

Отличительная особенность серии книг «Мир станкостроения» — тщательный отбор научной и технической литературы (зарубежной и отечественной) по актуальным направлениям развития станко-инструментальной отрасли. Публикуемые в серии книги направлены на информационное обеспечение подпрограммы «Станкоинструментальная промышленность» государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности». Отечественное станкостроение должно стать основой технологической независимости и базой современного машиностроения.

*Заместитель министра Минпромторга России
М. И. Иванов*



РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ «МИР СТАНКОСТРОЕНИЯ»

Иванов Михаил Игоревич, заместитель министра Минпромторга России – председатель редсовета

Члены совета:

Бойм Александр Григорьевич, к.т.н., зам. генерального директора ПАО «ЭНИМС», г. Москва

Боровский Георгий Владиславович, к.т.н., исполнительный директор ФГУП «НПО «Техномаш», г. Москва

Кузнецов Александр Павлович, д.т.н., профессор МГТУ «СТАНКИН», г. Москва

Маслов Андрей Руффович, д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Никитин Дмитрий Владимирович, проректор МГТУ «СТАНКИН», г. Москва

Новиков Сергей Васильевич, к.т.н., зам. генерального директора АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», главный редактор журнала «СТАНКОИНСТРУМЕНТ», г. Москва

Олейник Андрей Владимирович, д.т.н., профессор МГТУ «СТАНКИН», г. Москва

Паничев Николай Александрович, председатель редакционного совета журнала «СТАНКОИНСТРУМЕНТ», г. Москва

Самодуров Георгий Васильевич, к.т.н., президент Ассоциации «Станкоинструмент», г. Москва

redsovet_knigi@electronics.ru



МИР станкостроения

Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Сталкер

Технологии
аддитивного
производства

Перевод с английского
под ред. д.ф.-м.н., профессора
И.В. Шишковского

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2020

УДК 621.7

ББК 30.6

Г46

Г46 Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б.

Технологии аддитивного производства

Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 648 стр. ISBN 978-5-94836-447-6

Книга посвящена новейшим технологиям, которые дают возможность на основе данных о виртуальных моделях твердых тел изготавливать физические модели в результате быстрых и легких производственных процессов.

Авторы книги – признанные специалисты в области аддитивных технологий, имеющие многолетний опыт работы и исследований. Первое издание задумывалось как базовый учебник, объединивший все литературные источники, посвященные целям и задачам аддитивного производства (АП). Второе издание существенно переработано и дополнено, новая информация включена в дополнительные разделы и главы.

Разработчики АП и представители промышленности найдут полезные сведения в этой книге, поскольку она поможет понять состояние дел в отрасли и укажет возможности для дальнейших исследований. Издание предназначено также для преподавателей, студентов и аспирантов, изучающих аддитивное производство, может быть использовано в качестве автономного курса или как модуль в большой программе по технологии производства.

УДК 621.7

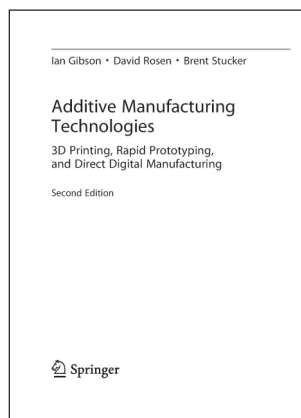
ББК 30.6

Translation from English language edition:
Additive Manufacturing Technologies by Ian Gibson,
David Rosen and Brent Stucker
Copyright © Springer Science+Business Media New
York 2010, 2015
All Rights Reserved

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», перевод на
русский язык, оригинал-макет, оформление, 2020

ISBN 978-5-94836-447-6

ISBN 978-1-4939-2112-6 (англ.)



Содержание

Предисловие к русскому изданию	22
Предисловие	23
Глава 1	
Введение и описание основных принципов	28
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 манипулиро- вание 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

Развитие технологий аддитивного производства	51
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**Общая последовательность процесса аддитивного производства**

83

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

Процесс фотополимеризации в ванне	108
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

Плавление порошков в сформированном слое.....	163
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

Экструзионные системы	214
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

Распыление материала методом струйной печати.....	248
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

Глава 8**Распыление связующего для струйной печати 283**

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

Глава 9**Процессы ламинирования листовых (слоистых) материалов 302**

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

Глава 10**Процессы направленного энерговклада 336**

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

Технологии прямой записи	365
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

Преимущества бюджетных систем АП	394
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

Руководство по выбору процесса.....	406
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

Постобработка.....	436
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 по- терь 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 произ- водстве	462
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-элемент- ного анализа.....	485
15.7. Формат файла аддитивного производства	487
15.8. Упражнения	489
Литература.....	489

Глава 16

Прямое цифровое производство	491
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

Проектирование для аддитивного производства	521
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

Быстрое изготовление инструмента	566
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

Применения АП	581
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

Глава 20

Возможности для бизнеса и будущее АП.....	612
--	------------

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

Предметный указатель	627
-----------------------------------	------------

Предисловие к русскому изданию

Я был очень рад, когда услышал, что профессор Игорь Шишковский будет научным редактором русского издания нашей монографии. Обладая многолетним и богатым опытом в данной области, этот известный ученый и педагог сможет гарантировать как техническую точность, так и ясность изложения. Поскольку русский язык является одним из самых распространенных языков в мире, этот перевод позволит значительно расширить аудиторию, которая сможет впервые получить доступ к данной информации. Я надеюсь, что исследователи, студенты и преподаватели найдут эту книгу прекрасным дополнением к своей коллекции, и что она расширит их познания в быстро развивающихся областях аддитивных технологий.

Брент Сталкер
профессор, университет Луисвилля (Кентукки, США)

Предисловие

Благодарим вас за внимание, уделенное нашей книге о технологиях аддитивного производства (АП — Additive Manufacturing). Мы надеемся, что она принесет пользу и оправдает затраченные на чтение время и силы, и тогда вы посчитаете нашу работу стоящим начинанием. Все началось во время обсуждения этой темы на конференции в Португалии, когда было решено собрать все литературные источники, посвященные целям и задачам АП. Поскольку мы не только друзья, а также и коллеги, казалось разумным объединить усилия, а не конкурировать — ведь распределение нагрузки и использование сильных сторон друг друга, несомненно, приведет к большим результатам с меньшими затратами.

Мы написали эту книгу, потому что все работаем в области АП в течение многих лет. Хотя ни одного из нас нельзя назвать старым, все вместе мы обладаем 60-летним опытом, и у каждого из нас есть устойчивая репутация как педагогов и исследователей в этой области. Все мы следили, как технологии, описанные в этой книге, формируются, развиваются и превращаются в серьезные коммерческие инструменты, с десятками тысяч пользователей и ежегодным производством многих миллионов изделий с помощью машин АП. Информация об АП в настоящее время включена в учебные программы во многих университетах, политехнических колледжах и институтах по всему миру. Все большее количество студентов изучает эти технологии, однако мы с сожалением наблюдаем, что пока отсутствует единый учебник по этой дисциплине, так необходимый для таких программ. Мы считаем, что первое издание этой книги и является подобным учебником, поэтому на основании второго, обновленного издания, представленного здесь, мы надеемся, что смогли еще в большей степени улучшить наше начинание.

Под термином «аддитивное производство» понимается спектр технологий, которые способны на основе данных о виртуальных моделях твердых тел изготавливать физические модели в результате быстрых и легких производственных процессов. Данные моделирования разбиваются на серии данных о двумерных сечениях конечной толщины. Затем эти данные загружают в машины АП, которые можно объединить, чтобы они все вместе последовательно слой за слоем добавляли материал, в результате формируя изделия на физическом уровне. Следовательно, машины АП абсолютно точно воспроизводят геометрические параметры детали без необходимости регулировки и настройки таких производственных процессов, как изготовление оснастки, обработка подсечек, соблюдение углов уклона или других функций. Поэтому с полным правом мы можем сказать, что изготовление изделий на машинах АП — это процесс по принципу «строишь

то, что видишь» (WYSIWYB — What You See Is What You Build), который имеет особенно высокую ценность при изготовлении изделий сложной геометрической формы. Этот основной принцип заложен в конструкцию почти всех машин АП с вариациями в каждой технологии, обусловленными методами, используемыми для создания слоев и склеивания их вместе. Другими факторами влияния можно назвать скорость изготовления, толщину слоя, тип исходного материала, точность и стоимость изготовления. При таком обилии переменных становится ясно, почему эта книга получилась такой большой и подробной. Несмотря на это, у нас в запасе остается еще много информации, которую следовало бы предоставить читателям.

Первые три главы этой книги дают обзор основных процессов АП. Не увлекаясь полным описанием каждой технологии, мы предоставляем оценку, из которой становится понятным, почему АП так важно для многих отраслей промышленности. Мы кратко описываем быстрое развитие этой технологии от скромного, но многообещающего начала, все еще требующего больших усилий для развития, к тому результату, который в настоящее время находится на стадии зрелости и демонстрирует реальную пользу для проектных организаций по разработке продуктов. Мы надеемся, что после прочтения этих глав вы узнаете основы работы АП.

В следующих девяти главах (глава 4–12) мы по очереди подробно представим каждую группу технологий. Основы каждой технологии рассматриваются с точки зрения основного процесса, идет ли речь о фотополимерном отверждении, спекании, плавлении или других процессах, поэтому читатель сможет правильно оценить, какие факторы необходимы для понимания, развития и оптимизации каждой технологии. Большинство обсуждаемых в этой книге технологий были переведены на коммерческие рельсы, как минимум, одной компанией; оборудование, используемое в подобных производствах, описано наряду с обсуждением о том, как выбрать его наилучшие модели. Последняя глава из этой группы сосредоточена на недорогих процессах и машинах, ее текст частично пересекается с частью материала из предыдущих глав, но мы считаем, что подобное отношение оправдано с точки зрения растущего в геометрической прогрессии интереса к этому недорогому оборудованию.

Из заключительных глав вы узнаете, как применять аддитивные технологии в различных условиях. Во-первых, мы рассмотрим методы отбора для сортировки множества вариантов, касающихся типа машины, которую вы хотите купить применительно к вашему приложению АП, и предоставим рекомендации по правильному выбору технологий для ваших целей. Так как все машины АП зависят от программного обеспечения 3D САПР, мы переходим к обсуждению всего технологического процесса проектирования. После этого мы рассмотрим методы и технологии постобработки, чтобы в случае неоптимального выбора машины и материала, которые

оказались не до конца подходящими для точного производства нужных вам изделий, у вас была возможность для улучшения их характеристик и внешнего вида. Глава, посвященная вопросам программного обеспечения АП, завершает эту группу глав.

Технологии АП усовершенствовались до такой степени, что многие производители рассматривают машины АП как средства производства конечного продукта. Такой подход назван прямым цифровым производством (Direct Digital Manufacturing,), что открывает двери для многих интересных и инновационных приложений, которые в прошлом считались невозможными, неосуществимыми или нерентабельными. Теперь мы можем рассмотреть возможность массовой кастомизации (изготовления продукции по конкретным техническим требованиям заказчика), при которой изделие может быть изготовлено в соответствии со вкусами отдельного потребителя, но за рентабельную цену. Затем мы обсудим, как использование этой технологии влияет на процесс проектирования и его улучшение с учетом подхода WYSIWYB. Это плавно переводит нас к объектам приложения АП, в том числе инструментам и продукции для медицинской, аэрокосмической и автомобильной промышленности. Мы заканчиваем книгу главой о бизнесе или применении на уровне предприятия различных направлений АП, исследуя, как эти системы позволяют креативным предприятиям и предпринимателям придумывать новые продукты, а также описываем перспективные в будущем области приложения АТ.

Эта книга в первую очередь предназначена для студентов и преподавателей, изучающих АП, либо может пригодиться в качестве автономного курса или как модуль в большой программе по технологии производства. В ней достаточно глубоко представлена информация об АП, чтобы быть полезной для студентов или аспирантов, она сопровождается многочисленными ссылками на литературные источники, чтобы указать молодым людям, изучающим этот предмет, направления дальнейшего поиска. Каждая глава имеет также ряд вопросов и упражнений, предназначенных для тестирования знаний читателя и расширения понимания предмета. В помощь педагогам в комплекте и как часть второго издания идет руководство с инструкциями, которое включает дополнительные задания и их решения. Разработчики АП также найдут полезные сведения в этой книге, поскольку она поможет им понять состояние дел в области и укажет возможности для дальнейших исследований.

В новой редакции книги мы сделали ряд изменений по сравнению с изданием 2009 года. Кроме того, мы собрали всю возможную информацию об изменениях в этой отрасли, которую разместили в ряде новых разделов и глав. Так, была расширена глава о медицинских приложениях, в нее мы включили обсуждение приложений для автомобильной и аэрокосмической отрасли. Представлена новая глава по быстрому изготовлению

оснастки, а также глава, посвященная недавним достижениям в секторе недорогих АП. Мы вставили описание спектра последних технологических инноваций, в том числе обсуждение нового формата файлов для аддитивных технологий (Additive Manufacturing File Format), а также другие дополнения, сопровождающие стандартизацию АП в ASTM (American Society for Testing and Materials — Американское общество специалистов по испытаниям материалов) и ISO. Мы обновили терминологию в тексте, чтобы соответствовать терминологии, разработанной комитетом ASTM F42, который также был принят в качестве международного стандарта ISO. Во втором издании мы тщательно отредактировали текст, удалили ссылки на технологии, принадлежащие отдельным компаниям, а вместо этого сосредоточились на технологических принципах и общем представлении этих технологий. Мы разделили исходную главу, посвященную процессам печати, на две главы: о разбрызгивании материала и связующего, чтобы отразить стандартную терминологию и эволюцию этих процессов в разных направлениях. Мы уверены, что в результате этих многочисленных дополнений и изменений настоящее издание стало более полным.

Однако, несмотря на наши усилия, мы понимаем, что книга о такой быстро меняющейся технологии не долго будет источником самой свежей информации. Поэтому мы будем обновлять наш курс на сайте <http://www.springer.com/978-1-4419-1119-3>, публикуя там дополнительные домашние упражнения для студентов и новые материалы для педагогов. Если у вас есть комментарии, вопросы или предложения по улучшению, они будут только приветствоваться. Мы ожидаем обновления этой книги в будущем и с нетерпением ждем ваших комментариев о том, как вы использовали эти материалы, и пожеланий по улучшению нашей книги.

Как упоминалось ранее, каждый автор является признанным специалистом в области аддитивных технологий, имеющим многолетний опыт работы и исследований. Кроме того, во многих отношениях появление этой книги стало возможным только благодаря участию в наших работах студентов и коллег, с которыми мы сотрудничали на протяжении многих лет. Для представления авторов и некоторых других участников процесса издания книги мы заканчиваем это предисловие краткими биографиями авторов и благодарностями.

Ян Гибсон (Сингапур),
Давид Розен (Атланта, Джорджия, США),
Брент Стакер (Луисвилл, Кентукки, США)

Благодарности

Доктор Брент Стакер благодарит штат Юта и Технический исследовательский центр VTT Финляндии за предоставление времени для работы над первым изданием этой книги и творческого отпуска в Хельсинки; а также Университет Луисвилля за свободный график преподавательской работы и создание условий для творчества, которые были так необходимы для завершения второго издания книги. Кроме того, написание большей части этой книги не стало бы возможным без исследований аспирантов и докторантов, которые работали с доктором Стакером на протяжении многих лет. В частности, он хотел бы поблагодарить доктора Г.Д. Джанаки Рам из Индийского технологического института в Мадрасе, который выступил соавтором главы «Аддитивные технологии на основе послойного синтеза» в справочнике CRC Materials Processing Handbook. Эта его работа очень помогла со структурированием текста нашей книги. Кроме того, работы следующих студентов стали частью информации, излагаемой в этой книге и в сопровождающих ее учебных заданиях: Муни Малхотра, Сюджи Ку, Карсон Эсплин, Адам Смит, Джошуа Джордж, Кристофер Робинсон, Янжи Ян, Мэтью Суонк, Джон Обелодан, Кай Цзэн, Хайцзюнь Гун, Сяодун Син, Хенфен Гу, Мд. Анам, Хачикет Патил и Дипанкар Пал. Особую благодарность доктор Стакер выражает своей жене Гейл и детям Тристи, Эндрю, Меган и Эмме, которые терпеливо поддерживали его во время работы над этой книгой в течение многих дней и вечеров.

Профессор Давид У. Розен выражает благодарность Технологическому институту Джорджии за поддержку и благодарит многих аспирантов и постдоков, которые своими работами способствовали созданию этой книги. В частности, этого доктора: Фэй Дин, Амит Джаривала, Скотт Джонстон, Амейя Лимайе, Дж. Марк Мичем, Беней Сагер, Л. Ангела Це, Гончинь Ван, Крис Уильямс, Юн Ян и Венчао Чжоу, а также Лорен Марголин и Ксиаюн Чжао. Особая благодарность его жене Джоан и детям Эрику и Кристе за их терпение, которое они проявляли к нему во время работы над этой книгой.

Профессор Ян Гибсон хотел бы отметить поддержку Университета Дикин, которая выражалась в предоставлении достаточного времени для его работы над этой книгой. Л.К. Ананд также помог в подготовке многих рисунков и изображений для написанных Я. Гибсоном глав. Наконец, он хотел бы поблагодарить свою любимую жену Лину за ее терпение, любовь, понимание, проявленные в течение долгих часов подготовки материала и написания глав. Он также посвящает эту книгу своему покойному отцу Роберту Эрвину Гибсону и надеется, что он бы гордился этим замечательным достижением своего сына.

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ И ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ

Аннотация

Технология, описанная в этой книге, изначально была названа быстрым прототипированием. Термин «быстрое прототипирование» (БП, RP — Rapid Prototyping) используется в различных отраслях промышленности для описания процесса быстрого изготовления модели или макета системы или ее части перед окончательным запуском в производство или коммерциализацией. Иными словами, акцент делается на быстром создании прототипа или базовой модели, на основе которой можно было бы в дальнейшем разрабатывать более точные модели и в итоге получить конечный продукт. Консультанты по вопросам управления и инженеры-программисты используют термин «быстрое прототипирование» для описания своих процессов развития бизнеса и программных подходов в виде кусочно-слоеных моделей-прототипов, что позволяет клиентам и другим заинтересованным сторонам проверить реализацию идеи и обеспечить обратную связь в процессе разработки. В контексте разработки продукции термин «быстрое прототипирование» широко используется для описания технологий, которые создают физические прототипы непосредственно по цифровым данным. Эта книга посвящена именно таким новейшим технологиям, разработанным для изготовления прототипов, но в настоящее время применяющимся и для многих других целей.

1.1. Что такое аддитивное производство?

Аддитивное производство — это официальный термин для обозначения процессов, которые ранее определялись как быстрое прототипирование, а в широком использовании — Трехмерная печать. Термин «*быстрое прототипирование*» (БП, RP — Rapid Prototyping) используется в различных отраслях промышленности для описания быстрого представления системы или ее части перед выпуском конечного продукта или коммерциализацией. Иными словами, акцент сделан на быстром создании прототипа изделия — опытного образца, на основе которого происходит дальнейшее уточняющее

моделирование и в конце концов разработка конечного продукта. Консультанты по вопросам управления и программисты также используют термин «быстрое прототипирование» для описания процесса развития бизнеса и программных продуктов кусочно-слоеными прототипами, что позволяет клиентам и другим заинтересованным сторонам проверить идеи и обеспечить обратную связь в процессе разработки. В контексте разработки продукта термин «быстрое прототипирование» широко используется для технологий, которые создают физические прототипы непосредственно по цифровым данным моделирования. Наша книга посвящена именно таким технологиям, изначально разработанным для прототипирования, но в настоящее время используемым для многих других целей.

Пользователи технологии БП пришли к выводу, что этот термин является недостаточным и, в частности, не эффективно представляет более поздние приложения технологии. Улучшение качества продукции и оборудования для БП означало гораздо более тесную связь с конечным продуктом. В настоящее время многие детали изготавливаются сразу на подобном оборудовании, поэтому мы не имеем права называть их прототипами. Термин «быстрое прототипирование» также указывает на основной принцип этих технологий, который заключается в изготовлении всех изделий аддитивным методом. Недавно созданный в рамках *ASTM International* (American Society for Testing and Materials — Американского общества специалистов по тестированию материалов) Технический комитет принял решение о введении новой терминологии. Несмотря на то что данное решение все еще находится в стадии обсуждения, в принятых ASTM в последнее время стандартах используется термин «аддитивное производство» (АП) [1].

Основной принцип технологии АП заключается в том, что модель первоначально генерируется с использованием системы трехмерного автоматизированного проектирования (3D САПР, 3D CAD — Computer-Aided Design), а изделие изготавливается непосредственно без необходимости планирования процесса. Хотя в реальности все выглядит далеко не так просто, АП, конечно, значительно упрощает процесс производства сложных трехмерных объектов прямо по данным САПР. Другие (традиционные) производственные процессы требуют тщательного и детального анализа геометрической формы и размеров детали, чтобы определить порядок обработки поверхностей, выбор инструментов и процессов технологической цепочки, потребность в дополнительной оснастке для финишной обработки изделия. АП, в отличие от них, нужны только некоторые основные данные о размерах, некоторое знание о принципах работы машин АП и свойствах материалов, выбранных для данного изделия.

Ключом к пониманию АП является принцип изготовления изделия — послойное добавление материала, причем каждый слой представляет со-

бой тонкий поперечный срез изделия, информация обо всех параметрах которого содержится в исходных данных САПР. Очевидно, что на физическом уровне каждый слой должен иметь конечную толщину, поэтому получающееся в итоге изделие будет приближением к исходной виртуальной модели, как показано на рис. 1.1. Чем тоньше каждый слой, тем ближе конечная деталь к оригиналу. Все коммерциализованные на сегодняшний день машины АП используют послойный подход и отличаются друг от друга только используемыми материалами, методами создания слоев и соединения слоев друг с другом. Этими различиями определяются точность соответствия конечного изделия заданной модели и его физико-механические свойства. Они также определяют время изготовления детали, необходимость финишной обработки, размер машины АП, общую стоимость машины и всего процесса.



Рис. 1.1. Представление чайной чашки в САПР и изображения последующих моделей с использованием послойного синтеза изделия с разной толщиной слоев

В этой главе мы хотим ввести основные понятия АП и описать общий процесс АП от проектирования до изготовления конкретных изделий. Далее мы обсудим влияние АП на проектирование и производство и попытаемся разобраться, как в этом контексте может измениться весь процесс разработки продукта. Поскольку АП становится все более важным элементом проектирования и разработки изделий, глава завершается обсужде-

нием некоторых соответствующих инструментов, необходимых в процессе разработки продукта.

1.2. Где используются изделия АП?

В этой книге вы найдете описание широкого спектра приложений АП. Вы также узнаете, что их количество растет по мере развития и совершенствования технологических процессов. Первоначально АП применялось только для создания презентационных моделей изделий во время их разработки. Широко известно, что модели гораздо нагляднее и полезнее для оценки проекта, чем чертежи или визуализация, поскольку помогают в полной мере понять намерения проектировщика, представляющего концепцию проекта. Рисованные эскизы, конечно, создавать быстрее и проще, однако для изготовления модели требуется полностью проверить все проектные расчеты.

Помимо изготовления исходных моделей, АП в течение определенного времени развивалось в направлении улучшения качества материалов, повышении точности изготовления и общего качества производства. Модели нашли применение в качестве источника уточняющей информации по принципу 3F (Form, Fit, and Function) — *формы, пригодности к сборке и функционирования изделия*. Начальные модели были использованы, чтобы в полной мере оценить форму и общую цель конструкции (форма). Повышение точности изготовления в процессе означало, что детали изготавливались с допусками, необходимыми для целей сборки (пригодность к монтажу). Улучшение физико-механических характеристик означало, что деталь правильно обработана, поэтому ее можно оценивать в соответствии с ее конечным функциональным назначением (функция).

Сказать, что АП оказалось полезно только для создания моделей, было бы неправильно и стало бы недооценкой технологии. В сочетании с другими методами в технологических цепочках АП могут быть использованы для значительного сокращения времени разработки продукта и затрат. Совсем недавно некоторые из этих технологий были усовершенствованы до такого уровня, что на выходе сразу можно получить конечный продукт. Это объясняет, почему терминология существенно изменилась от «быстрого прототипирования» до «аддитивного производства». Кроме того, использование мощных лазеров привело к тому, что изделия можно сразу изготавливать из разных металлов, что еще больше расширяет область применения АП.

1.3. Общее представление процесса аддитивного производства

Аддитивное производство включает в себя ряд этапов для перехода от виртуального описания в САПР к изготовлению изделия на физическом уровне. Степень применения АП изменяется в зависимости от конкретного изделия. Для изготовления небольших, относительно простых изделий АП используется лишь для создания визуализационных моделей, в то время как более крупные, более сложные объекты, для проектирования которых необходима объемная проектная документация, включают АП на многочисленных этапах и итерациях в течение всего процесса изготовления. Кроме того, на ранних этапах процесса проектирования изделия могут потребоваться просто заготовки, в этом случае прибегают к АП из-за скорости, с которой они могут быть изготовлены. На более поздних стадиях процесса изделиям требуется финишная обработка и доводка (в том числе шлифование, подготовка поверхности и покраска) перед использованием, здесь АП полезны для создания сложных форм без необходимости подбора специальных инструментов. Далее мы тщательно рассмотрим различные этапы процесса АП, но в итоге большинство таких процессов в разной степени включают следующие восемь этапов (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Общее представление процесса аддитивного производства, состоящего из восьми стадий при изготовлении изделия

1.3.1. Этап 1. Проектирование в среде САПР

Изготовление любых деталей с использованием АП должно начинаться с создания виртуальной модели с помощью специального программного обеспечения, которое полностью описывает геометрическую форму и размеры внешней поверхности изделия. Это может включать использование практически любого профессионального программного обеспечения САПР для твердотельного моделирования, но в любом случае на выходе нужно получить трехмерное представление твердого тела или его поверхности. Оборудование для обратного инжиниринга (например, лазерного и оптического сканирования) также может потребоваться для создания этого представления.

1.3.2. Этап 2. Преобразование в STL-файлы

Почти каждая машина АП принимает формат STL (Stereo Lithography) файлов, которые стали стандартом де-факто, и в настоящее время почти каждая САПР может выводить такие файлы в этом формате. В таких файлах описаны внешние замкнутые поверхности изначальной САПР-модели, они формируют основу для расчета слоев.

1.3.3. Этап 3. Перенос STL-файла в машину АП и манипулирование этими файлами

STL-файл с описанием изделия передается в машину АП. Здесь производятся некоторые общие манипуляции с файлом — исправление размеров, позиционирование и ориентация для изготовления изделия.

1.3.4. Этап 4. Настройка машины

Перед началом изготовления машину АП нужно правильно настроить. В установках нуждаются параметры изготовления, например пределы использования материала, источник энергии, толщина слоя, тайминги и т.д.

1.3.5. Этап 5. Изготовление

Изготовление изделия представляет собой большей частью автоматизированный процесс, поэтому машина способна выполнять его практически без контроля оператора. Необходим только поверхностный мониторинг работы машины в отдельных случаях, чтобы не произошло ошибки, например закончился материал для печати, отказал источник питания или программное обеспечение и т.д.

1.3.6. Этап 6. Извлечение изделия

После завершения изготовления нужно извлечь изделие. Для этого иногда требуется провести некие манипуляции с машиной, в которую встроены

блокировки безопасности, чтобы обеспечить, например, снижение температуры или отсутствие активно движущихся частей.

1.3.7. Этап 7. Последующая обработка

После извлечения изделия из машины может потребоваться его дополнительная очистка перед использованием. На этом этапе изделия еще могут не набрать нужную прочность или в них остаются вспомогательные поверхности, которые должны быть удалены. Таким образом, на эти работы часто требуются время и тщательная ручная обработка опытным оператором.

1.3.8. Этап 8. Применение

В некоторых случаях детали уже могут быть готовы к использованию. В других случаях требуется дополнительная обработка перед эксплуатацией. Например, могут потребоваться грунтовка и покраска для создания нужной текстуры поверхности и финишной обработки. Обработка может быть трудоемкой и длительной, если требования к конечному продукту очень высоки. Также по техническим условиям на изделие отдельные детали должны быть собраны вместе с другими механическими или электронными компонентами, чтобы сформировать конечную модель или продукт.

Теперь, после рассмотрения многочисленных этапов процесса АП становится понятно, что многие машины АП требуют тщательного технического обслуживания. Во многих машинах встроены хрупкие лазерные или печатные устройства, которые нужно внимательно контролировать. Их нельзя эксплуатировать в грязной или шумной обстановке. Несмотря на то что машины, как правило, предназначены для работы без участия и контроля оператора, техническое обслуживание должно включать в себя регулярные проверки, кроме того, перечень работ по техническому обслуживанию может различаться в зависимости от применяемой технологии АП. Важно также отметить, что процессы АП выходят за пределы имеющихся стандартов на большинство материалов и технологий, что объясняет недавний интерес Технического комитета ASTM F42 по аддитивным технологиям, который работает для решения этой проблемы [1]. Тем не менее многие производители машин АП рекомендуют и предоставляют тестовые шаблоны, которые можно использовать для проверки работы машин в допустимых пределах.

Кроме технического обслуживания оборудования, бережного отношения требуют и применяемые материалы. Сырье, используемое в некоторых процессах АП имеет ограниченный срок годности, также для некоторых материалов требуется хранение в определенных условиях, которые предотвращают нежелательные химические реакции. Нужно избегать воз-

действия влаги, света, загрязнений материалов. В большинстве процессов используются материалы, которые могут быть повторно использованы для изготовления других деталей. Тем не менее для повторного использования есть ограничения, поскольку в результате может произойти ухудшение свойств, поэтому нужно соблюдать процедуры для поддержания постоянного качества материала в ходе многократного использования.

1.4. Почему используется термин «аддитивное производство»?

В настоящее время рассматриваемая нами технология заключается прежде всего в использовании аддитивных процессов, т.е. укладке тем или иным способом (добавлении) материала слой за слоем. Термин «аддитивное производство» (от англ. additive — добавлять), или АП, очень хорошо представляет данный процесс, однако есть достаточно много синонимов. В этом разделе рассматриваются другие термины, которые были использованы для обозначения этой технологии, чтобы лучше объяснить ее общую цель и преимущества для разработки и изготовления продукции.

1.4.1. Автоматизированное изготовление (Autofab — Automated Fabrication)

Термин «автоматизированное изготовление» (Autofab — Automated Fabrication) сделал популярным Маршалл Бернс в своей книге с таким же названием, которая была одним из первых учебников, описывающих эту технологию в начале 1990-х годов [2]. Основное внимание в ней уделено использованию автоматизации в производстве продукции, что подразумевает упрощение производства в целом и исключение из производственного процесса ручного труда. Компьютеры и микроконтроллеры используются для управления исполнительными механизмами и мониторинга за системными переменными. Этот термин также может быть использован для описания других форм обрабатывающих центров с числовым программным управлением (ЧПУ), поскольку отсутствует прямое указание на число изготовленных деталей или количество необходимых для этого стадий процесса, хотя Бернс в первую очередь сосредоточился на технологиях, описанных в нашей книге. Некоторые ключевые технологии, однако, были опущены, так как они возникли после написания книги.

1.4.2. Быстрое прототипирование изделий произвольной формы (Freeform Fabrication или Solid Freeform Fabrication)

Следует отметить, что описываемая технология позволяет изготавливать изделия сложной геометрической формы. Иногда главным преимуществом этой технологии является принцип «за сложность платить не нужно» (complexity for free), т.е. для машины АП не имеет значения, какова сложность формы и конструкции данного изделия. Изготовление простого куба или цилиндра занимает практически столько же времени и состоит из такого же количества операций машины, как и производство сложного анатомического объекта такого же объема. Следовательно, «бесплатно» означает независимость процесса производства от сложности формы изделия. Этот факт кардинально отличает АП от большинства обычных производственных процессов, количество которых существенно увеличивается по мере роста сложности геометрической формы детали.

1.4.3. Аддитивное производство или послойный синтез

Термины «аддитивное производство» и «*послойный синтез*» относятся к способу изготовления изделий путем добавления материала слой за слоем. В этом заключается отличие АП от технологии механической обработки, в ходе которой, наоборот, материал удаляется или извлекается из заготовки. Следует отметить, что некоторые процессы не являются чисто аддитивными в том, что на одном этапе материал добавляется в одной точке, но также используются процессы извлечения материалов на другом этапе. В настоящее время каждый коммерческий процесс работает в послойном режиме. Тем не менее ничего не мешает предположить, что, несмотря на этот важный принцип, будущие системы будут добавлять материал при изготовлении изделий по другим принципам и точно так же будут включены в эту классификацию согласно широкому спектру критериев. Следует добавить сюда и слегка измененный термин «аддитивное изготовление путем формообразования (*аддитивное формование*)» (Additive Fabrication), который ввел Терри Волерс, известный консультант по АП, который пишет широко известные ежегодные отчеты о текущем состоянии этой отрасли [3]. Тем не менее многие специалисты предпочитают термин «производство» (manufacturing), поскольку «формование» (fabrication) имеет некоторый негативный смысл, отсылающий к понятию «прототип», т.е. заготовка, а не к конечному продукту. Кроме того, в некоторых регионах мира термин «формование» ассоциируется с гибкой листового металла и связанными с ней процессами, и, таким образом, специалисты из этих регионов часто возражают против использования слова «формование» для обозначения этой технологии. Следовательно, термин

«аддитивное производство» начинает широко использоваться, например был применен Волерсом в его последних публикациях и презентациях.

1.4.4. Стереолитография или трехмерная печать

Эти два термина изначально введены при описании определенных машин. Термин «*стереолитография*» (SL — Stereolithography) был использован американской компанией *3D Systems* [4, 5], а *трехмерная печать* (3DP) широко используется исследователями в Массачусетском технологическом институте [6], которые изобрели технологию на основе струйной печати. Оба термина указывают на участие в производстве двумерных процессов (литографии и печати) и расширение их в третье измерение. Так как большинство людей хорошо знакомы с технологией печати, идея ее использования для изготовления физического трехмерного объекта имеет смысл. Многие считают, что в конечном итоге термин «трехмерная печать» станет наиболее часто используемым для обозначения технологии АП. Недавний рост интереса СМИ к технологии это доказал, поэтому для широкой публики более узнаваем термин «трехмерная печать», чем любой другой, который употребляется в этой книге.

1.4.5. Быстрое прототипирование

Термин «быстрое прототипирование» был названием этого процесса, поскольку технология изначально создавалась для улучшения или замены той или иной модели изделия (прототипа). Производители и разработчики продукта считают прототипирование сложным, утомительным и дорогостоящим процессом, который часто препятствует развитию и творческим этапам в процессе внедрения нового продукта. БП предназначено для значительного ускорения этого процесса, поэтому термин использовался достаточно широко. Тем не менее пользователи и разработчики этой технологии теперь понимают, что АП, имеет гораздо больше возможностей, нежели простое изготовление прототипов.

Значительное улучшение точности изготовления и свойств материалов позволили включить эту технологию в тестирование, изготовление оснастки, производство и другие сферы, к которым нельзя применить термин «прототипирование». Тем не менее очевидно, что большинство других терминов, описанных выше, также далеко не безупречны. Одна из возможностей заключается в том, что многие продолжают использовать термин БП для различных видов производств, не ограниченных только прототипированием, подобно тому, как IBM занимается не только производством офисного оборудования, а компания 3М работает за пределами горнодобывающей отрасли. Интересно посмотреть, как терминология будет развиваться в будущем.

Во всех случаях, где это возможно, мы использовали термин «аддитивное производство» или его аббревиатуру АП в качестве общего термина для набора технологий, описываемых в этой книге. Следует отметить, что в литературе большинство введенных выше терминов являются взаимозаменяемыми; но различная терминология может указывать на конкретный подход, используемый в конкретном случае. Поэтому и в этой книге, и в интернет-поисковиках, и в другой литературе читатель должен учитывать контекст, чтобы лучше понять значение каждого термина.

1.5. Преимущества аддитивного производства

Многие специалисты считают технологию АП революцией в разработке и производстве изделий. Некоторые даже пошли еще дальше, утверждая, что производство, как мы его знаем сегодня, перестанет существовать, если мы будем развивать АП до его логического завершения, и в настоящий момент мы переживаем новую промышленную революцию. Сейчас АП часто называют одной из самых передовых технологий, которые изменяют способ проектирования и производства изделий. Следовательно, мы имеем полное право задать вопрос: «Так ли это?» Что такое есть в АП, что вдохновляет людей на подобные заявления?

Во-первых, давайте рассмотрим «быстрый» характер этой технологии. Преимущество в скорости относится не только ко времени, необходимому на создание деталей. Форсирование всего процесса создания продукта возможно благодаря повсеместному использованию компьютеров. Поскольку в технологии применяется 3D САПР в качестве отправной точки и передача проектной документации АП происходит беспрепятственно, не стоит беспокоиться по поводу преобразования данных или интерпретации цели проектирования. Так же как 3D САПР работает по принципу «получаешь то, что видишь» (WYSIWYG — You See Is What You Get), так же обстоит дело и с АП, поэтому про эту технологию мы с полным правом можем сказать «строишь то, что видишь» (WYSIWYB — What You See Is What You Build).

Неразрывность и целостность всего процесса может также рассматриваться с точки зрения сокращения технологических операций. Независимо от сложности деталей, их изготовление внутри машины АП обычно проводят в одну стадию. Большинство традиционных производственных процессов потребовало бы нескольких этапов и итераций. Чем сложнее разрабатываемый вами дизайн (конструкция) изделия, тем в большей степени увеличивается количество этапов для его производства. Даже относительно простое изменение конструкции может привести к значительному увеличению времени изготовления обычными методами. Поэтому АП можно

рассматривать как метод, при котором очень эффективно прогнозировать временные затраты на изготовление изделия, независимо от того, какие изменения могут быть введены на первых этапах разработки изделия.

Аналогичным образом при использовании АП можно существенно снизить количество необходимых процессов и ресурсов. При обычном производстве даже опытному мастеру для изготовления прототипа в соответствии с набором чертежей САПР потребуется работать в несколько этапов. Это объясняется тем, что ему придется пользоваться различными методами обработки, начиная с ручной резьбы, отливки, штамповки и до применения станков с ЧПУ. Ручная механическая обработка и подобные операции утомительны, трудны и не лишены ошибок. Отливка — грязный процесс, для него требуется изготовление форм. Работа на станках с ЧПУ требует тщательного планирования и последовательного подхода, также необходим монтаж оснастки еще до вытачивания детали. Конечно, изначально предполагается, что мастер владеет всеми этими технологиями и у него под рукой находятся необходимые для изготовления детали инструменты.

АП можно использовать для отказа или хотя бы снижения трудоемкости многих этапов этих многоступенчатых процессов. С добавлением некоторых вспомогательных технологий, таких как силикон-каучуковое литье, сверление, полировка, шлифование, вполне возможно изготавливать широкий спектр различных деталей с различными характеристиками. Производственные процессы, включающие технологии АП, намного чище, более рациональны и универсальны, чем традиционные технологии машиностроения.

1.6. Различие между аддитивным производством и обработкой на станках с ЧПУ

Как уже упоминалось в обсуждении автоматизированного производства, по структуре АП имеет много общего с работой на станках с ЧПУ. Технология ЧПУ также имеет в своей основе компьютерное управление, которое используется для производства продукции. Изготовление изделий на станках с ЧПУ отличается в основном тем, что в процессе производства происходит удаление материала, а не его добавление. Для изготовления на станках с ЧПУ потребуется заготовка размером больше той детали, которую нужно из нее выточить. В этом разделе мы сравним основные характеристики работы на станках с ЧПУ и АП. Цель на самом деле заключается не в убеждении читателя в том, что одна технология лучше другой, а в том, чтобы показать, как реализовать их на разных этапах изготовления продукции или для ее различных видов.

1.6.1. Материал

Технология АП была первоначально разработана для полимерных материалов, восков и бумажных слоистых материалов. Впоследствии началось внедрение в АП композитов, металлов, керамики. Станки с ЧПУ могут быть использованы для мягких материалов, таких как средней плотности древесноволокнистые плиты (оргалит), технологичные (поддающихся машинной обработке) пены и воски и даже некоторые полимеры. Тем не менее использование станков с ЧПУ для формирования более мягких материалов ориентировано на подготовку этих деталей для использования в многостадийном процессе, например в отливке заготовок. Станки с ЧПУ лучше всего применять для точного изготовления конечного продукта — высококачественных деталей с заданными характеристиками из твердых, но относительно хрупких материалов, таких как сталь и другие сплавы металлов. Некоторые изделия, изготовленные с применением АП, напротив, имеют полости и отверстия или анизотропию свойств, которые зависят от ориентации изделия, параметров производственного процесса или метода ввода проектной документации в машину, в то время как изделия, изготовленные на станках с ЧПУ, обладают большей однородностью свойств и имеют более предсказуемые параметры качества.

1.6.2. Скорость изготовления

Высокоскоростной станок с ЧПУ способен удалять материал гораздо быстрее, чем машины АП добавляют слой за слоем до аналогичного объема. Тем не менее это только часть картины, поскольку технология АП может быть использована только на одном этапе. Станки с ЧПУ требуют значительных трудозатрат на настройку и планирование процесса, особенно для изготовления деталей сложной геометрической формы. Поэтому скорость следует оценивать с точки зрения всего процесса, а не только физического воздействия на материал детали. Станки с ЧПУ применяются в многоступенчатом производственном процессе, в ходе которого нужно перемещать или переставлять деталь внутри одной машины или использовать разные станки. Для изготовления детали в машине АП требуется всего несколько часов; часто несколько деталей изготавливаются партиями за один этап АП. Финишная обработка может занять несколько дней, если требуется высокое качество. Тот же процесс обработки на станке с ЧПУ, даже на 5-осевом высокоскоростном, может занять несколько недель, причем заранее нельзя предсказать точный срок изготовления детали.

1.6.3. Сложность

Как упоминалось выше, чем выше сложность геометрической формы, тем большее преимущество имеет АП по сравнению с ЧПУ. Если станок с ЧПУ используется для создания сразу единой детали, то возникают случаи, ко-

гда некоторые геометрические характеристики просто невозможно изготовить. Установка обрабатывающего инструмента на шпинделе накладывает определенные ограничения на доступ к детали или столкновения с ней, чтобы воспрепятствовать незапланированному движению инструмента по обрабатываемой поверхности детали. Процессы АП не имеют подобных ограничений, поэтому удаляемые и внутренние поверхности можно легко нарастить и достроить без специального планирования процесса. Некоторые детали не могут быть изготовлены на станках с ЧПУ, если они не разделены на компоненты и не требуют сборки на последующих этапах изготовления. Рассмотрим, например, возможность обработки макета корабля внутри бутылки. Как вы будете изготавливать макет корабля, когда он находится в бутылке? Скорее всего, вы отдельно изготовите оба элемента, а затем найдете способ объединить их вместе в результате сборки или соединения. Благодаря использованию АП вы можете построить корабль в бутылке сразу. Поэтому инженер-машиностроитель должен проанализировать проект каждой детали до начала ее изготовления. Это необходимо для того, чтобы гарантировать возможность изготовления детали и определить способы ее изготовления. Несмотря на то что некоторые детали нельзя изготовить с применением АП, вероятность таких случаев очень низка и имеется масса способов, как все же осуществить это без особых трудностей.

1.6.4. Точность

Машины АП, как правило, работают с разрешением в несколько десятков микрон. Общим правилом для машин АП является различное разрешение вдоль каждой из ортогональных осей. Вертикальная ось сборки соответствует толщине слоя, поэтому по ней будет более низкое разрешение по сравнению с двумя другими осями в плоскости сборки. Точность в плоскости сборки определяется расположением механизма сборки, который обычно включает коробки передач и двигатели разных видов. Этот механизм также может определять минимальный размер. Например, в технологии SL используется лазер как часть механизма сборки, его обычно позиционируют с помощью зеркальных гальванометров с приводами. Разрешение гальванометров позволяет определить общие размеры изготавливаемых деталей, в то время как диаметр лазерного луча будет определять минимальную толщину стенки. Точность станков с ЧПУ в основном определяется аналогичным разрешением позиционирования вдоль всех трех ортогональных осей и диаметров вращающихся режущих инструментов. Нужно учитывать факторы, которые зависят от геометрии инструмента, например радиусов внутренних углов, но толщина стенки может быть меньше диаметра инструмента, так как в данном случае мы рассматриваем

процесс удаления материала. В обоих случаях изготовление очень мелких деталей также зависит от их геометрии и свойств материала.

1.6.5. Геометрическая форма

Машины АП, по существу, разбивают сложную задачу изготовления в трехмерии на серию укладки простых двумерных сечений номинальной толщины. Таким образом, из производственного процесса трехмерной печати исключается этап соединения поверхностей, а непрерывность процесса определяется близостью соседних поперечных сечений. Поскольку на станках с ЧПУ подобные переходы сделать не так просто, обработка поверхностей, как правило, должна быть сгенерирована в трехмерном пространстве. Для деталей простой геометрической формы, например цилиндров, конусов, прямоугольных параллелепипедов и т.д., это относительно простой процесс, который определяется стыками (точками соединения поверхностей) вдоль пути режущего инструмента. Эти точки находятся довольно далеко друг от друга, поэтому положение инструмента фиксируется. В случаях произвольных поверхностей эти точки могут располагаться очень близко друг к другу, следовательно, требуются многочисленные изменения в ориентации инструмента или детали. Детали с такой геометрией чрезвычайно трудно производить на станках с ЧПУ, даже с интерполированным управлением по пяти и более осям. Подсечки, внутренние полости, острые внутренние углы и другие элементы поверхности не всегда удается обработать, если их параметры находятся за определенными пределами. Рассмотрим, например, элементы поверхности детали, представленной на рис. 1.3. Многие из них очень трудно обрабатывать без манипуляций с деталью на различных этапах.

1.6.6. Программирование

При использовании станков с ЧПУ необходимо определить последовательности операций в программе изготовления детали, а также произвести выбор инструмента, настройку скорости обработки, положение и угол подхода и т.д. Многие машины АП имеют выбор опций, но трудоемкость и затраты времени на выбор диапазона, сложности обработки и последствия в случае неправильного выбора оказываются минимальными по сравнению со станками с ЧПУ. Худшее, что может произойти при использовании АП машины, — это некачественное изготовление детали, если программирование не проведено на достаточно высоком уровне. Неправильное программирование на станке с ЧПУ заканчивается серьезным повреждением машины и даже может представлять опасность для токаря.



Рис. 1.3. Поверхности, обработка которых представляет проблему для станков с ЧПУ

1.7. Примеры изделий аддитивного производства

На рис. 1.4 показан монтаж изделий, изготовленных с использованием некоторых общих процессов АП. Изделие *а* было изготовлено на машине для стереолитографии и представляет собой упрощенный фюзеляж для беспилотного летательного аппарата с покрытием, усиленным конформной решетчатой конструкцией (более подробно о производственном процессе читайте в главе 4). Более полное описание этой детали включено в главу о проектировании АП. Детали *б* и *в* были изготовлены с использованием струйного распыления материала (см. главу 7). На примере детали *б* продемонстрирована возможность одновременного нанесения нескольких материалов, в этом случае один набор головок используется для нанесения прозрачного материала, а другой набор — для нанесения черного материала линий и названия *Objet*. Изделие *в* — это часть цепочной конструкции. В обоих изделиях *б* и *в* есть рабочие вращательные соединения, которые были изготовлены с использованием допусков на зазоры для соединений и убираемой подпорки. Изделие *г* — металлическое, оно изготовлено на машине по спеканию металлического порошка (metal powder bed fusion machine) электронным пучком в качестве источника энергии (глава 5). Это изделие является моделью имплантата для лица. Изделие *д* изготовлено на машине для соединения листовых материалов, которая имеет струйную печать материалов нескольких цветов (глава 9). Изделия *е* и *ж* изготовлены с методом экструзии (выдавливания) материала (глава 6). Деталь *е* является храповым механизмом, который был изготовлен в еди-

ной сборке на промышленной машине. Опять же работа этого механизма достигается путем правильного проектирования соединений и применения убираемой подпорки. Изделие *ж* было изготовлено на дешевой личной машине (которая установлена дома у одного из авторов). Изделия *з* и *и* изготовлены методом спекания полимерного порошка. Изделие *з* — это хорошо известная модель зубчатой передачи, так называемая brain gear (ведущая шестерня). В ней вращение одного колеса приводит в движение все остальные колеса. Поскольку изделиям, изготовленным из PBF полимера, не нужны подпорки, работающие вращательные и передаточные соединения могут быть созданы путем управления допусками и удаления лишнего порошка в местах соприкосновения. Деталь *и* — другая конформная решетчатая структура, на ее примере также показаны возможности АП по изготовлению сложных форм.

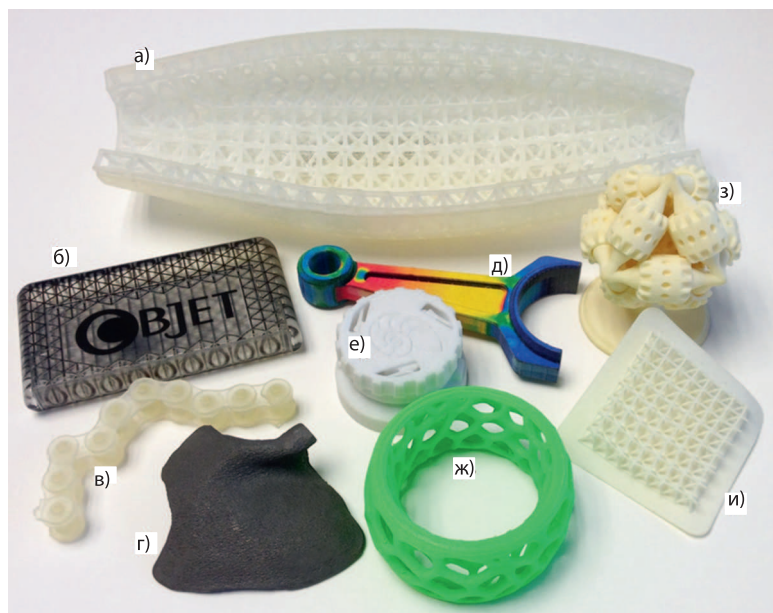


Рис. 1.4. Монтаж изделий АП

1.8. Другие родственные технологии

Наиболее распространенный способ ввода проектной информации для технологии АП — загрузка файла, вначале разработанного в традиционной системе 3D САПР, а затем преобразованного в формат STL. Есть, однако, и другие способы получения STL-файлов и другие технологии, которые могут быть использованы в сочетании с АП. В этом разделе будут описаны некоторые из них.

1.8.1. Технология реверс-инжиниринга

Все больше моделей строятся на основе данных, полученных с помощью реверс-инжиниринга (РИ), средств 3D визуализации и соответствующего программного обеспечения. В этом контексте РИ представляет собой процесс сбора геометрических данных другого объекта. Эти данные, как правило, изначально доступны в форме так называемого «облака точек сканирования», что означает множество соединенных между собой точек в пространстве, представляющих поверхности объекта. Эти точки нужно соединить вместе с помощью программного обеспечения для РИ, например Geomagic [7], которое также может быть использовано, чтобы объединить облака точек из разных сканов и выполнения других функций, таких как заполнение отверстий и сглаживание поверхностей. Во многих случаях эти данные могут быть неполными. Образцы, например, приходится помещать в удерживающую оснастку, поэтому прилегающие к ней поверхности не будут отсканированы должным образом. Кроме того, одни поверхности могут скрывать другие, так происходит в глубоких вырезах и пазах и во внутренних полостях и отверстиях; поэтому трудно получить внешний вид реального объекта. Недавние достижения в высоких технологиях позволили сделать гигантский рывок в технологии сканирования. Адаптированные мобильные телефоны всего за несколько сотен долларов со встроенным фотоаппаратом в настоящее время производят настолько высококачественное 3D сканирование, для которого несколько лет назад потребовался бы дорогой лазерный сканер или система стереоскопических камер стоимостью 100 000 долларов или больше.

Инженерные объекты, как правило, сканируются лазерными сканерами или с помощью контактных датчиков. Для объектов, имеющих сложную геометрию внутренних поверхностей, или анатомических моделей используется компьютерная томография (КТ), которая первоначально была разработана для медицинской визуализации, но также применяется для сканирования промышленно произведенных объектов. Эта техника работает аналогично АП: путем послойного сканирования собирается информация об объекте, затем с помощью программного обеспечения эти слои собираются вместе и определяются границы поверхности. Границы соседних слоев затем соединяют вместе, чтобы сформировать поверхность. Преимущество технологии КТ заключается в том, что можно получить изображение внутренних поверхностей. Высокоэнергетичное рентгеновское излучение также используется в промышленной технологии, чтобы создать изображения в высоком разрешении в пределах 1 мкм. Другой подход к оцифровке объектов — технология Capture Geometry Inside [8], которая во многом подобна реверсивному инжинирингу АП, при котором удаляемые слои за слоем поперечные сечения детали формируют двумерные изобра-

жения. Очевидно, что этот разрушающий подход к сбору геометрических параметров нельзя использовать для всех изделий.

АП можно применять для воспроизведения отсканированных предметов, что практически идентично получению 3D факса. Однако более вероятно, что данные будут изменены или объединены с другими данными, чтобы сформировать сложные артефакты произвольной формы для воплощения принципа технологии «за сложность платить не нужно». Примером может служить случай, когда отдельные данные (томограммы) пациента комбинируются с инженерным дизайном, чтобы сформировать персонализированный медицинский имплантат. Нечто подобное будет обсуждаться более подробно далее.

1.8.2. Компьютерное моделирование

3D САПР является чрезвычайно ценным ресурсом для проектирования и разработки продукции. Одним из основных преимуществ проектирования на основе программного обеспечения является легкость и дешевизна внесения изменений. Если на протяжении большей части разработки нового изделия мы сможем сохранить проектирование в программируемом формате, тогда есть гарантия, что любые изменения в конструкции будут воплощаться в виртуальной модели, а не на физическом уровне в самом изделии. Чем больше мы знаем о том, как изготавливать изделие еще до начала производства, тем более качественным будет конечный продукт. Это также наиболее экономически эффективный способ разработки самого продукта. Исправление обнаруженных нарушений проекта только после изготовления детали стоит дорого. 3D САПР может использовать АП для визуализации и выполнения основных тестов чернового проектирования перед запуском изделия в полномасштабное производство. Тем не менее чем сложнее проекты и чем больше они зависят от производства, тем менее вероятно, что мы получим достоверное представление даже с применением всех этих методов. Программное обеспечение 3D САПР также широко связано с другими программными пакетами, поскольку в нем часто используются такие подходы, как метод конечных элементов (МКЭ) для расчета физико-механических характеристик конструкции. Все эти методы обобщенно называются *компьютерным моделированием* (CAE — Computer-Aided Engineering). Усилия, динамические взаимодействия, напряжения, течения и другие параметры можно рассчитать, чтобы оценить, как будет вести себя изделие при определенных условиях. Такая программа не может с легкостью прогнозировать точное поведение детали, поэтому для анализа критических элементов потребуется комбинация компьютерного моделирования с основанным на АП экспериментальным анализом. Кроме того, с появлением прямого цифрового производства

(Direct Digital Manufacture), в котором АП используется для изготовления сразу конечного продукта, растет потребность в инструментах компьютерного моделирования для оценки работоспособности будущих деталей до их запуска в АП, чтобы мы могли построить эти детали в первый раз как проект для аддитивного производства (Design for Additive Manufacturing (D for AM)).

1.8.3. Тактильная САПР

Системы 3D САПР, как правило, построены на принципе, согласно которому проектирование модели начинается с базовых геометрических форм, которые затем различными способами объединяются в более сложные изделия. Такой подход работает очень хорошо для сложных изделий, которые мы тем не менее хорошо знаем. Однако не может ли он быть так же эффективен для проектирования более необычных конструкций? Многие потребительские продукты разрабатываются на основе идей художников и дизайнеров, а не инженеров. Отметим также, что АП предоставляет возможность большей свободы выражения мнений. В настоящее время АП действительно становится популярным инструментом для таких художников и скульпторов, как, например, Вирсавия Гроссман [9], которые используют свободу геометрических форм для создания визуально захватывающих скульптур. Но сегодня мы сталкиваемся с одной проблемой: некоторые компьютерные средства проектирования сдерживают или ограничивают творческие процессы, поэтому идет работа по расширению возможности САПР с целью предоставить больше свободы разработчику. Тактильно-сенсорное САПР моделирование, как в представленной на рис. 1.5 экспериментальной системе [10], работает аналогично коммерчески доступной системе моделирования Freeform [11].

Такая система обеспечивает более интуитивно понятную среду проектирования, чем другие стандартные САПР. Эти системы часто используют роботизированное устройство механорецепторной (сенсорной) обратной связи под названием Phantom, чтобы обеспечить обратную связь, выраженную в терминах усилий, для виртуальной среды моделирования. Объект можно увидеть на экране, а его восприятие (механорецепцию) трансформировать при помощи робота с подключенной программой Phantom в трехмерном пространстве. Среда моделирования включает в себя так называемую *виртуальную глину* (Virtual Clay), которая деформируется под действием прилагаемого усилия тактильного курсора. Это обеспечивает механизм для непосредственного взаимодействия с материалом моделирования подобно тому, как скульптор приложением усилий лепит из реальной глины нужную ему форму. Результаты использования этой системы — обычно получение более гармоничных и произвольных поверхностей, чем

проектирование сложных изделий с помощью дополнительных инструментов САПР. Поскольку требования и желания потребителей растут, мы наблюдаем, как инструменты САПР становятся все более доступными и популярными в профессиях, не связанных напрямую с проектированием, — у дизайнеров, скульпторов и даже обычных творческих людей.

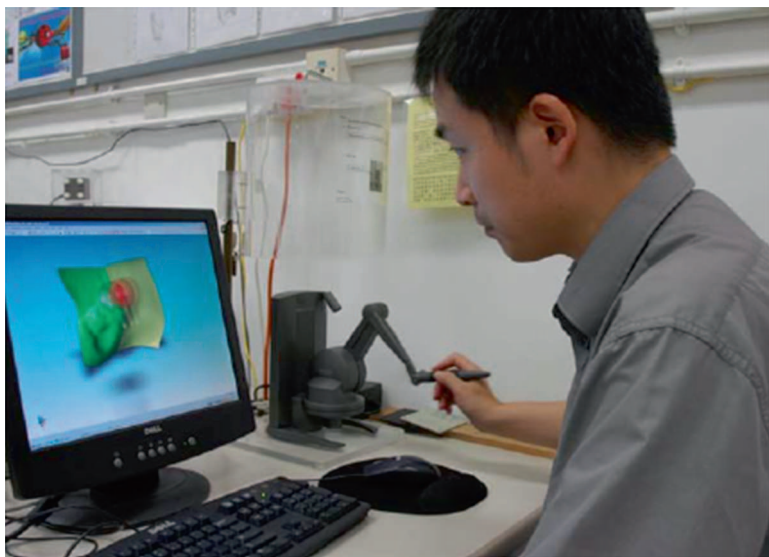


Рис. 1.5. Моделирование в системе Freeform

1.9. Об этой книге

Уже выпущено достаточно много книг, полностью посвященных аддитивному производству или содержащих разделы с его описанием. Пока, однако, не было ни одной книги, предназначенной для преподавания этой технологии в университетах на современном уровне. Недавно университеты включили аддитивное производство в различные программы. Объемы такого включения варьируются от разделов в отдельных модулях до полноценных курсов для аспирантов. Эта книга направлена на поддержку этих программ по всестороннему охвату как можно большего количества аспектов данной технологии. Авторы этой книги были вовлечены в создание программ в своих университетах и решили написать ее, поскольку прекрасно понимали, что на сегодняшний день нет учебника, который бы полностью представлял необходимый материал с соответствующей широтой и глубиной охвата. Кроме того, мы считаем, что с ростом интереса к трехмерной печати эта книга сможет также обеспечить всестороннее понимание связанных с ней технологий. Несмотря на рост популярности, уже

стало ясно, что полное понимание всей широты возможностей, предлагаемых АП, пока отсутствует.

В начале этой книги обсуждаются общие аспекты АП, а затем по главам следует подробное описание каждой технологии. Последняя глава посвящена общим процессам и приложениям. Предполагается, что читатель уже знаком с технологией 3D твердотельного моделирования САПР и обладает по крайней мере небольшим объемом знаний о проектировании, разработке и изготовлении изделий. Мы надеемся, что большинство читателей имеют базовые знания по проектированию и дизайну как в целом, так и отдельных продуктов, а также знания в механике, материаловедении или технологии машиностроения. Поскольку технология АП также включает в себя множество электронных компонентов и информационных технологий, читатели, имеющие багаж знаний в компьютерных приложениях и мехатронике, также найдут пользу в этой книге.

1.10. Упражнения

1. Найти три определения для быстрого прототипирования, отличающиеся от определения аддитивного производства, данного в этой книге.
2. Найти в Интернете различные примеры приложений АП, которые иллюстрируют использование принципов «форма», «пригодность к монтажу», «функционал».
3. Какие действия могут быть выполнены на облаке точек с использованием программного обеспечения для реверс-инжиниринга? Чем эти инструменты отличаются от обычного программного обеспечения 3D САПР?
4. Какой термин вам больше нравится для обозначения этой технологии (АП, быстрое прототипирование изделий произвольной формы, просто быстрое прототипирование и т.д.) и почему?
5. Создайте список веб-ссылок на видео, показывающие работу различных технологий АП и технологические цепочки процесса.
6. Составьте список различных характеристик технологий АП для сравнения с производством на станках с ЧПУ. В каких случаях АП имеет преимущество, а в каких лучше использовать станки с ЧПУ?
7. Как работает настольное механорецепторное устройство Phantom и почему оно принесет больше пользы в создании моделей произвольной формы, чем обычные 3D САПР?

Литература

1. ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. <http://www.astm.org/COM MITTEE/F42.htm>.
2. Burns M (1993) Automated fabrication: improving productivity in manufacturing. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
3. Wohlers TT (2009) Wohlers report 2009: rapid prototyping & tooling state of the industry. Annual worldwide progress report. Wohlers Associates, Detroit.
4. Jacobs PF (1995) Stereolithography and other RP and M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling. SME, New York.
5. 3D Systems. <http://www.3dsystems.com>.
6. Sachs EM, Cima MJ, Williams P, Brancazio D, Cornie J (1992) Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model. J Eng Ind 114(4): 481–488.
7. Geomagic Reverse Engineering software. <http://www.geomagic.com>.
8. CGI. Capture geometry inside. <http://www.cgiinspection.com>.
9. Grossman B. <http://www.bathsheba.com>.
10. Gao Z, Gibson I (2007) A 6 DOF haptic interface and its applications in CAD. Int J Comput Appl Technol 30(3):163–171.
11. Sensable. <http://www.sensable.com>

ГЛАВА 2

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

Следует помнить, что АП развивалось не в отрыве от других технологий. Например, невозможно представить существование АП без инноваций в таких технологиях, как 3D-графика и программное обеспечение для компьютерного моделирования и проектирования (Computer-Aided Design). В этой главе освещаются некоторые ключевые моменты, которые отмечают развитие технологии аддитивного производства. Мы расскажем, как пути развития различных технологий сошлись к тому состоянию, из которого они могут быть интегрированы в машины АП. В этой главе также обсуждаются основные вехи развития технологий АП и их вклад в расширение спектра приложений для АП. Кроме того, мы обсудим, как постепенно увеличивается функциональность аддитивного производства и растет количество приложений уже за рамками первоначального предназначения этой технологии — изготовления прототипов.

2.1. Введение

Своим происхождением технология аддитивного производства обязана множеству открытий и инноваций в разнообразных технологических областях. Как и в случае многих производственных технологий, повышение вычислительной мощности компьютеров и снижение затрат на запоминающие устройства позволили проводить обработку больших объемов данных, характерных для *систем автоматизированного проектирования (САПР)* трехмерных моделей, в разумные сроки. В настоящее время мы уже привыкли к окружающим нас мощным компьютерам и другим сложным автоматизированным машинам, поэтому иногда даже трудно себе представить, как первопроходцы АП боролись за разработку первых машин для этой технологии.

В этой главе мы хотим остановиться на некоторых ключевых моментах, знаменующих ход развития технологии аддитивного производства. Мы

расскажем о направлениях развития всех технологий, комбинация которых в соответствующий момент позволила им интегрироваться в машины АП. Здесь мы также обсудим основные этапы становления АП технологий. Кроме того, мы рассмотрим, как аддитивное производство стало набирать новый функционал и охватывать все более широкий спектр приложений, уже далеко выходящий за пределы первоначального предназначения — быстрого изготовления прототипов.

2.2. Компьютеры

Как и многие другие технологии, АП возникло в результате изобретения компьютера. Тем не менее было мало предпосылок того, что первые компьютеры, созданные в 1940-х годах (Zuse Z3 [1], ENIAC [2] и EDSAC [3]), будут способны изменить жизнь таким образом, чтобы создать все то, что мы наблюдаем сейчас. Такие изобретения, как термоэлектронный клапан, транзистор и микрочип, позволили компьютерам стать быстрее, меньше, дешевле и одновременно повысили их функциональность. Это развитие произошло так быстро, что его не мог предсказать даже Билл Гейтс в Microsoft, когда в 1981 году заявил, что 640 кб памяти будет достаточно для любого компьютера под управлением системы Windows. В 1989 году он признал свою ошибку во время выступления в Клубе информатики Университета Ватерлоо [4]. Аналогичным образом в 1977 году попал пальцем в небо Кен Олсен из Digital Electronics Corp. (DEC), когда во время своего выступления на заседании Всемирного футуристического общества сказал, что нет и не будет никаких оснований предполагать, что компьютеры появятся дома у простых людей [5]. Наверное, это яркое выступление стало причиной, по которой Олсен вскоре потерял работу.

Одним из ключевых моментов в развитии компьютеров является их способность выполнять задачи в режиме реального времени. В те первые дни подготовка, решение и завершение сложных вычислительных задач занимали много часов или даже дней. Это сильно затрудняло повседневное использование компьютера, и, только когда было продемонстрировано, что задачи могут быть завершены в режиме реального времени, компьютеры стали использоваться как предметы обихода, а не только в качестве инструментов для академических исследований и в большом бизнесе. Это относится также к способности отображать результаты не только численно, но и графически. За развитие компьютерной графики мы должны поблагодарить, в частности, и игровую индустрию, которая внедрила множество инноваций в разработку графических технологий в целях отображения более подробных и «реалистичных» изображений для улучшения восприятия от игры.

АП в полной мере прямо и косвенно (в рамках основной технологии) использует следующие важные функции компьютерной технологии.

- *Вычислительная мощность*: часть файлов с данными очень велики и требуют для обработки соответствующего уровня вычислительной мощности, это необходимо для манипуляций при настройке машины и получении данных о слое (поперечном сечении) перед изготовлением изделия. Первым компьютерам было бы очень затруднительно обрабатывать данные больших файлов САПР.
- *Возможности графики*: для работы машине АП не требуется мощный графический движок, за исключением случаев просмотра файлов при позиционировании будущего изделия в виртуальном пространстве машины. Тем не менее всем машинам нужен хороший графический интерфейс пользователя (GUI — graphical user interface), который облегчается настройку, эксплуатацию и обслуживание машины.
- *Управление машиной*: технология АП требует точного позиционирования оборудования таким же образом, как это происходит в обрабатывающем центре с числовым программным управлением (ЧПУ) (Computer Numerical Controlled (CNC)) или даже в ксероксе или лазерном принтере. Такому оборудованию необходимы контроллеры, которые принимают информацию от датчиков для определения состояния оборудования и материала, приводы для позиционирования и других функций вывода. Также нужно выполнять вычислительные задачи для того, чтобы определить требования к управлению. Выполнение этих задач управления даже в режиме реального времени обычно не требует большой по сегодняшним меркам вычислительной мощности. Для работы выделенных функций, таких как позиционирование моторов, линз и т.д., как правило, нужны отдельные контроллерные модули. Компьютер будет использоваться для наблюдения за связью с этими контроллерами и передачи данных, относящиеся к изготовлению изделия.
- *Сеть*: почти каждый компьютер в наши дни становится средством для связи с другими компьютерами по всему миру. Файлы для изготовления изделия, как правило, разрабатываются на другом компьютере, а не на том, что управляет машиной АП во время производства. В системах прошлого требовалась загрузка данных с диска или ленты. В настоящее время почти все файлы передаются по внутренней сети, а часто через Интернет.
- *Интеграция*: по многообразию функций компьютер является центральным компонентом, который связывает вместе различные процессы. Целью компьютера является коммуникация с другими частя-

ми системы, обработка данных и отправка этих данных из одной части системы в другую. На рис. 2.1 показано, как упомянутые выше процессы интегрированы в машины АП.



Рис. 2.1. Основные компоненты машины АП

Первым компьютерным средам проектирования требовалась большая ЭВМ и мини-компьютеры. К этим компьютерам подключали рабочие станции, которые обычно строили графики и выполняли функции ввода/вывода. Затем компьютеры начали производить сложные вычисления для манипулирования моделями. Это было дорогое решение, поскольку основные компоненты — процессор и память — были очень дорогими элементами. С уменьшением стоимости этих компонентов персональные компьютеры (ПК) стали широко распространенным инструментом. Первые ПК не были достаточно мощны, чтобы заменить компьютеры на базе рабочих станций, выполняющих сложные функции, но их ускоренное развитие позволило за короткое время разработать дешевые и мощные устройства, которыми можно было заменить самые дорогие компоненты с точки зрения вычислительной мощности.

Без компьютеров невозможно было бы получить отображения трехмерных изображений. Без 3D-графики не было бы САПР. Без этой функции

цифрового представления трехмерных объектов возможности машин АП были бы ограничены изготовлением изделий только простейших форм. Поэтому с уверенностью можно сказать, что без современных компьютеров мы бы не наблюдали развитие и становление аддитивного производства.

2.3. Технология компьютерного моделирования и проектирования

Сегодня каждый студент инженерного факультета должен научиться использовать компьютеры для решения многих задач, включая разработку новых конструкций. Среда САПР позволяет проектировать и большие здания, и микропроцессоры в наномасштабе. Технологии САПР поддерживают данные из разных областей науки и технологии, относящиеся к определенным типам изделий, в том числе их геометрические, электрические, тепловые, динамические, статические параметры и функции. САПР содержит правила, связанные с этими параметрами и функциями, что позволяет пользователю сосредоточиться на проектировании и функциональности будущего изделия, не заботясь о его работоспособности. САПР дает пользователю возможность сосредоточиться на отдельных особенностях большого или сложного изделия, сохраняя целостность данных и одновременно их упорядочивая, чтобы правильно интегрировать новые подсистемы с уже имеющимися.

Технология аддитивного производства в основном используется на конечном этапе машиностроительного производства и 3D твердотельного моделирования с помощью САПР. Важно понимать, что это только одно из направлений гораздо большего набора САПР и при этом не все САПР способны создавать проектную документацию для послойного АП. В настоящее время технология АП фокусируется на воспроизведении геометрической формы, и поэтому лучшими для использования в АП являются те САПР, которые производят такие формы наиболее точным и эффективным образом.

В начале САПР были крайне ограничены в возможностях для отображения информации на дисплеях. Первые системы отображения в редких случаях были способны в лучшем случае выводить на экран буквенно-цифровой текст. Некоторые первые компьютеры имели специальные устройства для вывода графической информации отдельно от текстовых команд, используемых для управления. Тем не менее геометрические формы отображались главным образом в векторной форме, выводя на экран каркас изделия. В силу большой потребности в вычислительной мощности, необходимой для отображения графики для таких систем, большинство дисплеев были монохромными, что сильно затрудняло демонстрацию трех-

мерных геометрических форм на экране без показа эффектов освещения и затенения.

Развитие САПР не было бы таким быстрым, если бы постоянно не выдвигались требования, связанные с ускоренным ростом потребности в системах автоматизированного производства (САМ — Computer-Aided Manufacture). САМ представляет собой канал для преобразования виртуальных моделей, разработанных в САПР, в физические изделия, которые мы используем в нашей повседневной жизни. Весьма сомнительно, что без требований, связанных именно с таким преобразованием виртуального в реальное, САПР получила бы такое быстрое и широкое развитие. Это, в свою очередь, подпитывалось и направлялось сопутствующими технологиями производства основных элементов компьютеров — процессоров, запоминающих устройств и дисплеев. САМ системы производят код для машин с числовым программным управлением (ЧПУ), по существу, объединяя координатные данные с командами по выбору и запуску режущих инструментов. Ранние технологии ЧПУ выбирали САМ данные, относящиеся к месту обработки основных поверхностей изделия — отверстий, пазов, полостей и т.д. Затем происходила механическая обработка этих поверхностей на заготовках деталей. Когда станки с ЧПУ доказали свою эффективность и автоматизированную функциональность, сложность функций увеличилась. В настоящее время возможности станков простираются на изготовление весьма сложных, произвольных поверхностей. Тем не менее существуют два основных ограничения для всех видов механической обработки на станках с ЧПУ:

- почти каждую деталь приходится обрабатывать в несколько этапов, из-за чего часто требуется несколько проходов для удаления материала и переустановок детали;
- вся обработка зависит от направления подвода режущего инструмента (благодаря чему этот вид производства определяют как 2,5D, а не полностью 3D). Для такого вида обработки необходима определенная ориентация обрабатываемой заготовки, которая не всегда возможна на каждой стадии процесса изготовления.

Обработка на станках с ЧПУ, следовательно, требует программного обеспечения только для *моделирования поверхностей*. Все ранние системы САМ были основаны на моделировании поверхностей с помощью САПР. Технология АП была первым автоматизированным производственным процессом, для которого действительно требуется 3D твердотельное моделирование с применением САПР. Моделирование полностью замкнутой поверхности необходимо для получения направляющих координат для АП. Для этого используются системы моделирования поверхности, но, поскольку поверхности описываются граничными кривыми, достаточно часто воз-

никают затруднения с точным и плавным их соединением. Даже если зазоры незаметны, полученные модели далеко не просто построить с помощью АП. В крайнем случае любые неточности в 3D-модели будут перенесены на изделие в процессе изготовления в АП. В первых приложениях АП часто возникали различные трудности с отображением из-за несовершенства программного обеспечения для моделирования поверхностей.

Поскольку для систем АП просто необходимы точные модели с полностью замкнутыми поверхностями, предпочтение отдается САПР для твердотельного моделирования, которые гарантируют представление объема у всех моделей и, следовательно, по определению все модели будут иметь полностью замкнутые поверхности. В то время как моделирование поверхностей может быть использовано для изготовления изделий, не всегда есть уверенность, что конечная модель будет точно представлена в виде изделия из твердого материала. Такие модели, как правило, необходимы для инструментов инженерного компьютерного моделирования (CAE — Computer-Aided Engineering), таких как метод конечных элементов (FEA — Finite Element Analysis), но также очень важны для других процессов САМ.

С большинством САПР теперь можно легко работать на ПК. Это, как правило, является результатом усовершенствований в области компьютерных технологий, упомянутых ранее, но также стало итогом улучшений в тех методах, которые используются для представления, манипуляции и хранения данных в САПР. Большинство САПР в наши дни используют неоднородный рациональный базисный сплайн (сплайн полиномиальными кривыми) (NURBS — Non-Uniform Rational Basis-Splines) [6]. NURBS предоставляет отличный способ точно определить кривые линии и поверхности, которые соответствуют внешней оболочке модели САПР. Поскольку определения модели могут включать в себя поверхности произвольной формы, а также простые геометрические формы, все они должны учитываться при построении модели, и поэтому представляющие ее сплайны получаются достаточно сложными, чтобы не увеличивать размер итоговых файлов и облегчить работу с ними. Сплайнами легко манипулировать для изменения получившейся формы.

Технология САПР быстро улучшается по следующим направлениям:

- *реализм*: благодаря эффектам освещения и затенения, трассировки лучей и другим фотореалистичным методам визуализации становится возможным генерировать изображения моделей в средах САПР, которые трудно отличить от реальных фотографий. В некоторых отношениях это снижает требования к визуализации моделей для АП;
- *пользовательский интерфейс*: для первых САПР требовался ввод текстовых инструкций в диалоговом окне. Разработка графических

интерфейсов для GUI на основе Windows позволила создать графический диалог и даже прямое манипулирование моделями в виртуальных трехмерных средах. Инструкции выдаются с помощью выпадающих меню и контекстно-связанных систем команд. Чтобы удовлетворить различные пользовательские предпочтения и стили, часто одну и ту же инструкцию можно выполнить по-разному. Клавиатуры по-прежнему необходимы для ввода конкретных размерностей, но удобство САПР значительно повысилось. Однако требуется еще пройти определенный путь, чтобы сделать САПР доступными для людей без инженерного образования и другой подготовки;

- *инженерные оценки*: поскольку САПР является неотъемлемой частью подготовки современного инженера, жизненно важно, чтобы программное обеспечение включало в себя максимальное количество информации для инженерных оценок. При твердотельном моделировании с применением САПР можно рассчитать объем и массу моделей, исследовать посадки и зазоры в соответствии с изменениями допусков, а также экспортировать файлы с данными сетки для метода конечных элементов. Использование этого метода возможно даже в среде САПР;
- *скорость*: как упоминалось ранее, использование NURBS способствует оптимизации работы с данными САПР. САПР постоянно оптимизируется различными способами, в основном за счет использования новых разработок аппаратного обеспечения компьютеров;
- *точность*: если проектирование предполагает высокие допуски для конструкции, на первый план выходит точность расчетов. Результатом сохранения высокой точности становятся высокие требования к времени обработки и объему запоминающих устройств;
- *сложность*: все вышеуказанные характеристики могут привести к созданию крайне сложных систем. Для поставщиков программного обеспечения достаточно затруднительно включить эти функции, одновременно сделав их удобными в использовании и не требующими для выполнения большой вычислительной мощности;
- *простота в эксплуатации*: последние разработки в технологии САПР были сосредоточены на создании системы, доступной широкому диапазону пользователей. Одна из целей — создать все возможности для неподготовленных пользователей проектировать сложные геометрические детали для себя. Сейчас есть современные САПР для 3D твердотельного моделирования, которые работают исключительно в веб-браузере, они обладают возможностями, аналогичными для рабочих станций десятилетней давности.

Многие производители программного обеспечения САПР сосредоточены на производстве высокоинтегрированной среды проектирования, кото-

рая позволяет разработчикам параллельно работать в команде над единым проектом на различных платформах и в разных подразделениях организации. Промышленные дизайнеры должны работать с проектными менеджерами по продажам и маркетингу, проектировщиками, аналитиками, инженерами-технологами и представителями многих других подразделений организации, чтобы внести свой вклад в разработку проекта конечного продукта. Такие подразделения могут находиться даже в разных регионах мира и в то же время быть частью одной той же организации или выступать в качестве субподрядчиков. Следовательно, Интернет интегрирует эти программные системы, предусмотрев соответствующие меры для быстрой и точной передачи и защиты интеллектуальной собственности.

Вполне возможно непосредственно манипулировать файлами САПР для генерации данных по слоям, которые затем будут введены в машину АП, и это обычно называют прямым слайсингом (*direct slicing*) (непосредственным разделением на слои) [7]. Тем не менее это означает, что каждая САПР должна иметь алгоритм прямого слайсинга, который будет совместим с разными типами технологии АП. Иначе каждый поставщик систем АП должен составить программу для каждой САПР. Оба этих подхода являются непрактичными. Решение заключается в использовании общего формата, который соответствует технологии. Этот общий формат был разработан компанией *3D Systems*, США, которая стала первой компанией, коммерциализировавшей технологию АП. Именно она назвала формат файла «STL» после разработки своей технологии *стереолитографии* (пример которой показан на рис. 2.2).



Рис. 2.2. Модель, выполненная в среде САПР (слева) и преобразованная в STL формат (справа)

Формат STL стал общим достоянием, чтобы все производители САПР получили к нему доступ и интегрировали в свои системы. Эта стратегия была успешной, и STL-файлы теперь являются стандартным выводом почти для всех систем твердотельного моделирования САПР, а также приняты производителями систем АП [8]. STL использует треугольники (метод триангуляции) для описания поверхностей, которые будут построе-

ны. Каждый треугольник описывается тремя точками и вектором нормали к поверхности, направленным наружу. Запись STL-файла выглядит следующим образом:

```
facet normal -4.470293E-02 7.003503E-01 -7.123981E-01
outer loop
vertex -2.812284E + 00 2.298693E + 01 0.000000E + 00
vertex -2.812284E + 00 2.296699E + 01 -1.960784E-02
vertex -3.124760E + 00 2.296699E + 01 0.000000E + 00
endloop
endfacet
```

В будущем требования к технологии САПР будут изменяться параллельно с развитием АП. По мере продвижения ко все более широкой функциональности в изготовлении изделий с использованием АП мы должны понимать, что САПР должна будет интегрировать в себя правила, связанные с АП. На сегодняшний день акцент был сделан на внешней геометрии. В будущем, возможно, нам потребуются знания правил функционирования систем АП, чтобы оптимизировать изготовление изделий на АП машинах.

2.4. Другие технологии, связанные с АП

Помимо компьютерной технологии, есть ряд других технологий, которые были разработаны вместе с АП и заслуживают упоминания в этой книге, так как они внесли свой вклад в дальнейшее совершенствование систем АП.

2.4.1. Лазеры

Многие из первых систем АП были основаны на *лазерной технологии*. Причины заключаются в высокой интенсивности и энергии коллимированного пучка лазерного излучения, который контролируемым образом может очень быстро перемещаться с использованием направленных зеркал. Поскольку при АП требуется отверждать или соединять каждый слой материала избирательным образом, лазеры являются идеальными кандидатами для использования при условии, что лазерная энергия совместима с механизмами трансформации материала. Есть два вида лазерной обработки, используемой в АП: отверждение и спекание (плавление). При использовании фотополимерных смол требуется лазерное излучение определенной частоты, которое вызывает отверждение или вулканизацию жидкой смолы. Обычно это лазер в ультрафиолетовом диапазоне, но также могут быть использованы другие частоты. Для спекания требование к ла-

зерному излучению заключается в переносе достаточного количества тепловой энергии для прохода через слой твердого материала и расплавления порошка или сплавления листов материала. Для порошковых процессов, например, ключевым моментом является контролируемое расплавление материала без избыточного нагревания, чтобы после прекращения подачи лазерного излучения расплавленный материал быстро затвердевал снова. В случае резки цель заключается в отделении одной части материала от другой, что производится в виде лазерной резки. В первых машинах АП использовались газоразрядные лазеры, чтобы обеспечить необходимую энергию, но многие производители в последнее время перешли на твердотельные лазеры, которые обладают большей эффективностью, сроком службы и надежностью.

2.4.2. Технологии печати

В последние годы быстро развивается струйная или капельная технология печати. Улучшения разрешения и снижение цен позволили высококачественной, часто многоцветной печати стать частью нашей повседневной жизни. Другими причинами такого высокого качества печати также можно считать совершенствование и надежность систем по подаче материала. Первоначально цветные чернила имели низкую вязкость и подавались в печатающие головки при температуре окружающей среды. Теперь можно генерировать гораздо более высокие давления внутри камеры формирования капель, поэтому появилась возможность использовать материалы с гораздо более высокой вязкостью и даже расплавленные материалы. Это означает, что теперь для печати может использоваться метод осаждения капель, который позволяет применять фотоотверждаемые и расплавленные смолы как связующие для порошковых систем. Поскольку печатающие головки являются относительно компактными устройствами, в которых компактно сосредоточено устройства по управлению осаждением капель (как показано на рис. 2.3), стало возможным производство недорогих машин АП с высокими разрешением и производительностью. Как и в случае с лазерами, применяемыми для массового производства, в АП внедряют полномасштабные технологии современной печати.

2.4.3. Программируемые логические контроллеры

Данные о моделях, разработанных с помощью САПР, вводятся в машины АП в виде больших файлов данных, генерируемых с помощью стандартных компьютерных технологий. После загрузки в машину АП эти файлы выстраиваются в последовательности в соответствии с этапами процесса. Для запуска каждого из них требуются входные сигналы от датчиков и приводов. Для обеспечения этого процесса и управления машиной часто

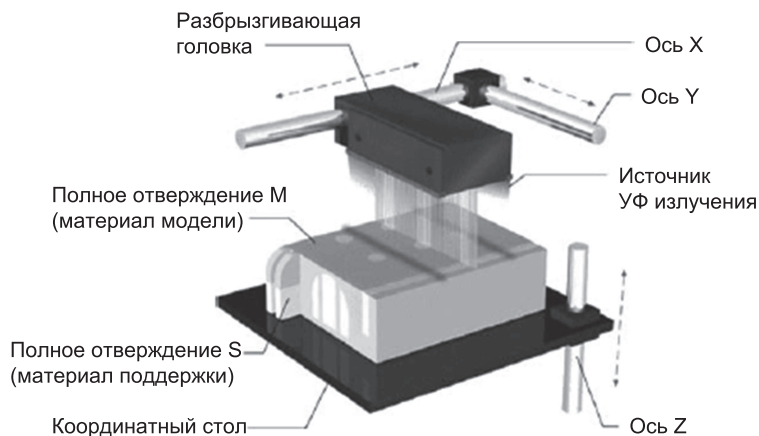


Рис. 2.3. Технология печати с использованием машин AP (фото предоставлено компанией Stratasys)

лучше всего использовать системы микроконтроллеров, а не микропроцессорные системы. Промышленные системы микроконтроллеров формируют основу *программируемых логических контроллеров* (ПЛК, Programmable Logic Controllers (PLCs)), которые обеспечивают надежный контроль производственных процессов. Проектирование и изготовление такого промышленного оборудования, как машины AP, значительно упрощается благодаря сборке из базовых элементов, которая производится на основе платформ современных ПЛК для координации и контроля за различными действиями в ходе процесса изготовления.

2.4.4. Материалы

Ранее технологии AP развивались исходя из материалов, которые уже были доступны и которые еще разрабатывались, чтобы соответствовать новым процессам. Тем не менее процессы AP в значительной степени являются уникальными и используемые для них исходные материалы далеко не идеально подходили для этих новых приложений. Например, модели из первых фотоотверждаемых смол были хрупкими и легко деформировались. Порошки, используемые в процессах послойного синтеза на основе лазерного спекания, быстро деградировали¹ в машине, поэтому изделия из большей части используемых материалов получались непрочными. По мере роста знаний и совершенствования навыков в технологии шла разработка и новых материалов, специально соответствующих процессам AP. Материалы подбирались и проектировались в точном соответствии с рабочими параметрами различных процессов, поэтому росло качество изготовленных изделий. В результате изделия получались более точной формы,

¹Речь идет о полимерах и смолах, а они именно деградируют.

имели большую прочность, долговечность, появилась возможность использовать даже металлы для технологий АП. В свою очередь, установка на создание новых материалов в точном соответствии с производственными процессами позволила создавать материалы для высокотемпературной обработки, уменьшить размер изделий и их деталей и повысить производительность самих машин.

2.4.5. Обработка с использованием ЧПУ

Одна из причин появления технологии АП заключалась в том, что станки с числовым программным управлением (ЧПУ) не в состоянии обрабатывать детали с нужным качеством в требуемых временных рамках. Станки с ЧПУ работали медленно, были громоздкими и тяжело управляемыми. Технологию АП довольно легко настроить на быстрое производство, однако она страдала от низкой точности изготовления и ограниченных возможностей имеющихся материалов. По мере усовершенствования технологий АП производители оборудования с ЧПУ поняли, что у них появился достойный конкурент. Станки с ЧПУ значительно усовершенствовались к моменту уверенного становления технологий АП. Вполне возможно, развитие высокоскоростной обработки на станках с ЧПУ пошло бы по другому пути, если бы, как утверждают некоторые специалисты, предполагаемая угроза конкуренции с технологиями АП не заставила производителей оборудования с ЧПУ переосмыслить их конструкцию. Развитие гибридных технологий прототипирования, таких как Space Puzzle Molding (формование объемными пазлами), которые применяют как высокоскоростную машинную обработку, так и аддитивные методы для изготовления больших, сложных и прочных литейных форм и элементов (рис. 2.4 [9]), демонстрируют взаимозаменяемость двух технологий для использования преимуществ обеих. Для деталей с правильной геометрической формой, которая позволяет обработку при одном позиционировании, станки с ЧПУ — часто самый быстрый и эффективный метод с точки зрения затрат. Для деталей со сложной геометрией или деталей, в ходе обработки которых большая часть общего объема обрабатываемого материала уходит в стружку, АП предоставляется более быстрым и экономичным способом, чем обработка на станках с ЧПУ.

2.5. Использование слоев

Ключевым принципом изготовления изделий в АП является использование слоев как конечных двухмерных сечений трехмерной модели. Почти в каждой технологии АП происходит наращивание изделия путем добавления новых слоев материала, поэтому все коммерческие системы работают

именно таким образом, в первую очередь из-за упрощения изготовления трехмерных объектов. Использование для представления сложного трехмерного объекта двухмерных сечений было широко распространено во многих приложениях, помимо АП. Наиболее очевидным примером является составление географических карт с использованием изолиний, соединяющих точки на постоянной высоте над уровнем моря, чтобы представлять холмы и другие географические рельефы. Эти контурные линии можно представить в виде пластин, которые при наложении друг на друга формируют представление о ландшафте географических регионов. Точные разрывы между этими двухмерными сечениями представить достаточно затруднительно, поэтому их аппроксимируют или интерполируют в виде непрерывных кривых, соединяющих эти слои. Такие методы также могут быть использованы для трехмерного представления других физических свойств, например в виде изобар или изотерм на картах погоды.

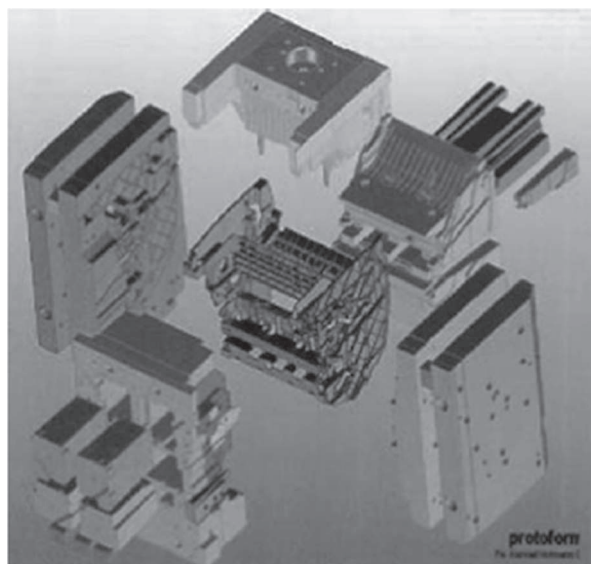


Рис. 2.4. Технология формования объемными пазлами (Space Puzzle Molding), в которой формы собираются из сегментов, что ускоряет и облегчает формовку и сборку (фото предоставлено компанией Protoform, Германия)

Архитекторы также использовали такие методы, чтобы представлять ландшафты реальных или проектируемых районов, например, как это использовала архитектурная фирма в своем проекте, показанном на рис. 2.5 [10]. Концепция особенно логична для строителей зданий, которые также применяют аддитивный подход, хотя и не используют слои. Посмотрите, как были построены пирамиды в Египте и в Южной Америке. Вне зависимости от метода изготовления строительных блоков, ясно, что для их