

# М Р СТАНКОСТРОЕНИЯ

Я. Гибсон, Д. Розен,  
Б. Стакер

Технологии  
аддитивного  
производства



ТЕХНОСФЕРА

# Содержание

Предисловие к русскому изданию .....	22
Предисловие .....	23
<b>Глава 1</b>	
<b>Введение и описание основных принципов .....</b>	<b>28</b>
1.1. Что такое аддитивное производство? .....	28
1.2. Где используются изделия АП? .....	31
1.3. Общее представление процесса аддитивного производства .....	32
1.3.1. Этап 1. Проектирование в среде САПР .....	33
1.3.2. Этап 2. Преобразование в STL-файлы .....	33
1.3.3. Этап 3. Перенос STL-файла в машину АП и манипулирование этими файлами .....	33
1.3.4. Этап 4. Настройка машины .....	33
1.3.5. Этап 5. Изготовление .....	33
1.3.6. Этап 6. Извлечение изделия .....	33
1.3.7. Этап 7. Последующая обработка .....	34
1.3.8. Этап 8. Применение .....	34
1.4. Почему используется термин «аддитивное производство»? .....	35
1.4.1. Автоматизированное изготовление (Autofab — Automated Fabrication) .....	35
1.4.2. Быстрое прототипирование изделий произвольной формы (Freeform Fabrication или Solid Freeform Fabrication) .....	36
1.4.3. Аддитивное производство или послойный синтез .....	36
1.4.4. Стереолитография или трехмерная печать .....	37
1.4.5. Быстрое прототипирование .....	37
1.5. Преимущества аддитивного производства .....	38
1.6. Различие между аддитивным производством и обработкой на станках с ЧПУ .....	39
1.6.1. Материал .....	40
1.6.2. Скорость изготовления .....	40
1.6.3. Сложность .....	40
1.6.4. Точность .....	41
1.6.5. Геометрическая форма .....	42

1.6.6.	Программирование .....	42
1.7.	Примеры изделий аддитивного производства.....	43
1.8.	Другие родственные технологии .....	44
1.8.1.	Технология реверс-инжиниринга.....	45
1.8.2.	Компьютерное моделирование.....	46
1.8.3.	Тактильная САПР.....	47
1.9.	Об этой книге .....	48
1.10.	Упражнения .....	49
	Литература.....	50

## Глава 2

<b>Развитие технологий аддитивного производства .....</b>	<b>51</b>	
2.1.	Введение .....	51
2.2.	Компьютеры .....	52
2.3.	Технология компьютерного моделирования и проектирования. ....	55
2.4.	Другие технологии, связанные с АП.....	60
2.4.1.	Лазеры .....	60
2.4.2.	Технологии печати .....	61
2.4.3.	Программируемые логические контроллеры.....	61
2.4.4.	Материалы.....	62
2.4.5.	Обработка с использованием ЧПУ .....	63
2.5.	Использование слоев .....	63
2.6.	Классификация АП процессов .....	65
2.6.1.	Жидкие полимерные композиции .....	67
2.6.2.	Системы отдельных частиц.....	68
2.6.3.	Системы с расплавленным материалом .....	69
2.6.4.	Системы с твердыми листовыми материалами.....	71
2.6.5.	Новая схема классификации технологий аддитивного про- изводства .....	71
2.7.	Системы с использованием металлов .....	73
2.8.	Гибридные системы .....	74
2.9.	Основные этапы в развитии АП.....	75
2.10.	Международное распространение АП.....	77
2.11.	Перспективы аддитивного производства. Трансформация быстрого прототипирования в прямое цифровое производство...	79
2.12.	Упражнения .....	80
	Литература.....	81

**Глава 3**

<b>Общая последовательность процесса аддитивного производства .....</b>	<b>83</b>
3.1. Введение .....	83
3.2. Восемь этапов аддитивного производства .....	84
3.2.1. Этап 1. Концептуализация изделия и его проектирование в среде САПР .....	84
3.2.2. Этап 2. Преобразование данных САПР в STL/AMF форматы .....	86
3.2.3. Этап 3. Передача STL/AMF файлов на машины АП и их обработка .....	88
3.2.4. Этап 4. Настройка машины .....	89
3.2.5. Этап 5. Построение изделия .....	90
3.2.6. Этап 6. Извлечение и очистка изделия .....	90
3.2.7. Этап 7. Постобработка изделия .....	91
3.2.8. Этап 8. Применение .....	91
3.3. Различия технологий АП .....	92
3.3.1. Системы с использованием фотополимеров .....	93
3.3.2. Порошковые системы .....	94
3.3.3. Системы с расплавленным материалом .....	94
3.3.4. Твердые листовые материалы .....	95
3.4. Системы с использованием металлов .....	96
3.4.1. Использование подложек .....	96
3.4.2. Плотность энергии .....	96
3.4.3. Масса изделия .....	96
3.4.4. Точность .....	97
3.4.5. Скорость производства .....	97
3.5. Техническое обслуживание оборудования .....	97
3.6. Вопросы обработки и хранения материалов .....	98
3.7. Проектирование для АП .....	99
3.7.1. Ориентация изделия .....	99
3.7.2. Удаление опорных элементов .....	101
3.7.3. Устройство полостей .....	101
3.7.4. Включение ребер жесткости и других фиксирующих элементов .....	102
3.7.5. Элементы фиксации частей конструкции .....	102
3.7.6. Снижение числа составных деталей изделия при сборке .....	103
3.7.7. Идентификационная маркировка .....	104
3.8. Области применения, не включающие традиционное моделирование в среде САПР .....	104
3.8.1. Медицинское моделирование .....	104

3.8.2.	Данные реверс-инжиниринга.....	105
3.8.3.	Архитектурное моделирование .....	105
3.9.	Дальнейшие перспективы .....	105
3.9.1.	Упражнения .....	106
	Литература .....	107

## Глава 4

<b>Процесс фотополимеризации в ванне .....</b>	<b>108</b>	
4.1.	Введение .....	108
4.2.	Материалы для фотополимеризации в ванне .....	111
4.2.1.	УФ-отверждаемые фотополимеры.....	111
4.2.2.	Обзор химии фотополимеров .....	113
4.2.3.	Композиции полимеров и механизмы реакций .....	116
4.3.	Скорость реакции .....	120
4.4.	Фотополимеризация в ванне с лазерным сканированием.....	121
4.5.	Моделирование процесса фотополимеризации.....	122
4.5.1.	Энергетическая освещенность и экспозиция .....	123
4.5.2.	Взаимодействие ЛИ и полимера .....	126
4.5.3.	Фотоскорость.....	129
4.5.4.	Временная шкала .....	130
4.6.	Векторное сканирование в машинах для VP .....	131
4.7.	Способы сканирования .....	134
4.7.1.	Явления и ошибки, встречающиеся при послойном синтезе изделий .....	134
4.7.2.	Шаблон лазерного сканирования WEAVE .....	137
4.7.3.	Способ лазерного сканирования STAR-WEAVE.....	139
4.7.4.	Шаблон (решетка) лазерного сканирования ACES .....	142
4.8.	Микрофотополимеризация в ванне с векторным сканированием	146
4.9.	Технологии и процессы проекционной фотополимеризации в ванне с использованием масок.....	148
4.9.1.	Технологии проекционной фотополимеризации в ванне с использованием масок .....	148
4.9.2.	Коммерческие системы для MPVP .....	150
4.9.3.	Моделирование для MPVP .....	151
4.10.	Двухфотонная фотополимеризация в ванне.....	153
4.11.	Преимущества и недостатки процесса .....	155
4.12.	Заключение .....	156
4.13.	Упражнения .....	157
	Литература .....	159

**Глава 5**

<b>Плавление порошков в сформированном слое.....</b>	<b>163</b>
5.1. Введение .....	163
5.2. Материалы .....	165
5.2.1. Полимеры и композиты на их основе.....	165
5.2.2. Металлы и композиты на их основе .....	168
5.2.3. Керамика и керамические композиты.....	169
5.3. Механизмы спекания порошков .....	170
5.3.1. Твердофазное спекание .....	170
5.3.2. Химически индуцированное спекание .....	174
5.3.3. ЖФС и частичное плавление.....	175
5.3.4. Полное плавление.....	180
5.3.5. Изготовление изделий.....	181
5.4. Параметры технологического процесса и моделирование .....	183
5.4.1. Параметры технологического процесса .....	183
5.4.2. Соотношения между использованной энергией и способом сканирования.....	186
5.5. Работа с порошками.....	190
5.5.1. Выбор способа подачи порошка .....	190
5.5.2. Системы подачи порошков.....	191
5.5.3. Восстановление порошка после обработки .....	193
5.6. Варианты процессов PBF и коммерческие машины .....	195
5.6.1. Лазерное спекание полимеров .....	195
5.6.2. Лазерные системы для обработки металлов и керамики... ..	199
5.6.3. Электронно-лучевое плавление.....	202
5.6.4. Линейные и послойные режимы PBF процессов для полимеров.....	207
5.7. Преимущества и недостатки процесса.....	210
5.8. Заключение .....	212
5.9. Упражнения .....	212
Литература.....	213

**Глава 6**

<b>Экструзионные системы .....</b>	<b>214</b>
6.1. Введение .....	214
6.2. Основные принципы.....	215
6.2.1. Загрузка материала .....	216
6.2.2. Разжижение материала.....	217
6.2.3. Экструзия .....	218
6.2.4. Отверждение .....	221
6.2.5. Управление ориентацией изделия .....	222

6.2.6.	Связывание .....	223
6.2.7.	Генерация поддержек .....	224
6.3.	Управление построением и траекториями движения .....	226
6.4.	FDM процесс, разработанный компанией Stratasys .....	231
6.4.1.	Типы машин FDM .....	232
6.5.	Материалы .....	234
6.6.	Ограничения FDM .....	236
6.7.	Биоэкструзия .....	237
6.7.1.	Формирование геля .....	238
6.7.2.	Экструзия расплава .....	239
6.7.3.	Архитектура скаффолдов .....	240
6.8.	Другие системы .....	241
6.8.1.	Контурное изготовление .....	241
6.8.2.	Непланарные системы .....	242
6.8.3.	FDM керамики .....	244
6.8.4.	RepRap и Fab@home .....	244
6.9.	Упражнения .....	246
	Литература .....	246

## Глава 7

<b>Распыление материала методом струйной печати .....</b>	<b>248</b>	
7.1.	Развитие печати как процесса аддитивного производства .....	249
7.2.	Материалы для распыления методом струйной печати .....	250
7.2.1.	Полимеры .....	250
7.2.2.	Керамика .....	254
7.2.3.	Металлы .....	255
7.2.4.	Осаждение растворов и взвесей .....	258
7.3.	Основы обработки материалов .....	259
7.3.1.	Технические проблемы распыления материалов .....	259
7.3.2.	Технологии формирования капель .....	262
7.3.3.	Непрерывный режим распыления .....	262
7.3.4.	Режим распыления DOD .....	264
7.3.5.	Другие методы формирования капель .....	266
7.4.	Моделирование процесса распыления материалов .....	268
7.5.	Машины для распыления материалов .....	273
7.6.	Преимущества и недостатки процесса .....	274
7.7.	Заключение .....	276
7.8.	Упражнения .....	277
	Литература .....	279

<b>Глава 8</b>	
<b>Распыление связующего для струйной печати .....</b>	<b>283</b>
8.1. Введение .....	283
8.2. Материалы .....	286
8.2.1. Материалы, продаваемые на рынке .....	286
8.2.2. Исследование керамических материалов .....	288
8.3. Варианты процесса .....	290
8.4. Машины для распыления связующего .....	293
8.5. Преимущества и недостатки процесса .....	296
8.6. Заключение .....	298
8.7. Упражнения .....	299
Литература .....	300
<b>Глава 9</b>	
<b>Процессы ламинирования листовых (слоистых)</b>	
<b>материалов .....</b>	<b>302</b>
9.1. Введение .....	302
9.1.1. Склеивание, или адгезивное связывание .....	303
9.1.2. Процессы «соединение-раскрой» .....	303
9.1.3. Процессы «раскрой-соединение» .....	306
9.2. Материалы .....	309
9.3. Основы обработки материалов .....	311
9.3.1. Термоскрепление .....	311
9.3.2. Прессование листового металла .....	313
9.4. Ультразвуковое аддитивное производство .....	314
9.4.1. Качество соединения слоев методом УАП .....	317
9.4.2. Основы ультразвуковой сварки металлов .....	318
9.4.3. Параметры процесса УАП и их оптимизация .....	320
9.4.4. Микроструктуры и механические свойства изделий УАП .....	323
9.4.5. Приложения УАП .....	328
9.5. Заключение .....	332
9.6. Упражнения .....	333
Литература .....	334
<b>Глава 10</b>	
<b>Процессы направленного энерговклада .....</b>	<b>336</b>
10.1. Введение .....	336
10.2. Общее описание процесса направленного энерговклада .....	339
10.3. Подача материала .....	340
10.3.1. Подача порошка .....	340
10.3.2. Подача проволоки .....	344



10.4. Системы направленного энерговклада .....	345
10.4.1. Процессы лазерной наплавки металла .....	345
10.4.2. Процессы нанесения металла с применением электронного пучка.....	349
10.4.3. Прочие процессы DED .....	350
10.5. Параметры процесса .....	351
10.6. Типичные материалы и микроструктура.....	352
10.7. Взаимосвязь обработки, структуры и свойств.....	356
10.8. Преимущества и недостатки DED .....	361
10.9. Упражнения .....	364
Литература.....	364

## Глава 11

<b>Технологии прямой записи</b> .....	<b>365</b>
11.1. Технологии прямой записи .....	365
11.2. История вопроса.....	365
11.3. ПЗ с использованием чернил.....	366
11.3.1. Процесс распыления форсункой .....	368
11.3.2. Шпиндельные системы.....	370
11.3.3. Процессы струйной печати чернилами.....	372
11.3.4. Аэрозольная ПЗ.....	373
11.4. ПЗ методом лазерного переноса.....	376
11.5. ПЗ термическим напылением .....	378
11.6. ПЗ методом осаждения потоком частиц.....	380
11.6.1. Лазерное CVD .....	381
11.6.2. Химическое осаждение из паровой фазы фокусированным пучком ионов.....	383
11.6.3. CVD с электронным пучком .....	384
11.7. Прямое осаждение из жидкой фазы .....	384
11.8. Пучковые методы корректировки для аддитивных/ субтрактивных подходов ПЗ.....	386
11.8.1. Запись пучком электронов.....	386
11.8.2. Запись пучком сфокусированных ионов.....	387
11.8.3. Запись лазерным пучком.....	387
11.9. Гибридные технологии .....	388
11.10. Использование методов ПЗ .....	388
11.11. Упражнения .....	391
Литература.....	391

**Глава 12**

<b>Преимущества бюджетных систем АП .....</b>	<b>394</b>
12.1. Введение .....	394
12.2. Интеллектуальная собственность .....	395
12.3. Прорывная инновация .....	398
12.3.1. Возможности прорывного бизнеса.....	398
12.3.2. Внимание средств массовой информации .....	399
12.4. Движение новаторов .....	401
12.5. Будущее бюджетных систем АП .....	403
12.6. Упражнения .....	404
Литература .....	404

**Глава 13**

<b>Руководство по выбору процесса.....</b>	<b>406</b>
13.1. Введение .....	406
13.2. Методы выбора для изделий .....	407
13.2.1. Теория принятия решений .....	407
13.2.2. Методы определения приемлемости .....	409
13.2.3. Методы выбора .....	411
13.2.4. Пример выбора .....	415
13.3. Проблемы выбора .....	419
13.4. Пример системы для предварительного выбора .....	422
13.5. Планирование и контроль производства.....	429
13.5.1. Планирование производства.....	429
13.5.2. Предварительная обработка.....	430
13.5.3. Изготовление детали.....	431
13.5.4. Последующая обработка.....	431
13.5.5. Выводы .....	432
13.6. Нерешенные проблемы .....	432
13.7. Упражнения .....	433
Литература .....	434

**Глава 14**

<b>Постобработка.....</b>	<b>436</b>
14.1. Введение .....	436
14.2. Удаление поддерживающего материала .....	436
14.2.1. Постобработка естественной поддержки .....	437
14.2.2. Удаление искусственной поддержки .....	439
14.3. Улучшение текстуры поверхности .....	442
14.4. Повышение точности.....	443
14.4.1. Источники неточности .....	443

14.4.2. Предварительная обработка модели для компенсации потерь точности .....	444
14.4.3. Стратегия механической обработки.....	445
14.5. Улучшение эстетического восприятия .....	450
14.6. Подготовка к использованию в качестве модели .....	451
14.6.1. Модели для литья по выплавляемым моделям.....	452
14.6.2. Модели для литья в песчаные формы .....	453
14.6.3. Другие методы копирования модели .....	454
14.7. Улучшение свойств с помощью нетепловых методов .....	456
14.8. Улучшение свойств с помощью тепловых методов .....	456
14.9. Выводы .....	460
14.10. Упражнения .....	460
Литература .....	461

## Глава 15

### Задачи программного обеспечения в аддитивном производстве .....

15.1. Введение .....	462
15.2. Подготовка моделей САПР: файл STL.....	463
15.2.1. Формат файла STL, бинарный/ASCII .....	463
15.2.2. Создание файлов STL из системы САПР .....	465
15.2.3. Расчет каждого профиля сечения .....	466
15.2.4. Зависящие от технологии элементы.....	472
15.3. Проблемы с файлами STL .....	475
15.4. Манипуляции с STL-файлом .....	477
15.4.1. Программы просмотра .....	478
15.4.2. STL манипуляции на установках АП .....	478
15.5. За пределами файла STL.....	480
15.5.1. Прямое разбиение модели САПР .....	480
15.5.2. Цветовые модели.....	481
15.5.3. Сложные материалы.....	482
15.5.4. Применение STL для механической обработки.....	482
15.6. Дополнительное ПО в помощь АП .....	483
15.6.1. Обзор функций ПО .....	483
15.6.2. Моделирование процесса АП с помощью конечно-элементного анализа.....	485
15.7. Формат файла аддитивного производства .....	487
15.8. Упражнения .....	489
Литература .....	489

**Глава 16**

<b>Прямое цифровое производство .....</b>	<b>491</b>
16.1. Компания Align Technology.....	492
16.2. Компании Siemens и Phonak.....	494
16.3. Индивидуальное изготовление обуви и другие примеры ПЦП .	497
16.4. Движущие силы ПЦП .....	501
16.5. Производство против прототипирования .....	504
16.6. Оценки затрат.....	507
16.6.1. Модель затрат .....	507
16.6.2. Модель времени построения.....	509
16.6.3. Пример сканирования лазером в ванне с фотополимером .	513
16.7. Учет затрат в ходе жизненного цикла изделия .....	514
16.8. Перспективы ПЦП.....	517
16.9. Упражнения .....	518
Литература .....	520

**Глава 17**

<b>Проектирование для аддитивного производства .....</b>	<b>521</b>
17.1. Мотивация .....	522
17.2. Проектирование с учетом требований производства и сборки..	523
17.3. Уникальные возможности АП .....	527
17.3.1. Сложные формы .....	528
17.3.2. Сложная иерархия .....	529
17.3.3. Функциональная сложность .....	531
17.3.4. Сложные материалы.....	534
17.4. Принципы и цели базового ПАП.....	535
17.4.1. Сложная геометрия .....	536
17.4.2. Интегрированные сборки.....	536
17.4.3. Индивидуальная геометрия .....	537
17.4.4. Многофункциональные конструкции .....	537
17.4.5. Устранение традиционных ограничений ПИС .....	538
17.5. Исследование свободы проектирования .....	538
17.5.1. Объединение деталей и повторное проектирование.....	539
17.5.2. Иерархические структуры .....	540
17.5.3. Примеры промышленного проектирования.....	543
17.6. Инструменты САПР для АП.....	545
17.6.1. Проблемы САПР.....	545
17.6.2. Твердотельные САПР.....	547
17.6.3. Перспективные технологии САПР .....	549
17.7. Методы синтеза.....	554
17.7.1. Теоретически оптимальные облегченные конструкции .....	554

17.7.2. Методы оптимизации .....	555
17.7.3. Оптимизация топологии .....	556
17.8. Заключение .....	562
17.9. Упражнения .....	563
Литература.....	563

## Глава 18

<b>Быстрое изготовление инструмента .....</b>	<b>566</b>
18.1. Введение .....	566
18.2. Прямое АП для ИФ вкладышей.....	568
18.3. Электроды-инструменты.....	573
18.4. Литье по выплавляемым моделям .....	575
18.5. Другие системы.....	575
18.5.1. Инструментальная оснастка для вакуумного формования	576
18.5.2. Оснастка для формования волокнистой массы (пульпы) ..	577
18.5.3. Оснастка для производства композитов .....	577
18.5.4. Сборочный инструмент и зажимы для снятия показаний при измерениях.....	578
18.6. Упражнения .....	579
Литература.....	580

## Глава 19

<b>Применения АП .....</b>	<b>581</b>
19.1. Введение .....	581
19.2. История развития.....	582
19.2.1. Важность физических моделей.....	583
19.2.2. Функциональные испытания .....	584
19.2.3. Быстрое изготовление ИО .....	585
19.3. Применение АП для поддержки медицинских приложений.....	587
19.3.1. Хирургические и диагностические средства .....	588
19.3.2. Разработка протезов .....	590
19.3.3. Производство.....	592
19.3.4. Тканевая инженерия и трехмерная печать органов.....	593
19.4. Программная поддержка в медицинских приложениях.....	594
19.5. Ограничения АП для медицинских приложений .....	596
19.5.1. Скорость .....	597
19.5.2. Цена .....	598
19.5.3. Точность .....	598
19.5.4. Материалы.....	599
19.5.5. Простота использования .....	599
19.6. Дальнейшее развитие медицинских приложений АП.....	600

19.6.1. Разрешения .....	600
19.6.2. Страхование .....	601
19.6.3. Подготовка технического персонала .....	601
19.6.4. Расположение установки .....	602
19.6.5. Сервисные бюро обслуживания .....	602
19.7. Применение в аэрокосмической промышленности .....	603
19.7.1. Характеристики, благоприятствующие АП .....	603
19.7.2. Производство продукции .....	604
19.8. Применение в автомобильной промышленности .....	608
19.9. Упражнения .....	609
Литература .....	610
<b>Глава 20</b>	
<b>Возможности для бизнеса и будущее АП .....</b>	<b>612</b>
20.1. Введение .....	612
20.2. Что может быть нового? .....	615
20.2.1. Новые виды продукции .....	615
20.2.2. Новые типы организаций .....	617
20.2.3. Новые типы занятости .....	619
20.3. Цифровое предпринимательство (ЦП) .....	621
20.4. Заключение .....	625
20.5. Упражнения .....	626
Литература .....	626
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>627</b>