 107, 109, 110, 112, 114, 116, 117, 118, 122, 126, 146, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 158, 162, 174, 175, 217, 218, 223, 269, 271, 286, 287, 288, 333
- Распределитель – 217
- Раствор пластика – 132
- Рафт – 130, 131, 166, 332
- Реактопласт (термореактивные пластмассы) – 106, 107, 206, 242, 293, 332
- Редуктор – 120, 121, 148
- Резервуар – 64, 99, 101, 191, 193, 195, 196, 197, 198, 204, 205, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 227, 331, 336
- Реология – 118, 175, 319, 332
- Ретракт – 119, 120, 171, 332
- Робот – 20, 21, 22, 23, 31, 47, 50, 51, 52, 140, 156, 157, 289
- Роботизация – 20, 22
- Робот-консультант – 21
- Самосгибание – 51
- САПР – система автоматического проектирования – 58, 59, 61, 287

- Сахарный сироп – 132
 Сверление – 88
 Сенсорные сети – 3428
 Сервисные технологии – 29, 32, 34, 38, 39, 41, 43, 60
 Сжатие – 147, 167, 205, 222, 257, 258, 278
 Сканирование – 11, 64, 91, 92, 93, 94, 98, 146, 147, 193, 212, 217, 269, 290, 329, 330
 Скорость – 20, 33, 48, 49, 53, 55, 60, 75, 110, 114, 118, 119, 120, 122, 134, 135, 136, 140, 151, 153, 170, 185, 196, 231, 236, 247, 262, 269, 275, 287, 288, 289, 327
 Скорость производства – 49
 Скорость сканирования – 269
 Слайсер – 11, 94, 95, 98, 131, 166, 181, 196, 290, 332, 338
 Слой – 12, 21, 55, 64, 65, 66, 67, 69, 70, 78, 82, 84, 89, 100, 11, 113, 122, 130, 140, 151, 153, 154, 162, 163, 166, 176, 188, 189, 193, 194, 197, 198, 200, 201, 202, 204, 217, 221, 222, 226, 230, 235, 237, 240, 245, 251, 252, 265, 207, 269, 274, 275, 277, 327, 337
 Смеситель – 123, 124, 139
 Смесь – 49, 56, 171, 245, 328, 332, 333
 Смола – 66, 69, 106, 107, 108, 176, 177, 191, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 205, 207, 208, 211, 212, 213, 235, 239, 294, 295, 332
 Сопло – 12, 52, 100, 109, 110, 111, 115, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 132, 137, 138, 139, 144, 151, 154, 158, 160, 238, 286, 287, 329, 332
 СП – субтрактивное производство – 56, 87, 88, 89, 98, 100, 254, 280, 333
 Спекание – 54, 55, 65, 69, 101, 102, 216, 234, 265, 271, 332
 Сплав – 50, 54, 81, 104, 123, 125, 172, 176, 221, 222, 226, 230, 236, 249, 258, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 278, 285, 288, 333
 СПФ – сплавы с памятью формы – 50
 Сплавление – 216, 256, 257, 259, 263, 265, 274, 333
 Сплавы на основе никеля – 288
 Стекло – 22, 85, 86, 98, 132, 143, 144, 172, 173, 256108, 112, 113, 128, 129, 171, 223, 224
 Стереолитография – 12, 64, 67, 68, 93, 94, 101, 147, 191, 214, 215, 333
 Стол – 67, 73, 75, 76, 77, 112, 113, 126, 127, 128, 129, 132, 133, 139, 141, 144, 145, 159, 170, 175, 178, 179, 180, 182, 183, 184, 184, 199, 209, 210, 211, 232, 239, 282, 333

- Стоматологический – 65, 74,
206, 209, 211, 212, 243, 282,
284, 295, 296
- Стренга – 109, 117, 139, 188,
333
- Строительство – 22, 53, 74, 114,
286, 290
- Струйная 3D-печать – 102, 237,
238, 240, 242, 246, 247, 293,
333
- Струйная обработка материа-
лов – 99
- Струйная обработка связующе-
го – 99
- Струйная печать связующим
веществом – 13, 103, 251,
252, 254, 256, 259, 260, 261,
262, 283, 292, 293, 333
- Субтрактивное изготовление –
87, 88, 333
- СУП – система управления про-
изводством – 33, 34
- Температурная сопротивляе-
мость – 169, 206, 333**
- Температурная усадка – 170,
333
- Термобарьер – 116, 117, 121,
125, 333
- Термоблок – 115, 123, 125, 126,
333
- Термокамера – 141, 142, 143,
144, 170, 173, 178, 179, 180,
249, 255, 256, 333
- Термопластик – 171, 233, 333
- Термопласт – 106, 107, 109,
149, 151, 156, 159, 166, 167,
168, 169, 178, 182, 188, 294
- Термостат – 115
- Технология – 11, 12, 13, 18, 19,
22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31,
32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 41,
43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 51,
52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59,
61, 62, 63, 65, 67, 69, 70, 71,
72, 74, 75, 76, 77, 78, 80, 81,
82, 83, 84, 85, 86, 88, 89, 70,
94, 95, 96, 97, 98, 99, 104,
108, 109, 110, 112, 126, 128,
132, 146, 153, 155, 159, 165,
166, 178, 179, 180, 185, 186,
191, 194, 196, 198, 204, 206,
207, 209, 210, 211, 212, 213,
214, 216, 217, 219, 221, 223,
225, 227, 228, 229, 230, 233,
234, 235, 236, 237, 238, 240,
242, 244, 246, 247, 248, 249,
250, 251, 257, 258, 261, 263,
264, 265, 267, 270, 273, 274,
275, 277, 278, 279, 280, 281,
283, 284, 285, 286, 288, 289,
290, 292, 293, 294, 295, 296,
297, 339
- Течение – 18, 21, 80, 85, 118,
151, 175, 177, 184, 209, 246,
267
- Титан – 17, 49, 50, 123, 125,
268, 270, 272, 273, 278, 285,
288, 295, 330
- ТО – топологическая оптимиза-
ция – 14, 59, 281, 334
- Токарный станок – 280

- Томография – 94, 267
- Топографическая карта – 63, 64
- Топография – 63
- Треjder – 21
- Треjдинг – 21
- Углерод – 108, 174, 185, 186, 187, 221, 223, 230
- Ударная прочность – 169, 334
- Удельная стоимость изготовления – 90, 98
- «Умная» фабрика – 32, 334
- «Умные» материалы – 50, 51
- Упорный подшипник – 148
- Услуги – 28, 31, 33, 35, 39, 44, 45
- УФ – ультрафиолет – 14, 51, 67, 84, 102, 103, 171, 172, 173, 207, 235
- Фидер – 12, 114, 115, 119, 120, 121, 125, 132, 327, 334
- Физический мир – 25, 31
- Филамент – 12, 100, 106, 107, 108, 109, 110, 114, 115, 116, 117, 119, 120, 121, 122, 123, 125, 126, 132, 139, 146, 147, 152, 153, 159, 160, 162, 164, 165, 167, 170, 171, 172, 173, 175, 186, 187, 190, 233, 294, 327, 334
- Фильера – 100, 146, 151, 152, 154, 174, 332, 334
- Фильерная головка – 148, 149
- Финансовый рынок – 21
- Формат – 59, 67, 80, 93
- Формовочное изготовление – 87, 334
- Формовочные методы – 88, 98
- Формующая головка – 334
- Форсунка – 287, 340
- Фотополимер – 64, 68, 81, 84, 107, 191, 206, 209, 213, 235, 239, 242, 246, 294, 295, 334
- Фотополимеризация в резервуарах (ванночке) – 12, 64, 66, 99, 101, 197
- Фотоскульптура – 63, 64, 334
- Фрезеровка – 57, 88, 280, 289
- ФСИ – Фонд содействия инновациям – 75, 76
- Функциональный – 50, 51, 52, 58, 60, 62, 76, 83, 87, 107, 152, 178, 183, 186, 188, 189, 209, 226, 227, 228, 229, 231, 246, 247, 248, 255, 256, 261, 263, 266, 267, 288, 293, 294, 295, 296, 297
- Химическая стойкость – 169, 223, 259, 335
- Холодная сварка – 176, 335
- Хот-энд – 114, 116, 117, 118, 119, 122, 125, 126, 170, 174
- Хрупкость – 81, 294, 295
- Цилиндрический канал – 118
- Червяк – 148, 149, 335

- ЧПУ – числовое программное управление – 14, 56, 57, 88, 94, 283, 235
- Ш**аблон сканирования – 147, 183
- Шаблоны для литья – 295
- Шлифование – 175, 176, 177, 208, 245, 246, 335
- Шнек – 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 160, 333, 335
- Шоколад – 74
- Э**кономика – 23, 24
- Экономический центр – 24
- Экспозиция – 63
- Экструдер – 12, 56, 100, 110, 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 121, 125, 126, 127, 132, 133, 134, 135, 136, 140, 147, 148, 149, 150, 151, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 170, 171, 174, 327, 335
- Экструдер Уэйда – 116, 159, 335
- Экструзионная головка – 118, 151, 156, 333, 334, 335
- Экструзия – 12, 53, 99, 100, 109, 110, 117, 127, 132, 146, 147, 148, 149, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 159, 160, 162, 163, 165, 171, 173, 176, 178, 179 180, 182, 188, 335
- Эластичность – 170, 247, 335
- Электродуговое наращивание – 11, 55, 104, 285, 292
- Электронные схемы – 51, 52, 188
- Эстетический – 281
- Ю**велирное дело – 50, 53, 74, 209, 211, 212, 278, 295
- А**ВА – 14
- ABS – 14, 113, 125, 127, 134, 141, 144, 161, 169, 170, 172, 173, 175, 176, 177, 206, 233, 243, 247, 248, 294
- ADAM – Atomic diffusion additive manufacturing – 14, 55, 186, 336
- AF – Additive fabrication – 14, 65
- ALM – Additive layer manufacturing – 14, 65
- AM – Additive manufacturing – 14, 55, 65, 78, 104, 152, 186, 336
- ASTM – American Society for Testing and Materials – 14, 65, 99
- B**ig Data – 15, 21, 25, 62
- BJ – Binder jetting – 115, 103, 3364, 79, 91, 87, 94, 255
- C**AM – Computer aided manufacturing – 15, 289
- CDLP – Continuous direct light processing – 15, 213, 336
- CFF – Continious Filament Fabrication – 15, 185, 336

- CLIP** – Continious Liquid Interface Production – 15, 213, 336
- CoreXY** – 137, 138
- DED** – Direct Energy Disposition – 15, 104, 286, 288, 292, 337
- Direct** – 15, 102, 104, 114, 115, 116, 213, 265, 286, 336
- DLP** – Digital Light Processing – 15, 101, 107, 191, 193, 194, 195, 196, 204, 205, 206, 209, 211, 213, 214, 215, 293, 294, 295, 296, 336
- DMD** – Digital Micromirror Device – 15, 194, 210, 336
- DMLS** – Direct Metal Laser Sintering – 15, 102, 265, 271, 272, 273, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 181, 282, 283, 284, 285, 288, 292, 293, 295, 337
- DOD** – Drop on Demand – 15, 102, 235, 237, 238, 337
- DTM** – Desk top manufacturing – 15, 69, 70
- EBM** – Electron Beam Melting – 15, 54, 70
- EBSD** – Electron backscatter diffraction – 15, 268
- FDM** – Fused Disposition Modelling – 12, 15, 52, 56, 57, 70, 73, 78, 100, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 123, 125, 132, 140, 146, 147, 152, 153, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 170, 177, 178, 180, 182, 183, 185, 186, 189, 190, 196, 206, 209, 222, 233, 293, 294, 337
- FFF** – Fused Filament Fabrication – 12, 15, 100, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 113, 114, 116, 124, 126, 132, 140, 152, 153, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 169, 170, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 182, 183, 184, 185, 186, 189, 190, 196, 204, 205, 209, 222, 227, 240, 247, 280, 293, 294, 295, 296, 226, 337
- FGF** – Fused Granula Fabrication – 15, 152, 337
- Filament** – 12, 15, 100, 185, 334, 336, 337
- FLM** – Fused Layer Modelling – 15, 152, 337
- FPM** – Fused Pellet Modelling – 15, 152, 337
- GSM** – Graded structural material – 15, 268
- G-код** – 94, 95, 337
- HAZ** – Heat affected zone – 15, 268
- Hbot** – 136, 137
- HDMR** – 15, 57, 337
- HIPS** – 15, 165, 233
- Hybrid deposition and subsequent micro-rolling** – 15, 57, 337

- IN100 – 15, 267, 268
- LAAM – Laser assisted additive
manufacturing – 16, 267
- LAMZ – Laser additive
manufactured zone – 16, 268
- LBMD – 16, 104, 338
- LENS – Laser Engineering Net
Shaping – 16, 54, 104, 338
- LOM – Laminated Object
Manufacturing – 104, 337
- MJ – Material Jetting – 16, 102,
230, 238
- MJF – Mutli Jet Fusion – 16,
230, 231, 236, 338
- NPJ – Nano Partilcle fetting –
16, 55, 249, 338
- PA – 16
- PA 12 – 16
- PA 6 – 16
- PAM – Polymer Additive
Manufacturing – 16, 152, 338
- PEEK – 16, 117
- PEI – 16, 169, 294
- PETG – 16, 113, 169, 173
- PLA – 16, 108, 113, 118, 142,
165, 169, 170, 171, 172, 173,
175, 233, 299
- PMMA – 15, 195
- PP – 16
- PPE – 16
- PS – 16
- PVA – 16, 132, 176
- PVC – 16
- Raft – 338
- RepRap – Replicating Rapid
Prototyper – 16, 72, 73, 127,
134, 137, 142, 338
- Retract – 119, 338
- Selective Laser Sintering – 16,
54, 101, 102, 216, 265, 338
- Sheet Lamination – 104, 338
- Single Pass Jetting – 17, 55, 338
- SLA – 12, 16, 17, 64, 68, 70,
101, 106, 107, 108, 147,
191, 193, 194, 195, 196,
199, 202, 203, 204, 205,
206, 209, 210, 211, 212,
213, 214, 215, 217, 227,
239, 240, 242, 246, 247,
280, 293, 294, 295, 297, 338
- Slicer – 332
- SLM – Selective laser melting –
16, 54, 102, 265, 269, 270,
271, 272, 273, 274, 275, 277,
278, 279, 280, 281, 282, 283,
284, 285, 288, 292, 293, 295,
338
- SLS – 16, 54, 69, 70, 102, 106,
108, 216, 217, 218, 218, 219,
220, 221, 222, 223, 224, 225,
226, 227, 228, 229, 230, 232,
233, 234, 235, 239, 251, 256,
257, 258, 271/ 273, 275, 277,
293, 294, 295, 296, 338
- SPJ – 17, 55, 338

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Stereolithography – 16, 17, 64,
67, 93, 94, 101, 338

STL – 16, 17, 59, 67, 93, 94, 96,
98, 329

TC11 – 17, 268

TPU – 17, 169, 294

UAM – Ultrasonic Additive
Manufacturing – 17, 105, 339

WAAM – Wire arc additive
manufacturing – 17, 55, 104,
285, 289, 290, 291, 292, 239

WSZ – Wrought substrate zone –
17, 268

X-head – 135, 141

XY-head – 134, 135, 141

YZ-bed – 135, 138

Z-bed – 135, 138

Учебное издание

Канищев Максим Викторович

Ульев Леонид Михайлович

ВВЕДЕНИЕ В АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 1

ОБЗОР ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ

Учебник

Технический редактор *Т.В. Суханова*

Корректор *Е.Н. Леонова*

Верстальщик *Ю.В. Пашкова*

Подписано в печать 13.01.23

Уч.-изд. л. 22,5

Формат 60 × 90 ¹/₁₆

Университет науки и технологий МИСИС,
119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1

Издательский Дом НИТУ «МИСиС»,
119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 2А
Тел. 8 (495) 638-44-06

Отпечатано в типографии
Издательского Дома НИТУ «МИСиС»,
119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4А
Тел. 8 (495) 638-44-16, 8 (495) 638-44-43