

**Шишковский И. В.**

**ОСНОВЫ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

**Самара – 2011-2015**

**ББК**

**УДК 621.373.826.004.14:[621.9.06-52:658.527.011.56]**

**Шишковский И. В.**

Основы аддитивных технологий высокого разрешения. – СПб. Изд-во Питер, 2015. 348 с.: ISBN 978-5-496-02049-7

В книге представлено систематическое изложение физических основ аддитивных технологий и быстрого прототипирования функциональных изделий высокого разрешения по данным их компьютерного проектирования. Особое внимание уделено методикам послойного синтеза и формирования объемных изделий концентрированными потоками энергии (лазерными, электронными, ионными пучками). Рассмотрены примеры применений функциональных прототипов в авиакосмической промышленности, автомобилестроении, строительстве, дизайне и ювелирной промышленности. Отдельно представлен анализ перспективных биомедицинских приложений, обсуждаются подходы по проектированию и созданию МЕМС.

Для ученых и специалистов в области материаловедения и передовых лазерных технологий машино- и приборостроения, студентов материаловедческих и машиностроительных специальностей.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие</b>	<b>6</b>
<b>РАЗДЕЛ I. ВВЕДЕНИЕ В АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</b>	<b>8</b>
<b>Глава 1 Основы быстрого прототипирования (БП)</b>	<b>8</b>
1.1 Общие термины БП	8
1.2 Преимущества и проблемы БП	10
1.3 Классификация методов, систем и установок БП	13
1.4 Основы автоматизации процесса БП	16
1.5 Обобщенная схема операций при БП	21
1.5.1 Трехмерное моделирование средствами САПР	23
1.5.2 Конвертация данных и их передача	23
1.5.3 Проверка и подготовка установки к выполнению	24
1.5.4 Послойное построение изделия	24
1.5.5 Удаление поддержек и другие пост процессы	24
1.6 Специфика работы на разных машинах БП	26
1.7 Пути повышения точности воспроизведения моделей и качества поверхности	28
1.8 Тесты производительности и контроля	29
1.9 Сравнительная оценка машин прототипирования по размерам рабочей камеры, точности и времени воспроизведения.	29
1.10 Дорожная карта развития аддитивных технологий	33
<b>Глава 2 Системы автоматического проектирования (САПР) и форматы представления данных для БП</b>	<b>35</b>
2.1 CAD/CAM/CAE для систем БП	35
2.2 STL формат данных для БП	38
2.3 Проблемы STL формата	50
2.4 Дизайн в БП (ориентация изделия, создание и удаление поддержек, вырезы в изделии, удаление включений и другие производственные ограничения, условия блокировки, уменьшение расчетов по дизайну изделия и его сборке)	52
2.5 Расщепление и объединение, стиль и шаг решетки при послойном синтезе	55
2.6 Методики сканирования и последовательность построения годных и негодных ячеистых (мозаичных) моделей	55
2.6.1 Методика WEAVE	55
2.6.2 Методика STAR-WEAVE	56
2.6.3 Методика Quick-Cast	57
2.7 Восстановление поврежденных STL файлов	58
2.8 Новые форматы данных для БП	59
2.9 Другие трансляторы и программы просмотрщики	61
2.10 Точность и ошибки воспроизведения 3D изделий средствами САПР, оценка качества и вопросы стандартизации	72
<b>РАЗДЕЛ II. ОСНОВЫ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</b>	<b>75</b>
<b>Глава 3 Методы БП с участием жидкой фазы</b>	<b>75</b>
3.1 Фотополимеризационные материалы:	75
3.1.1 Твердеющие под УФ фотополимеры	79
3.1.2 Обзор химии фотополимеров	79
3.1.3 Виды резины, механизмы и скорости реакций полимеризации	80
3.2 Физические основы лазерной стереолитографии:	82
3.2.1 Облучение и экспозиция	83
3.2.2 Процесс затвердения и сопутствующие деформации	84

3.2.3 Методы сканирования при лазерной стереолитографии	84
3.3 Аппаратура для лазерной стереолитографии	86
3.3.1 Типоряд установок 3D Systems (SLA)	86
3.3.2 Cubital's Solid Ground System (SGC)	89
3.3.3 D-MEC's Solid Creation System (SCS)	91
3.3.4 CМЕТ's Solid Object Ultraviolet Laser Printer (SOUP)	94
3.3.5 Teijin Seiki's Soliform System	95
3.3.6 Meiko's Rapid Prototyping System для ювелирной промышленности	96
3.4 Другие системы БП подобного рода SLP, LMS, PolyJet	98
3.5 Двухлучевые системы БП	99
3.6 БП методом заморозки	100
3.7 Лазерная микро стереолитография: процедура, параметры, материалы.	101
3.8 Проекционные масочные фотополимеризационные технологии (МПФТ)	104
3.8.1 Проекция на маску при стереолитографии	104
3.8.2 Коммерческие МПФТ системы – MicroTEC	104
3.9 Двухфотонная стереолитография и субмикронные изделия высокой точности	105
<b>Глава 4 Твердофазные методы БП</b>	<b>110</b>
4.1 Материалы и процессы листового ламинирования	110
4.2 Процессы склеивания и адгезивного связывания листовых материалов	110
4.2.1 Термическое связывание	111
4.2.2 Процессы основанные на фиксации листового металла	112
4.3 Ультразвуковая (УЗК) консолидация ламината	112
4.3.1 Основы процесса УЗК их оптимизация	112
4.3.2 Микроструктуры и механические свойства УЗК связанных изделий	112
4.4 Установки для послойного ламинирования объемных изделий	113
4.4.1 Методика построения изделий из листового материала -Laminated Object Manufacturing LOM (Cubic)	115
4.4.2 Kira (PLT) Paper lamination Technology - Технология бумажной ламинации	117
4.5 Физические основы процессов экструзии	119
4.5.1 Размягчение и нагрузка на материал	119
4.5.2 Экструзия и плавление	119
4.5.3 Затвердевание	120
4.5.4 Дополнительные операции (генерация поддержек, контроль позиционирования)	120
4.5.5 Биоэкструзия и гелеобразование	122
4.5.6 Материалы для экструзии (полимеры, керамика, цветные решения)	122
4.6 Типоряд установок для послойной заливки экструдированным расплавом - Fused deposition modeling (FDM, Stratosys)	125
4.7 3D system (MJM) Multi-Jet Modeling System	128
4.8 Solidscape's Model Maker and Pattern Master / Sanders Prototype , Inc./	129
4.9 Процессы Beijing Yinhua's Slicing Solid Manufacturing (SSM), Velted Extrusion Modeling (MEM) и Multi-Functional RPM Systems (M-PRM)	130
4.10 Послойное создание литейной формы - Shape Deposition Manufacturing (SDM) process	131
4.11 Движение RepRap и народный 3D принтер	132
<b>Глава 5 Методы БП на порошковой основе</b>	<b>133</b>
5.1 Физические основы селективного лазерного спекания (СЛС)	133
5.2 Классификация порошков	134
5.2.1 Полимерные порошки	135
5.2.2 Металлические порошки	137
5.2.3 Керамические порошки	138
5.3 Реология и макрокинетика спекания	140

5.3.1 Твердофазное спекание	142
5.3.2 Жидкофазное спекание	143
5.3.3 Химически индуцированное (реакционное) спекание	143
5.3.4 Полный переплав порошка	145
5.4 Работа и уход за порошками	1473
5.4.1 Способы доставки и укладки порошка	147
5.4.2 Типы порошковых дозаторов	149
5.4.3 Системы обработки порошка	151
5.4.4 Системы восстановления порошков	151
5.5 Поглощение и рассеивание концентрированных потоков энергии (КПЭ) в порошковых средах	152
5.6 Варианты порошковых методик БП	156
5.6.1 Лазерные системы, работающие с легкоплавкими порошками	156
5.6.2 Лазерные системы, работающие с металлическими и керамическим порошками	157
5.6.3 Электроннолучевое плавление порошка	157
5.6.4 УЗК порошков	157
5.7 Технологические параметры процесса	158
5.8 Типоряд установок для СЛС/П, использующих подход «Bed Deposition»	159
5.8.1 DTM - 3D System's машины для СЛС/П	159
5.8.2 Установки EOS GmbH	160
5.8.3 Электроннолучевое плавление - Acram's Electron Beam Melting (EBM)	161
5.8.4 Процессы Laser cusing (Concept Laser GmbH)	162
5.8.5 Установки Phenix Systems, SLM Solution, Renishaw	163
5.9 Типоряд установок для «Direct Deposition»	164
5.9.1 Процесс лазерного формования - Optomec's Laser Engineering Net Shaping (LENS)	165
5.9.2 Направленное нанесение металла POM's Direct Metal Deposition (DMD)	167
5.9.3 Процессы Lasform Technology (Aeromet Co.), 3D Laser Cladding (Liverpool University, UK), 3D Laser Welding (Southern Methodist University, USA)	167
5.9.4 Процесс EasyCLAD - Construction Laser Additive Directe (Франция)	168
5.9.5 Процесс EBDM – Electron beam Direct Manufacturing фирмы Sciaky (США)	169
5.10 Другие установки, работающие на основе порошковых материалов	171
5.10.1 Процесс Fraunhofer's Multiphase Jet Solidification (MJS)	171
5.10.2 Процесс Soligen's Direct Shell Production Casting (DSPC)	171
5.10.3 Therics Inc.'s Theriform процесс	172
5.11 Эволюция от настольного 2D принтера к аддитивным 3D технологиям.	173
5.12 Физические основы трехмерной печати.	173
5.13 Материалы для трехмерной печати	174
5.13.1 Полимеры	174
5.13.2 Керамика	175
5.13.3 Металлы	175
5.13.4 Создание цветовых оттенков изделия	176
5.14 Параметры технологического процесса трехмерной печати	176
5.14.1 Техника образования капель	176
5.14.2 Непрерывный режим и режим капания по требованию	177
5.14.3 Другие способы образования капель	177
5.14.4 Осаждение горячего расплава	177
5.15 Типоряд установок для трехмерной печати	177
5.15.1 Z Corporation	182

<b>РАЗДЕЛ III. ГИБРИДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БП</b>	<b>185</b>
<b>Глава 6 Субтрактивные технологии БП</b>	<b>185</b>
6.1 Особенности 3D микромеханической обработки с использованием лазеров	185
6.2 Лазерные технологии в микро машиностроении	187
6.2.1 Лазерная резка, сварка и прошивка отверстий	187
6.2.2 Лазерное микро формование и литье	189
6.2.3. Лазерное микро фрезерование, рихтовка, шлифовка	190
6.2.4 Инициированное лазером физическое и химическое травление/осаждение (LPVD/LCVD). Лазерное ударное воздействие	193
6.2.5 Лазерное скрайбирование, маркировка и гравировка	196
6.2.6 Лазерное структурирование и интерференционная металлургия	197
<b>Глава 7 Быстрая инструментовка - 203</b>	
7.1 Принципиальные пути металлической инструментовки	203
7.2 Металлическая инструментовка основанная на пластических моделях БП	204
-Точное литье мастер форм БП	204
-Литье из стереолитографических моделей	205
- Прямое использование стереолитографии	206
-Косвенное использование стереолитографии	207
7.3 Металлическая инструментовка, основанная на металлических моделях БП	207
- Многокомпонентный металлический порошок (лазерное спекания)	207
- Однокомпонентный металлический порошок (лазерное спекание)	209
- <i>μMIM</i> - микро инжекционное формование металла	212
<b>Глава 8 Обратный инжиниринг</b>	<b>214</b>
8.1 Основы обратного проектирования и конструирования	214
8.2 САПР для обратного инжиниринга	219
8.3 Примеры систем для реконструирования	222
8.4 Точность реконструирования	224
<b>РАЗДЕЛ IV. ПРИЛОЖЕНИЯ МЕТОДОВ АП</b>	<b>227</b>
<b>Глава 9 АП в индустрии, архитектуре, искусстве</b>	<b>227</b>
9.1 Выбор материала для приложения и метода АП	218
9.2 Конструирование и дизайн	218
9.3 Построение моделей в архитектуре	228
9.4 Примеры применений в машиностроении, анализ и планирование	231
9.5 Производство оснастки в промышленности	231
9.6 Аэрокосмические приложения	232
9.6.1 Моделирование и создание беспилотных летательных аппаратов.	234
9.7 Автомобильная индустрия	238
9.8 Товары народного потребления	239
9.9 Модельное дело в искусстве и дизайне	240
9.10 Компьютерное моделирование и АП в искусстве.	241
9.11 Археологические решения методами АП	241
9.12 Компьютерное моделирование и АП в криминалистике	243
9.13 Ювелирные приложения АП	243
<b>Глава 10. Биопрототипирование и медицинские приложения</b>	<b>245</b>
10.1 Трехмерное медицинское сканирование	245
-Компьютерная томография и ее приложения	246
-Магниторезонансная томография и ее приложения	249
-Ультразвуковое сканирование	250
10.2 Софт для обработки медицинских данных	250

- DICOM формат представления медицинских данных	250
- Основные возможности программ Mimic®	251
- Виртуальное трехмерное планирование с SimPlant®	252
- Точность подготовки импланта с SurgiGuide®	255
- Проверка анатомической ориентации	259
- Контроль и морфология объема импланта и интенсивности изображения	260
10.3 Виртуальная костная хирургия и компьютерная краниопластика	261
10.3.1 Анатомически точные модели	261
10.3.2 Сосудистое биомоделирование	261
10.4 Компьютерное моделирование, конечно-элементный анализ, дизайн имплантов и тканево-инженерных конструкций	263
10.5 Лазерная и электроннолучевая технология прямого синтеза титановых ортопедических имплантов	268
10.6 Лазерная печать клеток	270
10.7 СЛС биополимеров и керамополимерных матриц	280
10.8 Биопринтинг – мечты и реальности	287
<b>Глава 11. Примеры приложений методик АП для создания Микро- (Нано-) Электро-Механических систем (МЭМС/НЭМС)</b>	<b>293</b>
11.1 АП и создание пористых инженерных конструкций с контролируемой архитектурой костных тканей	296
11.2 Проектирование, создание и физические свойства тканево-инженерных конструкций из биодеградируемых синтетических полимеров	302
11.3 СЛС интеллектуальных пористых систем дозированной доставки лекарств	305
11.4 СЛС фильтрующих элементов с контролируемой пористостью и оценка их протоковых характеристик	310
11.5 СЛС метал - полимерных композиций с функциональными нановключениями для MEMS приложений.	318
<b>ЛИТЕРАТУРА</b>	<b>327</b>
<b>Приложение А – Список производителей установок для АТ и материалов для систем АП</b>	<b>332</b>
<b>Приложение Б - Список сервисных бюро и исследовательских центров по АП в России</b>	<b>335</b>
<b>Приложение В – Список программы для АП</b>	<b>337</b>
<b>Приложение Г – Список аббревиатур (Англо-русский глоссарий терминов в области АП)</b>	<b>343</b>

## Предисловие

Последние три десятилетия увеличение производительности за счет компьютерной автоматизации производства нашло свое отражение в становлении и развитии технологий Быстрого Прототипирования (Rapid Prototyping), еще известных как «Твердотельное производство» (Solid Freeform Fabrication), «Настольное производство» (Desktop Manufacturing) или «Послойные Аддитивные Технологии – (АТ)» (Layer Additive Manufacturing Technologies). Последнее определение - послойное аддитивного производство (АП) – наиболее полно отражает смысл процесса БП. Модели создаются путем наслаивания вещества, и при малой толщине слоя модель очень близка к своему прототипу. Обычно толщина слоев в АТ ~ 0.1 мм, и этого оказывается достаточно для широкого практического применения прототипов: в электронике, моделировании и производстве продуктов потребления, ювелирной промышленности, автомобиле- и авиа-строении и т.д. Однако развитие микро и nano технологий настоятельно требует еще более высокой точности прототипов.

Уже сейчас АП стало мощным инструментом в машиностроении и практически отдельной отраслью промышленности. Разрабатываются инновационные процессы, позволяющие создавать модели со все более высокой точностью, скоростью, с уникальными свойствами и с новыми экономическими преимуществами. Другими словами, АП - это совокупность методик (технологий), позволяющих создавать трехмерные изделия в едином технологическом процессе по данным компьютерных моделей.

Настоящая книга посвящена систематическому изложению принципов и описанию физических явлений в процессе АП, а также их потенциальным применениям. Обсуждаются связи между перспективными материалами и процессами производства из них наукоемких изделий, что связывает воедино материаловедческие и технологические аспекты. Методы АП с использованием концентрированных (ионных, электронных и, особенно, лазерных) потоков энергии являются основополагающими при создании интеллектуальных изделий в микро и nano электронике, биоинженерных приложениях.

Уникальность лазерного излучения заключается в широких возможностях по автоматизации и высокой точности позиционирования при применении его в гибком перенастраиваемом производстве. Поэтому появляются новые гибридные направления использования лазеров, например лазерная микромеханическая обработка (микрофрезерование), инициированная лазерным излучением микрохимическая обработка, травление и т.д. В книге дается краткий, но всесторонний обзор принципов использования лазера в формовании и удалении материалов.

Содержание книги разделено на четыре части и 11 глав. Часть I посвящена основным терминам БП, приведена классификация методов АП и представлено описание обобщенного процесса АП изделия. Глава 2 описывает известные системы автоматического проектирования и форматы представления данных, дает детальный анализ известных и представление о новых форматах. Такие форматы как IGES и SLC сравниваются с известным STL, показаны ограничения и их решения, что делает главу познавательной и для специалистов по АТ.

Вторая часть книги посвящена собственно описанию основных методов АП (главы 3-5). Описаны детально основы каждой технологии в терминах базового процесса, будь то затвердевание фотополимера, ламинирование, экструзия, спекание и плавление порошков и т.д., так что читатель сможет понять, как данная технология развивалась, и увидеть пути ее оптимизации. Многие из технологий коммерциализованы уже не одной фирмой и описание работающих установок также представлено, чтобы читатель смог выбрать лучшую для своих нужд. Особое внимание уделено лазерным методикам АП, поскольку именно они позволяют существенно повысить точность воспроизведения, а также создавать функциональные изделия. Такое изложение позволит читателю лучше представить преимущества использования лазеров в различных процессах, описание которых дано в следующих частях книги, и интуитивно судить о путях развития новых применений лазеров.



Часть III о гибридных (субтрактивных) технологиях БП начинается с краткого обзора производственных процессов микрообработки в машиностроении и путей встраиваемости лазеров в конфигурацию производства. Описаны лазерные процессы трехмерного микроосаждения, микроформования и микроудаления (гравировки, сверления, резки и фрезерования) материалов. Так как все процессы имеют бесконтактную (немеханическую) природу, вводится также разделение на термические и атермические процессы лазерной обработки. Далее часть III посвящена введению в более узкую область БП, а именно, «быструю инструментовку» (Rapid Tooling) и «обратный инжиниринг» (Reverse Engineering), пока еще широко не известную российскому читателю. Быстрое изготовление оснастки, мастер - форм для литья, реинжиниринг - это ключевые факторы ускорения современного производства. В совокупности с используемыми методиками БП, дано сравнение преимуществ и недостатков этих подходов, программного обеспечения, используемых материалов и параметров технологических установок.

Главы заключительной части книги посвящены применению АП в различных областях начиная с процесса конструирования (дизайна); на примерах обсуждаются все стадии создания изделия. Поскольку многие свойства изделия зависят от выбора метода АП, особенностей работы конкретного САПР, материала для будущего изделия и оптимальных режимов работы конкретной установки, все эти особенности также обсуждаются.

Производители установок АП постоянно работают над их улучшением, анонсируют новые материалы и режимы их использования, это открывает возможности для новых приложений АТ, считавшихся ранее невозможными или неэкономичными. Обсуждаются возможности массового производства изделий и в специфических областях, таких как авиация и медицина. Ярким примером безальтернативного использования компьютерных методов моделирования (CAD/CAE) и АТ является моделирование и создание беспилотных аппаратов как воздушного, безвоздушного (т.е. космического), так и подводного базирования. С другой стороны известно, что медицинские приложения АТ рассчитаны на строго индивидуальные требования пациентов, и поэтому также крайне востребованы. Книга заканчивается главой, описывающей создание методами АП микро- (нано-) электро- механических систем (МЕМС). На такие системы наблюдается гигантский спрос в последние годы, так как они легко автоматизируются и встраиваются в технологические цепочки.

Автор надеется, что данная книга послужит побуждающим мотивом для многих читателей в поиске новых применений БП. Исследователи в области АП также смогут найти в ней много полезного, определить место своих исследований среди других и выявить направления будущих работ. Автор понимает, что книга в такой быстро изменяющейся области технологий не может с течением времени не устареть, поэтому в книге представлены Приложения с Интернет ссылками на производителей систем АП, материалов и программного обеспечения, указаны адреса сервисных бюро и исследовательских центров, ведущих работу в данной области. Автор книги является признанным экспертом в области АТ уже многие годы. Книга содержит результаты, в том числе его работ, в создании которых принимали участие также его студенты и коллеги по исследованиям и совместным проектам, за что он им благодарен.

Таким образом, тематика данной книги охватывает широкий круг дисциплин и не ограничивается только материаловедением, машино- и приборостроением, лазерной физикой и т.п. Такой междисциплинарный характер не только отражает современные тенденции развития новых технологий, но и отвечает требованиям по развитию новых образовательных и академических программ. Обсуждение в данной книге макро-, микро- и нано- уровней процессов и технологий, а также способов их компьютерного моделирования отвечает требованиям развития нового технологического уклада, что позволяет надеяться на востребованность книги не только у академической, но и у инженерной общественности, а также у студентов старших курсов соответствующих специальностей.