И. В. Шишковский

ОСНОВЫ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

высокого разрешения

И. В. Шишковский

ОСНОВЫ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

высокого разрешения

ПИТЕР®

Москва · Санкт-Петербург · Нижний Новгород · Воронеж
Киев · Екатеринбург · Самара · Минск

2016

ББК 3 932.23-018.2 + 32.86
УДК 004.94:621.373.8
Ш65

Шишковский И. В.

Ш65 Основы аддитивных технологий высокого разрешения. — СПб.: Питер, 2016. — 400 с.: ил.

ISBN 978-5-496-02049-7

В книге представлено систематическое изложение физических основ аддитивных технологий 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 ювелирном производстве. 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.

12+ (В соответствии с Федеральным законом от 29 декабря 2010 г. № 436-ФЗ.)

ББК 3 932.23-018.2 + 32.86
УДК 004.94:621.373.8

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-496-02049-7

© ООО Издательство «Питер», 2016

Оглавление

Предисловие **6**

ЧАСТЬ I. ВВЕДЕНИЕ В АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 9

Глава 1. Основы быстрого прототипирования **10**

1.1. Общие термины 10
1.2. Преимущества и проблемы БП 12
1.3. Классификация методов, систем и установок БП 16
1.4. Основы автоматизации процесса БП 18
1.5. Обобщенная схема операций при БП 24
1.6. Специфика работы на разных машинах БП 29
1.7. Повышение точности воспроизведения моделей и улучшение качества поверхности 30
1.8. Тесты производительности и контроля 32
1.9. Сравнительная оценка машин и технологий АП 33
1.10. Дорожная карта развития аддитивных технологий 37

Глава 2. САПР и форматы представления данных для БП **39**

2.1. CAD/CAM/CAE для систем БП 39
2.2. STL-формат данных для БП 43
2.3. Проблемы STL-формата 54
2.4. Дизайн в БП (ориентация, поддержки, вырезы и включения) 56
2.5. Расщепление и объединение, стиль и шаг решетки при послойном синтезе 59
2.6. Методики сканирования и последовательность построения годных и негодных ячеистых (мозаичных) моделей 59
2.7. Восстановление поврежденных STL-файлов 63
2.8. Новые форматы данных для БП 64
2.9. Другие трансляторы и программы-просмотрщики 65
2.10. Точность и ошибки воспроизведения 3D-изделий средствами САПР, оценка качества и вопросы стандартизации 76

ЧАСТЬ II. ОСНОВЫ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 79

Глава 3. Методы БП с участием жидкой фазы **80**

3.1. Фотополимеризационные материалы 81
3.2. Физические основы лазерной стереолитографии 89
3.3. Аппаратура для лазерной стереолитографии 94
3.4. Другие системы БП подобного рода — SLP, LMS, PolyJet 106
3.5. Двулучевые системы БП 108
3.6. БП методом заморозки 109
3.7. Лазерная микростереолитография: процедура, параметры, материалы 109
3.8. Проекционные масочные фотополимеризационные технологии 112
3.9. Двухфотонная стереолитография и субмикронные изделия высокой точности .. 114

Глава 4. Твердофазные методы БП 118

4.1. Материалы и процессы листового ламинирования 118
4.2. Склеивание и адгезивное связывание листовых материалов 118
4.3. Ультразвуковая консолидация ламината 120
4.4. Установки для послойного ламинирования объемных изделий 122
4.5. Физические основы процессов экструзии 128
4.6. Типоряд установок для послойной заливки экструдируемым расплавом 136
4.7. 3D system — (MJM) Multi-Jet Modeling-метод 139
4.8. Solidscape's Model Maker и Pattern Master/Sanders Prototype, Inc 141
4.9. Beijing Yinhua's Slicing Solid Manufacturing (SSM), Velted Extrusion Modeling (MEM) и Multi-Functional RPM Systems (M-PRM) 142
4.10. Послойное создание литьевой формы 143
4.11. Движение RepRap и народный 3D-принтер 144

Глава 5. Методы БП на порошковой основе 146

5.1. Физические основы селективного лазерного спекания 146
5.2. Классификация порошков 148
5.3. Реология и макрокинетика спекания 154
5.4. Работа и уход за порошками 163
5.5. Поглощение и рассеивание концентрированных потоков энергии в порошковых средах 169
5.6. Варианты порошковых методик БП 173
5.7. Технологические параметры процесса 176
5.8. Типоряд установок для СЛС/П, использующих подход Bed Deposition 177
5.9. Типоряд установок для Direct Deposition 182
5.10. Другие установки, работающие на основе порошковых материалов 190
5.11. Эволюция от настольного 2D-принтера к аддитивным 3D-технологиям 192
5.12. Физические основы трехмерной печати 193
5.13. Материалы для трехмерной печати 194
5.14. Параметры технологического процесса трехмерной печати 196
5.15. Типоряд установок для трехмерной печати 197

ЧАСТЬ III. ГИБРИДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БП 205

Глава 6. Субтрактивные технологии БП 206

6.1. Особенности 3D-микромеханической обработки с использованием лазеров 206
6.2. Лазерные технологии в микромашиностроении 208

Глава 7. Быстрая инструментовка 224

7.1. Принципиальные пути металлической инструментовки 225
7.2. Металлическая инструментовка, основанная на пластических моделях БП 225
7.3. Металлическая инструментовка, основанная на металлических моделях БП 230

Глава 8. Обратный инжиниринг 240

8.1. Основы обратного проектирования и конструирования 241
8.2. САПР для обратного инжиниринга 245
8.3. Примеры систем для реконструирования 248
8.4. Точность реконструирования 250

ЧАСТЬ IV. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АП 253

Глава 9. АТ в индустрии, архитектуре, искусстве 254

9.1. Выбор материала для приложения и метода АП 254

9.2. Конструирование и дизайн ... 254
9.3. Построение моделей в архитектуре ... 256
9.4. Примеры применения АП в машиностроении. Анализ и планирование ... 258
9.5. Производство оснастки в промышленности ... 259
9.6. Аэрокосмические приложения ... 260
9.7. Моделирование и создание беспилотных летательных аппаратов ... 262
9.8. Автомобильная индустрия ... 268
9.8. Товары народного потребления ... 269
9.9. Модельное дело в искусстве и дизайне ... 270
9.10. Компьютерное моделирование и АП в искусстве ... 270
9.11. Археологические решения методами АП ... 270
9.12. Компьютерное моделирование и АП в криминалистике ... 274
9.13. Ювелирные приложения АП ... 274

Глава 10. Биопрототипирование и медицинские приложения ... 276

10.1. Трехмерное медицинское сканирование ... 276
10.2. Программное обеспечение для обработки медицинских данных ... 283
10.3. Виртуальная костная хирургия и компьютерная краниопластика ... 292
10.4. Компьютерное моделирование, конечно-элементный анализ, дизайн имплантатов и тканево-инженерных конструкций ... 296
10.5. Лазерная и электронно-лучевая технологии прямого синтеза титановых ортопедических имплантатов ... 302
10.6. Лазерная печать клеток ... 305
10.7. СЛС биополимеров и пористых керамополимерных матриксов ... 316
10.8. Биопринтинг — мечты и реальности ... 326

Глава 11. Примеры применения методик БП для создания микро- (нано-) электромеханических систем ... 333

11.1. АП и создание пористых имплантатов с контролируемой архитектурой костных тканей ... 336
11.2. Проектирование, создание и физические свойства тканево-инженерных конструкций из биодеградируемых синтетических полимеров ... 343
11.3. СЛС интеллектуальных пористых систем дозированной доставки лекарств ... 346
11.4. СЛС фильтрующих элементов с контролируемой пористостью и оценка их протоковых характеристик ... 352
11.5. СЛС металлополимерных композиций с функциональными нановключениями для MEMS-приложений ... 360

Список литературы ... 370

Приложение А. Список производителей установок для БП и материалов для систем БП ... 376

Приложение Б. Список российских сервисных бюро и исследовательских центров по БП ... 379

Приложение В. Список программных пакетов для БП ... 382

Приложение Г. Список аббревиатур (англо-русский глоссарий терминов в области БП) ... 390

Предисловие

В последние три десятилетия увеличение производительности за счет компьютерной автоматизации производства нашло свое отражение в становлении и развитии технологий быстрого прототипирования (БП) (Rapid Prototyping), известных также как твердотельное производство (Solid Freeform Fabrication), настольное производство (Desktop Manufacturing) или послойные аддитивные технологии (АТ) (Layer Additive Manufacturing Technologies). Последний термин — «послойное аддитивное 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 авиастроении и т. д. Однако развитие микро- и нанотехнологий 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 высокими точностью и скоростью, уникальными свойствами и новыми экономическими преимуществами. Другими словами, АП — это совокупность методик (технологий), позволяющих создавать трехмерные изделия в едином технологическом процессе по данным компьютерных моделей.

Данная книга посвящена систематическому изложению принципов АП и описанию физических явлений, протекающих в ходе него, 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 наноэлектронике, биоинженерных приложениях.

Уникальность лазерного излучения заключается в широких возможностях автоматизации и высокой точности позиционирования при применении его в гибком перенастраиваемом производстве. Поэтому появляются новые гибридные направления использования лазеров в АП, 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 11 глав, скомпонованных в четыре части. Часть I (главы 1–2) посвящена основным терминам БП, в ней приведена классификация методов АП и представлено описание обобщенного процесса АП изделия. В ней рассматриваются известные системы автоматического проектирования и форматы представления данных, детально анализируются известные форматы и гово-

рится о новых. Такие форматы, как IGES и SLC, сравниваются с известным STL, показаны ограничения и их решения, что делает главу познавательной и для специалистов по АТ.

Часть II книги (главы 3–5) посвящена изложению основных методов АП. Детально описаны основы каждой из технологий 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, поэтому представлено также описание работающих установок, 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 судить о путях развития новых применений лазеров.

Часть III (главы 6–8) о гибридных (субстрактивных) технологиях АП 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, рассказывается также о разделении на термические и атермические процессы лазерной обработки. Далее рассматривается пока еще широко не известная российскому читателю более узкая область АП, а именно быстрая инструментовка (Rapid Tooling) и обратный инжиниринг (Reverse Engineering). Быстрое изготовление оснастки, мастер-форм для литья, реинжиниринг — это ключевые факторы ускорения современного производства. Здесь же идет речь об используемых методиках БП, сравниваются преимущества и недостатки этих подходов, программное обеспечение, используемые материалы и параметры технологических установок.

Главы части IV книги (9–11) посвящены применению АП в различных областях, начиная с процесса конструирования (дизайна). На примерах обсуждаются все стадии создания изделия. Рассматриваются также выбор метода АП, особенностей работы конкретной САПР, материала для будущего изделия и оптимальных режимов работы конкретной установки, поскольку от них зависят многие свойства изделия.

Производители установок АП постоянно работают над их улучшением, анонсируют новые материалы и режимы их использования, что открывает возможности для применения новых приложений АТ, считавшихся ранее невозможными или неэкономичными. В книге 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 и безвоздушного (то есть космического), так и подводного базирования. В то же время известно, что медицинские приложения АТ рассчитаны на строго индивидуальные требования пациентов и поэтому также широко востребованы. Книга заканчивается главой, описывающей создание методами АП микро- (нано-) электромеханических систем (МЕМС). В последние годы наблюдается гигантский спрос на такие системы, так как они легко автоматизируются и встраиваются в технологические цепочки.

Автор надеется, что данная книга послужит для многих читателей побуждающим мотивом в поиске новых применений АТ. 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 быстроизменяющейся области технологий не может не устареть с течением времени, поэтому в ней представлены приложения, где даются ссылки на сайты производителей систем АП, материалов и программного обеспечения, указаны адреса сервисных бюро и исследовательских центров, ведущих работу в данной сфере. Автор книги является признанными экспертом в области АТ уже многие годы. Книга содержит результаты в том числе и его работ, в создании которых принимали участие 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 компьютерным дизайном, 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 наноуровней 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 студентов старших курсов соответствующих специальностей.

Часть I

ВВЕДЕНИЕ В АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Глава 1
Основы быстрого прототипирования

1.1. Общие термины

Быстрое прототипирование (БП) — это совокупность методик (технологий), позволяющих создавать трехмерные изделия в едином технологическом процессе по данным компьютерных моделей. Существует большое число других терминов и определений, ассоциирующихся с БП.

- FreeForm Fabrication — производство свободных форм. Термин подчеркивает тот факт, что БП геометрически независимо и по мере возрастания сложности формы нет необходимости строить более сложное оборудование для создания таких изделий.
- Automated Fabrication — автоматизированное производство. Этот термин связывает БП с другими известными технологиями, реализованными на станках с ЧПУ, и подчеркивает тот факт, что изделия могут быть созданы полностью автоматизированно, то есть без вмешательства человека. Оставляя в стороне мастерство отдельных мастеров-формовщиков, можно сконцентрироваться на увеличении скорости производства и уменьшить требования к квалификации персонала.
- Layer-based Additive Manufacturing — послойное *аддитивное производство* (АП). АП упрощает сложный процесс производства трехмерного изделия за счет создания конечного числа двумерных форм (сечений, слоев) данного изделия, сложенных друг на друга.

В течение всего времени существования технологий БП сам термин многие критиковали. В стандарте ASTM F2792 было предложено использовать новый термин — *аддитивные технологии*, которые определяются как «...процесс объединения материалов с целью создания объекта из данных 3D-модели, как правило, слой за слоем...». Несмотря на критику, этот термин распространился и сейчас является общепризнанным, ведь он включает в себя кроме названия собственно процесса описание программного обеспечения, маркетинговые и электронные компоненты. Последнее определение — это ключ к тому, чтобы представить, как БП работает. Модели создаются из связывающихся воедино слоев. Если толщина слоев мала, модель очень близка к своему прототипу. Обычно толщина слоев в БП ~0,1 мм, и этого оказывается достаточно для многих промышленных приложений. Спектр таких приложений сейчас довольно широк: электроника, дизайн и производство игрушек, кухонной посуды, ювелирная промышленность, автомобиле- и авиастроение и т. д. Термин «аддитивное производство» позволяет отличать БП от точного машиностроения с использованием станков с ЧПУ, в котором изделие создается удалением «лишних» частей. В БП изделие создается (выращивается) слой за слоем, начиная от подложки.

Соревнование технологий на мировом рынке приобретает грандиозные масштабы. Сейчас очень важно представить новые продукты на рынок как можно быстрее — раньше, чем конкуренты. Для того чтобы без промедления вывести продукт на рынок, требуется сделать много шагов, выполнить множество процессов. Дизайн изделия, его тестирование, производство, оценка рынка — все это надо спрессовать и по времени, и по материальным затратам. Эффективно использовать имеющиеся ресурсы можно, только разрабатывая новые продукты и подходы. Во многом двигателем технологического прогресса является компьютер. Это подтверждают прошедшие три десятилетия.

Спрессованность времени является главным фактором, побуждающим к развитию новых направлений и технологий для увеличения производительности. Старая практика прототипирования через мастер-формы также сдерживала прогресс. В этой книге дается описание основ нового технологического направления — БП.

Прототип — это важнейшая часть производственного процесса. В конструкторской практике слово «прототип» имеет несколько иное значение, чем в общелитературном языке. В Оксфордском словаре дано следующее определение: «прототип — это первый оригинальный пример какой-либо вещи, с которого потом можно сделать копию и размножить, то есть это предварительная модель данной вещи». Однако в конструировании это может быть и не только вещь (артефакт) — так можно назвать и способ оценки конструкторского решения, например «прототип разводки печатной монтажной платы». Более общее же определение предусматривает, что концептуальным прототипом могут быть математическая модель, карандашный набросок, пенная модель и, конечно, сам физический прототип.

Прототипирование — это процесс создания прототипов. Он начинается с выполнения компьютерной программы для построения реального (функционального) прототипа. Прототип характеризуют три важных аспекта.

1. Сборка прототипа выполняется из частей или компонентов.
2. Прототип может быть различным — от виртуального до физического.
3. Степень аппроксимации прототипа — от очень расплывчатого до идеально точной копии.

Сборка прототипа подразумевает создание конечного продукта из частей. Законченный прототип (модель) не полностью, но в основном характеризует продукт. Это нужно, например, для группы людей, которые оценивают его внешний вид, какие-то функциональные качества или последующие операции с ним. Например, на прототипе можно тестировать угол наклона спинки офисного стула, чтобы снизить риск искривления позвоночника в результате продолжительного сидения. Прототип фрагмента черепа позволяет криминалистам (археологам) судить, каков был при жизни его владелец, а хирургам — спланировать ход операции по его восстановлению.

Другой аспект — как прототип будет произведен. Виртуальный прототип — это некая математическая модель, последовательность операции по изготовлению физического прототипа. Виртуальный прототип можно изучать еще на стадии дизайна и судить о его качествах, базируясь на законах физики. Например, визуализация течения потоков воздуха при обтекании крыла позволит оценить его подъемную силу, особенности поведения данной формы крыла на до- и сверхзвуковых потоках. Когда реальный прототип очень большой и дорогой в изготовлении, виртуальный прототип — хороший помощник. Макет сотового телефона очень помогает конструктору оценить, как он ложится в руку, привлекателен ли эстетически.

Третий аспект — степень точности воспроизведения прототипа. Например, модель может лишь отдаленно напоминать реальный продукт, но позволит оценить его геометрические характеристики. Или, наоборот, грубая модель может внешне точно копировать реальный продукт, но быть изготовленной из различных материалов, чтобы оценить их привлекательность и функциональность. Ну и наконец, точная копия продукта, безусловно, нужна на финальной стадии выпуска его в производство.

БП обычно позволяет воспроизвести физический прототип довольно близким к реальному изделию. Многофункциональность и возможность сборки прототипа из отдельных частей дают ему неоспоримое преимущество перед конструкторским чертежом. Прототипы в производственном процессе служат:

- для экспериментирования и обучения;
- тестирования и апробации;
- оценки коммуникации и взаимодействия частей;
- синтеза и интеграции частей прототипа;
- планирования и исследования рынка.

1.2. Преимущества и проблемы БП

В настоящее время скорость и стоимость внедрения в производство новой техники напрямую зависят от эффективности работы каждой технологической цепочки на всех этапах от конструирования и проектирования изделия до создания его первоначального макета в натуральную величину. Резко ускорить прохождение этих этапов помогают внедряющиеся во всем мире высокотехнологичные методы трехмерного компьютерного моделирования и создания твердых копий деталей машин.

Актуальной является также задача сведения комплекса типовых процессов в единый технологический процесс (установку), позволяющий в сжатые сроки (за несколько часов вместо нескольких месяцев) изготовить прототипы инструментов и изделий с любой степенью сложности и точности внутренней или внешней поверхности без предварительных затрат на подготовку оснастки [1]. Не менее нужным является умение изготавливать единичные копии моделей сложной формы в таких сферах человеческой деятельности, как протезирование или реставрационные работы.

Таким образом, в рыночных конкурентных условиях требуется, чтобы новые изделия (продукты) были как можно более быстро и дешево разработаны, произведены и представлены на рынок. Стандартные многоступенчатые процедуры конструирования и проектирования не способны обеспечить выполнение этих требований современной динамики производства. Поэтому процессы проектирования и производства должны быть непосредственно интегрированы в процедуру обработки. Сокращение временных циклов изготовления продукции и увеличение номенклатуры изделий наряду с возрастающими требованиями к качеству неизбежно должны были бы привести к развитию новых тенденций на рынке конструирования, проектирования и создания новой техники и продукции. Так как большинство издержек современного производства относится именно к этой фазе, то очевиден высокий потенциал ускорения темпов развития для тех стран, компаний и производств, которые осознали данные проблемы и внедряют у себя новшества. Речь идет об объединении уже хорошо развитых систем автоматического проектирования (САПР) (англ. Computer Aid Design (CAD)), реализованных на примере профессиональных пакетов программ типа AutoCAD, Solid Work, КОМПАС-3D, CATIA,

Pro/ENGINEER, 3D Studio и т. д., с новой высокой технологией послойного синтеза объемных изделий и деталей машин (англ. Rapid Prototyping & Manufacturing (RP&M), Solid Free Form Fabrication и т. п.) [1].

В основе своей процессы БП состоят из следующих шагов: подготовка геометрического образа трехмерного объекта, формирование поперечных сечений изготавливаемого объекта, послойное наложение этих сечений в процессе синтеза и комбинирование слоев из конкретного материала. Таким образом, чтобы создать физический объект в ходе этих процессов, требуются данные лишь о поперечных сечениях. Кроме того, исчезают следующие проблемы, часто возникающие в связи с другими производственными процессами [2], [3].

- Отпадает необходимость в топологическом проектировании и распознавании по элементам, поскольку планирование процессов, в ходе которого используется эта информация, не требуется. Нет нужды преобразовывать элементы конструкции в элементы изготовления. Достаточно иметь трехмерную поверхностную или твердотельную модель детали, на основе которой будут сгенерированы данные о поперечных сечениях.
- Не требуется определять геометрию пустого пространства, поскольку в ходе процессов БП материал добавляется, а не снимается, как это делается на станке с ЧПУ.
- Не нужно определять несколько наборов оборудования или сложные последовательности обработки материала, поскольку деталь изготавливается за один прием.
- Нет необходимости рассматривать конструкции зажимов и креплений[1].
- Не нужно проектировать и изготавливать формы и штампы, так как процессы БП являются безынструментальными.

На рис. 1.1 представлены данные одного из ежегодных отчетов признанного в мире БП аналитика Терри Волерса (**Wohlers Associates**, США) [2], где отмечены основные направления применений технологий БП в промышленности и на потребительском рынке. Данные этих схем не нуждаются в комментариях и лишний раз свидетельствуют о том, что БП, безусловно, является «критической» технологией, и поэтому страна, не занимающаяся ее развитием и внедрением, не может называться передовой технологической державой.

Таким образом, технология БП нужна:

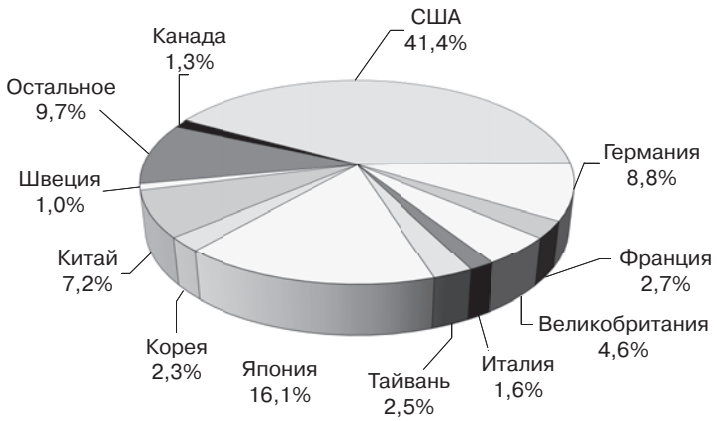
- для проверки на выполнимость новых понятий (концепций) проекта;
- оценки пригодности/работоспособности разрабатываемых сложных механизмов;
- возможности параллельной разработки нового изделия (программы) в нескольких направлениях;
- реализации высокой точности, скорости и воспроизводимости копий деталей и машин;
- возможности прямого использования этих копий в тестовых испытаниях;
- изготовления эталон-моделей и мастер-форм в технологии литья.

Совмещение CAD- и RP&M-технологий предлагает инструментальные средства и процедуры, которые превосходно подходят для быстрого и эффективного в стоимостном плане преобразования виртуальных (компьютерных) образов (изделий) в рыночные продукты (рис. 1.2, взят из отчета [2]).

---

[1] Некоторые процессы могут требовать создания вместе с деталью поддерживающих структур.

а



б

Рис. 1.1. Распределение технологий БП: *а* — по отраслям; *б* — по странам

Другими словами, можно отметить следующие выгоды для пользователей этой технологии:

- уменьшение time-to-market (время до выхода продукта на рынок);
- сокращение ошибок и проблем уже на стадии проектирования;
- высокая конкурентоспособность;
- улучшенное качественное управление производством;
- авторская защита понятий (концепций) проекта.

Проблемы АТ наиболее четко обозначил I. Gibson [13].

- *Толщина слоя*: 0,1 мм для многих АТ. Наилучший результат — 0,02 мм, и стремление достичь его приводит к удорожанию установки для АП и уменьшению скорости процесса. Поверхность изделий имеет четко выраженную текстуру, которую устраняют финишной обработкой.

Рис. 1.2. Задачи, решаемые в технологии БП

- *Точность воспроизведения*: толщина слоев влияет на точность воспроизведения. Установок, создающих детали с минимальной толщиной стенок, мало. Хорошим считается результат порядка нескольких миллиметров. Воспроизводимость изделий обычно хорошая, но усадка присутствует практически всегда, составляет десятки микрометров и должна учитываться. Многие АТ требуют наличия поддержек, что увеличивает время изготовления, требует постопераций по их удалению и ухудшает шероховатость поверхности.
- *Размеры изделий*: в основном ограничены размерами камеры синтеза. Масштабируемость изделий для ряда АТ неочевидна.
- *Материалы*: для каждой АТ их спектр ограничен.
- *Прочность изделия:* послойное построение изделий предполагает ухудшение прочности в направлении роста.
- *Скорость изготовления*: от нескольких часов до нескольких дней. Традиционные методы изготовления в последнее время тоже значительно ускорились, и пользователи ждут от АТ лучших результатов.
- *Стоимость изготовления*: все еще довольно высока. При стоимости машины более 200 тыс. евро использование АТ очень затратно. При стоимости машины около 30 тыс. евро стоимостной результат лучше, но качество изделий хуже.
- *Системная интеграция*: установки до настоящего времени работают независимо друг от друга, хотя большинство связаны посредством Интернета с CAD-станциями. Уход за установкой и постоперации все еще требуют большого количества ручного труда.

Последнее десятилетие XX века было отмечено бурным развитием различных способов (методик, техник) реализации технологии БП, которых к настоящему времени известно несколько десятков. Заметим, что некоторые из них даже не используют лазерное излучение (ЛИ) и поэтому не обеспечивают высокую степень точности воспроизведения изделий. Позже в данной главе будут названы и кратко

описаны основные методики, с помощью которых удается реализовать технологию БП. В сжатой форме изложены основные шаги по синтезу трехмерных изделий деталей машин от создания компьютерной модели в среде САПР до послойного выращивания готовых макетов деталей на современных установках. Показаны преимущества и недостатки конкретных методик БП, а также направления их применения.

1.3. Классификация методов, систем и установок БП

Как уже отмечалось, в настоящее время известно несколько десятков методик БП, от экзотичных (например, freeze water method (FWM) — метод послойного замораживания воды для выращивания изделий изо льда) до коммерчески успешных (SLA, SLS, LOM, FDM и т. д.). В монографии [4] впервые была предпринята попытка классификации всего многообразия методов БП. На рис. 1.3 классификация АТ представлена более наглядно в соответствии с тем, как это сделали C. K. Chua и его соавторы.

Используя ключевое слово «послойно», можно разделять методики послойного создания объемных изделий на аддитивные (additive), когда изделие растет слой за слоем, и субтрактивные (subtractive), при использовании которых, наоборот, изделие изготавливается избирательным удалением участков материала по аналогии с процессом фрезерования. Часть II книги посвящена аддитивным процессам синтеза, а часть III — субтрактивным процессам БП. В свою очередь, все многообразие аддитивных методик синтеза можно классифицировать, используя ключевое слово «материал» и его структурно-фазовое состояние. Так, было предложено разделять:

1. Методы БП с участием жидкой фазы (рассматриваются в главе 3):
   - *лазерная стереолитография* (SLA);
   - Cubital's Solid Groud System (SGC);
   - D-MEC's Solid Creation System (SCS);
   - CMET's Solid Object Ultraviolet Laser Printer (SOUP);
   - Teijin Seiki's Soliform System;
   - Meiko's Rapid Prototyping System;
   - БП методом заморозки, или freeze water method (FWM);
   - протекционно-масочная стереолитография — MicroTEC;
   - двухфотонная стереолитография.
2. Твердофазные методы БП (глава 4):
   - *методика построения изделий из листового материала* — LOM (Cubic);
   - ультразвуковая консолидация (УЗК) ламината;
   - Kira Paper lamination Technology (PLT);
   - послойная заливка экструдируемым расплавом (FDM, Stratosys);
   - 3D System (MJM) Multi-Jet Modeling System;
   - Solidscape's Model Maker and Pattern Master (Sanders Prototype, Inc.);
   - Beijing Yinhua's Slicing Solid Manufacturing (SSM);
   - Velted Extrusion Modeling (MEM);
   - Multi-Functional RPM Systems (M-PRM);
   - послойное создание литьевой формы (SDM).

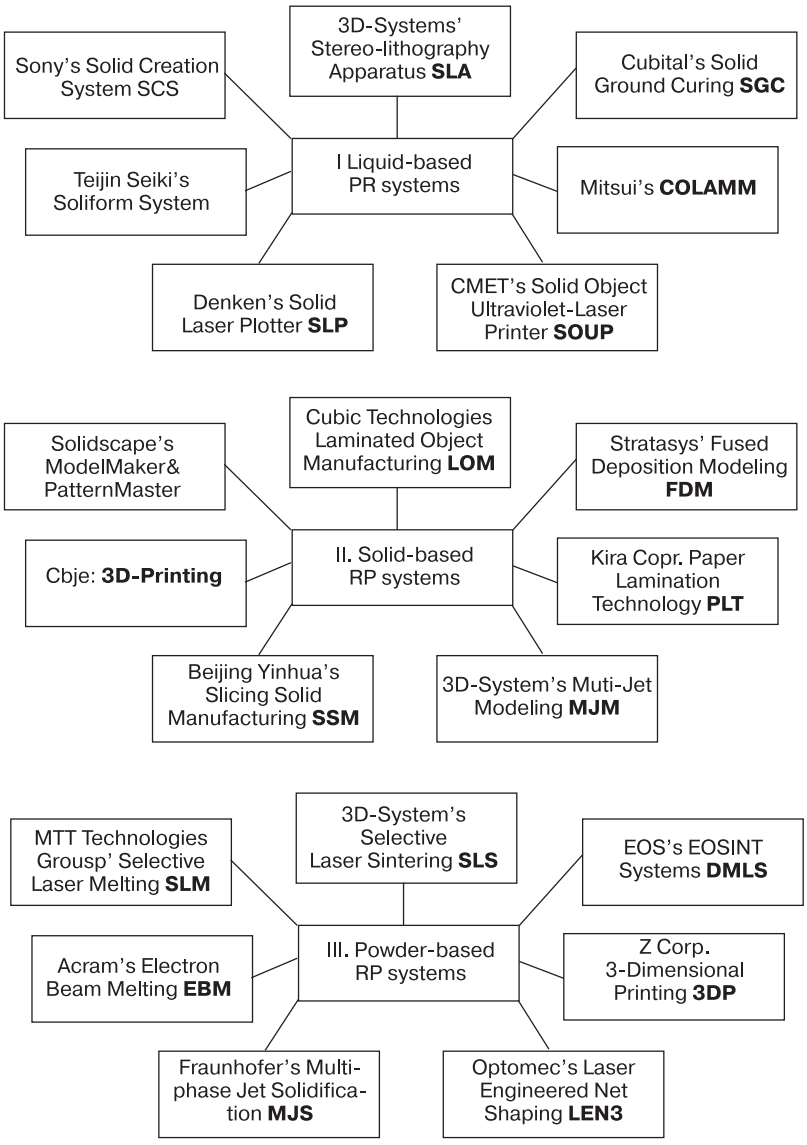


Рис. 1.3. Классификация аддитивных технологий

3. Методы БП на порошковой основе (глава 5):
   - *селективное лазерное спекание/плавление* (СЛС/П);
   - процесс лазерного инжиниринга точных форм — Optomec's Laser Engineering Net Shaping (LENS);
   - электронно-лучевое плавление — Acram's Electron Beam Melting (EBM);
   - Laser cusing (Concept Laser GmbH);
   - направленное нанесение металла — POM's Direct Metal Deposition (DMD);

- объемная лазерная наплавка — 3D Laser Cladding (Liverpool University);
- объемная лазерная сварка — 3D Laser Welding (Southern Methodist University);
- объемная лазерная генерация — 3D Laser generating (Fraunhofer-Institute of Production Technology (IPT));
- Soligen's Direct Shell Production Casting (DSPC);
- Fraunhofer's Multiphase Jet Solidification (MJS);
- Aeromet Corporation's Lasform Technology;
- Generis Rp Systems (GS);
- Therics Inc.'s Theriform Technology;
- *трехмерная печать* (Z Corporation).

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

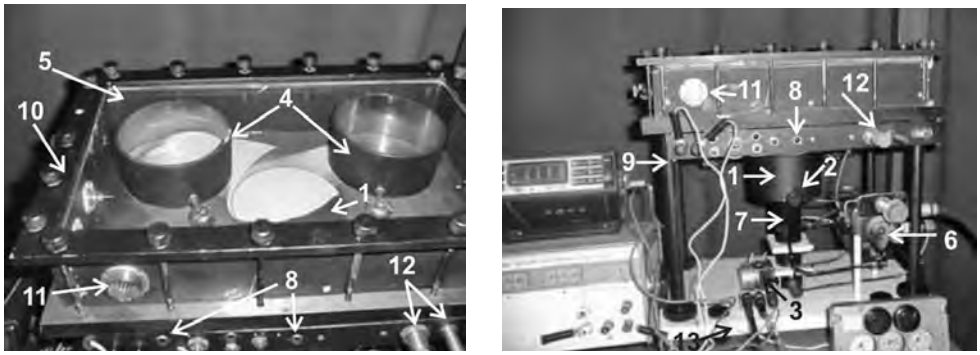
Основные патенты технологии БП в исторической перспективе представлены на сайте Эдварда Дженда (Castle Island Co) http://www.additive3d.com/museum/mus_c.htm, а также собраны в виде таблицы в [1]. В данный момент общее число патентов, относящихся как к самой технологии БП, так и к ее ответвлениям (Rapid Tooling — быстрая инструментовка, Rapid Reverse Engineering — обратный инжиниринг), а также приложений в медицине, архитектуре и искусстве и т. п. превышает несколько тысяч, что не позволяет перечислить их здесь.

Далее в главах 3–5 представлено краткое описание наиболее известных аддитивных методик БП. Это сделано не столько с целью показать некоторые преимущества или недостатки самих методик, сколько чтобы отметить их взаимосвязь и подчеркнуть, как физические и технологические идеи, реализованные в одной методике, перетекали в другие методики. Особое внимание будет уделено методам БП с использованием концентрированных (ионных, электронных и особенно лазерных) потоков энергии. Они являются основополагающими при создании интеллектуальных изделий в микро- и наноэлектронике, биоинженерных приложениях и позволяют обеспечить высокую точность при создании изделий, что отвечает магистральному направлению изложения информации в книге.

Часть III (главы 6–10) посвящена субтрактивным методикам создания объемных изделий, к которым относятся лазерная микромеханическая обработка (микрофрезерование), микроформование, лазерные микрорезка и сварка, инициированные лазерным излучением микрохимическая обработка и травление и т. д. Такой взгляд на лазерные технологии, в целом известные российскому читателю, но в применении к технологии БП представляется новым.

1.4. Основы автоматизации процесса БП

Задачи автоматизации, а главное *in situ* диагностики процессов БП, возникали с момента начала развития БП. В этом разделе они будут рассмотрены на примере спекания порошковых композиций. Реализация процесса синтеза в защитных средах нашла отражение в наших последних конструкторских решениях — экспериментально-технологическом стенде для СЛС/П (рис. 1.4), который значительно расширяет возможности технологии и изучения сопровождающих спекание физико-химических процессов [5], [6].



а *б*

Рис. 1.4. Камера синтеза объемных изделий: *а* — вид сверху; *б* — вид сбоку

Последняя версия оборудования стенда состоит из двух основных систем: системы пошагового опускания рабочего основания и системы дозировки порошков, помещаемых в рабочую зону для лазерной обработки.

Плита и наружная поверхность рабочего основания в начале работы совмещены до полной плоскостности. Это достигается подстройкой опорных штанг *9* (4 опоры) с помощью регулировочных винтов. Шток гидроцилиндра *7* перемещения рабочего основания в это время находится в крайнем выдвинутом положении. Перемещение осуществляется за счет дозированной подачи рабочей жидкости в верхнюю полость гидроцилиндра от импульсного гидронасоса (позиция *6*), который приводится в действие электромагнитом. Шаг подачи поршня может регулироваться от 10 до 200 мкм настройкой хода плунжера насоса с помощью винта, расположенного в подвижном якоре электромагнита. Заполнение полости плунжера жидкостью происходит через боковое отверстие по окончании рабочего хода и после возврата плунжера в исходное положение под действием пружины.

Для обеспечения быстрого и полного заполнения рабочего объема плунжера, а также возврата поршня в исходное положение по окончании работы гидросистему следует наддувать внешним газом до давления 2,5...3 кгс/см^2. Возврат поршня гидроцилиндра в исходное положение осуществляется за счет несбалансированного усилия от давления наддува на шток гидроцилиндра после открытия дросселирующего крана, когда жидкость перетекает из верхнего в нижний объем гидроцилиндра. Это усилие составляет порядка 5–6 кг, и для плавного возврата поршня в исходное положение используется регулирующий поток жидкости игольчатый дроссель-кран. Наддув гидросистемы осуществляется от внешнего газового баллона через редуктор. Рабочее основание представляет собой поршень, двигающийся в цилиндре большого диаметра *1*. Он жестко посажен на шток гидроцилиндра, уплотнен по образующей поверхности цилиндра *1* с помощью комбинированного радиального уплотнения на базе резинового и фторопластового колец. Для уменьшения трения о стенки цилиндра *1* уплотнение натерто специальным ультрадисперсным фторопластовым порошком «Суперфайн». Для того чтобы в уплотнение не попадал рабочий порошок, в верхней части поршня в канавке установлено пылесборочное кольцо из плотного фетра.

Поскольку предполагаются работы с подогревом или охлаждением рабочих порошков, внутри поршня сделаны канавки для пропускания через них охлажденного или нагретого газа (жидкости), для чего в нижнюю стенку поршня за-

деланы герметично два штуцера *2*. Для контроля положения поршня в процессе спекания изделия в системе установлен датчик положения поршня *3*. Он представляет собой точный переменный проволочный резистор типа ПЛ-11 с номиналом 20 кОм, на оси которого установлен подпружиненный шкив с намотанным на него тросиком, связанный с нижней частью поршня. Двигаясь, поршень сматывает тросик с барабана и вращает ось резистора. Контроль осуществляется с помощью цифрового омметра при предварительной калибровке датчика по часовому индикатору.

Вторая система предназначена для внесения порошка в рабочую зону для лазерной обработки. После опускания поверхности поршня на величину шага порошок или разные порошки, находящиеся в бункерах *4*, вносятся в рабочую зону поворотом бункеров до совпадения осей большого цилиндра и основания бункера. Бункера *4* представляют собой отрезки цилиндра того же диаметра, что и большой цилиндр *1*, их торцы притерты к шлифованной поверхности плиты. Это позволяет работать с очень мелкими порошками без их утечки из бункера. Поворот бункера осуществляется приводом, состоящим из коллекторного электродвигателя постоянного тока, червячного и цилиндрического редукторов и кривошипно-шатунного механизма. Один из кривошипов, установленный на редукторе, в процессе нанесения порошка поворачивается на 360°, второй кривошип при этом совершает возвратно-качательное движение на угол около 100°. Это перемещение начинается с замыкания оператором кнопки S2, которая шунтирует разомкнутый в крайнем положении микровыключатель Кн. 1 или Кн. 2 — в зависимости от положения тумблера S3 «Левый» или «Правый» — и подает ток на электродвигатель М1 или М2. Наличие этого переключателя делает невозможным одновременное движение левого и правого бункеров. Полнооборотный кривошип начинает вращение и замыкает микровыключатель. Движение происходит до тех пор, пока толкатель микровыключателя опять не попадет в выемку на поверхности полнооборотного кривошипа и не выключит электродвигатель. Для контроля за тем, какой из приводов, левый или правый, в настоящее время активирован, на панели управления установлены сигнальные лампы Лн. 1 и Лн. 2 (позиция *8*). Наличие питающего напряжения подтверждается горящей лампочкой Лн. 3 «Питание». Кнопка S1 подает питание на электромагнит ЭМ-1 импульсного насоса.

ЛИ фокусируется на поверхности порошка, проходя через защитное стекло *5*. Стекло прижимается к корпусу и плите невыпадающими винтами через рамку *10*. Съемный корпус в торце имеет канавки, куда уложено резиновое уплотнение. Рабочее пространство между стеклом и плитой, ограниченное по бокам корпусом, может вакуумироваться и заполняться различными газами под давлением через запорные краны. В стенках корпуса установлены также высоковольтные вводы *11* и герметичный разъем *12* для подключения всевозможных внутренних датчиков. Стенки корпуса скреплены винтами и посажены на силиконовый герметик. Для плоскостности всего устройства в нижней плите *13* установлены регулируемые по высоте опоры.

Таким образом, конструктивные особенности стенда [5], [6] в сравнении с ранними модификациями значительно расширяют возможности по СЛС/П и изучению сопровождающих спекание физико-химических процессов и не уступают современным образцам.

1. Размер спекаемого объема увеличен до $10 \times 10 \times 10$ см.
2. Имеется возможность спекания в защитной среде инертных газов, вакууме либо в среде химически активных газов.

3. Автоматизирован процесс опускания платформы в вертикальной плоскости, минимальный шаг платформы ~30...20 мкм, но сохранена возможность пошагового опускания и/или подъема платформы механически.
4. Предусмотрены два бункера для спекания разнородных порошков (многоматериальное АП).
5. Процесс разравнивания порошков автоматизирован, но сохранена возможность механического разравнивания, и лишь на части платформы.
6. Предусмотрена возможность подогрева платформы при спекании.
7. Ввод термопары позволяет контролировать температуру в зоне спекания.
8. Предусмотрены технологические отверстия для фото- и видеосъемки и диагностики процесса спекания.
9. Реализована возможность остановки техпроцесса как программно, так и физически на любой стадии синтеза объемного изделия.
10. Автоматизация ряда перечисленных операций открывает путь для создания компьютерной программы по управлению всем процессом СЛС/П в замкнутом цикле.

Подводя итоги, следует отметить, что описанный программно-аппаратный комплекс имеет ряд неоспоримых преимуществ перед современными западными аналогами (например, п. 2–9) и позволяет решать практически любые исследовательские и научно-практические задачи по изучению электромеханических и физико-химических процессов и оптимизации режимов СЛС/П, созданию функциональных и функционально-градиентных изделий, дополнительному направленному их подогреву при СЛС/П и поиску перспективных порошковых композиций для самого процесса синтеза.

Стенд открыт для планируемых нами инноваций, как то:

- использование нескольких источников ЛИ с существенно различающимися длинами волн;
- многолучевая независимая система сканирования этими лазерными источниками и модернизация программного обеспечения для обслуживания такой системы сканирования с управлением распределением энергии по пятну нагрева, высокой точности позиционирования и минимизации дрейфа источников;
- использование в едином процессе разных порошковых материалов для создания градиентных изделий и функциональных устройств (MEMS);
- модернизация программного обеспечения по оптимизации контуров обхода при послойном синтезе;
- диагностика в режиме реального времени температурных процессов послойного синтеза изделия, геометрии образца и его морфологии с системой обратной связи по коррекции параметров синтеза в случае их отклонения.

Экспериментально-технологический стенд для СЛС/П укомплектован программно-аппаратным обеспечением для измерения ЭДС и температурных пиков, возникающих на фронте волны горения, с обработкой пространственно-временных данных через АЦП на компьютере. Использование наработок ЗАО «Л-Кард» позволило оформить процесс измерения в виде виртуального стенда, созданного в среде LabView (Delphi) [7]–[9], и управлять им.

Схема установки для изучения электрических и термических явлений в контролируемых лазером процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) новых материалов (интерметаллидов, керамики) представлена на рис. 1.5.

Свободно насыпанная порошковая композиция размещается на платформе *7*. Объем кюветы ~12 см^3. При заданных размерах зоны лазерного воздействия (ЛВ), например 15 × 30 мм, и толщине спекаемых монослоев ~0,5...3 мм на расстоянии ~5 мм от края зоны спекания и на глубину ~3...5 мм вводятся пассивные электрические зонды (опорный и регистрирующий), скомбинированные в единую измерительную ячейку. В целом электроды располагают как можно ближе к зоне спекания, но гораздо дальше, чем до краев платформы *7*, куда насыпается порошковая смесь. Этим обеспечивается исключение влияния краев (стенки) платформы на фронт реакции спекания (горения). Для одновременного определения термических и кинетических характеристик исследуемого процесса вблизи каждого из зондов были размещены также спаи подходящих термопар. В зависимости от методики работы предполагается, что фронт реакции горения плоский и электроды (опорный и регистрирующий) могут располагаться по разные стороны от зоны реакции. При диагностике процесса синтеза интерметаллидов использовались хромель-алюмелевые термопары (диапазон температур 0...1200 °С, до 52 мВ), а в области более высоких температур (керамика) — W + Re (5%) — W + Re (20%) (диапазон температур 0...2400 °С, до 32 мВ). Сверху на платформу воздействовало ЛИ. Сканированием лазерным пучком поверхности платформы можно реализовать любой контур обхода (меандр, растр). Через редуктор газового баллона при необходимости в зону обработки осуществлялась подача инертного или реагирующего газа. Погрешность измерения: хромель-копель ±3...5 °С; вольфрам — рений ±0,1...4 °С.

Для оцифровки экспериментальных данных, полученных на установке, выполненной по рассматриваемой схеме, использовался 16-канальный внешний модуль АЦП/ЦАП E-440, соединенный с персональным компьютером шиной USB 1.1

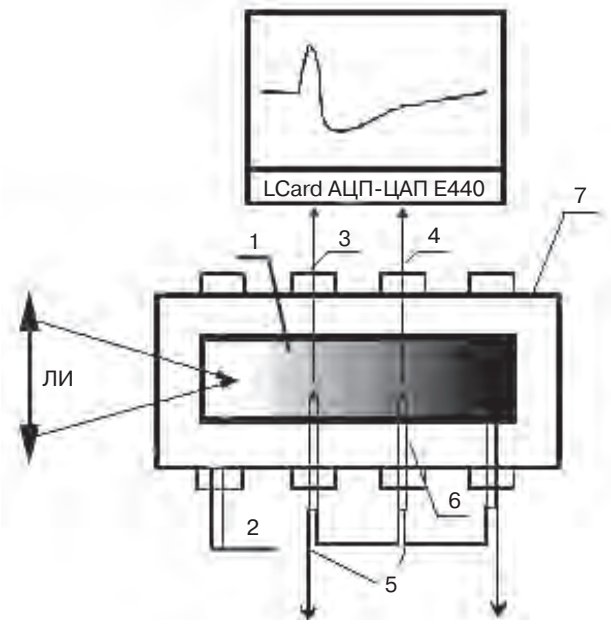


Рис. 1.5. Схема установки для изучения электротермических явлений в СВС-процессах:
1 — исследуемая шихта; *2* — вводы для измерительных устройств; *3* — опорный зонд;
4 — регистрирующий зонд; *5* — термопары; *6* — изоляторы

(совместима с USB 2.0). Его технические характеристики представлены, например, на сервере ЗАО «Л-Кард» по адресу: http://www.lcard.ru/e-440.php3.

Внешняя USB-шина данных позволяет повысить помехозащищенность измерительного стенда, развязать наводки из зоны ЛВ и внутри компьютера. Применение цифрового сигнального процессора ADSP 2185M позволяет избавить процессор компьютера от управления вводом/выводом и первичной обработки сигналов, программно реализовать выбор диапазонов измерения, частоту дискретизации и выполнить конфигурации входов АЦП как дифференциальных и/или с общей «землей». Синхронизация в E-440 возможна как по внешнему синхросигналу, так и по уровню входного сигнала. Дополнительно E-440 имеет «медленные» цифровые TTL-входы и выходы.

На рис. 1.6 и 1.7 представлена панель виртуального стенда [8], [9], на котором расположены органы управления процессом измерения ЭДС горения и температуры в различных точках порошковой композиции по мере продвижения фронта горения (лазерного пучка) по поверхности порошка (платформы). Температура измеряется относительно комнатной (холодный спай). В центре на графике выводится результат измерения температуры.

Цифровые и графические табло помогают интерактивно отслеживать процесс измерения. Через E-440 они непосредственно связаны с термопарами и электрическими зондами. Оформленный в виде оболочки интерфейс обеспечивает дистанционное взаимодействие измерительных зондов, АЦП и виртуального пункта управления, осуществляет сбор и статистическую обработку данных для последующего вывода в виде графиков. Фильтровать помехи можно с помощью ресурсов LabView (Delphi). Использование указателя на массив (Array Data Pointer)

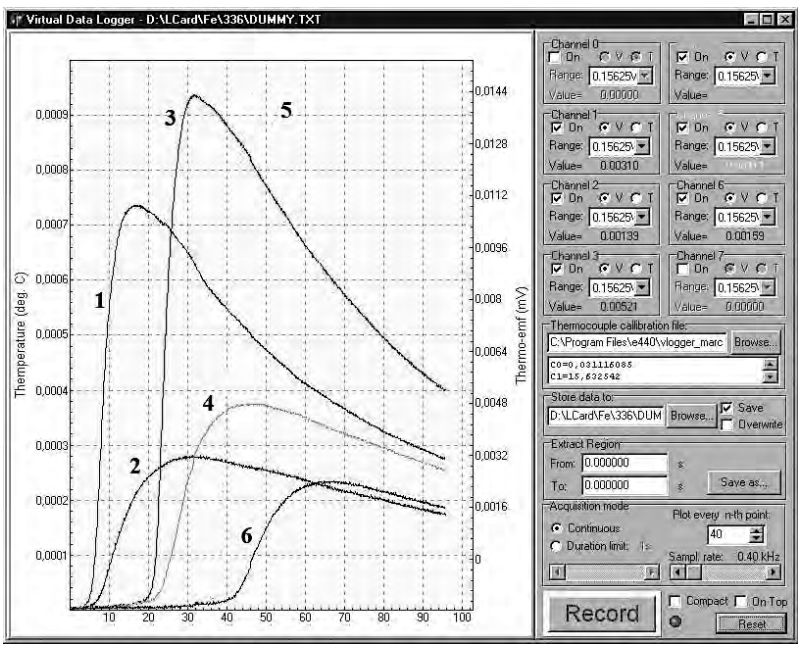


Рис. 1.6. Панель виртуального стенда. Флажками заданы для включения термопары *1–6* (*справа на интерактивном графике*)

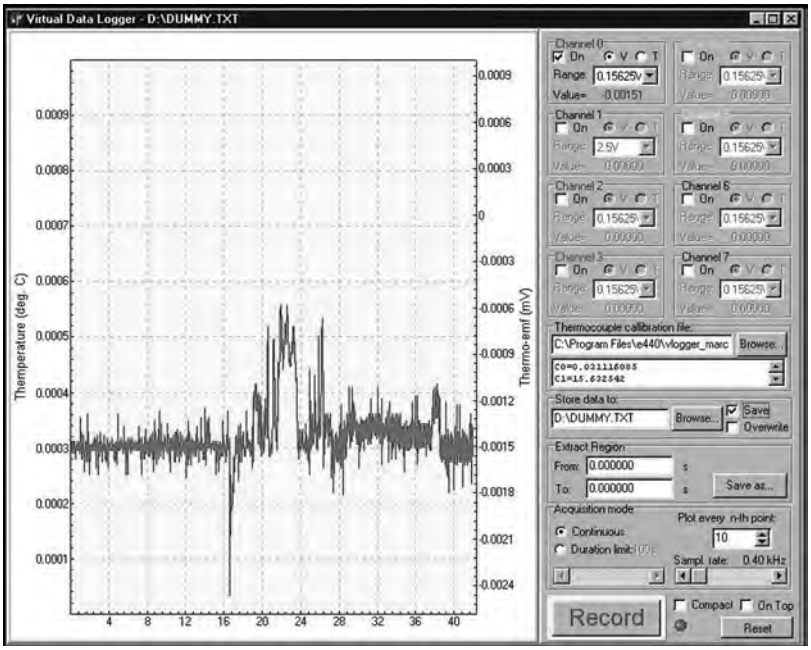


Рис. 1.7. Измерение ЭДС на фронте горения. Справа флажком задано включение одной пары электрических зондов

или дескриптора (Array Handle) позволяет передавать данные в другие программы (MatLab (Simulink, Wavelet Toolbox, Signal Processing Toolbox)). Представляемые LabView (Delphi) возможность обработки SQL-запросов, поддержка удаленных баз данных, создание CGI и использование G Web Server упрощают разработку дистанционных измерительных систем, работающих в том числе и через Интернет. Переключатели реализуют виртуальное подключение измерительных трактов. Табло из сигнальных лампочек показывает, какой тракт (способ измерения) в настоящее время активизирован. Наш экспериментальный комплекс открыт для последующей доработки, развития и автоматизации.

1.5. Обобщенная схема операций при БП

АП подразумевает, что основными принципами технологии является генерация модели средствами трехмерных САПР и последующее прямое создание изделия. Технология АП значительно упрощает процесс производства сложных трехмерных объектов по компьютерным данным. Традиционные процессы производства требуют детального анализа геометрии изделия, определения порядка (последовательности) производства его частей, а главное, подготовительной оснастки и пр. Напротив, АП нужны только основные данные о геометрии изделия и понимание того, как работает машина для БП и какие материалы будут использованы.

Знание о том, как функционирует АП, имеет в виду описание последовательности этапов создания изделия, включая следующие принципиальные вопросы: как добавляется материал в слои, как каждое сечение изделия может быть получено на основе компьютерных данных об изделии и т. п. Обычно в физическом мире

каждый слой должен иметь конечную толщину, так что результат должен соответствовать оригинальным данным. Чем тоньше слои, тем ближе изделие к оригиналу. Все коммерчески реализованные машины для БП сейчас используют способы минимизации этого параметра в основном за счет выбора материала и знания того, как слои формируются и связываются друг с другом. Точность воспроизведения конечной детали, свойства материала, из которого она сделана, будут определять механические и эксплуатационные свойства изделия. Толщина слоев влияет на скорость производства детали и то, потребуются ли так называемые постпроцессы. Размер рабочего объема машины для БП влияет на количество деталей, которые можно создать одновременно, а все вышеперечисленное влияет на конечную стоимость изделия и процесса.

Данный раздел является введением в основную концепцию АП и описывает некое обобщенное АП от его дизайна до приложений. Включение в АП стадии дизайна помогает понять, как идет процесс разработки и улучшения изделия. Поскольку АП становится важным инструментом в машиностроении, глава заканчивается тестами и сравнениями, а также обсуждением путей развития процесса и сопутствующей оснастки.

Обобщенный процесс АП. АП включает набор шагов от виртуального компьютерного представления данных об изделии до создания реального изделия. Как миниатюрные, так и изделия со сложной геометрией могут быть созданы по единому сценарию в обобщенном технологическом процессе. После создания иногда требуется дополнительная (например, пескоструйная) постобработка.

1.5.1. Трехмерное моделирование средствами САПР

Изначально должен быть выбран пакет САПР (это может быть Pro/ENGINEER, Solid Work, AutoCAD), в котором разрабатываемое трехмерное изделие будет смоделировано. Конструктор может использовать примитивы, существующие в указанных САПР, либо чертить изделие с нуля. Однако на выходе должен быть создан CAD-файл, понятный машинам БП. Такой формат файла давно существует и называется *STL-формат* (от STereoLithography — названия первого коммерчески успешного метода БП). STL-файл описывает изделие в понятной машине форме. Возможно, потребуются некоторые манипуляции с файлом: коррекция размера, позиции и ориентации изделия. Эта и последующие фазы обобщенного процесса АП будут описаны подробнее в главе 2.

1.5.2. Конвертация данных и их передача

Различные пакеты CAD используют разные алгоритмы для того, чтобы представить твердые предметы. Для того чтобы установить последовательность и единообразие, формат STL-файла был принят в качестве стандарта в индустрии БП. В STL-формате данные о трехмерном объекте и форме его трехмерной поверхности представляются как агрегат плоскостных треугольников и содержат координаты вершин и вектора нормали к их поверхности, направленные кнаружи для каждого треугольника. Так как STL-формат использует плоскостные элементы, он не может представить криволинейные поверхности точно. С увеличением числа треугольников улучшается точность воспроизведения, но при этом увеличивается размер файла данных. Большие сложные массивы данных требуют больше времени для предварительной обработки и построения, поэтому конструктор должен сбалансировать точность будущего изделия с управляемостью данных о нем, для того

чтобы STL-архив оставался работоспособным. Поскольку STL-формат общепризнан, процесс работы с ним идентичен для всех методов БП.

Конвертация данных и их передача в машинный блок установки для БП подразумевают также процесс *разделения на слои* STL-данных об изделии. На этом шаг предварительной подготовки STL-архива данных об трехмерном изделии должен быть представлен в виде отдельных слоев. Существует несколько программ, позволяющих потребителю отрегулировать размер, положение и ориентацию модели.

Ориентация при построении (выращивании) изделия важна по нескольким причинам. Во-первых, свойства прототипов могут изменяться от одного направления к другому. Например, обычно прототипы в вертикальном направлении *Z* менее точны и не так устойчивы, как в плоскости *X*–*Y*. Во-вторых, ориентация изделия часто обусловливает количество времени, необходимое для построения модели. Если рабочее пространство машины для БП достаточно для выращивания сразу нескольких изделий, разумно расположить их в камере для выращивания так, чтобы одновременно создать максимальное количество моделей. Устанавливая самый короткий размер в направлении *Z*, можно уменьшить число слоев и таким образом сократить время построения. Средства предпроцессингового программирования могут «нарезать» слои STL-модели толщиной от 0,01 до 0,7 мм в зависимости от метода построения. Программа может также воспроизвести *вспомогательную структуру*, для того чтобы поддержать модель во время ее выращивания. *Поддержки* полезны при наличии чувствительных к свисанию частей модели, внутренних полостей или тонкостенные разделов. Каждый производитель машин для БП считает своим долгом разработать и поставлять собственные средства программирования для предпроцессирования, что усложняет ход согласования данных, если возникает необходимость воссоздать (повторить) изделие на другой машине (в другом процессе БП).

1.5.3. Проверка и подготовка установки к работе

После запуска и подготовки машины БП к работе в ней надо установить параметры источника энергии. Следует также выбрать и загрузить исходный материал, предусмотреть связанные с ним условия работы (связи, допуски, поддержки), указать толщину слоя приращения, выбрать место изготовления в рабочей камере, установить времена задержки и пр.

1.5.4. Послойное построение изделия

На этом шаге будет фактически выращена конструкция изделия. Используя разные подходы (возможно, сразу несколько методик), машины БП слой за слоем строят (или удаляют!) изделие из полимеров, керамики, металла, бумаги, порошкового материала и т. п. Большинство машин могут работать практически автономно. Обычно это полностью автоматизированный процесс, идущий без вмешательства специалиста. Время от времени требуется мониторинг работы машины, чтобы гарантировать отсутствие ошибок при синтезе изделия, энергетических или программных сбоев.

1.5.5. Удаление поддержек и другие постпроцессы

После завершения синтеза деталь должна быть извлечена из рабочего объема установки. Возможно, это потребует осторожного понижения температуры в ней до температуры окружающей среды. Некоторым фоточувствительным материалам нужна полная дополнительная засветка готового изделия для окончательного его отверждения. Прототипы могут требовать также небольшой чистки, удаления поддержек и поверхностного покрытия. Зашкурить, герметизировать и/или покрасить

модель, чтобы улучшить ее потребительские свойства, — это традиционные постпроцессинговые операции.

Изделие готово к использованию. Возможно, потребуется операция сборки отдельно выращенных деталей.

На рис. 1.8 показана обобщенная управляющая программа работы с STL-файлом, где содержатся сведения обо всех сечениях данной модели, всех ее составных частях (здесь может быть использовано несколько файлов), допустимых отклонениях по уровню на один слой порошковой композиции при опускании платформы. В более совершенных версиях управляющих программ учитываются допуски, сводящие к минимуму деформацию (усадку) отдельных слоев, ступенчатость боковых граней изделия и т. д.

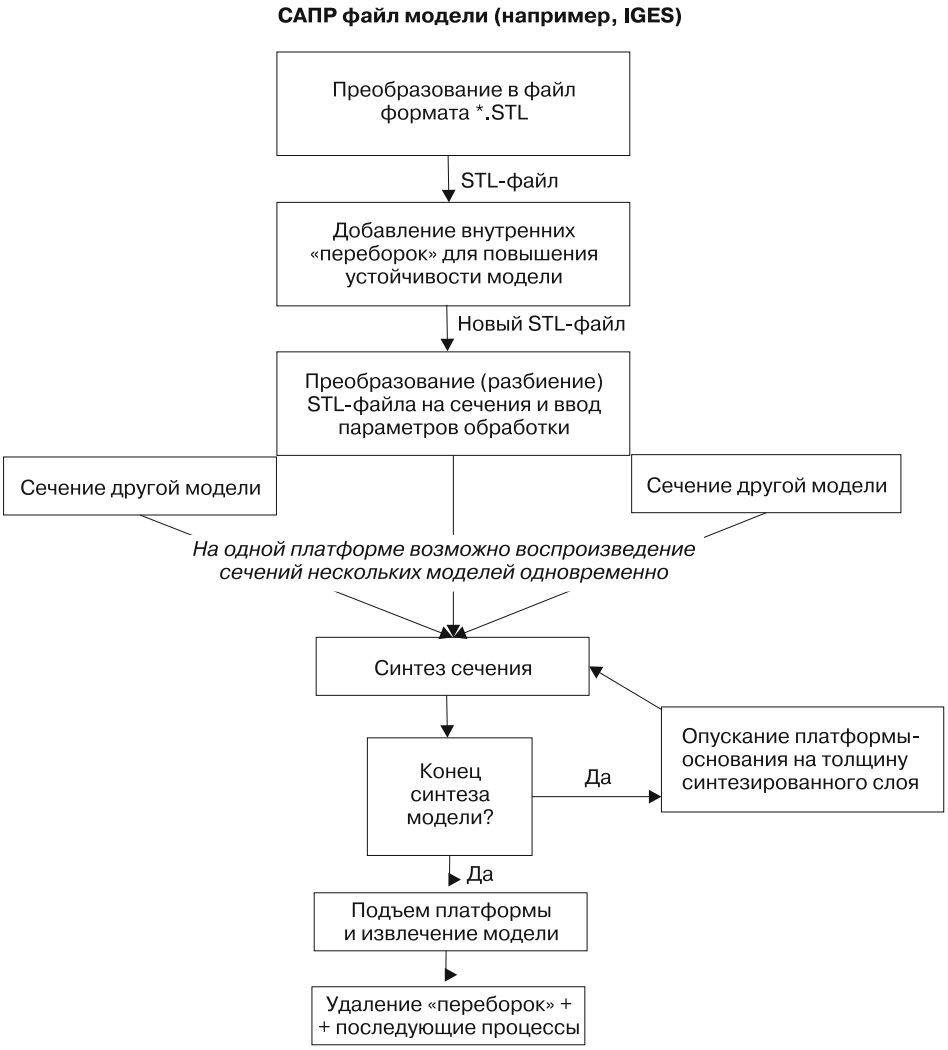


Рис. 1.8. Блок-схема управляющей программы обработки с STL-файлом

Как работает вся совокупность процессов, будет описано далее на примере экспериментального стенда для БП методом СЛС/П, созданного в Самарском филиале Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (СФ ФИАН) на базе лазерной технологической установки «Квант-60» (λ = 1,06 мкм) (рис. 1.9) [6]. За прошедшие годы экспериментальный стенд подвергался многократной модификации. Основными отличиями нашей реализации метода СЛС от послойного спекания на технологических установках Sinterstation (DTM Corp., Texas Austin, USA) или EOS Sinter (GMBH, Germany) являются отсутствие усилий при разравнивании порошковой композиции по спекаемой поверхности, а также использование длины волны ЛИ λ = 1,06 мкм. К чему приводит такая специфика, будет сказано в главе 5.

Рис. 1.9. Общий вид стенда для СЛС в СФ ФИАН

В состав стенда (рис. 1.10) входят технологический лазерный комплекс «Квант-60» (лазер на Nd^{+3}:YAG импульсно-периодического действия (позиции *7* и *8*), сопряженный с персональным компьютером *10* и работающий в нашем случае в непрерывном режиме) и устройство для спекания (рис. 1.11). В установке используются два сменных объектива с фокусными расстояниями f = 149 и 336 мм (диаметр пятна ЛИ $d_п$ = 50 и 100 мкм соответственно). Максимально достижимая мощность ЛИ не более P = 24 Вт контролируется на поверхности порошка с помощью приборов ИМО-2Н или ТИ-3. Управление лазерным пучком с помощью компьютера в рамках поля 50 × 50 и 100 × 100 мм (1024 × 1024 точки) позволяет осуществлять сканирование по любому наперед заданному контуру, воспроизводя тем самым послойно изделие произвольной конфигурации. Каждое сечение изделия предварительно, до лазерной обработки (ЛО), подготавливалось в памяти компьютера *10* с помощью специально разработанных программ, которые позволяют также оперативно изменять условия эксперимента (шаг по координатам X и Y, количество лазерных импульсов в точку, время перемещения луча из точки в точку, размер поля ЛО, смещение поля относительно нуля и т. д.). Общая продолжительность сканирования определяется временем перехода лазерного луча из точки в точку, успокоением отклоняющих лазерный пучок дефлекторов в каждой точке и может изменяться также аппаратно в широком диапазоне значений.

Последовательность операций по СЛС/П такова. Предварительно приготовленная порошковая смесь засыпается в бункер *9*, не имеющий дна *4*. Основанием для спекаемой модели является платформа *1*, которая в цилиндре *3* может перемещаться поршнем *2* по вертикали — оси Z с произвольным шагом. Перемещением бункера с порошком по направляющей *6* (ось X) осуществляется равномерное нанесение порошка на основание поршня *1* в плоскости *5*. Далее бункер уходит из зоны ЛО, в то время как цилиндр постоянно находится в этой зоне. Происходит сканирование — спекание (сплавление) сфокусированным ЛИ по подготовленному в компьютере контуру, этот контур последовательно заштриховывается.

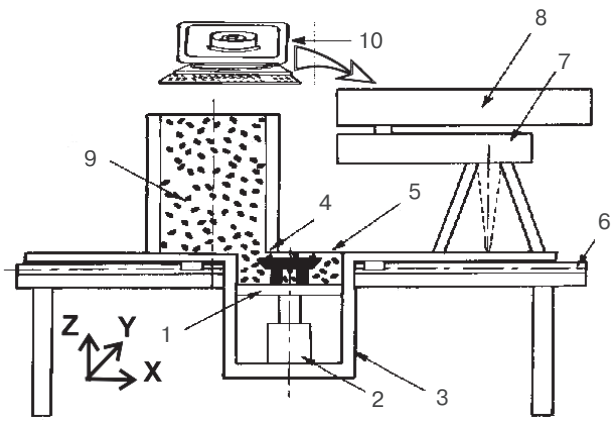


Рис. 1.10. Схема СЛС/П

Рис. 1.11. Платформа для спекания

При этом степень перекрытия лазерного пятна вдоль и поперек направления движения лазерного луча составляет 50% и также может изменяться нашей компьютерной программой. После обработки поршень в цилиндре опускается на высоту, сравнимую с толщиной спеченного слоя, и процесс повторяется. Таким образом, в первоначальной схеме реализуется полуавтоматический режим СЛС/П, при котором нанесение слоев порошка и перемещение поршня в вертикальной плоскости производятся вручную, а управление движением лазерного луча в горизонтальной плоскости — с помощью программного обеспечения.

1.6. Специфика работы на разных машинах БП

Разработчики систем БП в последнее время ориентируются на выпуск недорогих и быстродействующих машин, снижая стоимость и увеличивая объем рабочей камеры.

В соответствии с данными, приведенными в [2], в 2004 году было продано 2938 машин БП, а всего за время мониторинга данной технологии — 14 381 (данные 2005 года). В 2012 году количество проданных машин этого типа уже достигло 8000 единиц. При этом следует отметить, что бюджетные машины уверенно занимают лидирующие позиции (рис. 1.12). Эта тенденция сохраняется до сих пор.

Область применения БП определяется достижимой точностью изготовления детали и механическими свойствами используемого материала — растяжимостью, твердостью и прочностью на разрыв. Варианты применения можно разбить на три основные группы:

- прототипы для оценки проекта;
- прототипы для функциональной оценки;
- модели для дальнейшего производственного процесса.

В табл. 1.1 и 1.2 приведены сведения из интернет-источников (см., например, [1] и цитируемую там литературу), показывающие среднюю стоимость установок коммерчески успешных производителей. Указаны некоторые технологические особенности процессов (методик) послойного синтеза, а также приведена примерная стоимость используемых материалов.

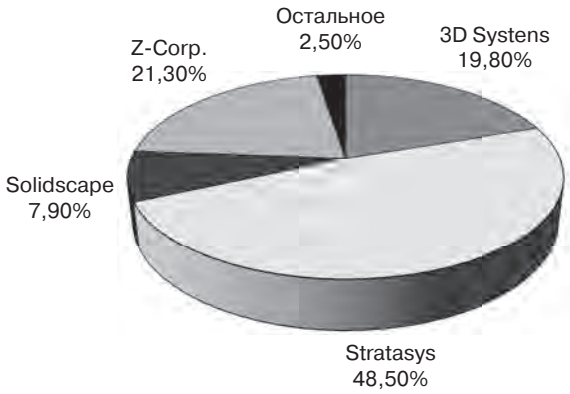


Рис. 1.12. Продажи мировыми производителями машин БП

Таблица 1.1. Сравнение методом АП по стоимости и времени создания изделия

Параметр	Методика				
	STL	SGC	SLS	FDM	LOM
Время подготовки	0 ч 34 мин	0 ч 21 мин	0 ч 35 мин	4 ч 20 мин	0 ч 46 мин
Стоимость подготовки, $	38,02	23,35	38,69	288,81	51,36
Время синтеза	5 ч 06 мин	10 ч 00 мин	3 ч 00 мин	8 ч 00 мин	9 ч 51 мин
Стоимость синтеза, $	28,77	10,05	31,99	39,11	22,49
Время на постоперации	1 ч 45 мин	1 ч 00 мин	1 ч 20 мин	0 ч 15 мин	0 ч 25 мин
Стоимость постопераций, $	38,50	22,00	29,26	5,50	9,24
Стоимость техобслуживания, $	24,66	1,88	27,40	7,54	22,49
Стоимость материала, $	4,00	31,43	5,89	4,00	3,82
Всего, $	133,94	88,7	199,23	344,94	109,40

Оценки показывают, что стоимость изготовления одного усредненного объемного изделия (детали) размером ~$4 \times 4 \times 8$ см^3 разными методами колеблется в пределах от $50 до $300 в зависимости от сложности контура внутренней и внешней поверхности изделия, количества требуемых изделий, используемого материала и типа установки. Приведенные в табл. 1.1 цифры получены в лаборатории фирмы Chrysler (USA, данные середины 1990-х годов). В методике SGC (послойное отверждение полимера УФ-лампой) предполагалось одновременное изготовление 35 деталей, остальные цифры приведены для одной детали. Заметим, что некоторые из стереолитографических установок в США не продаются из-за патентных проблем.

1.7. Повышение точности воспроизведения моделей и улучшение качества поверхности

Ступенчатость — один из типов неточности воспроизведения моделей или визуальный артефакт, который может быть зафиксирован после БП. Абсолютную точность можно определить как разницу между желаемым и фактическим размерами, определенную физическим измерением. Принимаются во внимание не только линейные

Таблица 1.2. Количественные характеристики наиболее успешных АТ

Параметр	Технология						
	Stereolithography	**Wide Area Inkjet**	**Selective Laser Sintering**	**Fused Deposition Modeling**	**Single Jet Inkjet**	**Three Dimensional Printing**	**Laminated Object Manufacturing**
Производитель	3D Systems			Stratasys	Solidscape	Z Corp.	Cubic Technologies
Основные свойства объемных изделий							
Рабочий объем, дюймов	20 × 20 × 24	10 × 8 × 8	15 × 13 × 18	24 × 20 × 24	12 × 6 × 9	20 × 24 × 16	32 × 22 × 20
Скорость	Средняя	Хорошая	Средняя	Плохая	Плохая	Отличная	Хорошая
Точность	Очень хорошая	Хорошая	Хорошая	Плохая	Отличная	Плохая	Плохая
Чистота поверхности	Очень хорошая	Плохая	Плохая	Плохая	Отличная	Плохая	Плохая (зависит от приложения)
Преимущества	Лидер рынка, большие размеры деталей, точность, широкий ряд продуктов	Лидер рынка	Лидер рынка, точность, широкий ряд материалов	Хорошая цена, широкий ряд материалов	Точность, хорошее качество поверхности	Высокая скорость, цветность изделия, бюджетная цена	Большие размеры деталей, литьевые формы, низкая стоимость материала
Недостатки	Требует постобработки, химическая опасность	Маленькие размеры и вес, хрупкость, неуд. чистота поверхности	Маленькие размеры, большая стоимость системы, шероховатая поверхность	Низкая скорость и точность	Низкая скорость, ограничения материалов и размеров	Ограничения материалов, хрупкость, неуд. чистота поверхности	Низкая точность, отходы, неуд. чистота поверхности
Стоимость установки	$(75–800)K*	~$50K	$(300–700)K	$(30...300)K	$(70...80)K	$(30...70)K	$(120...240)K
Стоимость материала, $/фунт							
Полимеры	$75...110	$100	$30...60	$115...185	$100	—	$9
Металл	—	—	$25...30	—	—	—	—
Другие	—	—	$5 (речной песок)	—	—	Крахмал: $0,35 (пластизоль: $0,60) + инфильтрация	$5...8 (бумага)

* Здесь буква «К» означает тысячи долларов.

размеры, но и такие характеристики, как плоскостность, степень кривизны, шероховатость. Лишь в ограниченном числе приложений абсолютная точность не очень важна, но в большинстве областей это насущная проблема. Был проведен целый ряд исследований, чтобы сравнить методики БП друг с другом и существующими стандартами. Разрабатываются программные решения для учета допусков и ошибок построения. Сейчас можно утверждать, что пока для многих технологий БП допуски все еще находятся на уровне характерных для машин с ЧПУ. При этом нельзя сказать с определенностью, что один метод БП точнее, чем другие, так как в любом методе всегда используется некоторый допуск. Если при обработке изделия на станке с ЧПУ положение режущего инструмента можно легко и точно определить как контрольную точку, от которой выполняются действия по устранению дефектов поверхности, то в БП такое позиционирование не всегда соответствует действительности.

Возьмем, например, процесс лазерной стереолитографии, в котором при позиционировании лазерного пятна определяется место, где идет сложная химическая реакция отверждения полимера. Однако оптическое рассеяние ЛИ в жидкой и твердой фазах, процессы усадки полимера при отверждении могут существенно скорректировать эту позицию и вызвать ошибку. Поэтому неудивительно, что некоторые методики БП, например Sanders Design International и Solidscape (методики Rapid ToolMaker и ModelMaker (MM)), дополняются возможностями субтрактивных подходов для послойного удаления неточностей. Уступая в скорости изготовления операциям, выполняемым на станках с ЧПУ, и делая процесс комплексным и многоступенчатым, они все же обеспечивают точность, сравнимую с получаемой на станках.

1.8. Тесты производительности и контроля

Обычно сравнение методик БП проводят, взяв за отправную точку возможности стереолитографии. Она дает точность ~100 мкм (0,004 дюйма) при размерах детали до 15 см. Порошковые методики и LOM обычно имеют точность меньше указанной. В струйных методиках БП ситуация на порядок лучше. Но тут важно знать не только геометрию изделия (его размеры), но и используемый материал, а также метод оценки точности и производительности.

В табл. 1.3 представлены данные, полученные НАСА (опубликованы NASA's Marshall Space Flight Center, авторы — K. Cooper, G. Williams, P. Salvail). Исследо-

Таблица 1.3. Сравнение методик БП по времени и стоимости

Параметр	Технология					
	MJM	**FDM**	**3DP**	**SLS**	**LOM**	**SLA**
Материал	Воск	АБС-пластик	Гипс	Полистирол	Бумага	Эпоксидный фотополимер
Точность в сравнении с CAD, дюймов	0,013	0,014	0,025	0,018	0,010	0,006
Время синтеза	7 ч 17 мин	42 ч 10 мин	5 ч 40 мин	6 ч 51 мин	19 ч 39 мин	26 ч 19 мин
Стоимость клапана, $	146,0	421,6	113,2	268,0	393,2	789,9

ватели взялись изготовить разными методиками перепускной клапан диаметром 15 см. Закономерность очевидна: увеличение точности воспроизведения приводит к увеличению стоимости и времени изготовления.

1.9. Сравнительная оценка машин и технологий АП

В табл. 1.4 проиллюстрировано сравнение по времени, точности и размерам рабочих камер для изготовления изделий размером 0,76...14 см различными методами БП.

Таблица 1.4. Сравнение методик АП по времени и точности воспроизведения

Методика*	Точность, мм	Максимальный размер изделия, мм**	Время процесса
Заливка экструдируемым расплавом (FDM)	0,005	254 × 254 × 254 (Stratasys)	12 ч 39 мин
Процесс листового ламинирования (LOM)	0,010	812 × 558 × 508 (Cubic Technologies)	11 ч 02 мин
Селективное лазерное спекание (SLS)	0,005	381 × 330 × 457 (3D Systems)	4 ч 55 мин
Процесс отверждения на основании (SGC)	0,006	508 × 355 × 508 (Cubital)	11 ч 21 мин
Стереолитография (SLA)	0,003	990 × 787 × 508 (Sony)	7 ч 03 мин
3D-печать (RepRap)	0,100	240 × 240 × 240 (Fab@ Home)	Не определено

* В скобках приводится английское сокращение.

** В скобках указан производитель.

Сравнение процессов БП обычно производят по следующим критериям.

- **Размер детали.** Габариты детали, которую может построить система прототипирования, ограничена размерами «строительной камеры». В зависимости от типа машины, ее модификации и метода синтеза размеры моделей варьируют от 8 × 8 × 8 до 32 × 22 × 20 дюймов. Очевидно, что большие детали могут быть изготовлены по частям и затем собраны в одну деталь.
- **Скорость.** Скорость построения модели зависит от таких факторов, как размер детали, геометрическая сложность, используемые материалы, программное обеспечение и др.
- **Материалы.** На рынке предлагается целый спектр материалов для прототипов, различающихся по степени прочности и качеству образуемой поверхности. В зависимости от процесса в модельном прототипировании используются следующие материалы: полистирол, термопластик, бумага, акрил, поликарбонат, нейлон, ABS, синтетические смолы и др.
- **Точность.** Точность прототипа (степень соответствия CAD-модели) зависит от ряда факторов:
  - правильности построения CAD-файлов;
  - продуманной системы поддержек;
  - разрешения (толщины слоев);
  - выбора методики синтеза;
  - свойств исходного материала.

Смолы, например, имеют свойство коробиться или усаживаться при высыхании. Другие материалы не обеспечивают качества поверхности модели, достаточного для дальнейшего ее использования (при изготовлении литьевых форм), или достаточной прочности.

- **Стоимость.** Из табл. 1.2 видно, что стоимость некоторых установок довольно высока. Однако они за короткое время окупаются, так как функциональность изготавливаемых прототипов велика.

Совокупную картину основных методик БП дает табл. 1.5.

Таблица 1.5. Сравнение систем БП

Параметр	Методика				
	CNC/ЧПУ	**FDM**	**3DP**	**SLS**	**SLA**
Относительная стоимость	$$$$$	$$$	$$	$$$	$$$
Точность	З*	Х	У	Х	З
Воспроизводимость тонких деталей	О	Х	У	О	З
Выбор материалов	З	О	У	О	Х
Модели для презентаций	З	У	У	У	З
Мастер-формы	З	Х	П	У	З
Direct Tooling Capability	З	У	П	Х	О
Медицинские приложения (CT Data)	П	Х	У	Х	О
Скорость процесса	Х	О	О	О	О

* Здесь **З** — здорово; **О** — очень хорошо; **Х** — хорошо; **У** — удовлетворительно; **П** — плохо.

Большинство систем БП позволяет использовать множество материалов. Рейтинговое сравнение свойств материалов для основных методов БП дано в табл. 1.6 (чем меньше число, тем больше рейтинг).

Таблица 1.6. Сравнение свойств материалов изделий, выполненных методами БП

Точность	PJET	ZCorp	FDM	SLA	SLS
	1.00	1.00	1.00	1.13	2.00
Детализация	PJET	SLA	ZCorp	FDM	SLS
	1.00	1.00	2.00	2.40	3.00
Прочность	SLS	FDM	PJET	SLA	ZCorp
	1.00	1.33	2.33	2.50	3.00
Гладкость поверхности	PJET	SLA	ZCorp	FDM	SLS
	1.00	1.00	2.00	3.00	3.00
Функциональность	FDM	SLS	PJET	SLA	ZCorp
	1.00	1.00	1.67	1.88	3.00

Прозрачность	PJET Yes	SLA Yes	FDM Yes	SLS No	ZCorp No
Гибкость материала	PJET Yes	SLA Partial	FDM No	SLS No	ZCorp No
Цветность	FDM Yes	ZCorp Yes	PJET Yes	SLA No	SLS No
Многоцветность в одном изделии	ZCorp Yes	FDM No	PJET No	SLA No	SLS No

Условные обозначения:

SLA	Стереолитография	ZCorp	3D-печать (Z Corp)
SLS	Селективное лазерное спекание	PJET	Многосопловая 3D-печать (Polyjet)
FDM	Заливка экструдируемым расплавом		

На рис. 1.13 представлены довольно показательные данные о том, как соотносятся физико-механические свойства *функциональных изделий* — шероховатость поверхности и прочность — с производительностью процесса (то есть скоростью роста изделия) и затратами на оборудование соответственно.

Электронное (EBM, подробнее о нем поговорим в разделе 5.8.3) и лазерное плавление (DMLS — разделы 5.8.2, 5.8.4, 5.8.5) позволяют создавать относительно небольшие изделия (см. рис. 1.13, *а*) с низкой шероховатостью, но производительность этих процессов мала. Производительность прямого лазерного нанесения металла (DMD-процесс — раздел 5.9.2) и электронно-лучевой наплавки проволоки (EBF3-EBDM-процесс — раздел 5.9.5) более высокая, они позволяют создавать большие изделия, однако качество поверхности крайне неудовлетворительное, то есть требуется дополнительная механическая отработка. Из анализа рис. 1.13, *б* следует, что технологии SLA и 3D Printing пригодны практически только для модельного дела (прочность изделий, производимых с их использованием, мала), а другая группа АТ, в которую входят DMLS-, DMD- EBM-, EBF3-, SLS- и FDM-процессы, позволяет создавать функциональные изделия. При этом капитальные затраты минимальны для FDM-процесса, удовлетворительны для SLA-, 3D Printing- и SLS-процессов и очень высоки для всех остальных. Максимально достижимые размеры получаемых изделий будут у DMD- и EBF3-процессов. FDM-процесс при относительно хорошей прочности и малых капитальных затратах наиболее рентабелен, и поэтому в мире наблюдается небывалый рост потребителей данной АТ.

Далее в книге будут последовательно представлены основные методики АП и их приложения. Будут показаны пути ускорения и улучшения качества процессов АП. Изначально АП создавалось исключительно для визуализации моделей изделий. Широко известно, что модели помогают лучше, чем рисунки, понять замыслы конструктора и его концепции. Хотя рисунки и чертежи в наш век компьютеризации создаются довольно быстро и легко, модели в любом случае требуются для

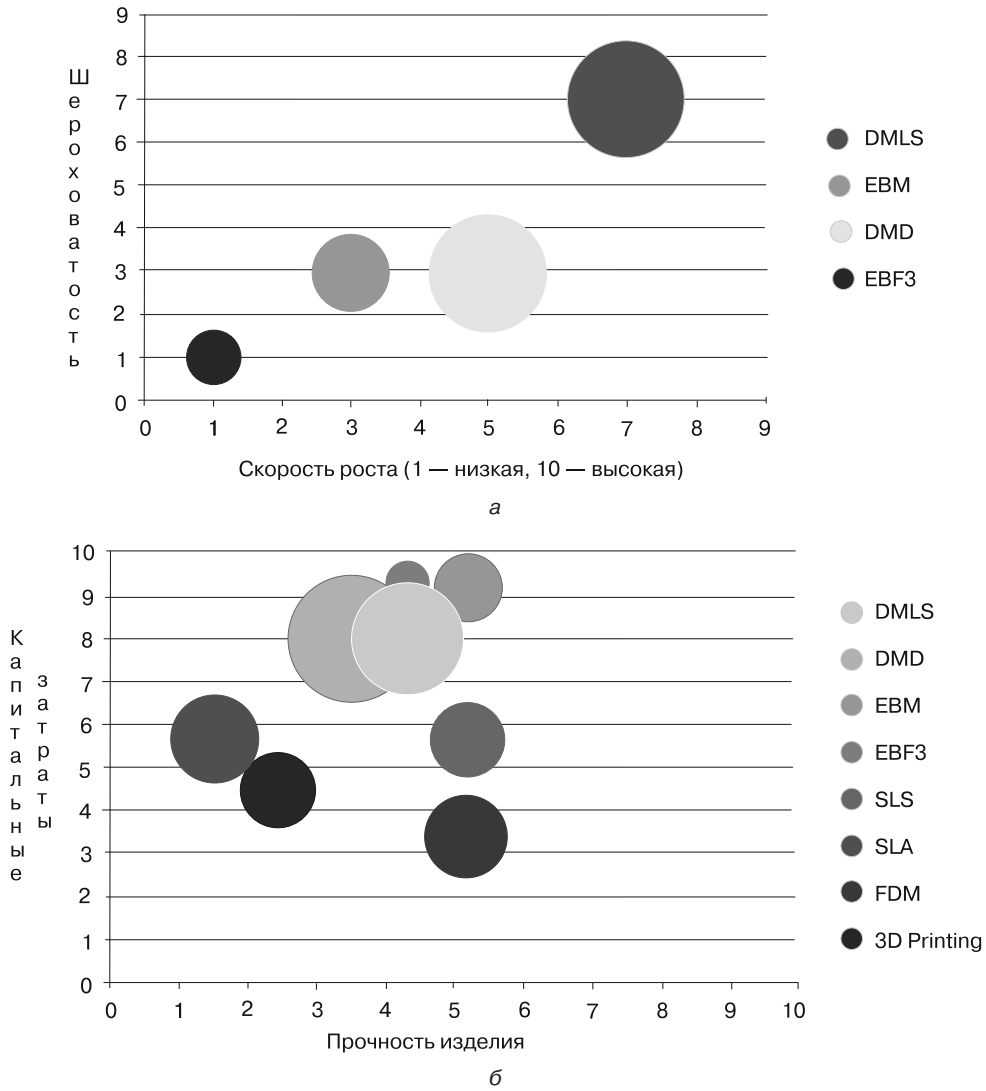


Рис. 1.13. Влияние: *а* — скорости роста изделия на шероховатость поверхности; *б* — капитальных затрат на установку на прочность изделия (размер шаров показывает, как соотносятся размеры изделий в АТ)

утверждения конструкции. Изначально создаваемое для модельных приложений АП совершенствовало материалы, точность воспроизведения и качество изделий. Три «Ф» — **ф**орма, **ф**асон, **ф**ункциональность — являются определяющими в модельном деле. Однако со временем функции моделей стали расширяться. АП стало связующим звеном в технологическом процессе изготовления деталей, значительно сокращая время и стоимость производства.

И все же магистральным направлением использования технологии АП пока остается изготовление моделей для литья [10]. В этом случае литейная модель и стерж-

ни изготавливаются системой АП и используются так же, как и деревянные модели и обычные стержни. Модели могут также использоваться для копирования. Еще одно важное применение прототипов — нанесение покрытий. В частности, приобретает популярность изготовление катодов для процедур электроэрозионной обработки путем нанесения покрытия на медные детали.

Таким образом, изложенные в настоящей главе основы АТ БП показывают современное состояние дел в технологиях АП. Причем тенденции развития современного производства таковы, что речь идет о стремлении к созданию как высокоточных копий (моделей) деталей машин, которые также важны и используются в технологиях литья по выплавляемым формам, так и *функциональных* (*функционально-градиентных*) *изделий* либо принципиально новых объектов человеческой жизнедеятельности [11].

Результаты исследований, описанные в данной монографии, могут быть использованы в медицине, фармакологии, нефте- и газохимии, электротехнике, а также в автомобильной, авиационной и других отраслях точного машиностроения. Другими словами, область применения АТ охватывает любую отрасль промышленности, где существуют задачи моделирования и АП функциональных единичных изделий сложной формы с уникальными физическими, химическими и/или биологическими свойствами (фильтрующие элементы, каталитические, мембранные вставки, имплантаты, сенсоры, микронасосы и пр.).

1.10. Дорожная карта развития аддитивных технологий

В последнее время стало модным составление дорожных карт развития той или иной технологии. В 2009 году в честь 20-летнего юбилея SolidFreeForm Fabrication Symposium отец-основатель симпозиума профессор D. Bourell и другие исследователи [12] опросили около 60 признанных экспертов, чтобы наметить перспективные пути развития АТ на ближайшее десятилетие и обозначить существующие проблемы (об этом говорилось также в разделе 1.2). Вот некоторые из приоритетных направлений, которые были ими отмечены:

В области моделирования процесса и его контроля актуальны:

- разработка многомасштабной системы моделирования «процесс—структура—свойства», интегрированной с инструментами CAD/CAE/CAM;
- создание систем с обратной связью, адаптивного управления с возможностями упреждения и отклика для процессов АТ. Алгоритмы системы управления должны базироваться на прогнозирующих моделях реакции системы и вариации процессов;
- создание новых сенсоров для диагностики процессов в камере синтеза и разработка (совершенствование) новых методов обработки информации при диагностике.

В области установок и превращения в материалах:

- развитие понимания физики процессов АТ для охвата всей совокупности явлений;
- создание масштабируемых скоростных методов линейных и угловых перемещений в процессах обработки материалов с целью увеличения производительности и рабочих объемов машин АП;
- использование уникальных возможностей АТ для создания эпитаксиальных металлических структур, уникальных структур (например, с отрицательным

коэффициентом термического расширения, метаматериалов), многоматериальных и/или функционально-градиентных структур (изделий), возможности врезки готовых (например, датчики, сенсоры) компонентов во время процесса изготовления изделия;

- получение ответов на вопросы, почему некоторые материалы можно, а некоторые нельзя использовать в АП;
- развитие инструментария для изготовления методами АТ структур на уровне «атом за атомом» и конструирования аддитивных нанофабрикаторов;
- определение («зеленых», то есть экологичных) материалов, включая многоразовые, пригодные для переработки и биодеградируемые материалы.

В области биомедицинских приложений:

- конструкции и методы моделирования имплантатов под заказчика;
- создание биотканевых клеточных каркасов (матриксов) для конструкции 3D-биологических моделей живой ткани;
- САПР для моделирования, анализа и имитации реакции и роста клеток в биоматриксах, созданных послойно методами АТ.

В области образования:

- совершенствование учебных программ для старшекурсников по АТ, материалам и оборудованию;
- развитие программы тренировки и аттестации для практикующих врачей, которые используют АТ в медицинской практике.

В области развития сообщества АТ:

- уменьшение стоимости оборудования, материалов и сервисного обслуживания машин АП для увеличения их доступности по отношению к обычным методам изготовления;
- введение международных стандартов аттестации продуктов АТ, процесса и материалов.

В области «национальный тестовый центр по АТ»[1] — создание в США национального центра и испытательных стендов с распространенными машинами АТ и экспертами для распространения этого оборудования и подготовки кадровых ресурсов в промышленности и подготовки платформы будущих исследований.

[1] В 2012 году в США создан научно-инновационный институт NAMII (Ohio, USA) по аддитивным технологиям (National Additive Manufacturing Innovation Institute).

Глава 2
САПР и форматы представления данных для БП

2.1. CAD/CAM/CAE для систем БП

Создание деталей машин методами БП начинается с их проектирования. Автоматизация процесса проектирования осуществляется путем развития САПР. Этот термин иногда заменяют английским эквивалентом — *Computer Aided Design System* (CAD System). Однако в САПР машиностроительных отраслей промышленности принято выделять системы функционального, конструкторского и технологического проектирования. Первые из них называют *системами расчетов и инженерного анализа*, или системами *CAE* (Computer Aided Engineering). А вот собственно *системы конструкторского проектирования* следует называть уже *CAD*-(Computer Aided Design) системами. Проектирование же технологических процессов составляет часть технологической подготовки производства и выполняется в *CAM*-(Computer Aided Manufacturing) системах.

Информационная поддержка этапа производства продукции осуществляется *автоматизированными системами управления предприятием* (АСУП). К АСУП относятся системы планирования и управления предприятием — *ERP* (Enterprise Resource Planning). Для решения проблем совместного функционирования компонентов САПР различного назначения, координации работы систем CAE/CAD/CAM, управления проектными данными и проектированием разрабатываются системы, получившие название *систем управления проектными данными — PDM* (Product Data Management). Системы PDM либо входят в состав модулей конкретной САПР, либо имеют самостоятельное значение и могут работать совместно с разными САПР.

Для обеспечения согласованной работы всей цепочки предприятий, участвующих в проектировании, производстве, реализации и эксплуатации сложной техники, используется соответствующая информационная поддержка этапов жизненного цикла промышленных изделий (рис. 2.1) [1]. Такая поддержка получила за рубежом название *CALS* (Continuous Acquisition and Lifecycle Support — компьютерное сопровождение и поддержка жизненного цикла изделий).

CALS-технология — это технология комплексной компьютеризации сфер промышленного производства. Комплексность обеспечивается унификацией и стандартизацией спецификаций промышленных изделий на всех этапах жизненного цикла. Основные спецификации представлены проектной, технологической, производственной, маркетинговой и эксплуатационной документацией. В CALS-системах предусмотрены хранение, обработка и передача информации в компьютерных средах, оперативный доступ к данным в нужное время и в нужном месте. Облачные технологии хранения и обработки данных позволяют со временем перейти

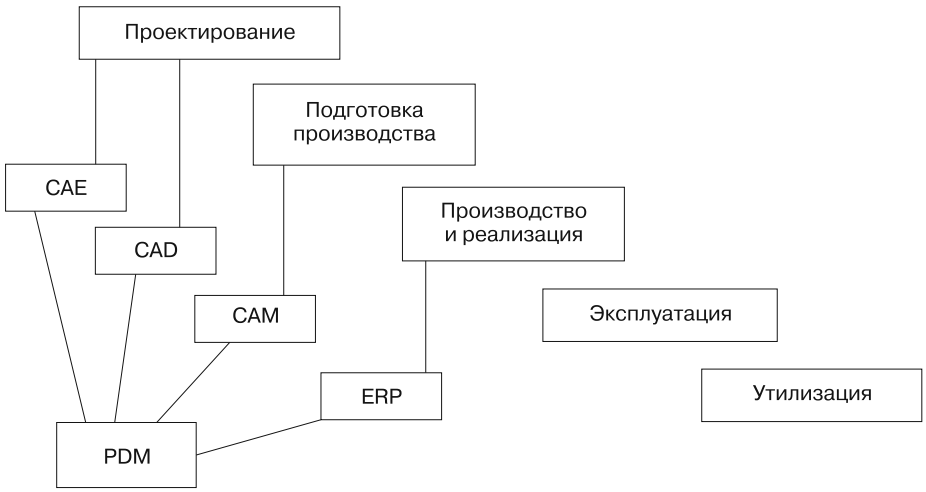


Рис. 2.1. Совокупность этапов жизненного цикла промышленных изделий и системы их автоматизации

к «облачному» производству. Формируется новый уклад в разделении труда, когда массовое производство приобретает кастомизированный характер, управление предприятием унифицируется с управлением корпорацией, происходит переход к управлению жизненным циклом изделий — объектов — систем — предприятий. CALS-технологии зародились в 1980-х годах в недрах военно-промышленного комплекса США. В 1990-х годах был разработан и к настоящему времени принят ряд серий международных стандартов, представляющих CALS-технологии, среди которых наиболее известен стандарт ISO 10303 STEP (Standard for Exchange of Product data).

Основная задача внедрения и освоения CALS-технологий — обеспечение единообразных описаний и интерпретации данных независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных. Структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки ее представления должны быть стандартизованными. Тогда становится реальной успешная работа над общим проектом разных коллективов, разделенных во времени и пространстве и применяющих разные системы CAD/CAM/CAE. Таким образом, CALS-технологии не отвергают существующие автоматизированные системы проектирования и управления, а являются средством их эффективного взаимодействия. CALS-технология отличается от традиционной технологии следующими особенностями.

1. На всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) изделия создается электронная документация.
2. Для всех этапов ЖЦ создается и используется единая обобщенная модель изделия.
3. Разрабатываются и используются международные стандарты на форматы и структуры данных по обмену информацией об изделии.
4. Поддерживается параллельная и территориально распределенная работа над создаваемым изделием.

В настоящее время интерактивные системы используются на всех этапах ЖЦ промышленного продукта. Таким образом, например, при решении расчетных задач используются CAE-системы, при проектировании — CAD-системы, при технологической подготовке производства и изготовлении — CAM-системы. Системы ERP и PDM применяются при управлении ресурсами предприятия и данными на всех этапах жизненного цикла промышленного продукта.

Классифицируют САПР также по ряду признаков, например по приложению, целевому назначению, функциональной полноте, характеру базовой подсистемы — ядра САПР.

По приложениям наиболее представительными и широко используемыми являются следующие группы САПР.

1. САПР для применения в отраслях общего машиностроения. Их часто называют машиностроительными САПР, или MCAD-(Mechanical CAD) системами.
2. САПР для радиоэлектроники: системы ECAD (Electronic CAD) или EDA (Electronic Design Automation).
3. САПР в области архитектуры и строительства.

Кроме того, известно большое число специализированных САПР, или выделяемых в указанных группах, или представляющих собой самостоятельную ветвь в классификации. Примерами таких систем являются САПР больших интегральных схем (БИС), САПР летательных аппаратов, САПР электрических машин и т. п.

По функциональной полноте условно различают САПР трех уровней.

- К нижнему уровню относятся программы, реализующие 2D-модели в виде чертежей и эскизов, например пакеты российских разработчиков БАЗИС-Конструктор 4.5 («Базис»), Графика-81 (Институт проблем управления), SprutCAD («СПРУТ-Технологии»), чертежно-графический редактор АРМ Graph (НИЦ АПМ), CADMECH и CADMECH-LT на базе AutoCAD и AutoCAD LT 2000 («Интермех»), T-Flex CAD LT («Топ Системы»), КОМПАС-ГРАФИК («Аскон»), АДЕМ (Omega Technologies) и др.
- На среднем уровне располагаются программные комплексы, которые позволяют создавать трехмерную геометрическую модель сравнительно несложного изделия в основном методом твердотельного моделирования. К числу этих программных комплексов можно отнести AutoCAD 2000 и AutoCAD Mechanical Desktop (Autodesk), Solid Works (Dassault Systems, Франция), Solid Edge (Unigraphics Solutions, США), PowerSHAPE (Delcam), Prelude Design (Matra Datavision, Франция), MicroStation (Bentley Systems), T-Flex CAD 3D («Топ Системы») и др.
- На верхнем уровне находятся наиболее мощные программные системы сквозного проектирования и производства. Среди них можно выделить: CATIA5 (Dassault Systemes), EUCLID3 (EADS Matra Datavision), UNIGRAPHICS (Unigraphics Solutions), Pro/ENGINEER и CADDS5 (PTC, США).

По характеру базовой подсистемы различают следующие разновидности САПР.

- САПР на базе подсистемы машинной графики и геометрического моделирования. Эти САПР ориентированы на приложения, где основной процедурой проектирования является конструирование, то есть определение пространственных форм и взаимного расположения объектов. Поэтому к этой группе систем относится большинство САПР в области машиностроения, построенных на базе графических ядер. В настоящее время широко используются унифицированные графические ядра, применяемые более чем в одной САПР, — это ядра Parasolid фирмы EDS Unigraphics и ACIS фирмы Intergraph.

- САПР на базе СУБД. Они ориентированы на приложения, в которых при сравнительно несложных математических расчетах перерабатывается большой объем данных. Такие САПР встречаются преимущественно в технико-экономических приложениях, например при проектировании бизнес-планов, но используются также при проектировании объектов, подобных щитам управления в системах автоматики.
- САПР на базе конкретного прикладного пакета. Фактически это автономно используемые программно-методические комплексы, например имитационного моделирования производственных процессов, расчета прочности по методу конечных элементов, синтеза и анализа систем автоматического управления и т. п. Часто такие САПР относят к системам CAE. Примерами могут служить программы логического проектирования на базе языка VHDL, математические пакеты типа MathCAD.
- Комплексные (интегрированные) САПР, состоящие из совокупности подсистем предыдущих видов. Характерными примерами комплексных САПР являются CAE/CAD/CAM-системы в машиностроении или САПР БИС. Для управления столь сложными системами применяют специализированные системные среды.

Ведущими CAE-производителями традиционно считаются компании Ansys Inc., Comsol, MSC и ряд менее известных. CAE-компании достигли высот и завоевали свои сегменты рынка независимо от успехов и неудач графических САПР-вендоров.

Так, компания ANSYS (SAS Inc.) со своими флагманскими продуктами ANSYS MultiPhysics, ANSYS Workbench после слияния и консолидации с FLUENT и CFD (пакеты для моделирования потоков жидкости, тепла, переноса реакций) достигла небывалых для софта по конечно-элементному моделированию (КЭМ) высот и фактически является эталоном CAE-систем. Платформа ANSYS Workbench поддерживает интеграцию с многочисленными CAD-системами, осуществляет модификацию и создание (ручное и автоматическое) геометрических моделей и сеток, параметрический анализ, оптимизацию и системное моделирование. Реализуется поддержка многопотоковых вычислений на суперкомпьютерах (High-Performance Computing (HPC)). Мультидисциплинарное моделирование — одна из сильнейших сторон продуктов ANSYS.

Программный пакет Comsol AB (Sweden) также активно развивается в сегменте CAE-систем и анонсировал свою мультифизичность практически с момента основания (FemLab Co.). Уникальной особенностью пакета Comsol является возможность постановки задачи в общем виде (Global Definition).

Компания MSC — еще одна из старейших на рынке CAE, начинавшая с известнейшего пакета NASTRAN. Мультифизичность также активно пропагандируется этой компанией, ее пакеты MSC Nastran — Marc — Fatigue (деформации, усталость материалов), Adams (системы твердых тел), Dytran (взаимодействие жидкостей и твердых тел), Patran (моделирование и генерация сеток) и другие хорошо известны пользователям.

Российские CAD/CAE-производители также существуют и частично уже названы. Здесь следует упомянуть группу компаний «АСКОН», доля которой на рынке CAD составляет до 20%, с такими пакетами, как Компас-Графика, Компас 3D с геометрическим ядром C3D. В последних версиях этого софта уже есть понятие о ЖЦ изделия, об аддитивных технологиях (есть STL-конвертор). Другой российский производитель, «Топ-Системы», выпустил T-FLEX 2D & 3D с ядром Parasolid. Важным его преимуществом следует отметить интеграцию российской системы стандартов в своей базе знаний.

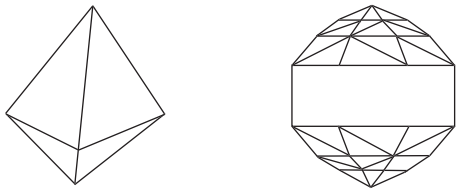
Однако современные тенденции в области CAD/CAE/CAM требуют развития новых подходов и решений. Многоуровневое моделирование и вычисления становятся насущной потребностью. Даже использование неструктурированных сеток в конечно-элементном анализе и применение HPC не позволяют эффективно моделировать материалы со сложной структурой в различных масштабах, например наноматериалы, биоматериалы, композиты и пр. Пространственный и временной масштаб модели, перенос расчетных данных между различными уровнями (шкалами) разрешения, возможности распараллеливания вычислений, понижение размерности без утраты физического смысла и т. п. еще ждут своего решения и развития. Не менее актуальна интеграция КЭМ с биологическими системами (например, биоимплантатами, искусственными органами), где требуется учет изменения (отклик) живой системы в процессе их создания и функционирования.

2.2. STL-формат данных для БП

Изготовление любого трехмерного изделия начинается с прорисовки конструктором его внешней и внутренней формы с точным указанием всех типоразмеров в натуральную величину в среде упомянутых ранее графических САПР. Не следует забывать и о более простом, но более дорогом с практической точки зрения способе — трехмерном сканировании поверхности (см. главу 10). В обоих случаях результатом работы оказывается файл, содержащий всю информацию об объекте в цифровом формате. Поскольку каждому графическому САПР присущ свой формат представления данных (например, *.3ds, *.igs, *.dxf, *.wrl, *.SAT), российскому потребителю технологий БП приходится использовать условно-бесплатное программное обеспечение (freeware, shareware), позволяющее преобразовать информацию из одного графического формата в другой.

Для того чтобы облегчить работу конструкторов-проектировщиков, в самой технологии БП был создан специальный стандарт представления данных об объекте. Формат STL (от Stereo Lithography) файла первоначально был разработан для процесса лазерной стереолитографии, но впоследствии взят за основу для других процессов послойного синтеза [2]. Формат STL и его спецификации были созданы компанией Albert Consulting group, которая занималась разработкой первого алгоритма послойной обработки по заказу компании 3D Systems. Для всех послойных систем необходимо, чтобы 3D-модель была «нарезана» горизонтальными слоями, чтобы затем можно было воспроизвести ее геометрию в виде физической модели слой за слоем. В настоящее время этот алгоритм является общепринятым графическим стандартом представления данных о модели для всех систем БП. Широкие возможности по его сжатию (архивации) и передаче через Интернет позволяют организовать процесс создания изделия оптимально и мобильно [3].

В основе компьютерного описания STL-формата, как, впрочем, и некоторых других, лежит метод трехмерной триангуляции поверхности модели. Простейшая трехмерная триангуляция поверхности изделия осуществляется треугольниками и может быть сглажена геометрическими фигурами более высокого порядка (рис. 2.2), за счет чего достигаются высокая точность и воспроизводимость синтезируемой поверхности. Поверхностные треугольники определяются (нумеруются) с учетом направления узлов (вершин треугольников) по часовой стрелке (рис. 2.3), а также с учетом подобных узлов в вершинах треугольников. При отсутствии перекрытия, очевидно, модель будет иметь промежутки, а неточное совпадение узлов означает ошибку триангуляции. Вектор нормали указывает наружу (см. рис. 2.3, *справа*).



Грубое сглаживание сферы

Тонкое сглаживание сферы

Рис. 2.2. Триангуляция сферы

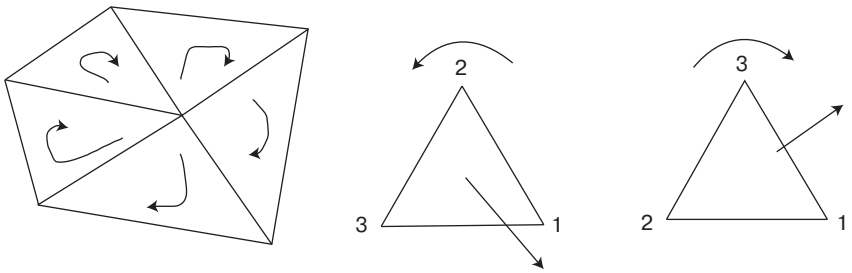


Рис. 2.3. Правила обхода вершин треугольников на поверхности 3D-объектов и направление нормали ячейки в формате STL

Таким образом, каждый треугольник (фасет) описывается четырьмя наборами данных: координатами *XYZ* каждой из трех вершин и нормальным вектором, который описывает ориентацию фасета, указывая, как и в других форматах, направление наружу модели. В спецификации к файлу специально оговаривается, что все координаты вершин фасетов в пределах системы должны принадлежать положительному октанту. Проще говоря, координаты вершин не могут находиться в пространстве отрицательных значений и все значения координат *X*, *Y* и *Z* каждого фасета должны быть положительными. Кроме того, каждый фасет должен иметь по две общие вершины с каждым из соседних фасетов. Это необходимо, чтобы обеспечить создание герметичной модели без щелей и зазоров.

STL-файл может быть представлен в ASCII-формате или бинарном формате, при этом текстовая и бинарная версии STL-файла совместимы не полностью. Бинарная версия содержит дополнительную информацию об атрибутах. Формат ASCII предназначен для целей отладки и тестирования. Необходимо также отметить, что некоторые производители оборудования для БП вводят собственные расширения STL-формата для передачи информации о цвете. Например, компания Z Corporation в своих машинах Z406 и новых установках Z510 использует расширение STL-формата, в котором информация о цвете каждого треугольника сохраняется с помощью цветовой схемы RGB (Red — Green — Blue).

К преимуществам формата STL можно отнести следующее.

- Структура STL-файла очень проста, поскольку он содержит только список плоских треугольников. Трехмерную модель можно преобразовать в формат STL с помощью стандартных алгоритмов плоской триангуляции. Точностью выходных данных можно легко управлять, и возникающие вырождения минимальны.

- Любая форма трехмерной геометрии может быть преобразована в триангулированную модель ввиду широкой применимости существующих алгоритмов поверхностной триангуляции.
- Если рабочее пространство машины для БП мало по сравнению с размером модели, STL-файл модели можно разбить на несколько частей, которые смогут уместиться в этом пространстве. С STL-файлом эту операцию выполнить легко. Однако разбитые STL-файлы должны проверяться на корректность индивидуально. Недостатки формата STL.
- Хранящиеся в файле данные о нормалях ячеек являются избыточными, поскольку эти данные можно получить из списка вершин ячеек путем их обхода в определенном порядке. Кроме того, координаты одних и тех же вершин фигурируют в файле неоднократно, поскольку каждая вершина принадлежит более чем одной ячейке. В то же время исходная трехмерная модель несет в себе полезную информацию о геометрии, топологии и материале объекта. Эту информацию можно было бы использовать для дальнейших расчетов — определения направления наращивания, создания поддерживающих структур, проверки объема преобразованной модели.
- Проблема STL заключается в его относительно неудачном способе представления кривых поверхностей, которые можно аппроксимировать лишь треугольными ячейками. Ошибки округления в STL, возникающие при арифметических операциях с плавающей точкой, порой оказываются значительными из-за отсутствия топологической информации о модели.

Стандарт хорош тогда, когда он функционален, с ним удобно работать. Первая особенность и одновременно проблема STL-формата — это сам процесс триангуляции поверхности. Замена точной 3D-поверхности триангулированной полигональной сеткой всегда требует определенной аппроксимации и преобразования данных. Основной вопрос здесь: обеспечивается ли необходимая точность? Такой фактор, как разрешение, здесь наиболее критичен. Для управления этим показателем имеется несколько ключевых параметров. Сложность заключается в том, что в каждой системе управление этими параметрами производится несколько по-разному. Но в основном управлять можно размерами треугольников, а также тем, как система обрабатывает закругления на модели. Например, Pro/ENGINEER предлагает два параметра для управления триангуляцией: Chord Height и Angle Control. Эти параметры соответственно задают размеры треугольников как функцию общего размера модели и определяют, каким образом система триангулирует неплоские поверхности (такие, как скругления, отверстия и т. п.).

В системе Solid Works пользователю тоже предлагаются две переменные: Deviation и Angle Tolerance. Они связаны с теми же факторами триангуляции, но используют другой язык и несколько иную систему измерений и связанных величин. В прочих системах применяются другие наборы параметров, которые, в свою очередь, связаны с иными факторами, также влияющими на качество вывода данных и функциональные возможности (или ограничения) каждой конкретной системы. Помимо этого, заслуживает внимания способность системы выводить STL-файлы для сборочных моделей. Существует два способа:

- весь узел может выводиться в один STL-файл, который содержит все выбранные детали в виде отдельных тел или оболочек;
- система обрабатывает сборочную модель и выводит каждую деталь в отдельный STL-файл.

Очень полезным будет инструмент, обеспечивающий предварительный просмотр и визуализацию сетки перед выводом окончательного варианта STL-файла. Ясно, что такая возможность очень существенна (особенно если вы работаете с поставщиком услуг прототипирования), так как сразу будет выявлено, что разрешение оказалось недостаточно высоким для создания точного прототипа вашей модели.

В основном САПР-программы высокого уровня имеют возможность вывода STL-файлов в пакетах с базовой конфигурацией и даже предлагают инструменты для проверки созданных данных. Однако не все САПР-вендеры поддерживают вывод данных в STL-формате, и не только отдельных деталей, но и сборок. В табл. 2.1 [5] обобщена информация о возможностях различных тяжеловесных пакетов по работе с STL-форматом.

Таблица 2.1. Поддержка STL в разных CAD-системах

Система	Поставщик	Версия	Вывод детали в формате STL	Вывод сборки в один STL-файл	Вывод сборки по деталям	Предпросмотр
Inventor Pro	Autodesk	9	Есть	Нет	Нет	Нет
CATIA V5	Dassault Systems	V5R14	Есть	Есть	Есть	Есть
I-deas	UGS	—	Есть	Нет	Нет	Есть
NX	UGS	3	Есть	Есть	Нет	Есть
Pro/ENGINEER	PTC	Wildfire 2	Есть	Есть	Есть*	Есть
Solid Edge	UGS	V16	Есть	Есть	Есть*	Нет
SolidWorks	SolidWorks (Dassault Systems)	2005	Есть	Есть	Есть	Есть
Rhino	McNeel & Associates	R3	Есть	—	—	Есть
StudioTools	Alias	R12	Есть	—	—	Есть

* Используется специальная функция либо написанная на Visual Basic программа.

Из таблицы следует, что пакеты *Inventor* и *Inventor Professional* поддерживают вывод STL-файлов на уровне ядра системы, однако в сравнении с другими системами доступные инструменты выглядят недостаточно гибкими. Возможность предварительного просмотра сетки отсутствует. Выводить можно только отдельные детали, но не сборки. Необходимо затратить усилия для того, чтобы экспортировать всю сборку в STL-файл, извлекая детали в сборку по одной, и это невозможно сделать имеющимися в ядре системы STL-инструментами. Что касается управления разрешением, то имеется три базовые предварительные установки: Low, Medium и High (рис. 2.4), однако их изменение связано с существенными трудностями. Для того чтобы это сделать, необходимо редактировать регистр операционной системы Windows. Более подробную информацию можно найти на сайте www.autodesk.com.

На уровне ядра системы *CATIA V5* предлагает базовый STL-вывод только в формате ASCII. Имеется возможность вывести файлы отдельных деталей, а так-

же поддерживаются оба режима вывода сборок — как в виде отдельных файлов деталей, так и в виде одного файла с множеством тел. Система не использует предварительно установленные параметры, но у пользователей есть возможность управления двумя ключевыми величинами: Sag Value (задает высоту хорды — она может быть установлена даже менее 0,1 мкм) и Step (задает максимальную длину грани треугольника). Кроме того, в системе CATIA V5 есть два связанных с STL модуля — TL1 и STL. По существу, TL1 предлагает возможность вывода в двоичном STL-формате и содержит некоторые возможности редактирования сетки.

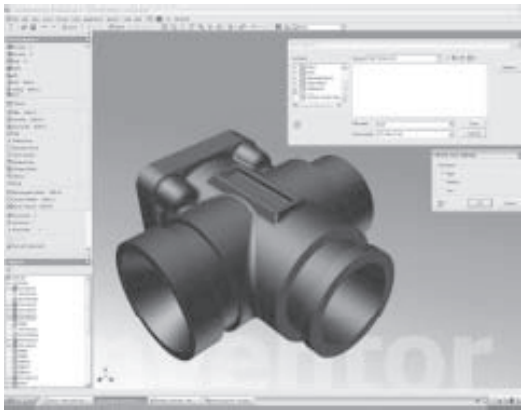


Рис. 2.4. Для управления разрешением при выводе в STL-формат система Inventor предлагает три базовые предварительные установки (Low, Medium, High)

Модуль STL — более высокого уровня, в него добавлены более продвинутые инструменты для ремонта и оптимизации сетки. Этот модуль включает инструменты для проверки качества сетки, которые отображают и «очищают» сетку — автоматически удаляют искаженные, дублированные и изолированные треугольники и т. д. Есть также модуль для автоматического заполнения дыр в сетке, инструменты перегенерации сетки (генератор высококачественной 3D-сетки для деталей сложной формы), инструменты сглаживания. Имеются такие функции, как разделение сетки на части (splitting), обрезка (trimming), соединение отдельных частей сетки (merging), эквидистантное перемещение (offsetting) и прореживание (decimation) сетки. Специальная функция под названием Flip Edge дает возможность изменять стыковку вершин треугольников для улучшения качества формы, особенно на острых ребрах и скруглениях (рис. 2.5).

Конечно, этот дополнительный функционал требует дополнительной платы от потребителя. Если вывод в кодах ASCII включен в ядро системы, то следующий

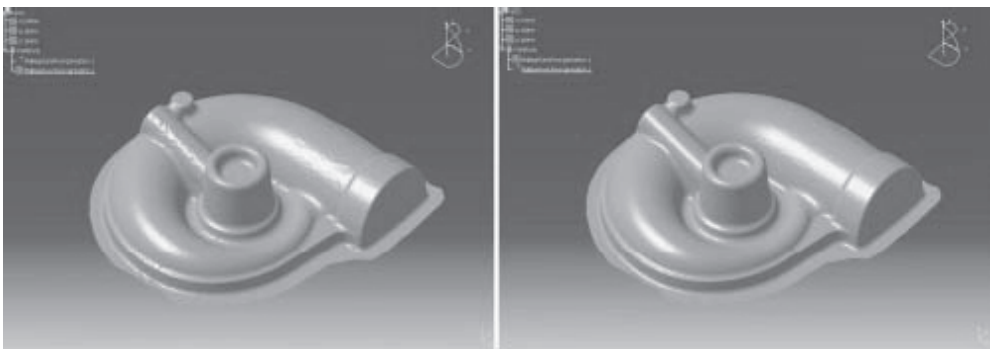


Рис. 2.5. Так работает функция Flip Edge, входящая в специализированный модуль STL пакета CATIA [5]: *слева* — STL-сетка до использования Flip Edges (острые грани и скругления воспроизводятся плохо); *справа* — результат работы функции (благодаря высококачественной сетке форма воспроизведена гораздо лучше)

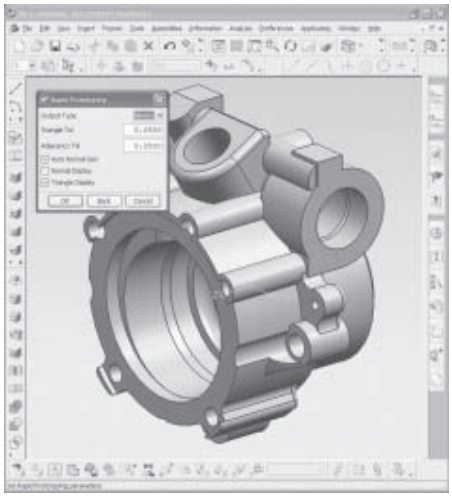


Рис. 2.6. Пакет NX позволяет выводить STL-файлы деталей и выбранные поверхности, а также экспортировать сборки в виде единой модели, где каждая деталь рассматривается как отдельный объем

уровень — модуль TL1 — уже доступен для платформы P1 (то есть для всех пользователей V5) и стоит $3500. Чтобы иметь STL-инструмент более высокого уровня, вы должны быть пользователем платформы P2 или P3, а сам модуль обойдется в $7000 [5]. Ни один из этих модулей не входит в какую-либо конфигурацию CATIA (которые Dassault и IBM называют группами модулей или бандлами) — оба продукта представляют собой расширения системы (addons). Более подробную информацию можно найти на сайте www.3ds.com.

Пакет *NX* компании UGS поддерживает вывод STL на уровне ядра системы, и эта функция доступна без дополнительной платы во всех конфигурациях пакета (рис. 2.6). Говоря о возможностях, надо отметить, что система позволяет выводить файлы деталей, а также выбранные поверхности (хотя применимость этого в БП ограничена).

Что касается сборок, то NX позволяет экспортировать их в виде единой модели, в которой каждая деталь представлена как отдельный объем. Для управления пользователю не предлагается набор каких-либо предварительных установок, как это делается во многих других системах, так как можно полностью управлять процессом. Базовая переменная Triangle Tolerance определяет, насколько точно треугольники аппроксимируют границы поверхностей. Имеется возможность просмотра треугольников, созданных для вывода файла в STL-формате. Команда Local Coordinate System позволяет убедиться в том, что после автоматического размещения все элементы находятся в области положительных чисел.

Другие параметры связаны с экспортом поверхностных моделей. Здесь надо отметить параметр Adjacency Tolerance, позволяющий задавать точность сопряжения поверхностей. Когда вычисляемое расстояние между границами двух поверхностей меньше заданной величины Adjacency Tolerance, то две границы рассматриваются как совпадающие, а две поверхности — как сопряженные по этой границе. Помимо этого, имеются инструменты, с помощью которых можно убедиться, что все нормали в STL-файле ориентированы правильно. Более подробную информацию можно найти на сайте www.ugs.com.

Пакет *I-deas* компании UGS поддерживает вывод STL-файлов в базовой конфигурации, но только для отдельных деталей. Перед выводом обеспечивается просмотр сетки в графическом виде, однако какие-либо предварительные установки отсутствуют. Управлять можно параметром Facet Deviation, который определяет максимальное расстояние от поверхности до лицевой плоскости фасета, аппроксимирующего эту поверхность. Значения параметра можно выбрать из набора предварительно заданных параметров в зависимости от размеров прототипирующей машины (рис. 2.7). Более подробную информацию можно найти на сайте www.ugs.com.

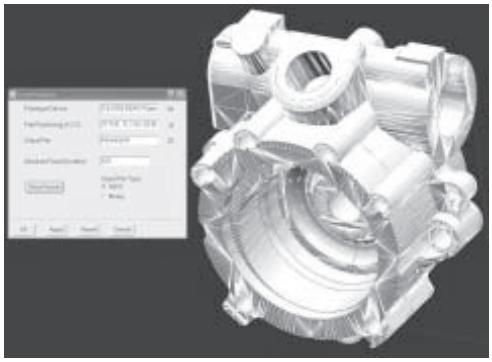


Рис. 2.7. В базовой конфигурации I-deas поддерживает STL-вывод для отдельных деталей

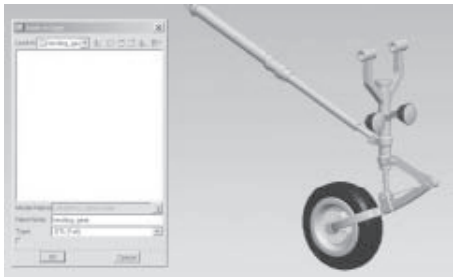


Рис. 2.8. Вывод STL-файлов в Pro/ENGINEER

Вывод STL-файлов в пакете Pro/ENGINEER компании PTC является стандартным для всего ряда конфигураций и модулей. Возможен экспорт как отдельных деталей, так и сборок (рис. 2.8). Что касается набора переменных и управления, то пользователи могут управлять выбором системы координат, связанной с деталью, выбрать подвид STL-файла (ASCII или Binary), а также разрешить или запретить использование отрицательных значений (это относится к требованию, чтобы все детали были расположены в октанте положительных значений координат). Для управления разрешением предназначены два параметра: Chord Height и Angle Control. При триангуляции поверхности модели Chord Height действует как глобальная переменная. Она устанавливает максимальное расстояние между хордой и поверхностью. Чем меньше выбранное значение высоты хорды, тем меньше отклонение от фактически существующей поверхности детали. Параметр Angle Control управляет дополнительной триангуляцией вдоль поверхностей с малыми радиусами — чем меньше значения радиусов, тем большее число треугольников используется при аппроксимации. Pro/ENGINEER обеспечивает возможность предварительного просмотра при разбиении поверхности на треугольники, что позволяет подобрать наилучшие значения параметров для получения необходимого результата.

При выводе сборок параметры остаются теми же, что и в рассмотренном случае, однако работа будет несколько отличаться от работы с отдельной деталью. Сборку в STL-формате можно вывести как составное тело в одном STL-файле. При этом пользователь может указать, какие детали сборки выводятся (часть деталей можно исключить). Для вывода деталей сборки в виде отдельных STL-файлов используется функция Pro/Batch, входящая в базовую конфигурацию пакета. Она позволяет выводить целые каталоги деталей и сборок вместо того, чтобы обрабатывать каждый объект отдельно. Этот инструмент позволяет также задать качество вывода для каждого объекта, что может быть полезно для изделий с различными по размерам деталями (что часто встречается в медицинских и электронных устройствах). Более подробную информацию можно найти на сайте www.ptc.com.

Пакет *Solid Edge* компании UGS обеспечивает поддержку вывода STL-данных на уровне ядра системы, и эта возможность доступна в различных конфигурациях пакета. Модели в формате STL могут быть сгенерированы как для деталей, так и для сборок, однако сборку можно вывести только в виде общего STL-файла, в котором представлены все входящие в нее детали (рис. 2.9). По словам представителей UGS, из сборки можно сгенерировать и отдельные STL-файлы, но для

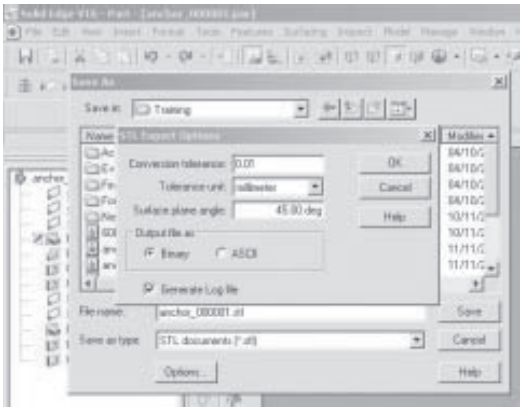


Рис. 2.9. Вывод STL-файлов в пакете Solid Edge

этого необходимо использовать открытый интерфейс программирования приложений (API) и скрипты, написанные на Visual Basic. Пакет Solid Edge не предоставляет возможностей визуализации или предварительного просмотра сетки перед ее экспортом.

Инструменты для STL-вывода имеют следующие опции. Параметр Conversion Tolerance ограничивает расстояние между поверхностью модели и аппроксимирующими ее фасетами (см. рис. 2.9). Его значение вводится с клавиатуры и является важным фактором, определяющим глобальную точность, с которой CAD-геометрия представлена после триангуляции в виде STL-файла. К другим параметрам относятся Tolerance Unit, который задает единицы изменения для Conversion Tolerance, а также Surface Plane Angle, значение которого определяет допустимое отклонение между поверхностью и аппроксимирующими ее фасетами. Файл STL можно вывести в ASCII- или двоичном формате. При работе система генерирует протокол, содержащий предупреждения и информацию о файлах, вовлеченных в процесс. Более подробную информацию можно найти на сайте www.ugs.com.

Пакет *SolidWorks* компании Dassault Systems во всех своих конфигурациях поддерживает STL-вывод и для деталей, и для сборок. При этом вся сборка может быть выведена в один STL-файл или каждая деталь — в свой файл. Обеспечивается предварительный просмотр сетки (если эта установка включена) с двумя вариантами качества отображения, которые задаются двумя заранее заданными величинами: «грубо» (Coarse) и «точно» (Fine). Можно также изменять значения отклонения (Deviation) и углового допуска (Angle Tolerance), которые управляют соответственно тем, как система производит триангуляцию детали в целом и ее отдельных элементов малого размера.

Кроме того, пользователь может задавать единицы измерения и выбирать между выводом файла в двоичном формате или в ASCII. Интересно, что при работе со сборками SolidWorks предлагает такую опцию, как проверка на соприкосновение или пересечение тел. Система также позволяет управлять ориентацией систем координат, автоматически переводя (или передвигая) детали в пространство положительных значений координат.

Наконец, компания SolidWorks предлагает Print3D — это веб-портал, на котором пользователи могут контактировать с компаниями, предлагающими услуги БП и изготовления деталей. Здесь можно разместить запросы на получение расценок и даже сделать заказ. Более подробную информацию можно найти на сайте www.solidworks.com.

В пакете *StudioTools* компании Alias вывод STL-файлов поддерживается на уровне ядра (как в двоичном виде, так и формате ASCII) и не требует дополнительных затрат. Поскольку StudioTools является системой поверхностного моделирования, то разделение на детали и сборки не используется. Компания Alias утверждает, что StudioTools не работает напрямую с деталями, но может работать с несколькими

моделями в одном файле. При этом система может экспортировать любые отдельные модели, которые «сшиваются» вместе.

Что касается опций, то управлять процессом можно с помощью нескольких изменяемых по желанию пользователя параметров. Это предпочтительнее, чем пользоваться предустановленными значениями. Основной переменной является Resolution, числовое значение которой необходимо ввести, — она используется для управления процессом триангуляции (рис. 2.10). Мгновенная обратная связь в виде предварительного просмотра сетки перед ее выводом позволяет убедиться в том, что программа генерирует удовлетворительную сетку. В процессе триангуляции можно управлять точностью, определяющей максимальное расстояние между сеткой и поверхностью, а также точностью стыковки вершин треугольников.

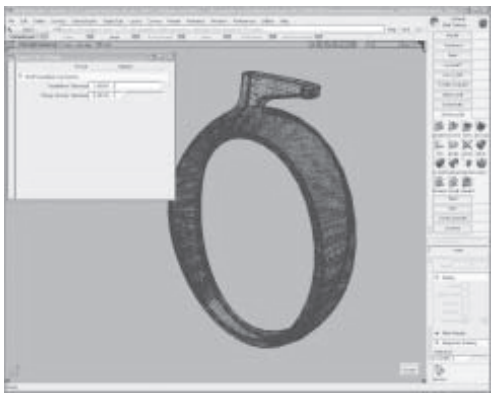


Рис. 2.10. В пакете StudioTools компании Alias пользователи могут изменять разрешение для управления процессом триангуляции

Кроме того, пользователи продвинутых конфигураций StudioTools (Studio, Surface Studio и AutoStudio) могут применять программу Spider компании Alias, которая обеспечивает несколько способов «ремонта» STL-моделей, имеющих прорехи. Выбор установки Coarse вызовет заполнение дыры минимальным числом многоугольников. Опция Taut позволяет закрыть любое найденное отверстие плоской «крышкой» из многоугольников. И наконец, опция Faired служит для того, чтобы заделать прореху триангулированной поверхностью, которая является плавным продолжением формы поверхностей вокруг отверстия. Более подробную информацию можно найти на сайте www.alias.com.

Пакет *Rhino* компании McNeel поддерживает широкий спектр функций STL-вывода. Но поскольку это преимущественно система поверхностного моделирования, вероятно, нет смысла говорить о деталях и сборках. Таким образом, вопрос о выводе сборок в данном случае будет неуместен.

Что касается управления, то Rhino выделяется гибкостью и широкими возможностями пользовательских настроек, в основном благодаря тому, что это система поверхностного моделирования. Пользователь может управлять выводом, просто перемещая ползунок-регулятор. Помимо этого, можно управлять всеми переменными, влияющими на STL-сетку. В их число входят параметры треугольников (углы, соотношения сторон, длина ребер), средства управления трансляцией зубчатых граней и наложением текстур на поверхности (рис. 2.11). В отличие от рассмотренных ранее систем, Rhino обеспечивает поддержку данных для БП и вне рамок стандарта STL. Так, можно выводить STL-файлы с информацией о цвете, а также данные в послойном формате SLC (SLiCe). Кроме того, есть возможность непосредственно передавать данные в программное обеспечение следующих RP-машин: InVision (3D Systems), DeskProto (Delft Spline Systems), Catalyst (Dimension), Studio (Objet), Modela Player (Roland), ModelWorks (Solidscape), Insight (Stratasys) и ZPrint (Z Corporation). Более подробную информацию можно найти на сайте www.mcneel.com.

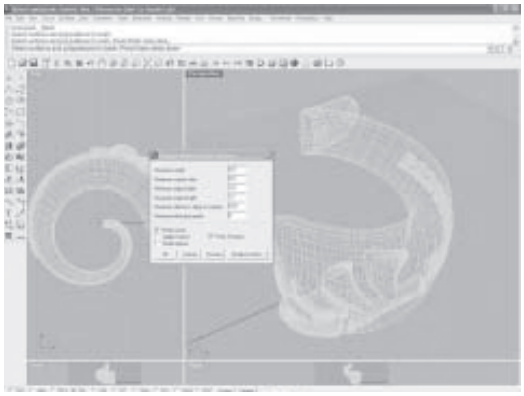


Рис. 2.11. Поскольку Rhino является системой поверхностного моделирования, потенциальная вероятность появления ошибок при выводе в STL-файл довольно высока. Однако это нейтрализуется широким набором управляемых пользователем параметров вывода

Следующим важным шагом является разбиение виртуального (компьютерного) изображения объекта на сечения, по которым в дальнейшем и будет выполняться послойный синтез вещественной копии.

Общий метод определения промежутка (то есть пустоты) в модели при ее сечении плоскостями может быть следующим. Геометрический луч, вышедший из одного угла (то есть вершины поверхностного треугольника), пройдя через объемную фигуру, должен попасть в другой угол (то есть другую вершину поверхностного треугольника), что означает: объект целый (рис. 2.12 и 2.13). Если это не так, в объекте существует пустота.

Кратко описанный метод графического представления данных и соответствующий ему стандарт были использованы нами при создании управляющих процессом лазерного спекания программ (см. рис. 1.8). Имея файл с координатами сечений трехмерного объекта, нужно было разработать также программу развертки, то есть описать путь, по которому будет осуществляться сканирование лазерным лучом

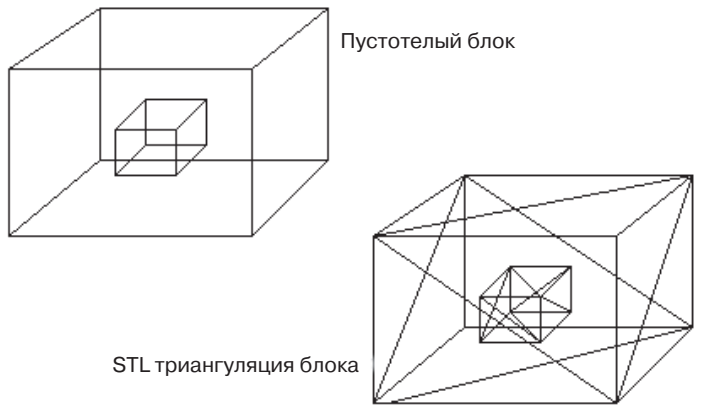


Рис. 2.12. Метод поиска пустоты в объекте

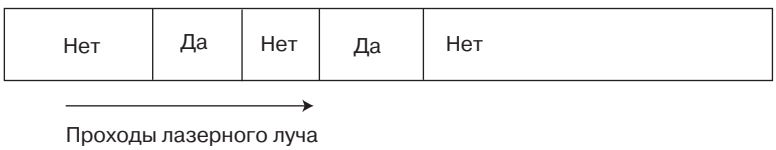


Рис. 2.13. Развертка одиночного прохода лазерного луча

каждого из слоев сечения. В течение прохода луча (рис. 2.13) излучение от лазера может достигать поверхности порошкового материала (и тогда в данном месте будет происходить спекание (сплавление)) при открытой лазерной заслонке — обозначено «Да». При закрытой заслонке — обозначено «Нет» — поверхность не будет подвергнута лазерному воздействию.

Если грани поверхностных треугольников при графической обработке сечений заранее не сведены, то в промежутках спекания не будет, что может привести к неожиданным результатам при синтезе (рис. 2.14). Другая проблема может возникнуть при графическом представлении полосы Мебиуса (рис. 2.15). Поскольку внутренняя поверхность полосы непосредственно переходит в ее внешнюю поверхность, то должны существовать графические утилиты (программы) для разрешения таких ситуаций. Можно задать определенные параметры, с помощью которых оператор мог бы контролировать общее число треугольников в фасетной аппроксимации при использовании транслятора. Иначе говоря, при создании STL-файла из трехмерной модели можно контролировать величину отклонения фактической поверхности модели от аппроксимирующих ее треугольных ячеек по нормали. Заметим, что больший объем STL-файла приведет к увеличению времени расщепления при генерации поперечных сечений и большему объему файла сечений, но зато повышает точность. Время изготовления изделия от размера STL-файла не зависит.

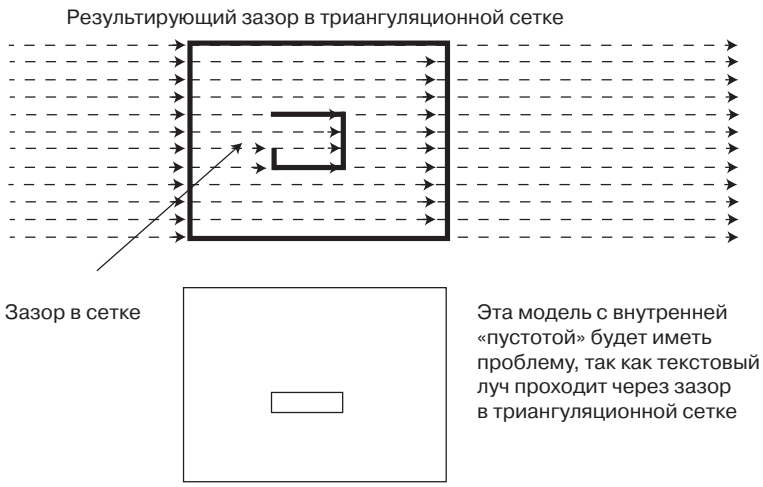


Рис. 2.14. Развертка лазерного луча при заштриховке сечения детали

Рис. 2.15. Правила обхода для сложной поверхности

2.3. Проблемы STL-формата

Далее будут обсуждаться некоторые проблемы представления данных для процессов БП, методики триангуляции, правильный выбор ориентации центра масс и расположения сечений в пространстве относительно самой детали и/или платформы и т. п. [3], [4], [6].

Рис. 2.16. Зазоры в STL-файле

Как отмечалось, STL-файл, созданный программой твердотельного моделирования, может содержать ошибки, даже если исходная трехмерная модель не имела дефектов. Далее вслед за авторами изданий [3] и [4] попробуем систематизировать виды ошибок, возникающие в STL-файле.

1. Предполагается, что ячейки STL-файла должны образовывать набор замкнутых оболочек, заключающих в себе объект. Но если какая-либо из ячеек отсутствует, оболочка получает прокол, в результате чего образуется зазор (рис. 2.16). Как следствие нет четкого различия между внутренней и внешней областями. Кроме того, при расщеплении STL-файла, имеющего зазоры, в слоях могут создаваться незамкнутые контуры, которые порождают случайные векторы при изготовлении детали.
2. Нормали некоторых ячеек могут быть обращены (рис. 2.17), в результате чего они окажутся не согласованными с направлением наружу, которое имела исходная поверхность.

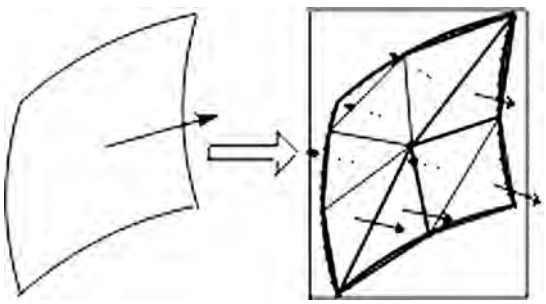


Рис. 2.17. Обращенные нормали в ячейке

3. Нормали ячеек, хранимые в STL-файле, могут не совпадать с нормалями, рассчитанными по вершинам соответствующих ячеек. Ячейки могут пересекаться неправильно, то есть в каких-либо местах, кроме своих сторон. Могут возникнуть перекрывающиеся ячейки (рис. 2.18).
4. Неверные геометрические алгоритмы, закрывая зазоры в STL, могут по ошибке создавать внутренние стенки и структуры, что может привести к неоднородному затвердеванию материала. Ошибку с появлением внутренней стенки иллюстрирует рис. 2.19.

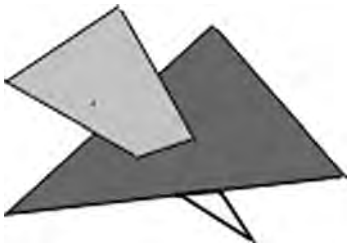


Рис. 2.18. Пересечение двух треугольников не по сторонам

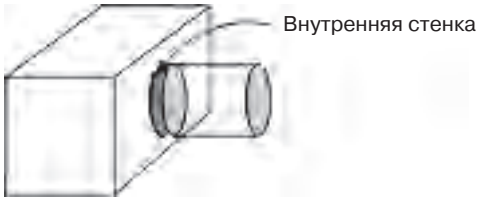


Рис. 2.19. Ошибка STL-модели с появлением внутренней стенки

5. STL-файл может иметь несогласованные значения допусков, если он создан путем объединения двух различных файлов. Кроме того, могут возникнуть зазоры на пересечении двух объединенных STL-моделей.
6. Ячейки могут быть вырожденными. Вырожденные ячейки — это такие ячейки, которые не занимают конечной площади и соответственно не имеют нормали. Есть два типа вырождения ячеек — топологическое и геометрическое. Топологическое вырождение происходит, когда две или более вершин ячейки совпадают. Оно не влияет на геометрию или связность остальных ячеек, поэтому топологически вырожденную ячейку можно просто отбросить. Геометрическое вырождение происходит, когда все вершины ячейки различны, а все стороны коллинеарны. Такая геометрически вырожденная ячейка не имеет нормали, однако содержит неявную топологическую информацию о том, как связаны соседние ячейки, то есть как сопрягаются две поверхности. Оба типа вырожденных ячеек демонстрирует рис. 2.20.

Если в STL-файле обнаружены ошибки, то прежде чем производить расщепление, необходимо предпринять дополнительные действия по его коррекции. Исправление ошибочного STL-файла требует больших вычислительных ресурсов, что является серьезным недостатком формата STL. Существует ряд коммерческих программных пакетов для проверки и исправления STL-файлов. К ним относятся 3D Verify от 3D Systems и MagicsRP от Materialise [7] (см. раздел 2.7).

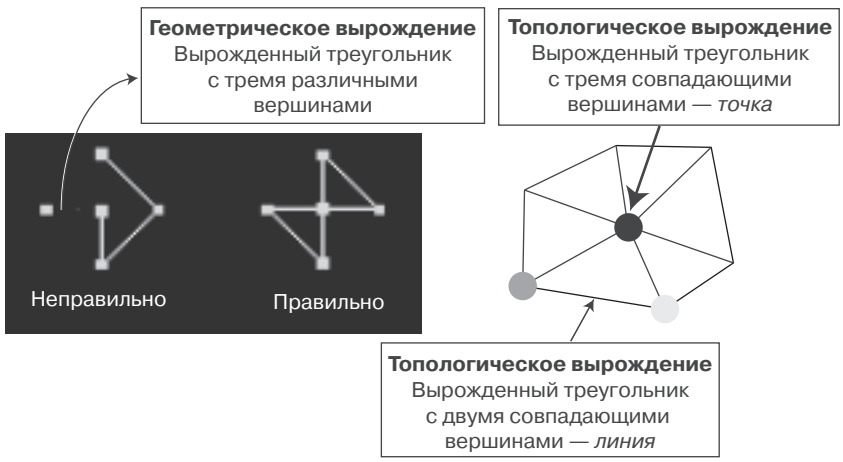


Рис. 2.20. Вырождение ячеек в STL-файле

2.4. Дизайн в БП (ориентация, поддержки, вырезы и включения)

Ориентация изделия — весьма важная процедура в БП. Поскольку все объекты изготавливаются послойно, определяющим фактором является выбор направления наращивания слоев [3]. Он влияет на многие ключевые аспекты процесса БП, например на качество отделки поверхности, длительность изготовления, требуемое количество поддерживающих структур и запертые объемы. Следует признать, что направление наращивания выбирается в основном методом проб и ошибок, а может и вовсе не рассматриваться. Несколько направлений наращивания, соответствующих принципиальным аспектам процесса, показаны на рис. 2.21. В зависимости от предполагаемого способа использования детали пользователь может пожертвовать быстротой изготовления в пользу большей разрешающей способности или точности. Обычно наиболее важна точность изготовления детали, следующим по значимости является эстетический фактор, а длительность изготовления несколько менее критична в сравнении с традиционными способами синтеза.

Рис. 2.21. Оптимальные направления наращивания

Более высокая разрешающая способность кривых поверхностей достигается путем ориентации их в горизонтальной плоскости перпендикулярно лазерному лучу. Наклонные поверхности, идущие вдоль оси расщепления, будут иметь явственный ступенчатый вид (рис. 2.22). Высота каждой ступеньки — это толщина слоя в данном месте детали. При некоторых видах ориентации детали может потребоваться поддерживающая структура.

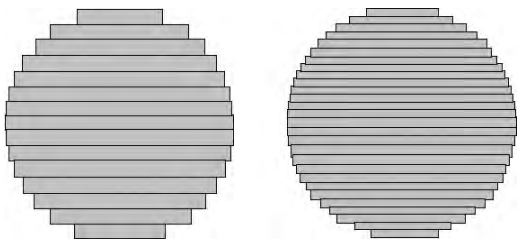


Рис. 2.22. Ступенчатый вид кривой поверхности

Под термином «запертый объем» понимается количество исходного материала, заключенное в обрабатываемой области. Таким образом, запертые объемы могут существовать в вогнутых областях, действующих как контейнеры. Исходный материал заперт, если его невозможно удалить из контейнера. Соответственно в зависимости от ориентации одна и та же вогнутая область может запереть, а может и не запереть необработанный материал. Если образуется запертый объем, иногда

бывает необходимо изготовить деталь со спускным отверстием, а после затвердевания заполнить его. В таком процессе, как ламинирование, запертые объемы не допускаются, поскольку удалить из них материал практически невозможно. Автоматическое обнаружение запертого объема обычно осуществляется компьютерной программой.

Поскольку методология процесса БП отличается от методологии традиционного производственного процесса, для обеспечения эффективного использования данного метода необходимо внести некоторые коррективы. Прежде всего время, требующееся для изготовления множества прототипов деталей с помощью системы БП, можно коренным образом сократить, изготавливая несколько деталей одновременно. В БП время, затраченное на изготовление прототипа, зависит не от количества деталей, а от общего числа слоев. Тесно расположив несколько деталей в подходящем объеме, можно изготовить их одновременно. Однако подбор расположения в интерактивном режиме — утомительный процесс, не гарантирующий достижения оптимального размещения всех деталей, и поэтому в общем случае он недостаточно хорош. Поскольку задача трехмерной упаковки является недетерминированной задачей, решаемой за полиномиальное время, оператор системы БП не может ее решить оптимально. Поэтому требуется эффективный алгоритм размещения множества деталей в рабочем объеме, и в некоторых программных продуктах, таких как MagicsRP от Materialise, предусмотрена функция полуавтоматической упаковки [7].

Поддержки, то есть внутренние или внешние переборки (рис. 2.23), создаются на стадии компьютерной разработки трехмерного вида модели с помощью различных программ, например Solid Concepts (Лос-Анджелес, Калифорния). Они позволяют стабилизировать выступы, консоли на краях модели, предотвратить расслаивание в сложных участках модели, корректировать возможное искривление слоев на платформе, позволяют легко отделять синтезированную модель от основания-платформы, облегчают синтез сложных моделей, так как последние создаются из нескольких частей.

Очень важно эффективно сформировать поддерживающую структуру, отражающую геометрию детали, поскольку избыточность поддерживающих структур приводит к увеличению времени проектирования и изготовления и увеличению расходов материала, а недостаточность — к получению негодных деталей. Качество конструкции поддерживающей структуры полностью зависит от возможностей программного обеспечения для БП. Обычно для автоматической генерации поддерживающей структуры используются программы MagicsSG и Bridgeworks.

Поддерживающие структуры необходимы по следующим причинам. Во-первых, они гарантируют, что формирователь слоя (или разравнивающий валик) не ударится о платформу при нанесении первого (нижнего) слоя. Во-вторых, поддерживающие структуры обеспечивают равномерность толщины слоя вне зависимости от возможной деформации платформы. Любые неоднородности принимает на себя слой поддерживающих структур, поэтому слой детали имеет одинаковую толщину во всех местах. В-третьих, они обеспечивают простоту снятия готовой детали с платформы. В-четвертых, условия (режимы) синтеза у основания платформы, где высокий теплоотвод, существенно отличаются от режимов синтеза в объеме — сгладить эти отличия позволяет продуманное построение системы поддержек. Обычно поддерживающие структуры имеют неплотный контакт с платформой, что облегчает последующее извлечение детали. Поддерживающая структура должна также соответствовать периферийной части нижнего слоя детали, включая углы.

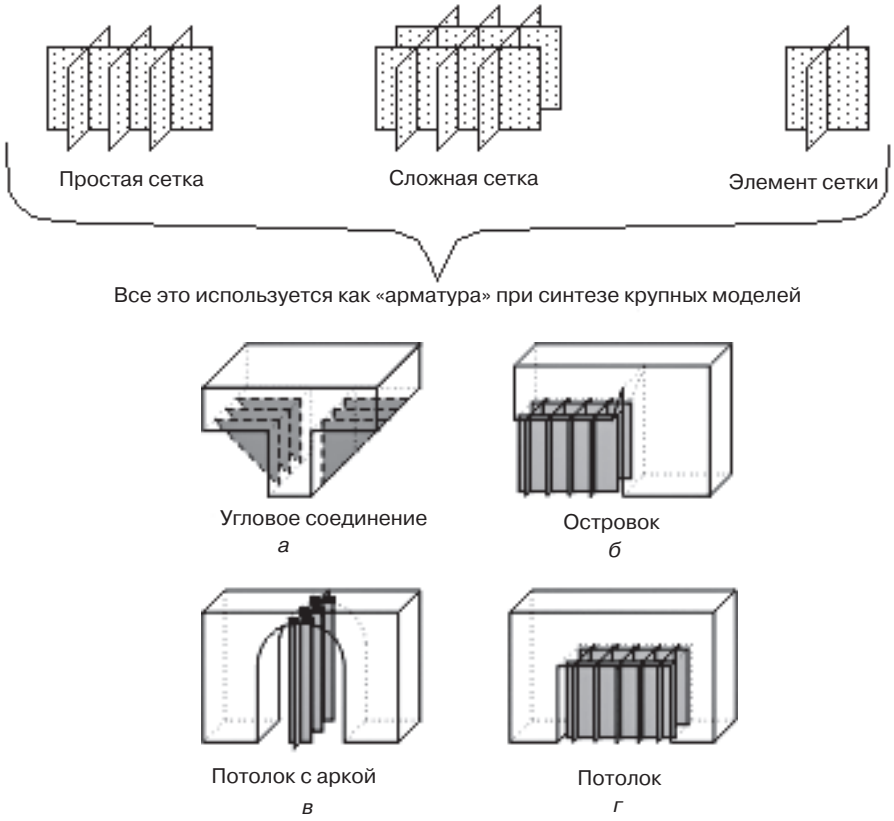


Рис. 2.23. Примеры поддержек: *а* — клин; *б* — островок; *в*, *г* — потолок

Поддержка всей нижней плоскости детали ограничивает ее тенденцию к изгибанию под собственным весом по мере наращивания следующих слоев. Однако на практике край поддерживающей структуры делают отступающим внутрь от края нижнего слоя детали. Это позволяет избежать поломки краев при удалении поддерживающей структуры. Распространенной практикой является изготовление ячеистого пьедестала (рис. 2.24), что позволяет легко удалить поддерживающую структуру и минимизировать влияние высокого теплоотвода в платформу.

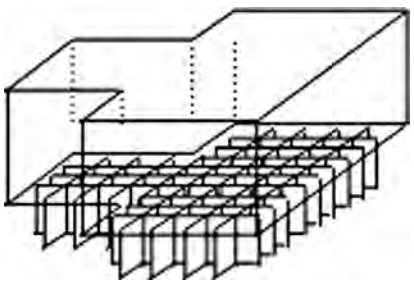


Рис. 2.24. Генерация ячеистого шаблона для пьедестала

Поддерживающие структуры требуются также [4], когда деталь имеет островки (island) или нависающие части. *Островком* называется часть детали, не связанная с какой-либо другой частью данного слоя (см. рис. 2.23, *б*). В этом случае островок присоединяется к платформе или к самой детали путем проектирования профиля островка на поверхность платформы или предыдущего слоя детали.

Соединение с предыдущим слоем может оказаться предпочтительным, если островок располагается высоко над платформой, поскольку это сократит длительность изготовления. Нависшие части также следует поддерживать с помощью треугольных подпорок, называемых клиньями (gussets) (см. рис. 2.23, *а*). Выступ может изгибаться под собственным весом, если его не подпирать. Арки или выпуклые поверхности поддерживают себя сами, поскольку величина уступа между соседними слоями мала и поддерживающие структуры не требуются. Но если поверхность является плоской, обращенные вниз поверхности следует поддерживать (рис. 2.23, *в* и *г*).

Во многих системах твердотельного и поверхностного моделирования предусмотрен режим сборки, в котором пользователь может моделировать поддерживающие структуры, глядя или опираясь на геометрию детали.

2.5. Расщепление и объединение, стиль и шаг решетки при послойном синтезе

Как отмечалось ранее, на стадии расщепления (Slicing) и слияния деталь и поддерживающие структуры рассекаются компьютерной программой на серию параллельных горизонтальных плоскостей. Результатом являются файлы сечений, состоящие из расположенных слоями друг над другом поперечных сечений. Расстояние между поперечными сечениями — это толщина слоя. Толщину слоя выбирают исходя из упомянутого ранее эффекта ступенек и особенностей исходного материала. Нижний предел толщины слоя определяется разрешающей способностью управления подъемным механизмом платформы, а верхний — мощностью лазера и скоростью сканирования. Современные программы *адаптивного расщепления* (Materialise) позволяют пользователю в автоматическом и/или ручном режиме, с одной стороны, оптимизировать, а с другой — повысить качество процесса синтеза за счет ускоренного роста изделия на простых и прецизионного роста — на сложных участках. После того как файлы сечений для детали и поддерживающих структур созданы, они объединяются, так что деталь и ее поддерживающие структуры могут изготавливаться вместе как единое целое. Если одновременно на одной платформе должны изготавливаться несколько деталей, файлы сечений всех деталей и поддерживающих структур объединяются таким образом, что поперечные сечения, принадлежащие одному и тому же слою, интерпретируются как поперечное сечение одной детали.

2.6. Методики сканирования и последовательность построения годных и негодных ячеистых (мозаичных) моделей

Внутренняя решетка (internal hatch) — это метод заштриховки конкретного сечения детали или объема внутри границ. Поскольку заштриховка производится путем сканирования лучом лазера конечного диаметра по точкам, то практически невозможно полностью просканировать внутренность детали, то есть заполнить точками какую-либо плоскость сечения. Однако выборочное сканирование может обеспечить структурную жесткость, а необработанные области оставляются до процедуры постобработки. Другим методом считается разбиение всего текущего сечения на отдельные области, в каждой из которых заштриховка идет по своему плану

(см. рис. 2.29). Считается оптимальным сначала очерчивать границы (контур) изделия, а затем сканировать внутренность, для чего используется один из рассмотренных в дальнейшем стилей [3], [4]. Стили сканирования рекомендуется также изменять для нижних (у основания платформы), средних и верхних слоев, поскольку условия теплоотвода везде будут разными. Если у изделия имеются свисающие края и/или тонкие стенки (тонкий профиль), требуются специальные методы сканирования, например двойной обход по контуру тонкого профиля, перераспределение энергии ЛИ в пучке, а также, возможно, изменение мощности и скорости сканирования лазерного луча. Почти все передовые процессы изготовления деталей, применяя которые стремятся повысить точность изготовления детали, сосредоточиваются на минимизации эффектов внутреннего напряжения.

Трехлинейная решетка (*Tri-Hatch*) состоит из линий, параллельных оси *X* изделия, а также линий, расположенных под углом 60 и 120° к оси *X*. Это дает внутреннюю структуру из равносторонних треугольников. Шаг между этими линиями чаще можно варьировать. Трехлинейная решетка была самым распространенным шаблоном сканирования.

Метод *WEAVE* (3D Systems) использует решетку из линий, параллельных осям *X* и *Y*. Например, показанный на рис. 2.24 ячеистый шаблон для подпорки-основания можно создать с помощью метода WEAVE с большим шагом решетки. Для более тонких слоев этот шаг необходимо уменьшать.

Стиль *STAR-WEAVE*, являющийся производным от WEAVE, вводит три новых понятия: *шахматная решетка* (staggered hatch), в том числе с ее поворотом на некоторый угол, *чередование последовательности* (alternate sequencing) и *сокращенная решетка* (retracted hatch). В акрониме «STAR-WEAVE» буквы «ST» обозначают шахматную решетку, «A» — чередование, а «R» — сокращенную решетку. Различия между обычной и шахматной решетками иллюстрирует рис. 2.25. При сканировании по методу STAR-WEAVE, поскольку вектора решетки *n*-го слоя смещены ровно на половину шага обычной решетки ($E_v/2 = h/2$) по отношению к векторам решетки ($n - 1$)-го слоя, какие-либо следы микротрещин исчезают. Кроме того, этот метод позволяет уменьшить концентрацию напряжений вдоль более слабых областей между векторами. Стратегия «четные/нечетные» (см. рис. 2.25) такова: на первом этапе сканируется каждый четный проход (из пары проходов, общее число проходов *n*); на втором этапе сканируется каждый нечетный проход (из пары проходов, общее число проходов *n*). Различные способы реализации проходов с номерами ($n + 1$, ..., $n + i$) также показаны на рис. 2.25 [3], [8].

Термин «чередование последовательности» означает, что последовательность рисования линий чередуется от слоя к слою. В этом случае векторы *X* и *Y* будут чередоваться в порядке, определенном последовательностью рисования. Так, например, в четных слоях первыми могут рисоваться векторы *X*, а в нечетных — векторы *Y*. Более того, направление рисования векторов также чередуется. Соответственно, например, в *n*-м слое векторы *X* рисуются первыми в направлении от передней стенки платформы к задней стенке. В ($n + 1$)-м слое векторы *X* рисуются вторыми (после векторов *Y*), причем в направлении от задней стенки платформы к передней. В сокращенной решетке каждый вектор, *X* либо *Y*, проведен так, что он соединен только с одной из границ. Противоположный конец вектора решетки отстоит от соответствующей границы на небольшое расстояние. Один из таких оптимальных вариантов, разработанных в DIPI, ENISE (Франция), схематически изображен на рис. 2.26 [8].

Метод *QuickCast* позволяет повысить точность изготовления деталей, используемых в качестве моделей при литье по выплавляемым моделям. Когда выяснилось,

что тепловое расширение твердых моделей приводит к ломке даже самых прочных оболочек, стало очевидно, что модели необходимо изготавливать с поддерживающей структурой в виде внутренней решетки с большим шагом, которая фиксировала бы внешние границы детали. Варьируя шаблон решетки, с тем чтобы обеспечить возможность удаления излишков исходного материала, можно изготавливать квазиполые модели, позволяющие успешно отливать твердые металлические детали. Поскольку квазиполая структура шаблонов в методе QuickCast требует меньшего количества материала, связывающего соседние слои, внутренние напряжения в «зеленой детали» ослабляются. Искажения при окончательном отверждении также снижаются, поскольку меньшее количество материала подвергается усадке.

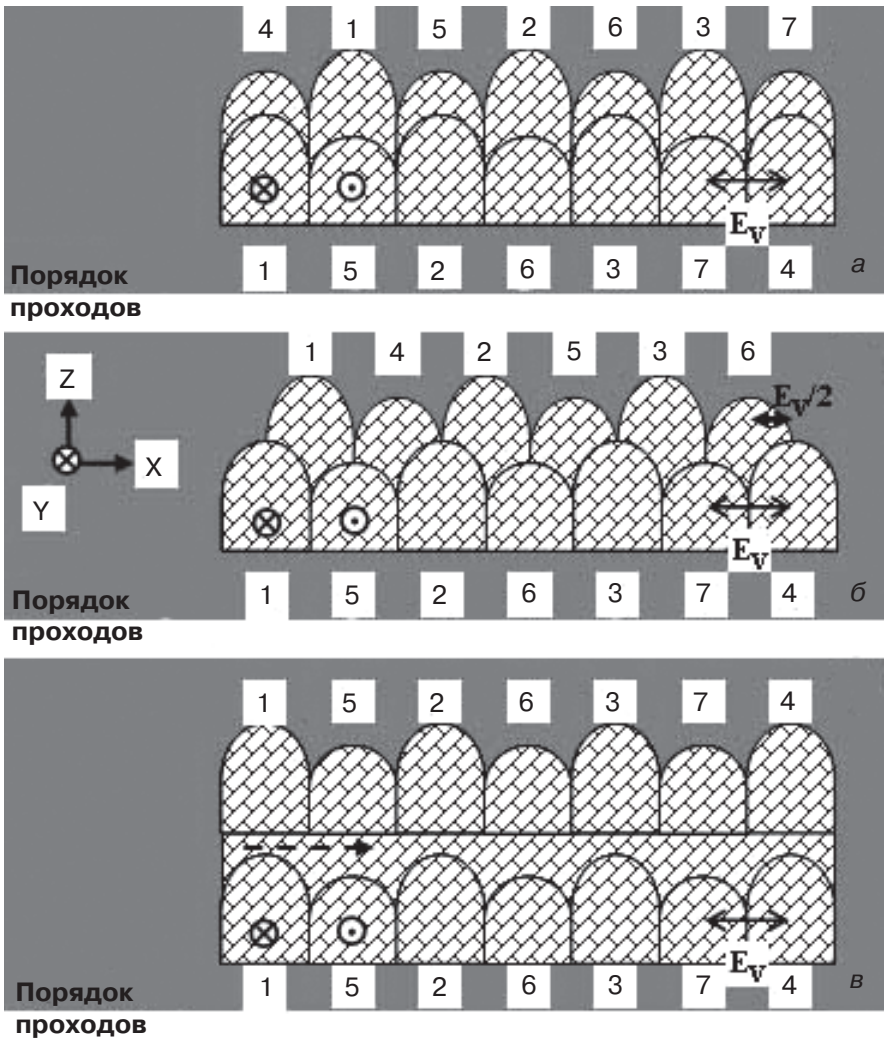


Рис. 2.25. Сравнение стилей решеток (цифрами пронумерована последовательность проходов): *а* — обычное наложение проходов; *б* — шахматная решетка; *в* — крестообразный порядок

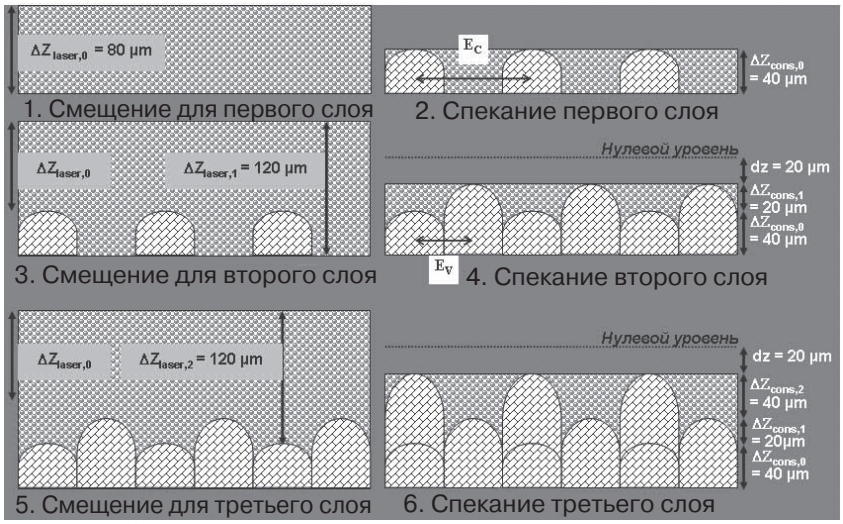


Рис. 2.26. Оптимальное спекание второго и последующих слоев от основания платформы. Величины смещений (ΔZ_i) указаны для металлического порошка

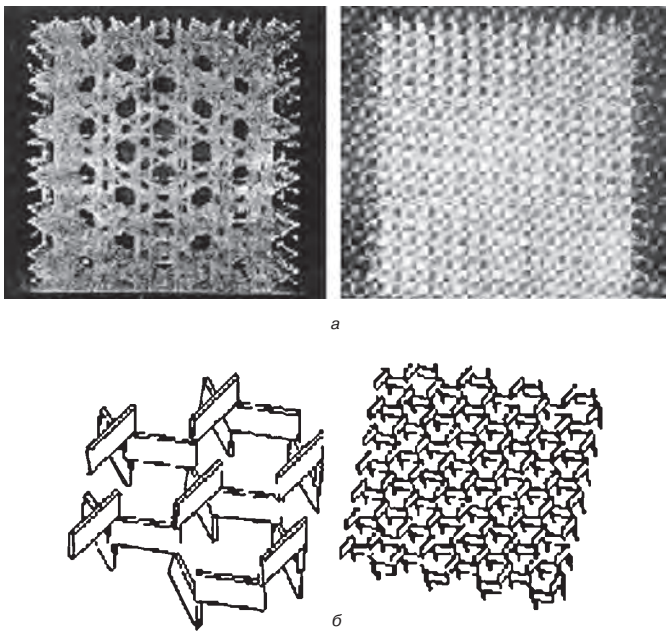


Рис. 2.27. Шаблоны решетки QuickCast: *а* — в QuickCast-версии 1.1 используется решетка из равносторонних треугольников и смещенных квадратов; *б* — в QuickCast-версии 2.0 используется шестиугольная решетка для построения более слабых шаблонов, которые легко выжигаются при литье по выплавляемым моделям

Чтобы создать квазиполую структуру по методу QuickCast, необходимо изготавливать объект с большим шагом решетки. Говоря математическим языком, объект должен быть односвязным. Если в произвольном месте топологически односвязного шаблона умышленно создать спускное отверстие, а еще в одном месте — относительно небольшое вентиляционное отверстие, устраняющее частичный вакуум, который в противном случае неминуемо бы образовался, то исходный материал может покинуть шаблон. Шаблоны решетки для метода QuickCast показаны на рис. 2.27.

2.7. Восстановление поврежденных STL-файлов

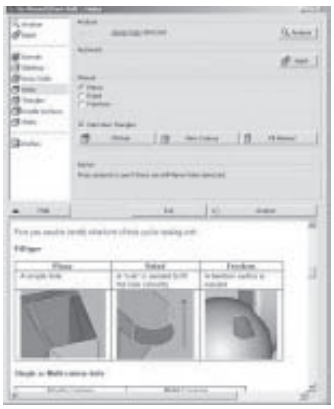


Рис. 2.28. Программа Magics компании Materialise часто используется для анализа и восстановления STL-данных

Как уже отмечалось, программа Magics компании Materialise (www.materialise.com) позволяет работать над ошибками и восстанавливать поврежденные STL-файлы. Она предлагает богатый набор инструментов для анализа и ремонта электронных моделей (рис. 2.28). Помимо прочего, с их помощью можно убедиться, что подготовленные STL-данные удовлетворяют вашим требованиям. Некоторые поставщики машин БП (например, компания EOS) поставляют в комплекте и адаптированную версию Magics. Кроме того, у компании Materialise есть и онлайн-сервис под названием STLfix. На сайте предлагаются инструменты для ремонта и конвертации CAD-данных различного формата (Unigraphics/Parasolid, IGS, VDA, CATIA V5, Pro/ENGINEER, STEP, Solid Edge, SolidWorks, CWG93D, VRML, CATIA V4) в STL-файлы с гарантированным качеством. На базовом уровне сервис STLfix позволяет бесплатно использовать автоматические процедуры, позволяющие решать ряд стандартных проблем. Если же этого недостаточно и требуется ручная доработка, то Materialise предлагает услуги своих сотрудников. В этом случае компания сообщает заказчику оценочную стоимость доведения STL-файла до хорошего уровня качества: 100 евро за первый час работы плюс по 50 евро за каждый последующий [7].

В связи с этим уместно посмотреть, что традиционно предлагают специалисты по трансляции CAD-данных. Например, сервис CADverter.com (www.cadverter.com) компании Theorem Solutions обеспечивает конвертацию в формат STL практически любых CAD-файлов. Цена зависит в основном от сложности файла.

Компания Delcam также предлагает STL-вывод — как часть сервиса трансляции данных PS-Exchange (www.ps-exchange.com). С его помощью можно конвертировать из формата в формат различные CAD-данные: CATIA V4 и V5, I-deas, Cimatron, AutoCAD, Pro/ENGINEER (2000i, 2000i2, 2001 и Wildfire), Rhino 3DM, Unigraphics (в том числе и детали, созданные в NX2), SolidWorks (от версии 2004 до текущей), Solid Edge, Parasolid, ACIS, IGES, VDA-FS STEP и DGK от Delcam. Стоимость услуги фиксированная и довольно привлекательная — 34 фунта стерлингов (примерно 65 долларов) [5]. Дополнительная информация о программных возможностях проверки, верификации, устранения ошибок в STL-файлах представлена в приложении В.

2.8. Новые форматы данных для БП

Прикладные инженерные программы САПР, например программы для генерации сетки при анализе по методу конечных элементов или для прокладки траектории движения инструмента станков с ЧПУ (CAM), также требуют на входе технического описания продукта в виде компьютерных данных. Данные технических требований делятся на два типа. Первый тип данных — это *данные чертежа*, они включают векторное описание линий (сплошных, пунктирных, осевых, размерных и выносных) и пояснительных данных (комментариев, символов и значений размеров), имеющихся на чертеже. Ко второму типу данных технических требований относятся *представление твердотельной модели* и некоторые пояснительные данные. Поэтому данные технических требований обычно импортируются из CAD-системы — либо из системы автоматизированной разработки чертежей, либо из системы твердотельного моделирования. Однако различные CAD-системы хранят результаты проектирования в своих собственных структурах данных, формат которых зависит от конкретной системы. Они могут не соответствовать входному формату используемой прикладной расчетной программы. Таким образом, когда две или более CAD/CAM/CAE-системы объединяются и связываются в единое приложение для совместного использования данных, часто возникает *проблема обмена данными*. Далее перечислены три наиболее популярных нейтральных формата для обмена данными между CAD-системами.

- **Формат IGES** (Initial Graphics Exchange Specification — первоначальная спецификация обмена графическими данными) был первым стандартным форматом обмена данными, разработанным для нужд передачи данных технических требований между различными САПР. Ранние версии IGES были неявным образом ориентированы на CAD/CAM-системы 1970-х — начала 1980-х годов, то есть главным образом на обмен чертежами. В более поздних версиях спектр типов данных, подлежащих обмену, расширился (в частности, добавлена возможность обмена данными о 3D-геометрии объекта). В настоящее время IGES является самым популярным форматом нейтрального файла.
- **Формат DXF** (Drawing Interchange Format — формат обмена чертежами) изначально разрабатывался для того, чтобы обеспечить для пользователей гибкость в управлении данными и преобразовании чертежей программы AutoCAD в форматы файлов, которые могли читаться и использоваться другими САПР. Из-за популярности AutoCAD формат DXF стал фактическим стандартом обмена файлами CAD-чертежей почти для всех САПР. Практически в каждой из появляющихся новых САПР имеется транслятор в формат DXF и обратно.
- **Формат STEP** (Standard for Exchange of Product model data — стандарт обмена данными о модели продукта) — это стандартный формат данных, используемый для хранения полной информации обо всем ЖЦ продукта, включая проектирование, анализ, производство, контроль качества, испытания и обслуживание, помимо обычных данных технических требований. Сегодня STEP привлекает к себе повышенное внимание, так как входит в систему стандартов технологий CALS как стандарт обмена данными о продуктах (см. также раздел 2.1).

Итак, каковы же перспективы STL-формата удержать первенство среди форматов, используемых для передачи данных в машины БП? Имеются ли возможности для улучшения интеграции CAD-систем и программного обеспечения, используемого при БП?

Одно из решений предлагает компания McNeel в системе *Rhino*. Речь идет о функции, которая позволяет передавать данные непосредственно на 3D-принтеры различных типов. Такое средство может эффективно использоваться даже отдельно от остальных инструментов. Компания 3D Systems также сообщает [5], что она проводит работы по созданию «более прямого интерфейса» между CAD-системами и разработанным ею 3D-принтером InVision. Как следует из пресс-релиза, 3D Systems предлагает «основу, позволяющую интегрировать функцию Print Preview для 3D-принтера InVision в любую CAD-систему или другое соответствующее программное обеспечение». Утверждается, что это даст возможность «отправлять задания на 3D-принтер InVision прямо из CAD-пакета, который клиент выбрал для работы».

Сегодня с развитием движения *RepRap* по созданию «народного принтера» (см. раздел 5.15) потребность в простоте и удобстве работы с форматами данных особенно актуальна.

По данным, приводимым в [5], «задача состоит в том, чтобы включить в CAD-интерфейс соответствующий пункт меню, который позволяет компилировать и посылать на 3D-принтер InVision необходимую последовательность команд». Реализовать это можно с помощью API (Application Programming Interface) каждой из CAD-систем. Один такой интерфейс уже разработан для SolidWorks. После его инсталляции (он устанавливается вместе с программным обеспечением принтера InVision) в меню добавляется новый пункт Send to InVision. При выборе этого пункта появляется окно предпросмотра (print preview) модели, подготовленной к печати на InVision. Далее пользователь может при желании переставить (reposition), масштабировать (scale) или скопировать (copy) модель, после чего следует выполнить команду Submit. При этом автоматически генерируется STL-файл, который и отсылается в очередь печати на InVision. Система все равно транслирует данные в STL-формат, но пользователю это незаметно.

Другими словами, возможность БП компьютерных моделей в прототипы является солидным преимуществом при переходе к 3D-проектированию. Важно, что большинство CAD-систем выводит STL-файлы хорошего качества. Это позволяет быть уверенным в том, что используемые STL-данные точно отображают разрабатываемое изделие на текущей стадии проектирования, конечно, если параметры заданы корректно.

STL-формат не собирается сходить со сцены, он будет служить в качестве формата RP-данных еще многие годы. В данный момент ему нет реальной альтернативы. Можно предположить, что работы, которые компания McNeel ведет с системой Rhino (а 3D Systems уже провела с системой SolidWorks), говорят о возможности реализации гораздо более интегрированных решений, однако это довольно долгий путь. А до тех пор, пока не наступят эти времена, пользователям по-прежнему нужно будет экспортировать STL-файлы с помощью тех инструментов, которые имеются в используемых ими CAD-системах и приложениях для моделирования.

2.9. Другие трансляторы и программы-просмотрщики

Следует отметить, что уже в базовой конфигурации практически всех CAD-систем есть функции предварительного просмотра аппроксимирующей сетки, визуализаторы и утилиты точной настройки параметров, влияющих на результат синтеза объемного изделия. При их использовании требуется знать, например, как задать оптимальную точность модели, обеспечивающую баланс между частотой сетки и размером экспортируемого STL-файла. Не все CAD-системы предоставляют такую возможность. Самой слабой из всех рассмотренных ранее систем (см. табл. 2.1)

в этом смысле является, пожалуй, Autodesk Inventor. Функция предварительного просмотра сетки отсутствует, а для установки разрешения имеются три заранее определенные настройки, которые непросто приспособить для нужд пользователя. Для модификации этих настроек необходимо редактировать регистр операционной системы Windows. Такие системы, как SolidWorks, Solid Edge, NX и Pro/ENGINEER, выгодно отличаются от Autodesk Inventor и предлагают средства управления большинством параметров, влияющих на качество сетки, а также средства предпросмотра STL-файла до его сохранения.

Оценивать качество STL-данных полезно с помощью программы Magics компании Materialise. Как отмечалось ранее, этот продукт используется в индустрии БП для импорта, ремонта и редактирования промышленных STL-данных на протяжении уже длительного времени [7]. Программа Magics позволяет выявлять наиболее общие проблемы и ошибки в STL-файлах. Поскольку файлы с данными об изделиях различались как по размеру, так и по сложности, конечно, строго сравнивать разные программы нельзя.

Для отдельных деталей все основные CAD-системы выводят STL-данные довольно хорошего качества и практически без ошибок. Единственная общая проблема есть у пакетов, которые относятся к классу систем поверхностного моделирования, таких как Rhino компании McNeel и StudioTools компании Alias. В отличие от твердотельных моделлеров, в системах поверхностного моделирования построение точной, полностью замкнутой (герметичной) модели не является обязательным. Поэтому потенциальный риск появления ошибок при использовании таких систем довольно велик. Поскольку изначально средства для вывода в формат STL и у StudioTools, и у Rhino были очень плохими, их разработчики признавали это и сразу включили в свои пакеты инструменты, которые позволяют убедиться, что результирующие STL-файлы относительно свободны от ошибок. Кроме того, есть некоторые проблемы при работе с I-deas — треугольники с неправильным направлением нормали, дыры в сетке и искаженные грани.

Всего лишь пять разработчиков CAD-систем предоставляют своим пользователям возможности вывода STL-данных сборочных моделей [5]. При этом только SolidWorks и Pro/ENGINEER позволяют генерировать серию STL-файлов отдельно для каждого компонента. Остальные системы поддерживают лишь создание сборки как составного тела в одном STL-файле.

Работа со сборками привносит в STL-файлы ошибки, несмотря на то что этот процесс очень удобен для автоматизации создания STL-данных по сборочным моделям. Если для отдельных деталей практически все CAD-инструменты позволяют выводить STL-данные, близкие к идеальным, то когда дело доходит до сборок, это часто становится настоящим бедствием. Треугольники с неправильным направлением нормали (см. рис. 2.17 и 2.18) были и остаются наиболее общей проблемой. Хотя системе SolidWorks удается избежать проблемы с неправильным направлением нормали треугольников, опыты показывают, что и она допускает различные виды ошибок, связанных с искажением граней и дырками в сетке.

У системы Pro/ENGINEER также есть проблемы. Вывод файлов для отдельных деталей сборки проходит успешно, но когда сама сборка выводится в виде единого STL-файла, число деталей в ней может значительно возрасти, что указывает на появление мусора. Под мусором в данном случае понимаются отдельные поверхности, не связанные ни с одной деталью. Можно предположить, что во время генерации STL-файла какие-то элементы сборочной модели распадаются на множество поверхностей, увеличивая количество деталей в файле. Сходные проблемы наблюдаются в системах CATIA V5 и NX. При проверке сборки тестовой программой Magics обнаруживаются лишние поверхности.

Причина ошибок, прежде всего неправильного направления нормалей треугольников, кроется, вероятно, в методике построения исходной модели. Для всех ее элементов должно выполняться условие единства модели. Это означает, что все элементы модели используют одно и то же 3D-пространство и между ними отсутствуют щели, какими бы малыми они ни были. Зазоры между элементами модели являются одной из главных причин возникновения проблем в процессе триангуляции. В результате получаются различные пересечения, изменяются направления нормалей треугольников или, как в случае с CATIA, образуется мусор в виде большого количества лишних поверхностей. В [5] считают, что проблемы нарушения целостности сборки при выводе файлов из Pro/ENGINEER, CATIA V5 и NX не могут быть объяснены условиями сопряжения деталей в сборке.

В Самарском филиале ФИАН при создании экспериментально-технологического стенда по СЛС/П также был создан ряд простейших программ для визуализации, просмотра и тестирования работы системы [3].

Программы-перекодировщики. Каждая из программ перекодирования обрабатывает исходные данные по определенному алгоритму и работает с графическими форматами наподобие стандартного бинарного неупакованного TIF-формата размером не более 1024 × 1024 пиксела (точки), а также BMP или PCX. То есть каждый слой (сечение) объемного изделия должен быть заранее приготовлен в одном из этих форматов.

Программа *CONTUR.EXE* осуществляет обход сечения (например, квадратного) по контуру (рис. 2.29, *б*). Она дает хорошие результаты для сечений, состоящих в основном из тонких линий (контурные рисунки). При обработке сложных заполненных сечений (наподобие фотографий) дает оптимальный обход рисунка, но при этом создает очень большой выходной управляющий файл (под оптимальностью обхода следует понимать соотношение количества пустых проходов лазерного луча установки «КВАНТ-60» к числу обрабатываемых точек). В результате перекодировки формируется управляющий файл с таким же именем, что и исходный, и с расширением .KWC.

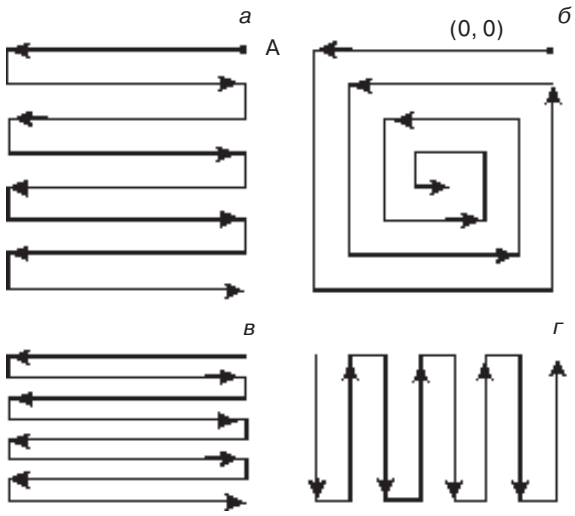


Рис. 2.29. Возможные пути обхода сечения изделия ЛИ:
а — по меандру; *б* — по контуру; *в* — круговой; *г* — матричный

Программа *RASTCONT.EXE* реализует растрово-контурный алгоритм перекодировки. Дает хорошие результаты при обработке любых сечений объектов. Единственным недостатком этого перекодировщика является то, что при спекании слоя самая последняя обрабатываемая линия из ряда соседних линий будет отличаться от них своей яркостью. Такие линии будут разбросаны по всему сечению, что несколько портит общий вид обработанной поверхности. Следует отметить, что все сказанное относится также к CONTUR.EXE, но в большинстве случаев эти последние линии для контурного обхода будут находиться по центру спекаемых слоев, что создает иллюзию выпуклости изображения. В результате перекодировки формируется управляющий файл с таким же именем, что и исходный, и с расширением .KWO.

Наконец, программа *RASTR.EXE* осуществляет растровый проход по меандру (рис. 2.29, *а*). Данный метод свободен от неравномерности по яркости, но обход не оптимален, так как время спекания существенно возрастает. К тому же выходной управляющий файл получается довольно большого размера. В результате перекодировки формируется управляющий файл с таким же именем, что и исходный, и с расширением .KWR.

На пульте управления установки предусмотрен тумблер, позволяющий менять направление обхода с кругового (см. рис. 2.29, *в*) на матричный (см. рис. 2.29 *г*).

Управление спеканием отдельных слоев. Для этого используется программа *SINTER.EXE*. После запуска программы лазерный луч сразу смещается в правый дальний от оператора угол (точка *A* или точка (0, 0) на рис. 2.29, *а*, *б* соответственно). Далее SINTER.EXE предлагает оператору ввести следующие параметры:

- величину смещения N в пикселах от точки (0, 0) до того места, откуда необходимо начать процесс спекания;
- шаг N_Y по оси Y (от 1 до 20);
- количество линий (проходов) N_{1Y} по оси Y, где будет проведено спекание, которое должно удовлетворять условию $N_{1Y} \le (1024 - N)/N_Y$;
- шаг по оси X (от 1 до 10);
- время успокоения лазерного луча в точке (в тактах IBM PC) при смещении от точки к точке.

После получения этих данных программа готова к работе. Теперь достаточно нажать Enter, чтобы требуемый квадрат (прямоугольник) был заштрихован лазерным лучом. Многократное повторение Enter, чередуемое с подсыпанием порошка, позволяет формировать простейшие объемные фигуры (куб, параллелепипед). Если необходимо скорректировать параметры задачи, можно нажать клавишу P (или p) и повторить ввод параметров. При нажатии Esc программа выходит в DOC. По окончании спекания каждого слоя программа возвращает лазерный луч в точку (0, 0) и выводит время, затраченное на процесс сканирования. Зная расстояние между точками (например, для объектива с f = 149 мм оно составляет ~50 (мм)/1024), геометрические параметры отсканированного сечения (N, N_Y, N_{1Y}) и время, можно найти скорость сканирования ЛИ поверхности.

Таким образом, данная программа является мощным инструментом при поиске оптимальных режимов СЛС/П. Следует напомнить, что при необходимости изменить путь обхода (см. рис. 2.29, *в*, *г*) достаточно просто переключить тумблер Маркировка: Матричная ↔ Круговая на блоке управления установки «КВАНТ-60» в противоположное положение.

Сервис. Программно-аппаратный комплекс имеет несколько сервисных программ.

Программа *KWTEST.EXE* позволяет протестировать оборудование, то есть наличие интерфейса между IBM PC и дефлекторами, а также выполнить ряд простейших операций. При нажатии клавиши:

- Esc — программа выходит в DOC;
- F1 — выполняется ручной тест, то есть можно задать любые координаты в поле размером 1024 × 1024 пикселов, и лазерный луч должен переместиться в это место;
- F2 — лазерный луч опишет квадрат размером 50 × 50 мм для объектива с f = = 149 мм и 100 × 100 мм для объектива с f = 336 мм;
- F3 — в рамках квадрата лазерным лучом будет начерчена сетка;
- F4 — лазерный луч пройдет по диагоналям квадрата;
- F5 — лазерный луч впишет в квадрат еще один квадрат, повернутый относительно основного центра поля на 45°;
- F6 — осуществляется проверка невозврата в точку;
- F7 — оценивается размер поля сканирования.

Программа *VISUAL.EXE* позволяет визуализировать результат работы перекодировщиков, то есть показать на экране компьютера контур сечения (рисунка), который предстоит использовать управляющей программе. Изображение можно перемещать по экрану с помощью управляющих клавиш со стрелками вверх, вниз, влево и вправо. Если изображение не сдвигается, то в этом направлении нет ничего интересного. Выход из программы осуществляется нажатием клавиши Esc.

Синтез объемных изделий. Программа *NORM.EXE* позволяет выполнять послойный синтез объемных изделий. Предварительно подготовленный файл в STL-формате должен быть сохранен в ASCI-кодах (расширение *.ASC), то есть фактически файл должен содержать только координаты вертексов узлов поверхностных треугольников. Также желательно удалить из файла всю информацию о цветах 3D-объектов, материале и способах редеринга, используемых графическим пакетом, но не существенных для послойного СЛС.

После запуска программа NORM.EXE предлагает выбрать из текущей директории название файла с расширением *.ASC, содержащего информацию о синтезируемом изделии. Если файла в текущей директории нет, можно указать полный путь к искомому файлу или выполнить его поиск подгружаемыми средствами. После ввода файла программа загружает его в оперативную память машины. К сожалению, оперативная память исполняемых в DOC программ не может быть больше 640 Кбайт, поэтому, если файл ASC-формата очень большой (размеры STL-файлов могут достигать 20...40 Мбайт!), необходимо разбить 3D-объект средствами профессиональных графических пакетов на более мелкие части и спекать их по отдельности. Еще один путь решения данной проблемы — это переход к другой операционной системе (от Windows к Unix — последняя как раз и используется на технологических установках SinterStation по СЛС фирмы 3D Systems, Co.). Однако решаемые до настоящего момента исследовательские и научно-технические задачи пока не требовали таких шагов.

После загрузки графического файла NORM.EXE предлагает ввести в интерактивном меню следующую информацию:

- номер слоя, с которого требуется начать синтез изделия;
- приращение (смещение) в вертикальном направлении, которое следует задать при спекании (то есть указать, что требуется спекать каждый последующий слой, каждый второй, десятый, сотый и т. д.);
- коэффициент (от 1 до 0), позволяющий пропорционально уменьшить все геометрические размеры синтезируемого 3D-объекта;
- время успокоения лазерного луча в точке при спекании (в тактах IBM PC);
- время, требующееся на переход от точки к точке, когда нет спекания (в тактах IBM PC).

На любой стадии процесса ввода параметров нажатием клавиши Esc можно выйти в DOC либо повторить ввод с новыми параметрами. Информацию можно изменять также при переходе на следующий слой, что позволяет изменять условия спекания от слоя к слою, то есть формировать градиентное изделие.

Если сечение 3D-объекта имеет сложный внутренний контур, в программе предусмотрена возможность перехода на ручной режим выбора сечений, которые будут заштриховываться лазером. Для этого достаточно щелкнуть левой кнопкой мыши на месте штриховки.

Возможность в любой момент прервать процесс синтеза представляется крайне актуальной для экспериментально-технологического стенда, каким и является наш стенд. Действительно, современные СЛС-машины (см. примеры в главе 5) позволяют загрузить установку работой на несколько дней, так что функции оператора будут сводиться к контролю за протеканием процесса по компьютерной программе. Это важно на производстве, когда процесс полностью отлажен, оптимизирован и фирмой-поставщиком выбраны порошки с нужными характеристиками. Для исследовательских же целей такая практика была бы сплошным тормозом, так как:

- для оптимизации порошковой композиции необходимо бы было готовить порошковую смесь для всего объема порошкового бункера (технологическая установка не заработает, если бункер не загружен);
- для оптимизации режимов лазерной обработки надо бы было синтезировать всю деталь, а не несколько слоев (прервать синтез на современной машине можно, но продолжить с места останова — не всегда);
- компьютерные программы управления установкой написаны так, чтобы оператор минимально участвовал в ее работе, следовательно, любая попытка вмешательства приводит к перезагрузке программы и процесс начинается с начала. Сами программы собраны и скомпилированы в виде выполняемых файлов, и редакция их невозможна.

По мере решения задач моделирования у операторов установок для БП, непосредственно выполняющих синтез объемных изделий и не занимающихся проектированием, исчезает необходимость в полнофункциональных версиях ПО САПР. Им нужны специальные программы, предназначенные только для просмотра, комментирования и оценки (измерений) будущего изделия. За данными классом программ закрепилось общее наименование «*вьюверы*» — буквально «просмотрщики». Существуют программы просмотра графических (растровых и векторных) и текстовых файлов. Интересующие нас программы просмотра предназначены для работы с векторными (то есть содержащими явно описанную графическую информацию) файлами. Применительно к САПР их можно разделить на две группы:

- вьюверы, предоставляемые разработчиком САПР для просмотра файлов, созданных в программном обеспечении их разработки, без установки самого ПО;
- вьюверы, предоставляемые независимыми разработчиками.

Вьюверы непосредственно от разработчика, как правило, бесплатны и доступны для загрузки с сайта компании-производителя. Вьюверы независимых разработчиков, как правило, платны, но это компенсируется их более широкими возможностями в плане количества поддерживаемых форматов. Рассмотрим программы просмотра на основании этого критерия. В качестве примера далее представлены основные игроки на рынке САПР среднего уровня — компании **Autodesk**, **SolidWorks** и **Microstation**. Основной тенденцией предоставляемых средств просмотра является их четкое разделение на три группы в зависимости от назначения:

- программы, предназначенные только для просмотра и печати. Все они бесплатны;

- программы, предназначенные для создания файлов в формате обмена чертежных данных, продвигаемом этим разработчиком. Они также бесплатны;
- программы, предназначенные для комментирования. Помимо выполнения стандартных функций программ первой группы они также позволяют вносить комментарии, проводить измерения и осуществлять экспорт в популярные графические форматы. Данные программы, как правило, доступны для бесплатного использования в течение ограниченного времени.

Кратко рассмотрим программы просмотра, предоставляемые компаниями-производителями.

Autodesk Inc. Разработчик AutoCAD, Mechanical Desktop и Autodesk Inventor.

Средства просмотра:

- Autodesk DWF Viewer предназначен для просмотра и печати 2D- и 3D-DWF-файлов с поддержкой нескольких листов в одном файле. DWF (Drawing Web Format) — формат, специально созданный фирмой Autodesk для обмена чертежной информацией через Интернет.
- Autodesk Inventor View предназначен для просмотра и печати 3D-проектов, созданных в среде Autodesk Inventor 10 и Autodesk Inventor 11.
- DWG TrueView позволяет осуществлять просмотр и печать 2D- и 3D-файлов в форматах DWG (внутренний формат AutoCAD) и DXF (формат обмена AutoCAD), а также публикацию их в DWF-формате (рис. 2.30).

Средства конвертации: Autodesk DWF Writer позволяет переводить чертежные файлы в DWF-формат. Помимо программ, разработанных Autodesk, поддерживает SolidWorks, Pro/ENGINEER, CATIA, UGS Solidedge и NX, а также программные продукты Microsoft и Adobe Acrobat.

Средства комментирования: программа Autodesk Design Review предназначена для просмотра 2D- и 3D-файлов в форматах DWG, DXF, DWF и Autodesk Inventor, а также графических файлов. Программа поддерживает комментирование, включая такие функции, как пометки и аннотации (с возможностью автоматического сохранения), а также средства вычисления длины и площади, и импорт дополнительной проектной информации.

Все эти программы доступны для загрузки с сайта http://www.autodesk.com/.

Система трехмерного моделирования SolidWorks. Разработчик SolidWorks Corporation.

Средства просмотра:

- SolidWorks Viewer позволяет просматривать модели SolidWorks без установки самой САПР. Доступна как плагин к Internet Explorer или как независимое Windows-приложение.
- eDrawings Viewer позволяет просматривать и печатать файлы как в формате eDrawing (особо компактный формат для публикации чертежных данных, продвигаемый компанией SolidWorks), так и в форматах SolidWorks (модели, сборки и чертежи) и AutoCAD (DWG и DXF). Доступны определение размерных параметров и динамический просмотр моделей. Поддерживает экспорт в растровые форматы.

Средства конвертации: eDrawings Publisher — программа предназначена для публикации файлов в формате eDrawing из SolidWorks, AutoCAD, Inventor, Pro/ENGINEER, CATIA V5, Unigraphics/NX, Solid Edge и CoCreate-OneSpace.

Средства комментирования: eDrawings Professional помимо возможностей, предоставляемых eDrawings Viewer, позволяет комментировать чертежные файлы

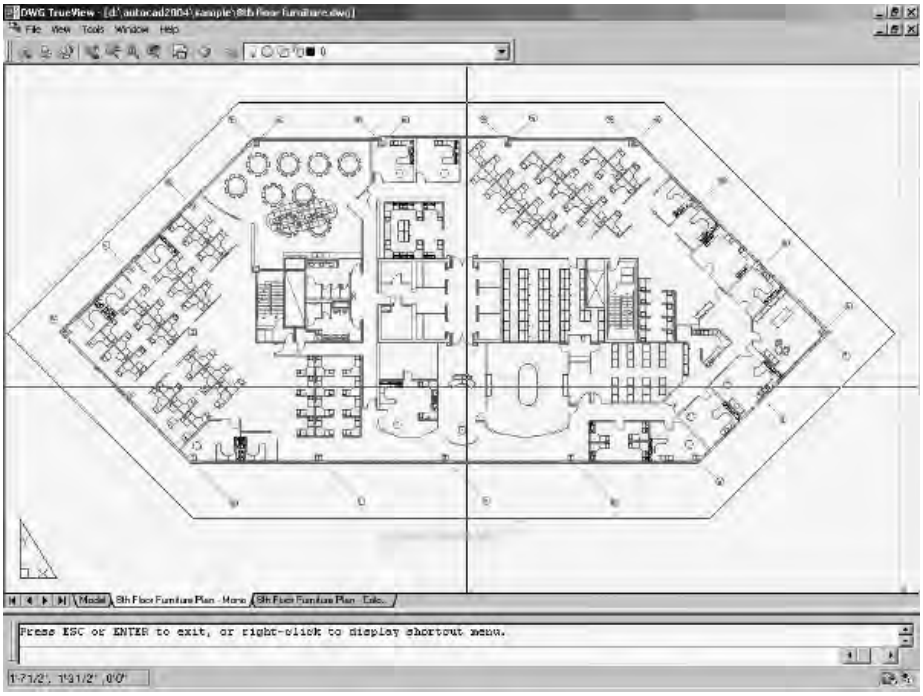


Рис. 2.30. Пример просмотра чертежа в DWG TrueView

и определять геометрические размеры, поддерживает динамические сечения, перемещение компонентов и просмотр анимации (рис. 2.31).

Все эти программы доступны для загрузки с сайта http://www.solidworks.com/.

Bentley Systems, Inc. Разработчик Bentley Microsation.

Средства просмотра: Bentley View предназначен для просмотра и печати DGN-файлов Bentley Microsation. Дополнительно поддерживает просмотр и печать DWG-файлов AutoCAD (до версии 2002), а также растровых и гибридных данных (рис. 2.32).

Средства комментирования: Bentley Navigator поддерживает просмотр и печать трехмерных чертежей в формате DGN и DWG (до версии 2002 включительно), а также растровых файлов и файлов Microsoft Project. Встроены возможности комментирования и точного вычисления размеров и доступен экспорт в форматы AVI и BMP. Обе программы доступны для загрузки с сайта компании http://www.bentley.com/.

Далее поговорим о программах просмотра, предоставляемых независимыми разработчиками.

Особенностью вьюверов, предоставляемых независимыми разработчиками, является их многофункциональность. Помимо САПР-форматов они поддерживают различные графические и текстовые форматы, что позволяет использовать эти программы как универсальное средство просмотра документов в пределах предприятия.

Cyco Software (http://www.cyco.com/, http://www.cyco.ru/). Компания занимается разработкой программ просмотра чертежных файлов более 15 лет. Из ее продукции применительно к данному разделу можно выделить программу просмотра **AutoManager View** и программу комментирования **AutoManager TeamWork**.

AutoManager View может просматривать и выводить на печать множество различных форматов данных, САПР — AutoCAD (DWG и DXF R11-2007, SLD, SLB

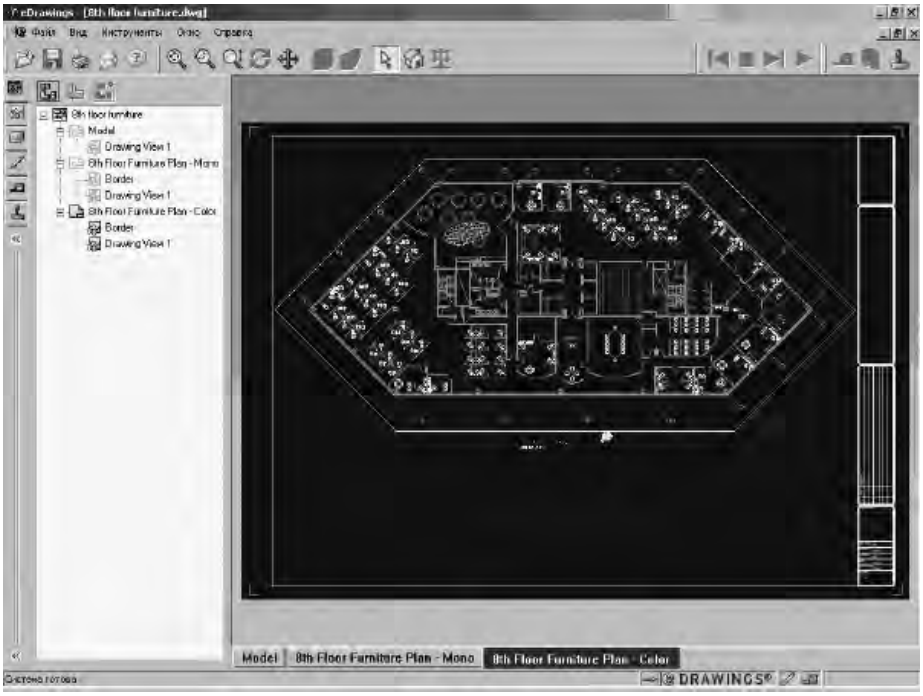


Рис. 2.31. Пример просмотра чертежа в eDrawings Professional

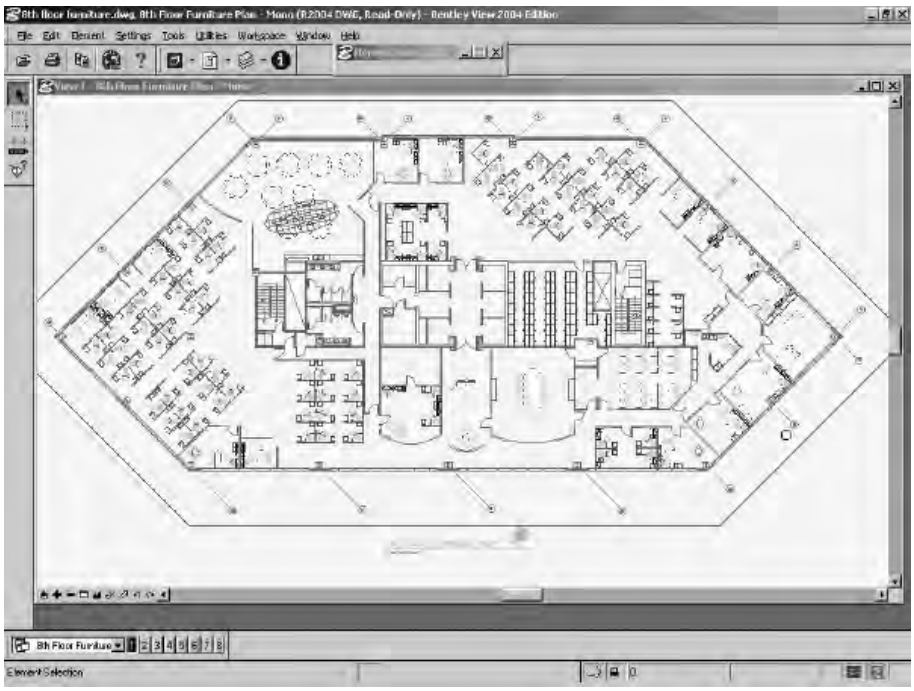


Рис. 2.32. Пример просмотра чертежа в Bentley View

и DWF), Cadkey (PRT), Microstation (DGN,CEL), Solidworks 2005 и 2006, GTX RasterCAD, Generic CADD, популярных растровых (GIF, JPG, PNG, BMP и др.) и текстовых форматов (TXT, RTF, DOC, XLS, DBF). Программа отмечена специальными наградами различных всемирно известных выставок и журналов.

AutoManager TeamWork является расширенной версией AutoManager View в плане поддерживаемых форматов данных. Он поддерживает форматы всего ПО Autodesk (AutoCAD, AutoCAD Mechanical, AutoCAD MAP, Mechanical Desktop, Archtectural Desktop, Autodesk Inventor, CAD Overlay и Raster Design), Solidworks 2004, 2005 и 2006, а также различные растровые и текстовые форматы (более 250, как говорят разработчики). Кроме этого, поддерживается комментирование файлов.

Загрузка тестовых версий ПО с сайта разработчика недоступна, однако можно заказать демонстрационный CD.

Cimmetry Systems (http://cimmetry.com/). Компания специализируется на разработке программ просмотра чертежных данных. Основной программный продукт — вьювер AutoVue — поставляется в четырех основных версиях, различающихся по функциональным возможностям и поддерживаемым форматам данных:

Средства просмотра:

- AutoVue позволяет просматривать и печатать более 100 популярных форматов — чертежных (AutoCAD, Microstation, Solidworks), растровых (TIFF, JPG, GIF и т. д.), графических векторных (PDF, PPT, AI), баз данных (Access, Dbase), текстовых и архивных форматов (рис. 2.33).
- AutoVue Solidmodel — кроме форматов, поддерживаемых AutoVue, позволяет просматривать и печатать чертежные форматы систем трехмерного моделирования (Solidworks, Pro/ENGENEER, Unigraphics, Autodesk Inventor, Solid Edge и Parasolid), а также форматы ПО, предназначенного для разводки печатных плат (PCAD, Protel, Allegro и др.).

Средства комментирования:

- AutoVue Professional — расширенная версия AutoVue, которая кроме просмотра и печати позволяет создавать пометки и аннотации, а также определять и проставлять размерные параметры чертежей.
- AutoVue Solidmodel Pro — это расширенная версия AutoVue Solidmodel, помимо просмотра и печати моделей она позволяет импортировать и комбинировать модели, созданные в различных системах трехмерного моделирования, комбинировать механические и электронные компоненты, создавать списки материалов и, конечно, поддерживает ввод пометок и аннотаций, а также определение и простановку размеров.

Все программные продукты семейства AutoVue помимо стандартной версии могут поставляться в качестве решения «клиент/сервер», что позволяет организовать работу удаленных пользователей над одним проектом и установить права доступа к просматриваемой информации. Можно загрузить полнофункциональную 30-дневную демоверсию AutoVue Solidmodel Pro, Desktop Edition с сайта разработчика.

Softelec (http://www.softelec.de/). Компания Softelec специализируется на разработке средств конвертации и редактирования растровых файлов. Программа для просмотра чертежных данных разработана с целью дополнения пакета предоставляемых компанией программных решений и, на мой взгляд, является хорошим примером независимого разработчика, для которого создание вьюверов не является основной специализацией.

VPview — программа относится к средствам комментирования, так как помимо просмотра и печати файлов в форматах САПР (DXF, DWG, DGN), графических

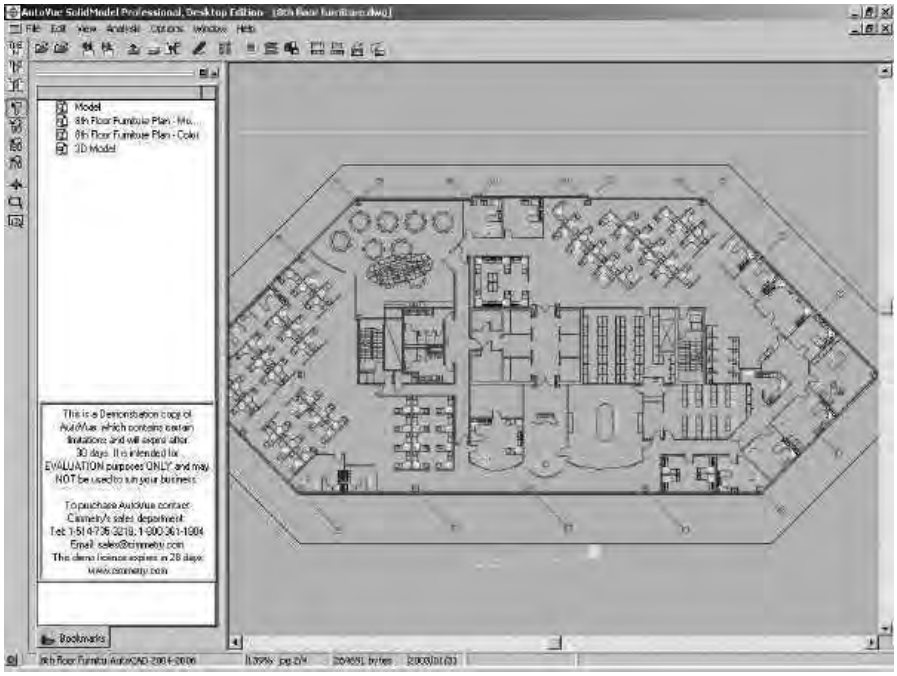


Рис. 2.33. Пример просмотра чертежа в AutoVue

и гибридных форматах позволяет осуществлять создание пометок и аннотаций. Пометки и аннотации можно сохранять в специальный формат RLF, разработанный компанией Softelec, с целью последующего просмотра вместе с исходными чертежными файлами на компьютерах других пользователей. Полнофункциональная демоверсия программы VPview доступна для загрузки с сайта компании http://www.softelec.de/.

Adobe Systems Inc. (http://www.adobe.com). Решение для электронного документооборота, которое предлагает компания Adobe, не является просмотрщиком форматов в прямом смысле слова. Вместо этого продвигается собственный формат обмена данных — PDF (Portable Document Format), который позиционируется как универсальное решение для обмена графическими и текстовыми данных между любым ПО (рис. 2.34). Программное обеспечение для работы с PDF-форматом, предоставляемое корпорацией Adobe, позволяет либо только просматривать и печатать файлы в этом формате (Adobe Acrobat Reader), либо также создавать и редактировать их. Программы, позволяющие создавать и редактировать PDF-документы, различаются между собой палитрой функциональных возможностей (а вследствие этого ценой), от простейшего Adobe Acrobat Elements, который создает документы в формате PDF путем вывода на печать на виртуальный принтер, до Adobe Acrobat 3D, позволяющего конвертировать в PDF-формат 3D-модели. Далее описаны основные функциональные возможности этой 3D-разработки семейства Adobe Acrobat.

Adobe Acrobat 3D имеет возможность конвертировать в PDF-формат 3D-модели из большинства САПР, создавать интерактивные документы с трехмерным содержанием, добавлять материалы и сечения, редактировать освещение. Реализована поддержка экспорта как 3D-моделей, так и 2D-изображений. В качестве форматов экспорта доступны STEP, IGES и Parasolid. Полнофункциональная 30-дневная оценочная версия Adobe Acrobat 3D доступна для загрузки с сайта Adobe Systems.

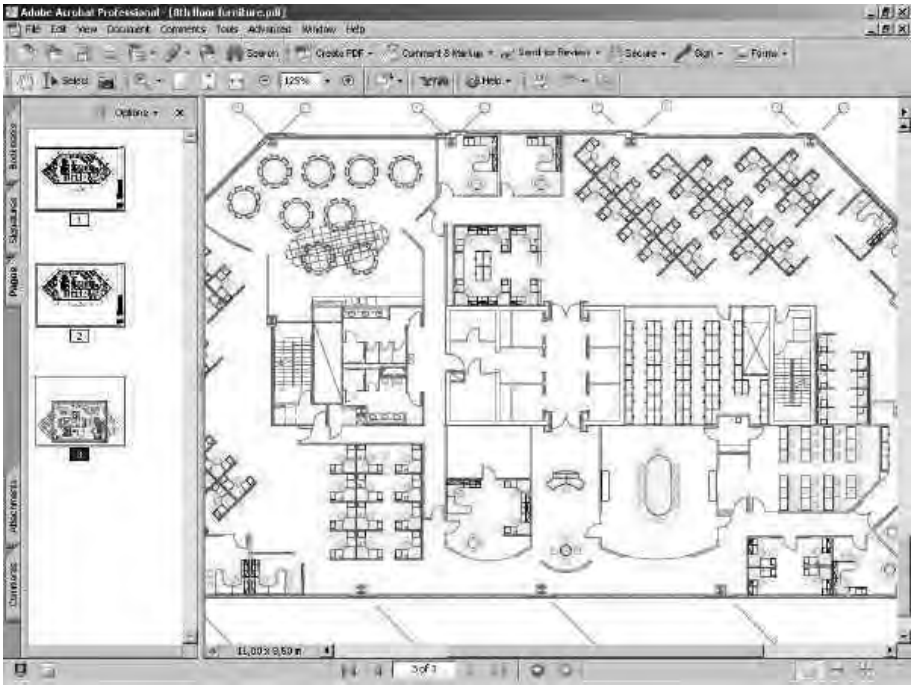


Рис. 2.34. Чертеж, конвертированный в формат PDF

Таким образом, подводя итоги, следует сказать, что стратегию выбора и использования просмотрщиков в системах БП определяют исходя из потребностей исполнителя, который сам для себя должен ответить на такие вопросы:

- Должны ли его пользователи вносить пометки в чертежи или им достаточно только просмотра и вывода на печать?
- Используется ли для обмена данными между сотрудниками Интернет или локальная сеть?
- Возможно, оптимальным будет использование «облачных» технологий, когда используется программное обеспечение из Интернета?

В приложении В представлен дополнительный список программ по конвертированию и трансляции STL-формата.

2.10. Точность и ошибки воспроизведения 3D-изделий средствами САПР, оценка качества и вопросы стандартизации

Как отмечалось в разделе 2.3, существует несколько типичных ошибок, которые появляются при экспорте в формат STL. Первая из них связана с полигонально-сеточной природой самого формата, из-за которой STL-файлы всегда являются аппроксимацией полной 3D-модели. Вопрос состоит только в том, насколько точно вы хотите аппроксимировать форму детали. По существу, при уменьшении размеров треугольников накладываемой сетки (где это необходимо) увеличивается разрешение, а значит, и точность, с которой цифровая 3D-модель представлена

в STL-файле. Проблемы, связанные с выбором оптимального разрешения, особенно существенны для неплоской геометрии, поскольку сложная поверхность, точно определяемая полученными в CAD-системе данными, заменяется аппроксимирующей поверхностью, состоящей из треугольников (фасетов). Если аппроксимация компьютерной 3D-модели будет довольно грубой, то на БП-модели вы увидите фасеты, из которых состоит сетка. Эти фасеты удаляются на стадии финальной доработки, однако при этом можно потерять и мелкие элементы детали или даже часть изделия, которую удалять нельзя. Особенно это критично для SLA-установки или когда аналогичное оборудование используется при серийном производстве деталей методом вакуумного или термореактивного литья. Если вы работаете с поставщиком услуг БП, это также означает, что за доработку придется платить дополнительно.

Конечно, есть и обратная сторона медали. Если уменьшать размеры треугольников, то для аппроксимации той же геометрии понадобится больше треугольников, что приведет к увеличению размера файла (рис. 2.35). Например, если в пакете Autodesk Inventor изменить установку разрешения с Medium на High [5], то при выводе той же CAD-модели в формате STL размер файла утроится. Однако при современных высокоскоростных средствах коммуникации передача большого объема STL-данных не является проблемой. Даже если файл окажется слишком большим, его можно записать на CD, а для передачи через FTP-сервер или пересылки по e-mail — архивировать и разбить на части. Кроме неправильного выбора разрешения при выводе STL-файла неблагоприятное влияние на форму получаемой в итоге БП-модели может оказать множество других факторов. Оставляя в стороне недостатки машин для БП, следует сказать, что большинства общих проблем можно избежать, если немного лучше понять, каким образом влияют на процесс прототипирования параметры той или иной системы. Например, поскольку STL является мозаичным форматом и для получения STL-файла практически из любой CAD-системы требуется какая-то конвертация данных, всегда существует потенциальный источник ошибок. Для большинства аддитивных технологий БП (когда материал добавляется, а не удаляется, как при фрезеровании на станке с ЧПУ) требуется, чтобы модель была герметичной, а ее форма была однозначно определена не только снаружи, но и внутри. То есть должно быть абсолютно четко понятно, где материал есть, а где его нет. Любая ошибка в STL-

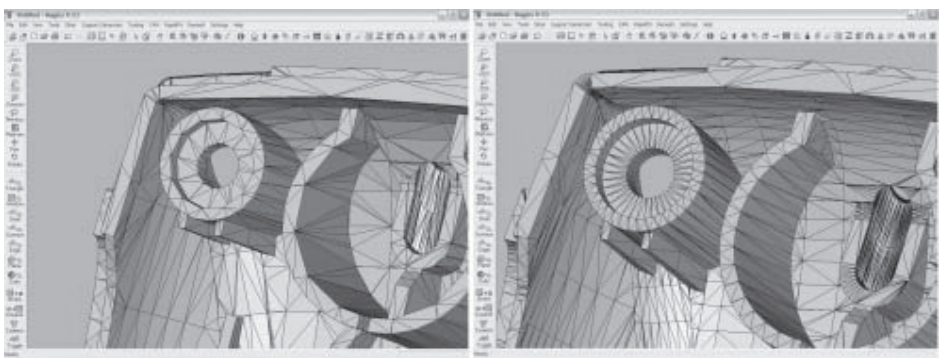


Рис. 2.35. С помощью программы Magics компании Materialise можно наглядно увидеть, как неправильный выбор разрешения при экспорте в STL-файл влияет на детальность представления CAD-модели. *Слева* показан элемент конструкции, экспортированный из SolidWorks с установкой Грубо (Coarse), *справа* — с установкой Точно (Fine)

файле может привести к нарушению процесса построения БП-модели. В качестве примера можно назвать следующие типичные проблемы:

- Часть треугольников в STL-файле имеет неправильные направления нормалей. Как это ни тривиально, но в этом случае программное обеспечение, отвечающее за генерацию управляющих данных о форме каждого слоя для БП-машины, будет добавлять материал вне объема БП-модели, а не внутри. Это приведет к браку и лишнему расходу материала.
- Неверная стыковка треугольников сетки. Если грани фасетов неправильно стыкуются с соседними, это повлечет за собой ошибки при воспроизведении отдельных ребер или даже всего контура. Результатом будут ошибки при построении БП-модели, что потребует ее последующей доработки, или же в отдельных случаях нарушение процесса послойного синтеза.

Специалисты по технологиям БП и все, кто тесно связан с этим процессом, скорее всего, уже сталкивались с трудностями, которые описаны ранее. Однако те сотрудники, которые готовят данные для БП-специалистов в своих компаниях (или, что бывает чаще, для сторонних поставщиков БП-услуг), не всегда подозревают о проблемах, которые могут вызвать присланные ими STL-файлы. Да и при тестировании покупаемой БП-системы зачастую возникает соблазн объяснить нарушение процесса синтеза модели несовершенством оборудования. Но в большинстве случаев это не так — просто низкое качество БП-модели является следствием использования некачественных STL-данных или неопытности пользователей. Вот какие проблемы называют поставщики БП-услуг, с которыми они сталкиваются постоянно [5]: «Пользователи присылают нам плохие файлы. При выводе STL-файла из CAD-пакета, в котором была разработана модель, может быть задано различное разрешение. Иногда мы получаем “экономные” файлы, в которых детали как будто граненые. В этом случае и БП-модель будет состоять из набора плоских поверхностей. И наоборот, если при выводе было задано слишком высокое разрешение, размер файла оказывается слишком большим для обработки. Нужна “золотая середина” между размером и качеством». При таком разнообразии качества файлов поставщикам БП-услуг нередко приходится тратить часы на устранение ошибок, чтобы сделать данные пригодными для синтеза БП-модели. А это, конечно, работа, требующая дополнительных затрат.

STL — наиболее примитивный формат представления 3D-данных. Он не аккумулирует в себе какую-либо дополнительную информацию. Некоторые разработчики снабжают CAD-систему вполне приличной поддержкой вывода STL-файлов, другие — весьма посредственной. По мнению авторов [5], у продуктов компании Autodesk, вероятно, самый слабый функционал с точки зрения управления процессом, хотя у некоторых других поставщиков тоже бывают проблемы с файлами. Странности разработок компании UGS заключаются в том, что если в системах NX и I-deas проблемы с STL-экспортом возникают, то в Solid Edge их нет. Пакеты Pro/ENGINEER и SolidWorks обеспечивают высокое качество STL-вывода для деталей, а также хорошие возможности управления процессом. В то же время качество вывода сборок довольно низкое. Однако оба пакета предоставляют пользователям инструменты для вывода деталей из сборок с генерацией отдельного файла для каждой детали. Кроме того, включенные в SolidWorks функции проверки пересечения деталей должны помочь избежать ошибок при создании STL-файлов, содержащих несколько деталей. Другие системы тоже имеют подобные инструменты, но они еще не интегрированы в процесс вывода и их применение требует дополнительных шагов, которые можно забыть или пропустить.

Часть II

ОСНОВЫ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Глава 3
Методы БП с участием жидкой фазы

К жидкофазным можно отнести следующие методики послойного синтеза.

Лазерная стереолитография (Laser StereoLithography (SLA)) основана на селективном отверждении фоточувствительных полимеров под действием ЛИ. Сканирование лазерным лучом поверхности каждого вокселя (*voxel* — объемный пиксел, или элемент трехмерного объема) в соответствии с данными CAD-файлов позволяет послойно формировать будущее изделие.

Голографическое интерференционное затвердевание (Holographic Interference Solidification (HIS)) подразумевает проецирование голографического изображения каждого из слоев на фоточувствительный полимер и последующее затвердевание, пока слой за слоем не будет сформировано объемное изделие.

Двулучевое интерференционное затвердевание (Beam Interference Solidification (BIS)) основано на поточечном затвердевании фоточувствительных полимеров в прозрачном контейнере на пересечении двух лазерных лучей с разными длинами волн. Первый лазер возбуждает жидкий полимер, переводя его в обратимое метастабильное состояние, а второй выполняет полимеризацию. Применение процесса имеет технические ограничения, связанные со слабой поглощательной способностью ЛИ на больших глубинах, эффектами затенения уже затвердевшим материалом необработанных областей полимера и дифракцией ЛИ, затрудняющей точность сведения двух лучей в одну точку.

Процесс *жидкофазной термической полимеризации* (Liquid Thermal Polymerization (LTP)) подобен SLA в части послойного затвердевания жидкого полимера. Однако полимеры, используемые в LTP-процессе, являются термореактивными, а не фотореактивными, то есть затвердевание инициируется тепловым источником, а не светом. Термическая природа процесса создает проблемы с точностью позиционирования вокселя из-за эффекта рассеяния тепла.

Процесс *струйного разбрасывания частиц* (Ballistic Particle Manufacture (BPM)), или капель расплава, из пьезоэлектрических сопл на подложку. Управление струйным потоком идет по данным 3D-модели, спроектированной на компьютере. Обычно используются легкоплавкие материалы (например, термопласты, металлы).

Процесс *электроразмещения* (Electrosetting) основан на использовании электродов совместно с пером графопостроителя или лазерного принтера, которые управляют осаждением проводящего материала в ванне с термореактивной жидкостью. Затвердевание жидкости обусловлено смещением электрического поля через жидкость при подаче на электроды электрического заряда.

3.1. Фотополимеризационные материалы

Фотополимеризационные материалы в настоящее время широко применяются не только в БП. Оснастка печатей, масочные технологии и прочее требуют использования отверждаемых полимерных композиций. В БП они также используются не только в процессах с участием жидкой фазы, о которых идет речь в данной главе, но и в процессах 3D-печати (см. главу 5). Поскольку 3D-печать считается бюджетной и экономной, она получает все большее распространение (см. об этом в разделе 1.6).

Поэтому гигант БП-индустрии — компания 3D Systems активно использует накопленный опыт из SLA-технологии в 3D-печати. Существует два основных производителя фотополимеров (см. приложение А) — Ciba (марка SL) и Du Pont (марка Somos).

3.1.1. Твердеющие под ультрафиолетом фотополимеры

Традиционными потребителями смол (олигомеров) являются фирма 3D Systems и малые японские производители SLA-машин. Протекционистскими мерами они совместно с производителями контролируют рынок исходных материалов для SLA, держат их стоимость на высоком уровне и фактически имеют от этого немалый дополнительный доход. Они рекламируют свои материалы как наиболее прочные (например, в 2004 году так был представлен новый фотополимер Accura SI 50 SL с характеристиками ABS-пластика), быстро полимеризующиеся, теплостойкие, а некоторые материалы, по их утверждениям, имеют биосовместимые свойства. Между тем технические (паспортные) данные фотополимеров пестрят предупреждениями об их химической опасности, в особенности при попадании в глаза и на кожу, о том, что их следует хранить при особых условиях (при отсутствии света и комнатной температуре) и не рекомендуется утилизировать.

В табл. 3.1 представлены современные материалы для БП с использованием фотополимеров фирмы DSM Somos (www.dsmsomos.com), а в табл. 3.2 и 3.3 — фирмы Solid Concepts (http://www.solidconcepts.com).

3.1.2. Обзор химии фотополимеров

Процесс стереолитографии основан на инициированной ЛИ радикальной полимеризации (отверждении) жидкого олигомера. Степень отверждения зависит от облученной лазером области, времени обработки и кинетических характеристик фотополимера. Первые смолы, их называли фотополимерной резиной, имели в своих цепочках мономеры полиакрилата, который отверждался по механизму свободной радикальной полимеризации. Однако впоследствии чаще стали использоваться смолы с эпоксидным основанием. Катионный механизм фотополимеризации стал преобладать над радикальным механизмом.

При радикальной полимеризации фотоинициатор после облучения лазером поглощает энергию фотона и производит свободные радикалы вследствие расщепления своего возбужденного состояния (рис. 3.1). Ввиду того что каждая молекула мономера имеет хотя бы две двойные связи акрилата, полимеризация распространяется в объеме, сшивая мономеры в полимерную сеть. Для повышения производительности процесса фотоинициатор должен поглотить свет на длине волны излучения лазера. Полиакрилат вообще имеет высокую реакционную способность и скорость фотополимеризации, однако полимеризация сопровождается высокой объемной усадкой (до 5%). А ингибирование кислорода может привести к неполному отверждению.

Таблица 3.1. Материалы и их свойства для стереолитографии по данным DSM Somos. www.dsmsomos.com

Материал*	Преимущества; тип***	Внешний вид, цвет	Вязкость cps/300C	Фото-ско-рость, *E*10 мДж/см^2	Модуль растяжения, МПа	Предел прочности, МПа	Удлинение на разрыв, %	Испытание по Изоду, Дж/см	HDT**/ 0,46 MPa, °C, UV (+TPC)
Somos 8110/8120	Эластичный; PE-подобный	Полупрозрачный	600/600	40/35	317,000/690,000	26,0/26,0	27,0/27,0	0,87/0,59	54/54
Somos 9110/9120	Универсальный; PP-подобный	Полупрозрачный	230/450	55/65	1,590/1,350	31,0/31,0	18,0/21,0	0,55/0,51	50/57
Somos 9420	Робастный; PP-подобный	Белый	475	95	700,000	18,5	28,0	0,46	49
ProtoTherm™ 12110/12120	Применим при высоких температурах; ABS-подобный	Красный	410/550	75/63	3,430/3,520	57,6/70,2	5,0/4,0	0,12/0,12	53 (155)/ 56 (126)
Somos 14120	Универсальный; ABS-подобный	Белый	240	64	2,460	45,7	7,9	0,24	53
NanoForm™ 15120	Точный; ProtoComposite™	Серый	570	112	5,000	48,0	2,1	0,15	66 (269)
NanoTool™	Точный; керамикоподобный; ProtoComposite™	Белый	2,500	84	11,200	69,9	0,9	0,14	225 (260)
ProtoGen™ 18120	Универсальный; перестраиваемый; ABS-подобный	Полупрозрачный	300	57	2,680	53,3	8,0	0,20	57 (95)
ProtoGen™ 18420	Универсальный; перестраиваемый; ABS-подобный	Белый	350	67	2,250	43,0	12,0	0,21	55 (95)

ProtoGen™ 18920	Универсальный; перестраиваемый; ABS-подобный	Серый	350	76	2,210	47,2	16,0	0,23	59 (97)
ProtoCast™ AF 19122	Малозольный; без добавок Sb, для точного литья	Желто-оранжевый	100	85	2,100	44,9	6,1	0,23	59
DMX-SL™ 100	Ударновязкий и износостойкий; ABS-подобный	Желтоватый	1,500	92	2,410	30,9	20,0	0,73	44
WaterShed® XC11112/11122	Чистый, водостойкий; ABS-подобный	Бесцветный	150/260	72/54	2,640/2,765	48,3/50,4	25,0/16,0	0,19/0,30	50/50
WaterClear® Ultra 10122	Оптически чистый; бесцветный	Бесцветный	165	46	2,880	55,5	8,0	0,25	47 (60)
Somos NeXt	Износостойкий, водостойкий; ABS-подобный	Белый	1000	67	2,500	44,0	10,0	0,52	57

* Названия материалов даны в английском написании, для того чтобы их проще было искать на сайтах производителей. ProtoTherm, NanoForm, NanoTool, ProtoGen, DMX-SL, ProtoCast, ProtoComposite WaterShed, WaterClear и Somos — торговые марки DSM Somos.

** HDT (Heat Deflection Temperature) — температура течения полимера.

*** PE — полиэтилен, PP — полипропилен, ABS — акрилбутадиенстирол.

Таблица 3.2. Материалы для технологии PolyJet™ (по данным http://www.solidconcepts.com/polyjet-materials.html)

Материал	Описание	Наличие/ стиль построения	Твердость по Шору по шкале D	Удлинение при разрыве, %	Предел прочности на разрыв	Модуль изгиба	HDT / 264 psi	HDT / 66 psi
SCI White	Общецелевой материал, целесообразно применять для прототипов и презентационных моделей в широком диапазоне индустрий	Стандарт	83	15...25	7,220 psi (50 МПа)	10,800 psi (74,6 МПа)	109 °F/ (43 °C)	116 °F/ (47 °C)
PolyJet Blue	Хорош для прототипов и изделий с высокой точностью деталировки	Высокое разрешение	83	15...25	7,990 psi (55 МПа)	12,100 psi (83,6 МПа)	113 °F/ (45 °C)	120 °F/ (49 °C)
PolyJet Gray	Идеален для прототипов и изделий с высокой точностью деталировки	Высокое разрешение	86	15	8,700 psi (60 МПа)	13,700 psi (95 МПа)	117 °F/ (47 °C)	120 °F/ (49 °C)
PolyJet Clear	Целесообразно применять для широкого диапазона твердых моделей, особенно для визуализации газожидкостных потоков или внутренних деталей	Высокое разрешение	83	15...25	8,745 psi (60 МПа)	11,000 psi (75,8 МПа)	111 °F/ (44 °C)	118 °F/ (48 °C)
Tango Plus	Удлинение при изломе достигает 200%, что делает материал самым робастным эластомером	Стандарт	27 (Шор А)	218	210 psi (1,45 МПа)	—	—	—

Таблица 3.3. Материалы для SLA-технологии (по данным http://www.solidconcepts.com/materials-sla.html#)

Материал	Описание	Наличие/стиль построения	Твердость по Шору по шкале D	Удлинение при разрыве, %	Предел прочности на разрыв	Модуль изгиба	HDT / 264 psi	HDT /66 psi
SC 1000	Превосходен для скоростного литья	Стандарт, высокое качество, скоростное литье и id-цвет	83	4...8	7,758 psi/ (53 МПа)	280 psi/ (1,930 МПа)	122 °F/ (50 °C)	127 °F/ (53 °C)
SC 4500	Предложен SCI Co, годится для общецелевых прототипов, отлично подходит для форм с жесткой посадкой	Стандарт, высокое качество	80	4...7	5,262 psi/ (36 МПа)	280 psi/ (1,930 МПа)	107 °F/ (42 °C)	107 °F/ (42 °C)
SC 5500	Материал высокой точности для SLA-функциональных прототипов и мастер-форм. Легок в постобработке	HDSL	86	9...12	7,120 psi/ (49 МПа)	330...350 psi/ (2,275... 2,413 МПа)	109...115 °F/ (43...46 °C)	120...127 °F/ (49...53 °C)
SL 7545	Полипропиленоподобный, высокая стойкость и прочность	Стандарт, высокое качество	79	12...21	5,000...5,700 psi/ (35...40 МПа)	200...225 psi/ (1,390... 1,560 МПа)	109...118 °F/ (43...48 °C)	118...122 °F/ (48...50 °C)
SL 7810	Прочные белые модели и прототипы с хорошей поверхностной отделкой и деталировкой, ABS-подобный	Высокое качество	86	10...20	5,200...7,400 psi/ (36...51 МПа)	275...348 psi/ (1,900... 2,400 МПа)	—	124 °F/ (51 °C)
Accura® 60	Поликарбонатоподобный, ударновязкий, износостойкий и неупругий	Высокое качество	86	14...22	8,400...9,800 psi/ (58...68 МПа)	220...300 psi/ (2,700... 3,000 МПа)	118...122 °F/ (48...50 °C)	127...131 °F/ (53...55 °C)

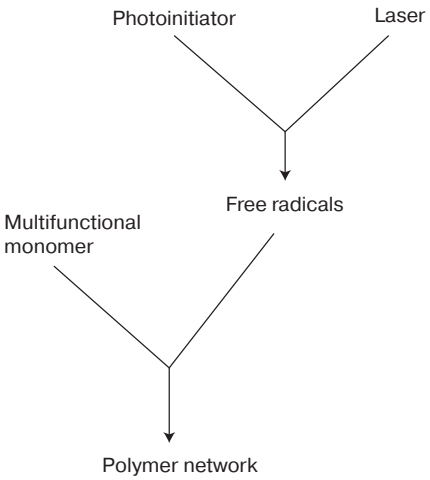


Рис. 3.1. Механизм радикальной полимеризации: фотоинициатор — лазер, свободные радикалы — полимер трехмерной структуры

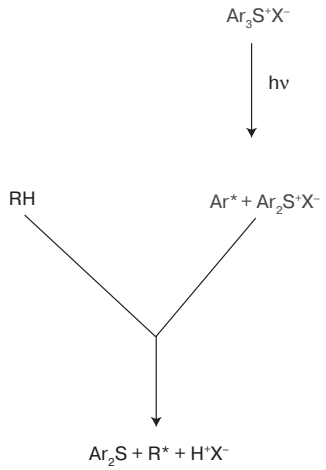


Рис. 3.2. Механизм катионной полимеризации

Катионная полимеризация использует активный катионный фотоинициатор (например, соль три-арил-сульфония (Ar_3S^+X) или два-арил-иодия (Ar_2I^+X)), который облучается ультрафиолетом (УФ) в присутствии молекулы — донора водорода (рис. 3.2). При катионной полимеризации не ингибируется кислород, а склонность к усадке гораздо меньше. Реакция полимеризации продолжается, даже если ЛИ выключается (темновая реакция). Эта особенность значительно увеличивает прочностные свойства полуфабриката (green part). Инфракрасная спектроскопия с временным разрешением для катионной и темновой полимеризации эфира винила и эпоксида в излучении Kr^+ лазера показывает, что короткая выдержка после лазерного импульса дает значительную темновую полимеризацию, а эфиры винила полимеризуются быстрее, чем эпоксиды. То есть реакционная способность их существенно выше, чем у акриловых олигомеров, у которых слабая темновая реакция и низкая прочность. Однако кинетика катионной полимеризации имеет сложный характер, не до конца еще изучена и сильно зависит от формулы олигомера. Интенсивные исследования направлены на поиск перспективных олигомеров. Определяющими параметрами здесь являются скорость фотополимеризации, время жизни полимера в активном состоянии, его вязкость и температура стеклования. Они влияют на будущие свойства прототипа — его точность, прочность, твердость, влаго- и температуроустойчивость, оптические свойства и т. д. Наиболее известными марками фотополимеров являются олигомеры фирм Ciba (например, SL 5195, SL 5510, SL 5520, SL 5530HT) и Du Pont (например, Somos 2110, Somos 7110, Somos 7120, Somos 8100, см. также табл. 3.1).

3.1.3. Виды резины, механизмы и скорости реакций полимеризации

Важными параметрами стереолитографического процесса, определяющими его качество, являются точность, отсутствие искажений, усадки прототипа по глубине и ширине линии прохода ЛИ. Геометрические характеристики зоны взаимодей-

ствия лазерного луча со смолой можно оценить, опираясь на закон поглощения ЛИ Бугера — Ламберта [2] на некоторой глубине z – $I(z)$:

$$I(z) = I(z = 0)\exp(-\alpha z),$$

где $I(z = 0)$ — интенсивность ЛИ на поверхности обработки. Коэффициент α [1/м] называется коэффициентом объемного поглощения. По мере его увеличения глубина проникновения ЛИ в полимер падает. Полимеризация начинается при достижении некоторого критического значения для лазерной экспозиции I_c [3]. Тогда оценить максимальную глубину отверждения C_d при данной лазерной экспозиции для гауссова профиля ЛИ можно из формулы

$$I_c = I_{max} \exp(-\alpha C_d)$$

или

$$C_d = \alpha \ln(-I_{max}/I_c).$$

Тогда ширину зоны полимеризации L_W можно оценить так:

$$L_W = \sqrt{2}\ W_0 \sqrt{(\ln(I_{max}/I_c))},$$

где W_0 — полуширина гауссова распределения.

Каждый слой при лазерной стереолитографии строится путем сканирования по определенной методике обхода ЛИ поверхности олигомера (рис. 3.3, см. также рис. 2.29). Контур очерчивается лазерным лучом, чтобы отметить область, где будет происходить полимеризация (твердеть смола), а затем эта область заштриховывается. Смежные линии вообще перекрываются (рис. 3.4), чтобы обеспечить непрерывность сканирования. На рис. 3.4, *а —в*, показано, как в зависимости от степени перекрытия проходом меняется структура зоны полимеризации.

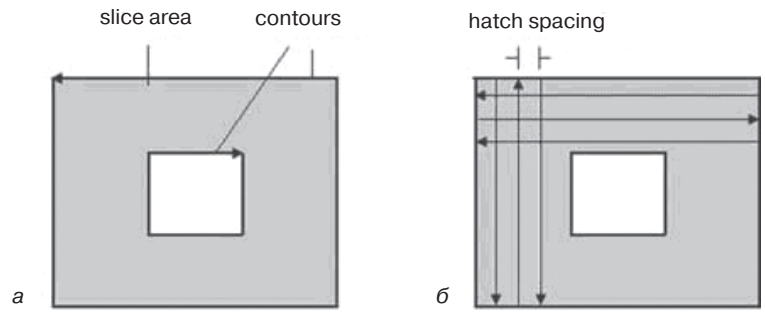
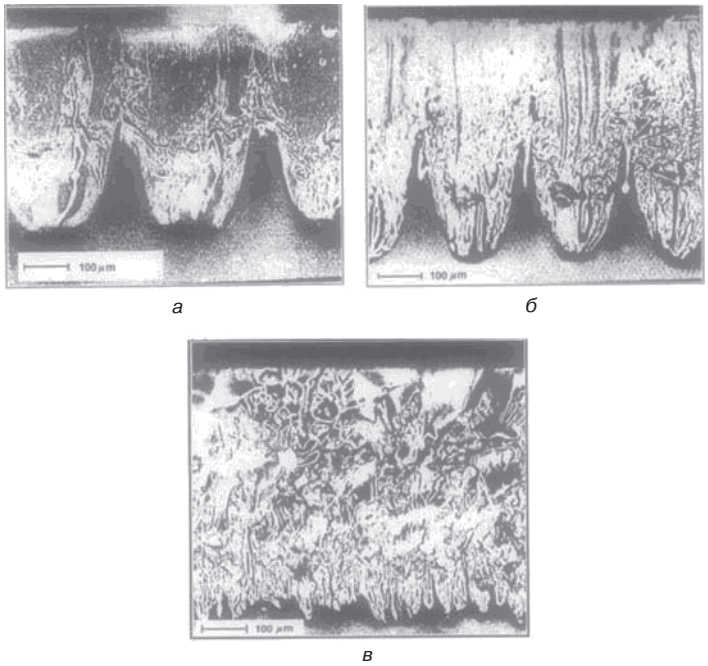


Рис. 3.3. Методики обхода ЛИ при сканировании поверхности: *а* — контур; *б* — штриховка

Важными геометрическими параметрами при послойной полимеризации (рис. 3.5) являются шаг между проходами и расстояние между слоями (сравните с рис. 2.25 и 2.26 для СЛС-процесса). При гауссовом распределении энергии в лазерном луче зона отверждения будет иметь полуэллиптический вид, а при наложении проходов будет формироваться однородный слой полимеризации. Важно так организовать процесс сканирования ЛИ, чтобы неотвержденные зоны в олигомере были минимальными.

Как отмечалось в разделе 2.6, методики сканирования могут быть организованы по типу STAR-WEAVE, ACES или QuickCast. Первые две методики используют для полного штрихования обрабатываемой поверхности, а последнюю — для частичной и более экономной штриховки.



а *б*

в

Рис. 3.4. Сечение микроструктуры одного отвержденного слоя после одного прохода ЛИ при: *а* — 0%; *б* — 25%; *в* — 50% перекрытия линий прохода [3]

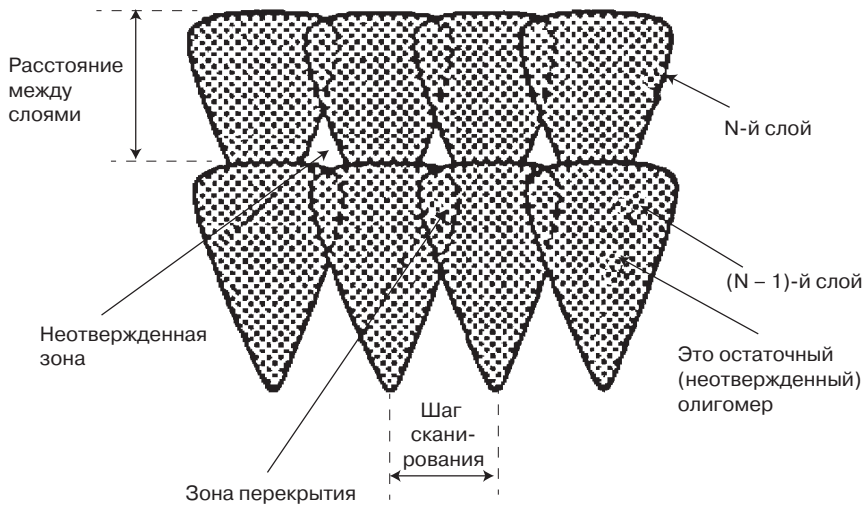


Рис. 3.5. Схема организации многопроходной обработки при послойной полимеризации

3.2. Физические основы лазерной стереолитографии

Лазерная стереолитография является одним из первых и наиболее развитым в технологическом плане способом синтеза объемных изделий. Впервые она была предложена Чарлзом Хеллом (Charles Hall) в 1986 году. Схема установки для лазерной стереолитографии, разъясняющая, как протекает процесс, приведена на рис. 3.6.

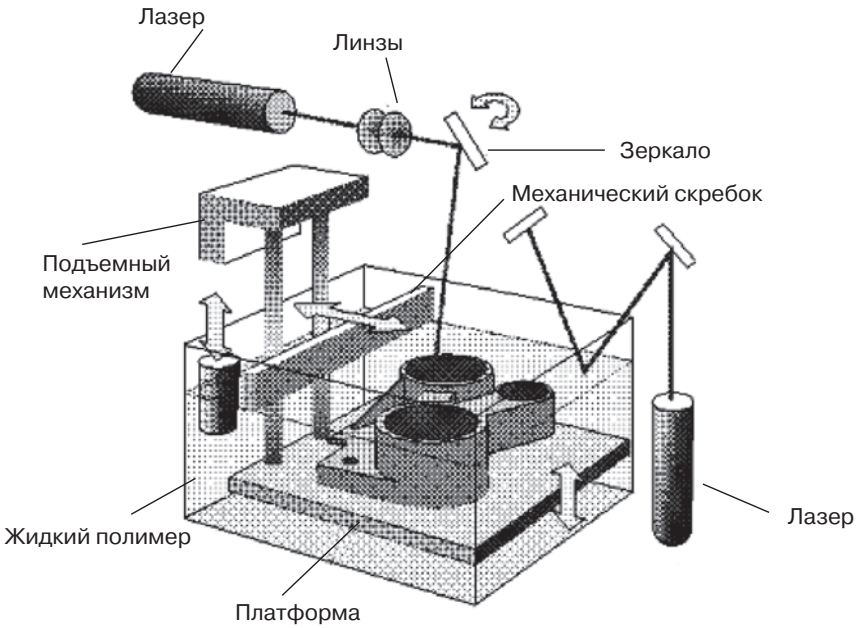


Рис. 3.6. Схема установки для лазерной стереолитографии

На обобщенной блок-схеме (рис. 3.7) показана последовательность выполняемых операций.

Планирование создания будущего изделия не менее важно, чем процедура синтеза. Минимизация времени, затрачиваемого на синтез, точность воспроизведения детали, ее прочностные свойства можно и нужно предугадать на стадии подготовки. Также важно решить, как будет расположена деталь (детали) в камере синтеза (обычно в вертикальном направлении деталь должна иметь минимальную величину). Ориентация детали определит, насколько явно будет видна слоистость поверхности после послойного синтеза и какими окажутся механические свойства (минимальные усадка и деформация изделия). Места расположения и количество поддержек также рассчитываются заранее. Прямоугольные поддержки увеличивают устойчивость детали, а косоугольные минимизируют использование материала.

3.2.1. Облучение и экспозиция

Как отмечалось ранее, физика процесса полимеризации основана на поглощении фоточувствительным полимером ЛИ конкретной длины волны (рис. 3.8), в результате чего в месте поглощения наблюдается процесс радикальной полимеризации (то есть отверждения) полимера.

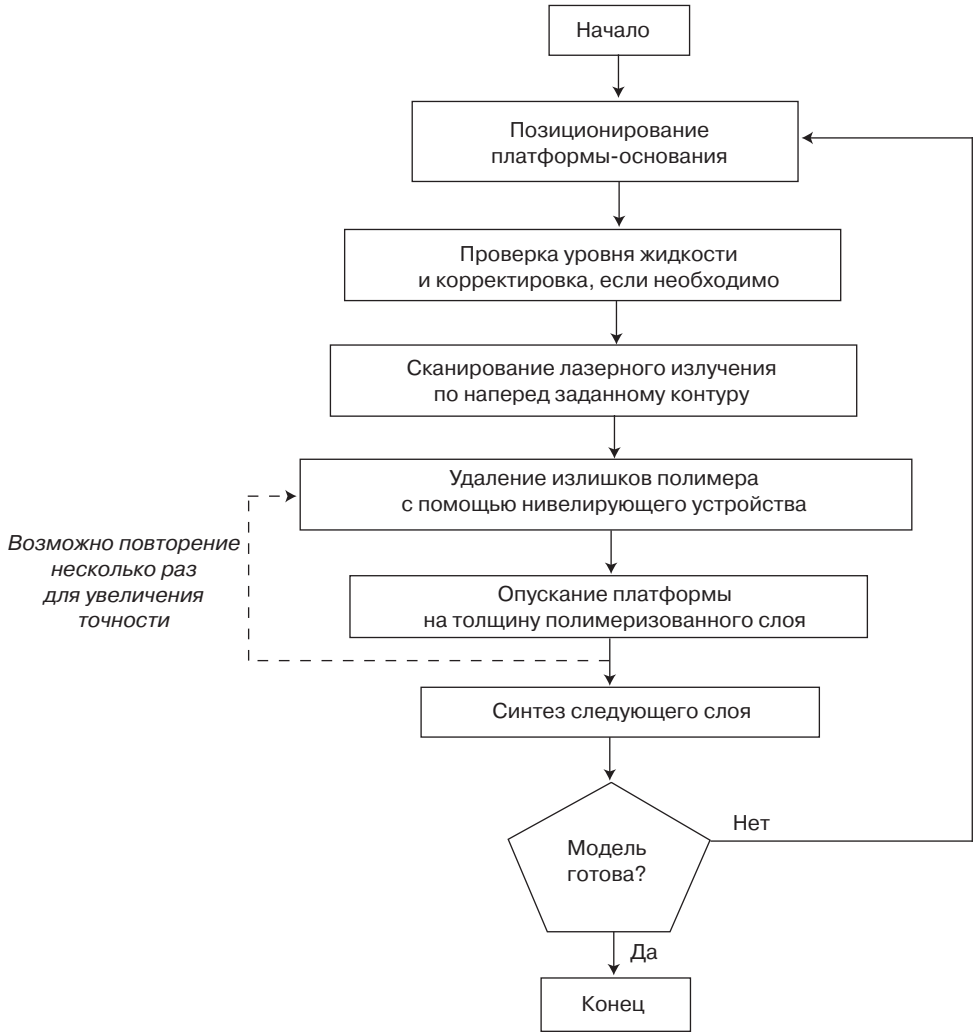


Рис. 3.7. Программная блок-схема процесса лазерной стереолитографии

Процесс синтеза модели осуществляется на платформе, которая расположена в ванне с полимером (рис. 3.6, 3.9). После отверждения текущего слоя основание-платформа вместе с моделью опускается вниз на расстояние ~0,5" = 1,3 мм и поверхность модели заполняется неполимеризованной жидкостью. Далее нивелирующее устройство удаляет излишки жидкого полимера с поверхности. Заметим, что амплитуда колебаний жидкости при заполнении должна быть заранее выверена. При этом сфокусированный лазерный луч все время остается

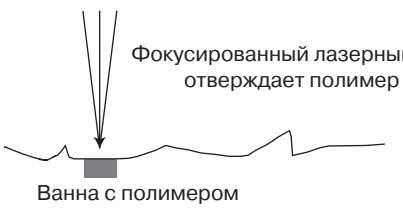


Рис. 3.8. Позиционирование ЛИ на поверхности полимера

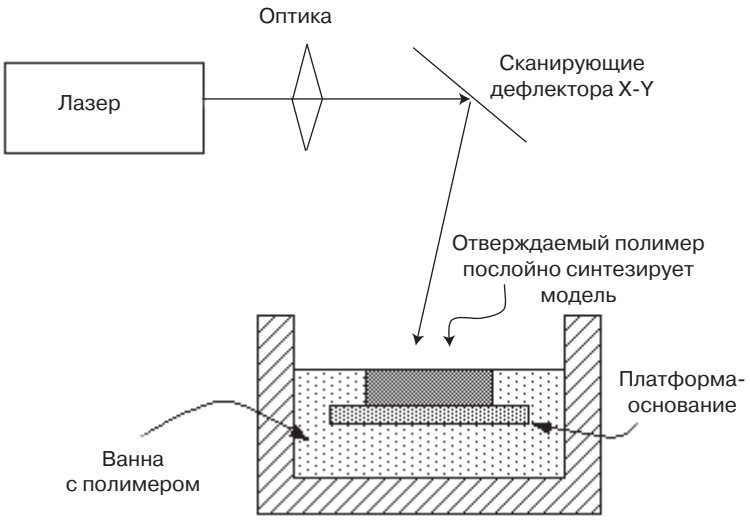


Рис. 3.9. Синтез слоя

на поверхности полимера и по заранее приготовленному CAD-программой контуру (см. рис. 3.3) обрабатывает (полимеризует) следующий слой.

3.2.2. Процесс затвердения и сопутствующие деформации

При отверждении происходит усадка полимера. Она может привести к изменению объема жидкости в ванне и должна все время контролироваться. В случае отклонения уровень восстанавливается (рис. 3.10). Минимальные толщины слоев составляют от 50...500 мкм в зависимости от типа полимера. Чем тоньше отвержденные слои, тем точнее, глаже боковая поверхность модели (см. рис. 2.22), но тем дольше идет процесс. Когда модель готова, платформа поднимается над уровнем жидкости, излишки олигомера стекают. После выемки из ванны модель помещают в печь для дополнительного отверждения полимера (постобработка). Также нужно удалить подпорки, которые формируются для поддержки нависающих частей изделия.

3.2.3. Методы сканирования при лазерной стереолитографии

Лазерная мощность при лазерной стереолитографии составляет 10...200 мВ (чем она больше, тем быстрее идет процесс полимеризации). В стереолитографии используются в основном He-Cd- или Ar-ионный лазеры, работающие в области УФ-излучения (длина волны 320...370 нм). Возможно использование самоподстраивающейся оптики для верификации фокусного расстояния до места обработки (рис. 3.11).

X–*Y*-дефлекторы представляют собой два управляемых компьютером зеркала (рис. 3.12).

На скорость синтеза влияет также выбор типа полимера. Фотополимер светочувствителен и токсичен. Поэтому ванна должна быть защищена от света и оборудована проточной вентиляцией. В процессе постобработки используется УФ-излучение мощных ламп, которое окончательно отверждает полимер. Время синтеза составляет час или более, после отверждения полимер перестает быть токсичным.

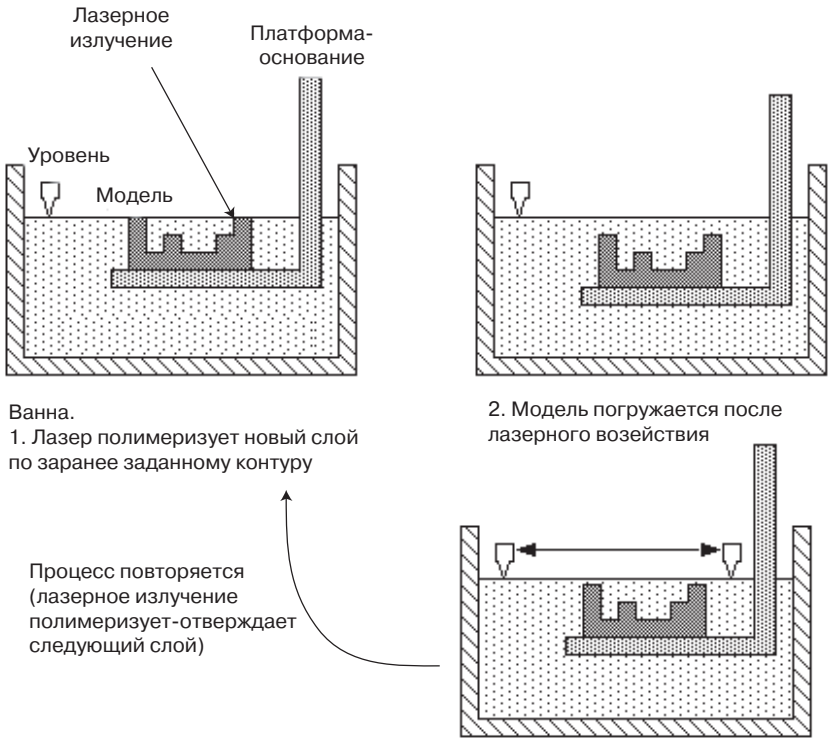


Рис. 3.10. Шаги платформы за цикл синтеза

Преимущества данной методики синтеза:

- установка полностью автоматизирована и работает без вмешательства оператора;
- точность воспроизведения модели высокая;
- острые края моделей заполняются полимером, что уменьшает склонность к расслоению;
- этот процесс очень популярен.

Недостатки:

- требуется много времени на постобработку (16 ч и более);
- усадка полимера при отверждении приводит к деформациям формы поверхности, а следовательно, уменьшается точность воспроизведения;
- полимер и средства для чистки ванны химически токсичны;
- количество возможных для использования типов полимеров ограничено, а стоят они дорого — $100...200 за 1 л;
- требуется хорошо технически подготовленный персонал, высоки затраты на обслуживание оборудования;
- при синтезе необходимы подпорки;
- требуются работы по удалению этих подпорок после синтеза;
- если деталь имеет вырезы внизу, то верхнее поперечное сечение детали имеет большую площадь, чем нижнее.

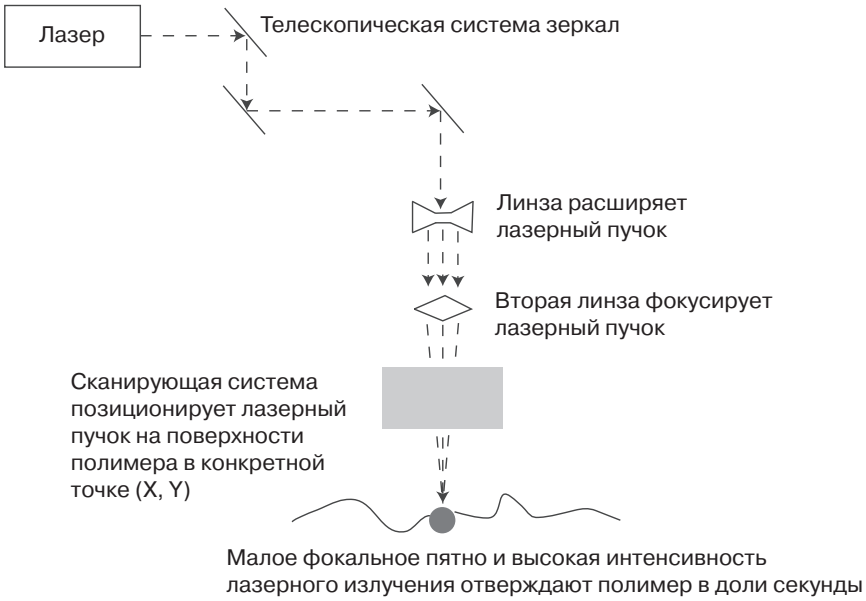


Рис. 3.11. Адаптивная система фокусировки

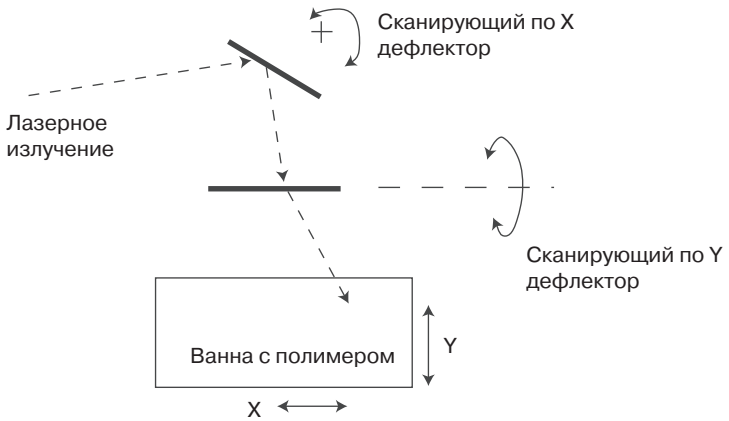


Рис. 3.12. Устройство сканирования ЛИ

Проблемы метода лазерной стереолитографии, которые еще не решены полностью:

- уменьшение времени экспозиции для увеличения производительности процесса приводит к деформациям;
- большинство частей модели отверждается до времени их непосредственной экспозиции за счет переоблучения слоев;
- происходит смещение слоев в результате перекрытия проходов ЛИ при экспозиции, а также предыдущих экспозиций;
- установки чувствительны к вибрации.

Приложения, в которых может быть использована методика:

- концептуальное проектирование, поскольку изделия из отвержденного полимера хрупкие;
- сборочное конструирование более сложных композиционных моделей при условии, что на изделия нанесен слой резины или металла (так они становятся менее хрупкими);
- технология литья по выплавляемым формам в качестве мастер-форм, эталонных моделей для изготовления опоки. В дальнейшем трехмерная модель выпаривается из опоки, а в пустоты заливается расплав металла.

3.3. Аппаратура для лазерной стереолитографии

Будучи локомотивом технологий БП (количество проданных в мире установок по стереолитографии на начало XXI века превышало число всех установок, основанных на других методиках БП), лазерная стереолитография позволила отработать физические и технологические основы послойного лазерного синтеза объемных изделий (ЛСОИ) (воспроизводимость формы, оптимизация исходных материалов, позиционирование лазерного луча, методы сканирования обрабатываемой поверхности, варьирование энергии ЛИ за счет мощности, скорости сканирования, изменения диаметра пятна лазерного источника и т. д.). Полученные знания были перенесены на другие, в том числе нелазерные, способы синтеза объемных изделий с учетом их специфики.

3.3.1. Типоряд установок 3D Systems (SLA)

В настоящее время известны установки для стереолитографии SLA-250, SLA-500, SLA-700 и др. (табл. 3.4). Здесь цифры, как принято в технологии БП, обозначают рабочий объем камеры для синтеза. В ванне можно синтезировать сразу несколько изделий. Ванна с полимером обычно вмещает ~20...200 л. Установки производятся компанией 3D Systems Inc. (США) (уже в 1991 году занимала 90% всего рынка, технологические установки производятся с 1988 года). Другие производители также выпускают подобные установки: Teijin Seiki (Япония), SOUP (CMET, Япония), JCS (Sony, Япония) — см. разделы 3.3.2–3.3.6. Несколько установок произведено в России — «ИПЛИТ»[1] (РАН, Шатура).

Стоимость более продвинутых установок SLA 7000 составляет ~$800 000. Сейчас 3D Systems анонсирует машину серии Viper HA для стереолитографии в качестве замены серии SLA (рис. 3.13). Особенностью новой машины является возможность синтеза в двух ваннах из разных материалов (табл. 3.5).

Оригинальными решениями 3D Systems являются правильное устройство (система Zephyr™), которое перемещается по поверхности (см. рис. 3.6, 3.10), чтобы нанести следующий слой смолы на поверхность, и программный софт. САПР рабочего места оператора установки SLA имеет название 3D Lightyear и работает под управлением Windows NT или более функциональной UNIX-системы Maestro. Эта система включает следующие модули и средства программирования:

- модуль 3DVerify™. Задача модуля — подтвердить герметичность и/или восстановить поврежденные STL-файлы средствами CAD. Проверяются зазоры между треугольниками, их перекрытие или избыточная триангуляция, неправильное направление нормали и пр.;

[1] Институт проблем лазерных и информационных технологий.

Таблица 3.4. Спецификация установок SLA-250 (источник — 3D Systems)

Модель	SLA 250/30A	SLA 250/50	SLA 250/50HR
Характеристики машины			
	Система начального уровня. Экономичная и многоцелевая	Высокопроизводительная установка с более мощным лазером, изменяемым размером камеры, системой повторного покрытия Zephyr	Система с малым размером пятна ЛИ и высоким разрешением
Объем камеры			
Максимальный размер камеры	250 × 250 × 250 мм^3	250 × 250 × 250 мм^3	250 × 250 × 250 мм^3
Объем			
Литры (галлоны)	29,4 (7,8)	32,2 (8,5)	32,2 (8,5)
Лазер			
Тип лазера	He-Cd	He-Cd	He-Cd
Длина волны	325	325 нм	325 нм
Мощность лазера; время работы	12 мВт; 2000 ч	25 мВт; 2000 ч	6 мВт; 2000 ч
Гарантия	2000 ч	2000 ч	2000 ч
Оптическое сканирование			
Двойное пятно	Нет	Нет	Нет
Диаметр пятна; контур — $1/e^2$	0,24 ± 0,04 мм	0,24 ± 0,04 мм	0,07 ± 0,01 мм
Диаметр пятна; штриховка — $1/e^2$	0,24 ± 0,04 мм	0,24 ± 0,04 мм	0,07 ± 0,01 мм
Система нанесения слоев (покрытия)			
	Doctor	Zephyr	Zephyr
Свойства			
Изменение размеров камеры	Возможно	Да	Да
Самоочистка	Нет	Нет	Нет
Автодобавка смолы	Нет	Нет	Нет
Программное обеспечение			
3D Lightyear/ Windows NT	With Build-station 3.8.4	With Build-station 3.8.4	With Build-station 3.8.4
Софт O/S	MS DOS	MS DOS	MS DOS
Полимеры			
Общего назначения	SL 5149, SL 5170, SL 5220	SL 5149, SL 5170, SL 5220	SL 5149, SL 5170, SL 5220
Стойкие	Нет	Нет	Нет
Высокотемпературные	SL 5210	SL 5210	SL 5210
Гарантия			
	1 год с даты установки	1 год с даты установки	1 год с даты установки

а *б*

Рис. 3.13. Внешний вид установок SLA: *а* — SLA 7000; *б* — Viper HA

Таблица 3.5. Спецификация установок SLA 7000 и Viper (источник — 3D Systems)

Модель	SLA 3500	SLA 5000	SLA 7000	Viper si2
Характеристики машин				
	Среднего размера система в 2,5 раза быстрее SLA 250, обладает улучшенной производительностью, есть возможность автопополнения смолой и самоочистки	Система в три раза больше, чем SLA 3500	Система в два раза больше SLA 5000, имеет возможность построения тонких слоев, обеспечивает высокое качество поверхности	Удвоенное разрешение, высокая мощность, долгий срок службы лазера
Объем камеры				
Максимальный размер камеры	350 × 350 × × 400 мм^3	508 × 508 × × 584 мм^3	508 × 508 × × 600 мм^3	250 × 250 × × 250 мм^3
Объем				
Литры (галлоны)	99,3 (25,6)	253,6 (67)		32,2 (8,5l)
Лазер				
Тип	Solid-State (Nd:YVO_4)			
Длина волны	354,7 нм			
Мощность лазера/ время работы	160 мВт/5000 ч	216 мВт/5000 ч	800 мВт/5000 ч	100 мВт/7500 ч
Гарантия	5000 ч			7500 ч
Оптическое сканирование				
Двойное пятно	Нет		Да	—

Модель	SLA 3500	SLA 5000	SLA 7000	Viper si2
Диаметр пятна; контур — l/e^2	0,25 ± 0,025 мм			0,25 ± 0,025 мм 0,075 ± 0,015 мм
Диаметр пятна; штриховка — l/e^2	0,25 ± 0,025 мм			0,7615 ± 0,0765 мм
Система нанесения слоев (покрытия)				
	Zephyr			
Характеристики				
Изменение размеров камеры	Да			
Самоочистка	Да			Нет
Автодобавка смолы	Да			Нет
Программное обеспечение				
Софт 3D Lightyear / Windows NT	Buildstation 5.1			Buildstation 5.2
Рабочая станция O/S	Windows NT 3.5.1			Windows NT 4.0
Полимеры				
Общего назначения	SL 5190, SL 5510	SL 5195, SL 5510	SL 7510	SL 5510
Стойкие	SL 5520		SL 7540	
Высокотемпературные	SL 5530 HT		N/A	
Гарантия				
	1 год с даты установки			

- модуль View™. Он позволяет показать STL- или SLI-файл в графической форме. Функцию просмотра используют для визуального контроля и выбора оптимальной ориентации изделия в камере синтеза;
- модуль MERGE. Модуль слияния позволяет объединить несколько SLI-файлов в группу, которую будут использовать совместно в будущем процессе;
- модуль Vista™. Является мощной вспомогательной программой для автоматической генерации структуры поддержки изделия. Структуры поддержки являются неотъемлемой частью успешного процесса синтеза изделия, так как позволяют закрепить изделия относительно платформы и предотвратить свисание его частей;
- модуль Manager™. Этот модуль САПР является первой стадией подготовки здания к выполнению. Он использует данные STL-файла для формирования задания машине, представляет структуру изделия и параметры разбиения на слои;
- модуль Slice™. Это модуль второго этапа подготовки к выполнению. Он преобразует данные модуля Manager™ об изделии в трехмерные поперечные сечения или слои;
- модуль Converge™. Это третий и последний этап подготовки задания. Модуль создает, окончательно формирует и проверяет задание для машины.

Методом стереолитографии были получены волокна высокой прочности. Удешевить процесс возможно, используя в установке управление УФ-излучением из оптоволокна. Модели больших размеров синтезируются по частям, а затем скле-

иваются в блоки. В качестве клея может использоваться тот же полимер, который отверждается под УФ-лампой. Можно добавлять в полимер порошки металлов или керамики, что изменяет (порой даже ухудшает) свойства полимера и усложняет процесс синтеза [4]. Широкая гамма отливок может быть создана по литьевым формам из полимерных эталонов моделей. На базе этой методики синтеза впервые был опробован метод конечных элементов для расчета тепловых полей при полимеризации и определения напряжений — деформаций, приводящих к нежелательному искривлению полимеризуемой поверхности и расслоению деталей [5], [6].

3.3.2. Cubital's Solid Ground System (SGC)

В процессе отверждения на твердом основании (*solid ground curing*, SGC) каждый слой отверждается путем экспонирования УФ-лампой, а не сканирования лазерным лучом. Таким образом, все точки слоя затвердевают одновременно и окончательное отверждение не требуется. Типичный процесс полимеризации на твердом основании реализуется в системе Solider от Cubital Israel, работа которой происходит так.

1. По данным геометрической модели детали и желаемой толщине слоя рассчитывается поперечное сечение каждого слоя.
2. Для каждого слоя изготавливается оптическая маска по форме соответствующего поперечного сечения.
3. После выравнивания (рис. 3.14, *а*) платформа покрывается тонким слоем жидкого фотополимера (рис. 3.14, *б*).
4. Над поверхностью жидкой пластмассы помещается маска, соответствующая текущему слою, и пластмасса экспонируется светом мощной УФ-лампы (рис. 3.14, *в*). Процесс начинается с маски, соответствующей нижнему слою.

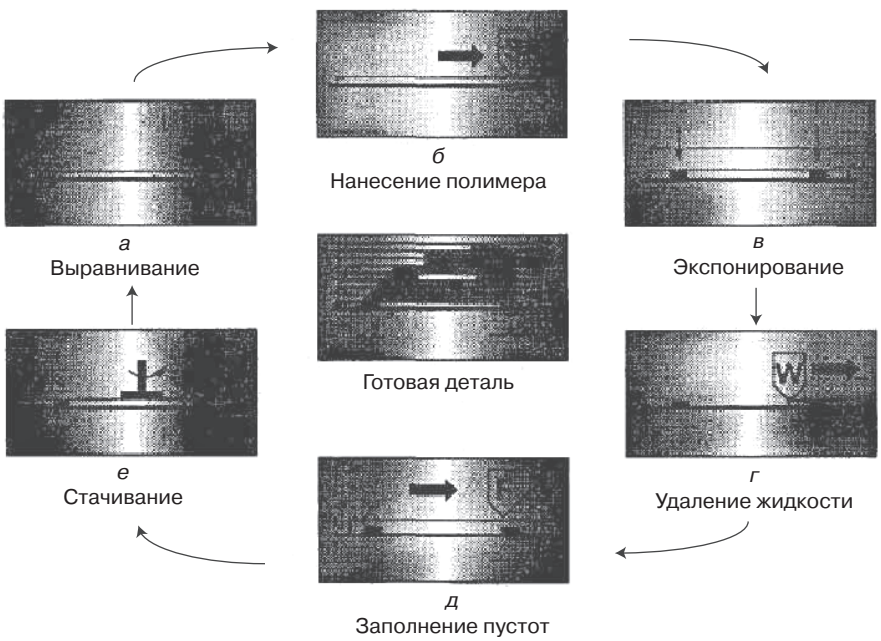


Рис. 3.14. Схема SGC-процесса

5. Оставшаяся жидкость удаляется с изделия аэродинамическим скребком (рис. 3.14, *г*).
6. Изделие покрывается слоем жидкого воска, который заполняет пустоты (рис. 3.14, *д*). Затем к воску прикладывается холодная пластина, и он затвердевает.
7. Слой стачивается до желаемой толщины с помощью шлифовального диска (рис. 3.14, *е*).
8. Готовая часть изделия покрывается тонким слоем жидкого полимера, и шаги 4–7 повторяются для каждого последующего слоя, пока не будет обработан самый верхний слой.
9. Воск расплавляется и удаляется из готовой детали.

Главным преимуществом отверждения на твердом основании по сравнению с лазерной стереолитографией является отсутствие необходимости в поддерживающих структурах. Это обусловлено тем, что пустоты заполняются воском. Кроме того, благодаря использованию света УФ-лампы вместо лазерного луча исключается операция окончательного отверждения. Хотя отверждение на твердом основании позволяет изготавливать детали с большей точностью, чем стереолитография, процесс этот весьма сложен. Основные параметры установок представлены в табл. 3.6.

Таблица 3.6. Cubital Inc.'s Solider 4600 и 5600 (источник — Cubital Inc.)

Модель	Solider 4600	Solider 5600
Источник воздействия	Мощная УФ-лампа	
XY-разрешение, мм	Лучше, чем 0,1	
Поверхностная точность, мм	0,15	0,15
Точность позиционирования платформы, мм	0,15	0,1...0,2
Минимальные размеры детали, мм	0,4 (горизонтально, *X*–*Y*) 0,15 (вертикально, *Z*)	0,4 (горизонтально, *X*–*Y*) 0,15 (вертикально, *Z*)
Рабочие размеры камеры, *XYZ*, мм^3	350 × 350 × 350	500 × 350 × 500
Скорость роста, см^3/ч	550	1311
Минимальная точность слоя, мм	0,06	0,06
Точность, %	0,1	0,1
Размеры машины, *XYZ*, м^3	1,8 × 4,2 × 2,9	1,8 × 4,2 × 2,9
Устройство управления	Рабочая станция	
Потребляемая мощность	380...415 *переменный ток*, 3 фазы, 50 кВт	380...415 *переменный ток*, 3 фазы, 50 кВт

Основные приложения:

- концептуальное моделирование, исследование рынка, тестирование, функциональный анализ прототипов;
- модели для литья, песчаные формы, БП пластиковых изделий;
- инструментовка в силиконовые, акриловые и эпоксидные формы, для покрытия напылением;
- медицинские приложения как пред- и постоперационный контроль, планирование операций и дизайн имплантатов.

3.3.3. D-MEC's Solid Creation System (SCS)

Процесс Solid Creation объединил разработки фирм Sony Co., JSR Co. и D-MEC Co. Софт и установка созданы в Sony Co., УФ-полимеры разрабатываются JSR (Japan Synthetic Rubber) Co., а сама технология была предложена D-MEC Co.

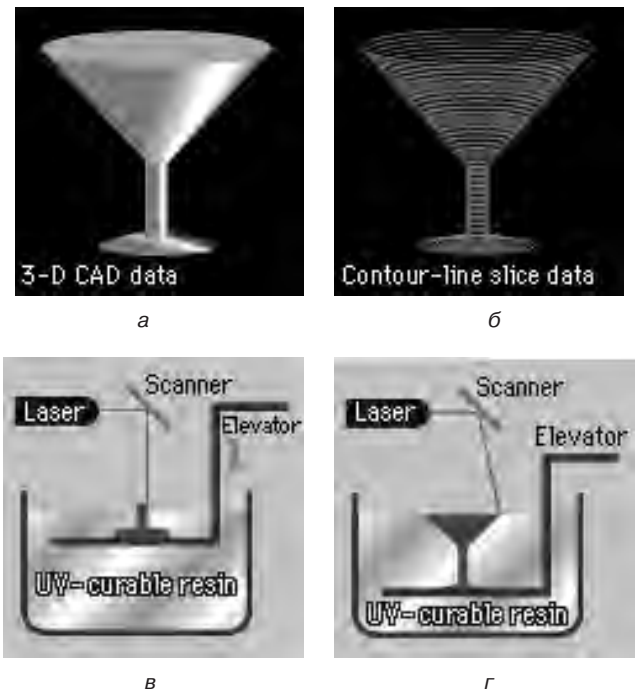
Процесс состоит из шагов, проиллюстрированных на рис. 3.15.

Основное оборудование представлено в табл. 3.7 и 3.8 (источник — http://www.d-mec.co.jp/eng/products/index.html).

В конце 2004 года D-MEC анонсировал машину для микростереолитографии. В то время как у обычной SLA-машины типичное разрешение находится в пределе 100...200 мкм, разрешение ACCULAS ~2 мкм (0,002 мм)! Это практически одна из первых машин для изготовления прототипов и микроприспособлений, называемых еще микроэлектромеханическими системами (англ. micro-electro-mechanical systems (MEMS)). ACCULAS использует Magics для САПР. О микростереолитографии и возможностях этой машины мы будем говорить в разделе 3.7.

Процесс идет по схеме, показанной на рис. 3.16.

Схема процесса микростереолитографии по версии D-MEC Ltd. и результаты синтеза показаны на рис. 3.17. Отличительными особенностями процесса и установок данного типа являются большой объем камеры для синтеза, высокие скорости сканирования, точность на уровне ~40 мкм. Недостатки также очевидны — необходимо формировать поддержки для детали, требуются постпроцессы



а *б* *в* *г*

Рис. 3.15. Процесс Solid Creation: *а* — преобразование 3D-изображения в CAD-файл; *б* — программное расслоение 3D-CAD-файла на сечения; *в* — сканирование УФ-лазером по контуру каждого сечения и отверждение олигомера на платформе; *г* — опускание платформы на толщину полимеризованного слоя и повторение для следующих сечений до тех пор, пока вся модель не будет создана

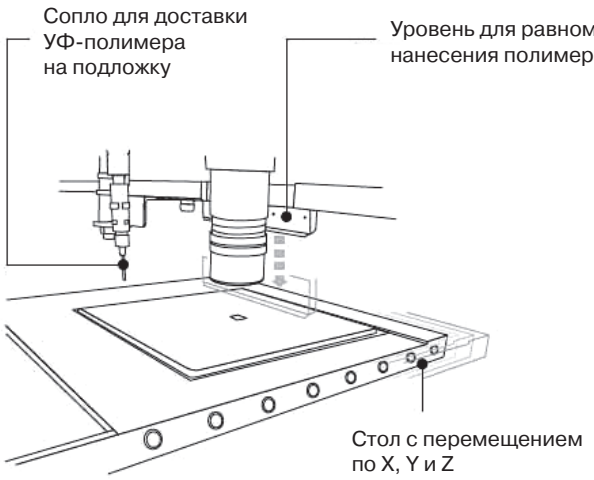


Рис. 3.16. Схема установки ACCULAS (источник — http://www.d-mec.co.jp)

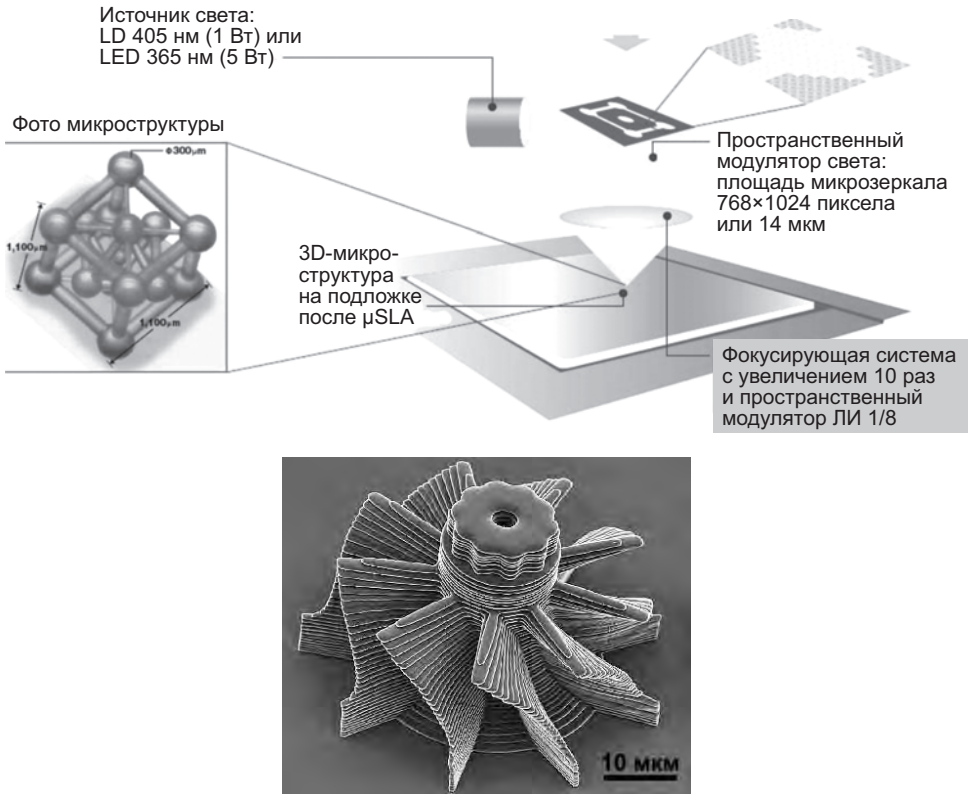


Рис. 3.17. Схема процесса и образование 3D-структур после микростереолитографии (источник — http://www.d-mec.co.jp)

Таблица 3.7. Серийные установки фирмы D-MEC

Модель	SCS-1000HD	SCS-2000	SCS-3000	SCS-8000
Лазер	He-Cd	Полупроводниковый твердотельный лазер		
Устройство модуляции	АОЗ (акустооптический затвор)			
Дефлекторы	Гальванометрическая система отклоняющих зеркал (система самоподстройки и дефокусировки)			
Размер пятна, мм	0,05...0,3 (автосогласование)	0,15...0,8 (автоподстройка)		
Скорость *XY*, м/с	2 (max)	10 (max)		
Рабочий объем, *XYZ*, мм	300 × 300 × 300	600 × 500 × 500	1000 × 800 × 500	600 × 500 × 500
Объем камеры, л	45 (изменяемый)	265 (изменяемый)	840 (изменяемый)	265 (изменяемый)
Размеры установки, *XYZ*, мм	1425 × 1100 × 1590	1650 × 1400 × 1820	2340 × 1700 × 2840	1650 × 1400 × 1820
Система контроля	Windows NT			
Мощность	AC 100 В, 10 А	AC 200 В, 30 А		

Таблица 3.8. Последние разработки фирмы D-MEC

SCS-1000HD	SCS-9000	SCS-6000	ACCULAS
Модель высокой точность	Компактная модель	Мощная модель больших размеров	Машина для микростереолитографии
He-Cd-лазер	Полупроводниковый твердотельный лазер — 200 мВт, 25 кГц	Полупроводниковый твердотельный лазер — 1000 мВт, 60 кГц (первый в Японии)	LD (405 нм) и/или LED (365 нм) — пространственная модуляция ЛИ
Реализована высокая точность изготовления деталей. He-Cd-лазер позволяет сфокусировать ЛИ до минимального размера пятна	Использован твердотельный лазер, что снижает стоимость оборудования. Высокая ремонтопригодность и энергоэффективность	Одна из самых больших в мире машин — 1000 × 800 × 500 мм с мощным лазером	• Точность позиционирования 1 мкм. • Минимальное приращение 5 мкм (механическая точность 0,5 мкм). • Материал — фотополимер высокого разрешения. • Размеры модели: максимум 50 мм^3, 150 × 150 × 50 мм. • Софт Viola (плагин для Magics). • Мощность 100 VAC*, 2 кВт; вес 600 кг. • Размеры 1000 × 1000 × × 1700 мм

* VAC (здесь и далее) — напряжение переменного тока.

по удалению поддержек и дополнительному отверждению фотополимера. Образование микро- и даже наноструктур на поверхности подложки оказывается возможным за счет высокой точности позиционирования и механической точности перемещения (см. данные табл. 3.8, последняя графа).

Материалы для D-MEC производятся JSR Co. и имеют следующие названия: высокоточные смолы (SCR710, 720, 735, 11120 и 9120), термостойкие смолы (SCR802), смолы для изделий с высоким разрешением (SCR751 и 950).

3.3.4. CMET's Solid Object Ultraviolet Laser Printer (SOUP)

CMET (Computer Modeling and Engineering Technology) Inc. является подразделением Mitsubishi Co. и производит машины следующих марок (табл. 3.9).

Таблица 3.9. Спецификация машин SOUP фирмы CMET Inc.

Параметр	SOUP II 600GS-02	SOUP II 600GS-05	SOUP II 600GS-10
Тип лазера	Твердотельный		
Мощность лазера, мВт	200	500	1000
Сканирующая система	Гальваномеханические зеркала с подстройкой фокуса по оси *Z*		
Максимальная скорость сканирования, м/с	20		
Диаметр пучка	Изменяемый 0,1...0,5 мм		
Максимальный размер детали, *XYZ*, мм	600 × 600 × 500		
Минимальное приращение слоя, мм	0,05		
Камера	Неизменяемая		
Система разравнивания	• Новая система уровня. • Роллер для разравнивания (опция)		
Контроллер уровня полимера	Осевой блок регулировки с датчиком высокой точности		
Потребляемая мощность	100 VAC, на одну фазу, 20 А (контрольный блок) и 30 А (нагреватель)		
Размеры установки, *XYZ*; блока управления, мм	1575 × 970 × 2160; 610 × 1020 × 1230		
Вес, кг	1700		
Софт	Win 2000		

Процесс идет традиционным для стереолитографии образом (рис. 3.18). Использование гальваномеханической системы позиционирования зеркал ускоряет процесс сканирования ЛИ поверхности фотополимера, а также обеспечивает хорошую точность позиционирования лазерного луча.

Для фотополимеризации используются следующие материалы: TSR-821 (модельное дело), TSR-829 (функциональные детали), HS-696, HS-680 (медицинские приложения), TSR-828 (модели высокой точности).

а *б*

Рис. 3.18. Стереолитография: *а* — внешний вид современной установки RM-6000II; *б* — схема процесса

3.3.5. Teijin Seiki's Soliform System

Фирма Teijin Seiki Co. Ltd. начала развивать свою систему лазерной стереолитографии в 1991–1992 годах, а позже (в 2001 году) объединила усилия с фирмой CMET Inc. В выпускаемых ими установках используются фотополимеры фирмы Somos (Du Pont) и реализуется процесс их послойного отверждения. Спецификация машин представлена в табл. 3.10.

Таблица 3.10. Серия установок Soliform 250 фирмы Teijin Seiki Co. Ltd.

Параметр	Soliform 250B	Soliform 250EP	Soliform 500C	Soliform 500EP
Тип лазера	Твердотельный			
Мощность лазера, мВт	200	1000	400	1000
Система сканирования	Цифровая сканирующая			
Максимальная скорость сканирования, м/с	12			
Диаметр пучка	Фиксированный — 0,2 мм, изменяемый — 0,1...0,8 мм (опция)		Фиксированный — 0,2 мм, изменяемый — 0,2...0,8 мм (опция)	
Максимальный размер изделия, *XYZ*, мм	250 × 250 × 250		500 × 500 × 500	
Минимальный шаг приращения слоя, мм	0,05		0,05	
Камера	Неизменяемая			
Система уровня	Система погружения в олигомер			
Контроллер уровня смолы	Объемный счетчик			
Потребляемая мощность	100 VAC, одна фаза, 30 A		200 VAC, 3 фазы, 30 A	
Размер установки, *XYZ*, мм	1430 × 1045 × 1575		1850 × 1100 × 2280	
Вес, кг	400		1200	

Процесс Soliform имеет следующие преимущества:

- быстрота и точность при сканировании — до 24 м/с, что является одним из лучших результатов для систем БП;
- высокая точность позиционирования;
- используется широкий спектр фотополимеров акрилатного и уретанового типа.

Недостатки процесса традиционны:

- нужны поддержки для роста изделия;
- нужны постоперационные процессы удаления поддержек и дополнительного отверждения полимера.

Soliform-процесс идет по схеме, описанной в разделе 3.2, а изготавливаемые изделия находят применение в качестве мастер-форм для инжекционного и вакуумного литья, а также литья по выплавляемым моделям.

3.3.6. Meiko's Rapid Prototyping System для ювелирной промышленности

Установки фирмы Meiko Co. Ltd. позиционируются как системы для создания малых деталей в ювелирной промышленности. На рис. 3.19 показан внешний вид установки LC-510.

Рис. 3.19. SLA-установка фирмы Meiko Co. Ltd.

Спецификация этой установки представлена в табл. 3.11.

Таблица 3.11. Установка LC-510

Лазер	Тип лазера	He-Cd
	Мощность	5 мВт
	Диаметр пятна	0,08 мм
	Длина волны	325 нм
Эксплуатационные характеристики	Метод сканирования	*X*–*Y*-плоттер
	Скорость сканирования (max)	1000 мм/мин
	X–*Y* механическая точность	0,01 мм
	Высота приращения (по оси *Z*)	0,2...0,01 мм
	Максимальные размеры модели	100 × 100 × 60 мм
	Объем камеры для полимера	2 кг (1,7 л)
OS & CAD	Операционная система	Windows 98, Me, XP, 2000, & NT
	Импорт CAD-форматов	JSD, DXF (3D Face), STL (ASCII)

Таблица 3.11 (*продолжение*)

Окружение	Рабочие температуры	22...28 °C
	Относительная влажность	20...80%
Общие параметры	Потребляемая мощность	AC 100 В, 15 А или AC 220 В, 6,8 А
	Размеры установки	860 × 760 × 800 мм
	Вес установки	150 кг

Компания Meiko Co. Ltd. разработала специализированную САПР для работы ювелиров — JCAD3/Takumi (рис. 3.20).

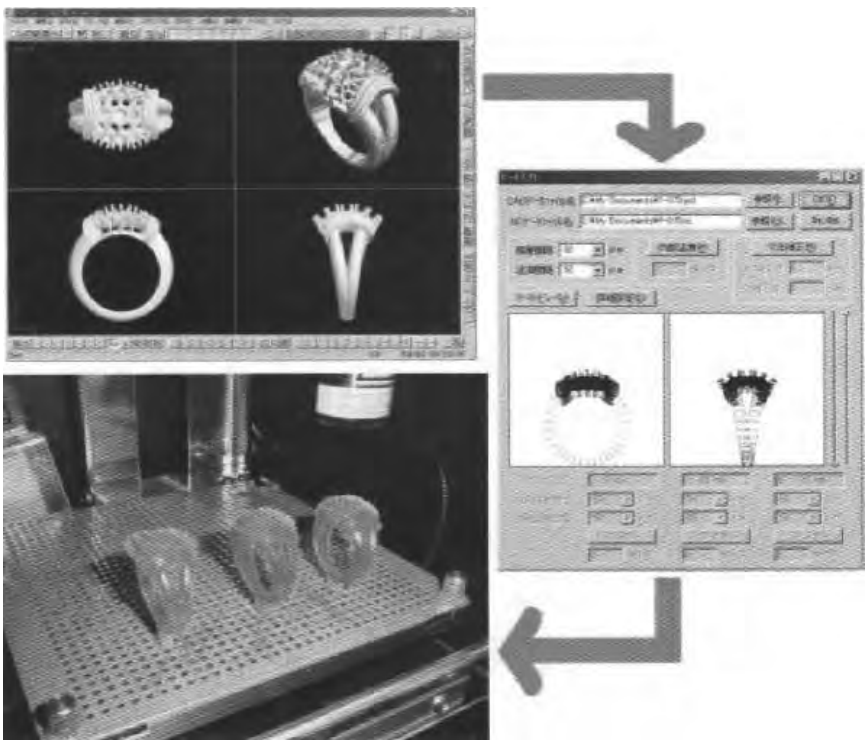


Рис. 3.20. Моделирование ювелирных изделий в пакете JCAD3/Takumi

3.4. Другие системы БП подобного рода — SLP, LMS, PolyJet

Из других методик послойной стереолитографии следует также упомянуть:

- SLP — производитель Denken Engineering Co. Ltd. (Япония).
- COLAMM (Computer-Operated, Laser-Active Modeling Machine) — производитель Mitsui Zosen Corporation (Япония). Платформа для синтеза в этой систе-

ме не опускается, а, наоборот, поднимается. Рост изделия начинается с верхнего слоя, который закрепляется на платформе. Деталь как бы подвешена в жидком олигомере.

- LMS (Layer Modeling System) — производитель Fockele und Schwarze Stereolithographietechnik GmbH (F&S) (Германия). Для системы характерны низкая стоимость, неоптическая система контроля за уровнем олигомера, возможность изменения объема камеры для синтеза.
- Light Sculpting — некомерциализованная методика от сервисного бюро из Milwaukee (США). Система похожа на масочный метод, патентованный Cubital's SGC. Однако здесь отверждаемая смола не контактирует с подложкой.

Наконец, нельзя не упомянуть о серьезном конкуренте компании 3D Systems — компании Objet Geometries (Израиль), недавно появившейся на рынке БП с технологией PolyJet. Первая установка Eden330 была запущена в середине 2003 года и уже снята с производства. Сейчас по всему миру установлено более 1000 систем Objet. Темпы развития систем 3D-печати Eden и расходных материалов FullCure наиболее прогрессивные. Доказательством тому является награда, которую Objet получил за систему Connex500 как наиболее инновационный продукт крупнейшей выставки EuroMold (Германия, декабрь 2007 года).

Процесс PolyJet заключается в следующем (рис. 3.21). На плоскость построения блоком печатающих головок согласно программному алгоритму наносится жидкий фотополимер. Блок состоит из 8 головок — это 768 сопел малого диаметра, наносящих 16 млн капель в минуту. На печатающей головке размещены две УФ-лампы, которые заменяют лазер в SLA-установках. После нанесения фотополимер полимеризуется под воздействием УФ. Этим завершается построением одного слоя. Далее плоскость построения опускается на очень малое расстояние, и головки наносят следующий слой.

Рис. 3.21. Схема работы и внешний вид установки Objet Connex 500 (www.stratasys.com)

Сейчас существует две платформы оборудования: Eden и Connex. Eden поддерживает технологию построения моделей PolyJet, Connex — технологию PolyJet Matrix. Отметим общие особенности систем.

Заявленная малая толщина слоя приращения 16 мкм удовлетворяет даже ювелиров, которые имеют повышенные требования к детализации моделей. Как следствие малой толщины — гладкость криволинейных боковых поверхностей. Высокое разрешение печати — 600 × 600 dpi. Точность изготовления моделей до 0,1 мм. Возможность изготавливать вертикальные перегородки с толщиной до 0,4 мм, хотя производителем заявляется 0,6 мм. Очень высокая скорость изготовления моделей. Процесс печати более продолжительный, чем у принтеров ZCorp, но с учетом отсутствия необходимости в постпроцессах весь цикл получения качественной готовой модели значительно короче, чем у конкурентов. Стоимость принтера Objet для конечного пользователя зависит от выбранной модели и составляет от 67 000 (для Eden250) до 300 000 (для Connex500).

Компания Objet является также разработчиком и производителем материалов FullCure. Выпускаются три типа материалов: жесткие, резиноподобные, полипропиленоподобные. Все профессиональные системы, кроме офисных Eden250/Eden260, поддерживают всю линейку расходных материалов. Материал поставляется картриджами по 2 кг (для офисных систем Eden250/Eden260) и 3,6 кг. Стоимость 1 кг в зависимости от типа материала составляет 230...280. При этом материал поддержки в два раза дешевле — примерно 115 за 1 кг.

3.5. Двулучевые системы БП

Фирма Cubital, реализующая SGC-процесс и изначально предлагавшая использовать УФ-лампу (см. раздел 3.3.2), заявила о возможностях развития двулучевой системы, которая отличается от методик, использующих одиночный лазерный луч. Ранее предлагалось (патент W. K. Swainson, 1967 год) совмещать ЛИ с разными длинами волн соосно или обрабатывать фотополимер под разными углами.

В двулучевой методике три луча лазера скрещиваются в заданной точке поверхности олигомера. Принципиально это просто процесс полимеризации, идущий в два этапа. Два фотона с различающимися частотами более активно инициируют полимеризационный процесс. Все остальное: сканирование и послойное отверждение — аналогично традиционному пути объемного синтеза. Кроме того, если энергии для перехода в возбужденное состояние от одного фотона недостаточно, то фотон от второго (подстраиваемого) источника ЛИ дополняет недостающее.

К сожалению, изложенный подход до сих пор не был материализован в коммерческий продукт (установку). Работы ведут в сотрудничестве Formigraphic Engine Co. и Battell Development Corporation (США), а также независимо French National Center for Scientific Research (CNRS). На пути внедрения должны быть решены три проблемы. Во-первых, надо уметь прецизионно управлять одновременно двумя лучами лазера в точке их пересечения на поверхности полимера. Во-вторых, каждый лазерный луч на своем пути испытывает многочисленные переотражения. Коэффициент отражения и пропускания для разных длин волн трудно контролировать, а из-за неоднородности поглощения полимер будет отверждаться с разными скоростями. Изменение температуры в камере синтеза также будет неоднородным.

Так как сами полимеры являются гетерогенными средами, то не ясно, как два лазерных луча могут быть сфокусированы в одной точке при названных неоднородностях. Полимерные молекулы не смогут долго находиться в возбужденном состоянии, и эффективность процесса снизится.

3.6. БП методом заморозки

Этот «оригинальный» метод БП — Rapid Freeze Prototyping (RFP) — был предложен Dr. M. Leu из University of Missouri-Rolla (США, 1999 год). Суть его — в послойном нанесении капель воды и последующей их заморозке. Слово «оригинальный» здесь взято в кавычки, поскольку для любого человека, лепившего в детстве снежную бабу, предложенное является очевидным. Авторы рекомендуют этот метод как крайне дешевый, обеспечивающий хорошую прочность между слоями и качественную результирующую поверхность, экологически чистый (вода для заморозки может быть многократно использована, а потом очищена) и высокоскоростной. Можно подкрашивать воду и делать цветные прототипы.

Схема процесса и внешний вид установки показаны на рис. 3.22. Потенциальными приложениями метода являются визуализация 3D-изделий, литье по выплавляемым моделям, формование под давлением, биоприложения [7]. Примеры изделий показаны на рис. 3.23.

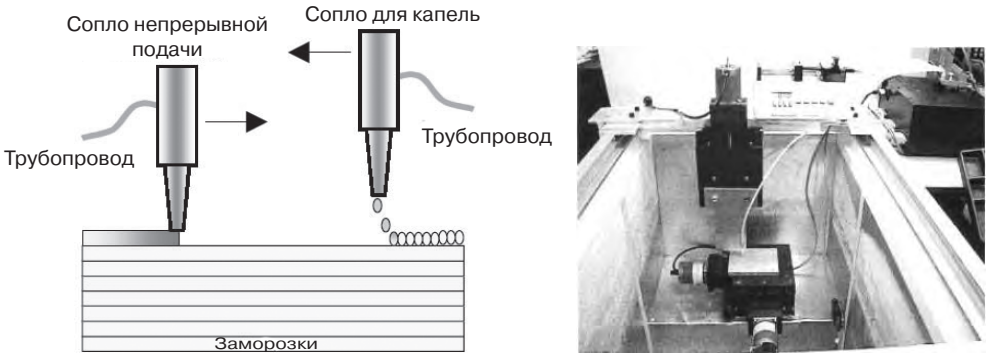


Рис. 3.22. Rapid Freeze Prototyping: *а* — схема процесса; *б* — установка

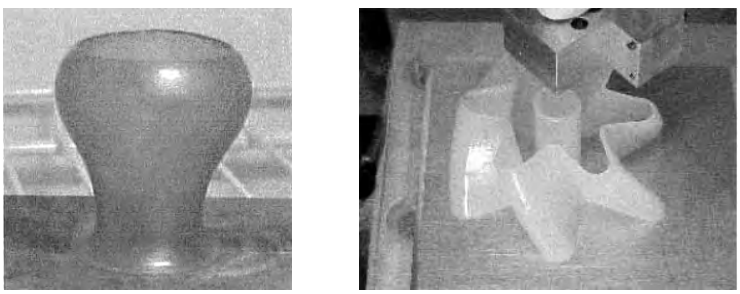


Рис. 3.23. Примеры 3D-изделий, полученных методом заморозки

3.7. Лазерная микростереолитография: процедура, параметры, материалы

Лазерная микро- и нанолитография относятся к литографическим методам с использованием ЛИ, способным структурировать материал в масштабах меньше

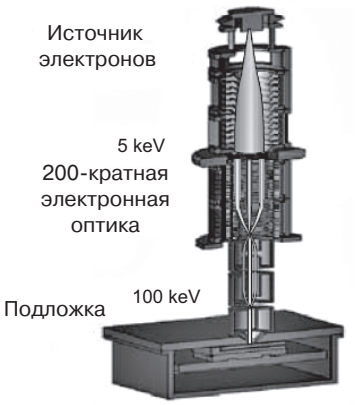


Рис. 3.24. Безмасочная нанолитография электронными пучками (<45 нм), процесс PML2 — Projection Mask-Less Lithography (e-beam)

10 мкм (микролитография) и меньше 100 нм (нанолитография). «Стерео» предполагает, что эти слои можно выращивать друг за другом и формировать объемное изделие (3D-структуры). Традиционно же эти методики литографии давно применяются в полупроводниковом производстве микрочипов и создании MEMS-устройств. В фотолитографии для засветки сборных фотошаблонов (масок) и мастер-форм используются УФ-лампы и концентрированные потоки энергии (КПЭ) (ионные, электронные, рентгеновские, лазерные пучки).

Повысить структурное разрешение за счет засветки КПЭ предлагалось уже давно. Так, электронно-лучевая литография используется в производстве фотошаблонов. Обычно она практикуется в форме безмасочной (maskless) литографии (рис. 3.24). Окончательный рисунок создается непосредственно из CAD-файла на компьютере, при этом контролируется контур электронного пучка, когда он сканирует покрытие подложки. Электронно-лучевая литография имеет недостаток — она гораздо медленнее, чем световая литография (рис. 3.25, *а*).

В дополнение к коммерчески устоявшимся методикам существует и продолжает возникать большое количество перспективных микро- и нанолитографических техник, в том числе (рис. 3.26) нанопечать (nanoimprint), магнитолитография, сканирующая зондовая литография.

Некоторые из этих новых методов успешно используются в небольших коммерческих приложениях и важных исследованиях (рис. 3.27).

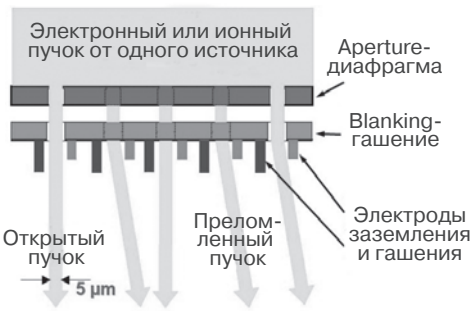


Рис. 3.25. Программируемая система апертур

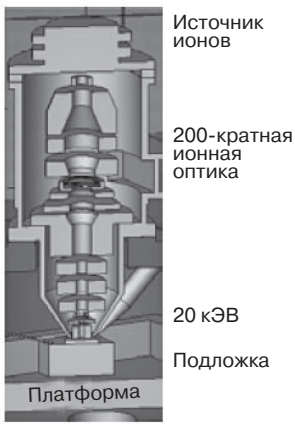


Рис. 3.26. Прямое наноструктурирование ионными пучками (<20 нм), процесс PMLP — Projection Mask-Less Patterning (ion — beam)

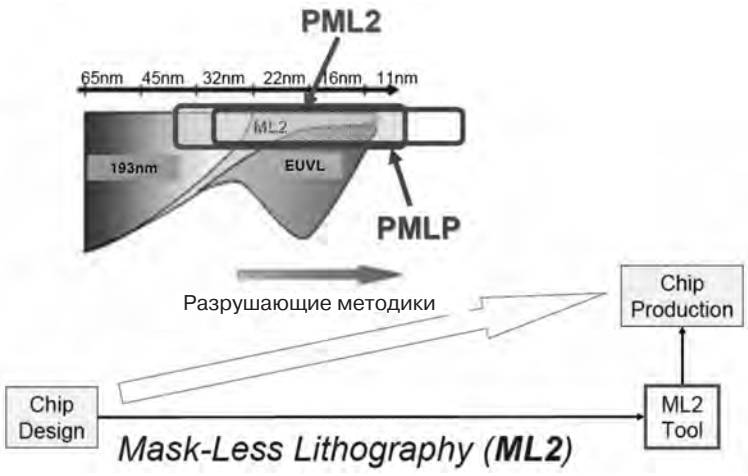


Рис. 3.27. Создание MEMS методами ионной и электронной литографии (Intelligent Manufacturing Systems, EU collaboration in framework of FP7, http://cordis.europa.eu/fp7/ict/international/ims_en.html) (chip design & production — проектирование и производство чипов)

Также следует упомянуть известные методы изготовления микро- и наноструктур — LIGA (Lithographie, Galvanoformung und Abformung), синхротронную рентгеновскую литографию, глубокую рентгеновскую литографию (Deep X-ray lithography).

Микростереолитография (μSLA) — это процесс, подобный стереолитографическому подходу (рис. 3.28). Для изготовления микро- и нанообъектов нужна высокая прецизионность в пространстве и времени. В отличие от макростереолитографии, здесь сфокусированный лазерный луч неподвижен относительно координатного стола, перемещающегося в направлениях *X*, *Y* и *Z*. Однако перемещения эти должны

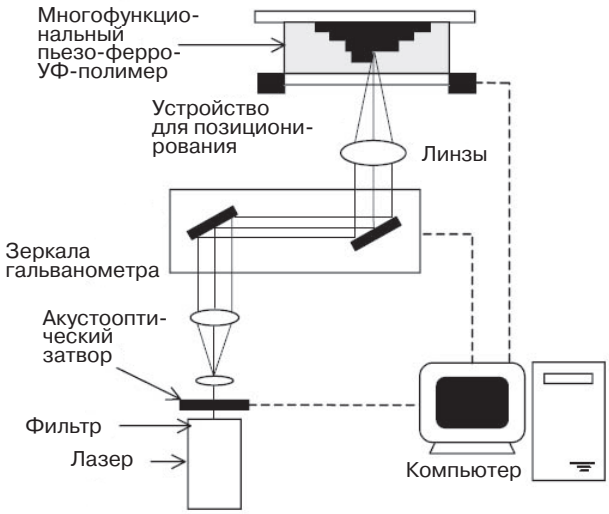


Рис. 3.28. Схема μSLA

быть довольно медленными, чтобы прошел процесс полимеризации. Таким образом возможно формировать слои толщиной ~20 мкм из керамопластов. Нановключения из частиц цирконат-титанат свинца-керамики или ферроэлектриков могут быть интегрированы в полимерные слои. Аппаратурной схемой используются He-Cd-лазер, акустооптический затвор и гальваномеханическая система зеркал.

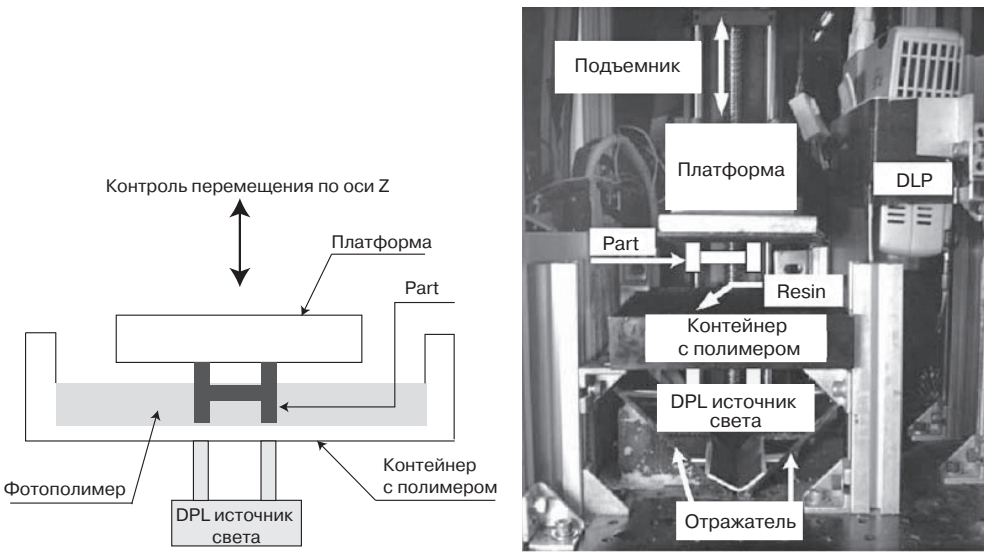
Такие структурно-функциональные керамические материалы обладают рядом уникальных свойств, такими как тепло- и химическая устойчивость, низкая теплопроводность, пьезо- и/или ферроэлектричество и т. д. 3D-структуры, созданные данным способом, могут играть роль микродвигателей, микронасосов, то есть являются полноценными MEMS. Для того чтобы получить плотные (беспористые) микрокерамические изделия, green part следует подвергнуть дополнительной УФ-обработке для полной полимеризации олигомера.

3.8. Проекционные масочные фотополимеризационные технологии

3.8.1. Проекция на маску при стереолитографии

Одним из пионеров проекционных масочных фотополимеризационных технологий (МПФТ) в стереолитографии следует считать Cubital Co. с ее методом Solid Ground System (SGC). Использование в качестве источника для засветки LED или liquid crystal display (LCD) было предложено в [8]. Метод назван direct mask photo curing (DMPC) (рис. 3.29).

В качестве полимера использованы недорогие олигомеры марки NAF202 фирмы Nippon Co. Инициатор полимеризации работает на длинах волн видимого света. Минимальная толщина полимеризующегося слоя ~100 мкм, время засветки ~10 с на один слой.



а *б*

Рис. 3.29. Масочная методика БП DMPC: *а* — схема процесса; *б* — структура машины с применением Digital Light Processor (DLP)

3.8.2. Коммерческие МПФТ-системы — MicroTEC

Компанией MicroTEC GmbH (http://www.microtec-d.com/) запатентован процесс микропрототипирования RMPD® — Rapid Micro Product Development, также основанный на масочном подходе. На рис. 3.30 показана схема этого оригинального процесса.

Возможность параллельно направлять большое количество лазерных лучей (рис. 3.30, *а*) через чередующиеся маски (рис. 3.30, *б*) значительно упрощает и удешевляет процесс. В дальнейшем известные методы физического осаждения

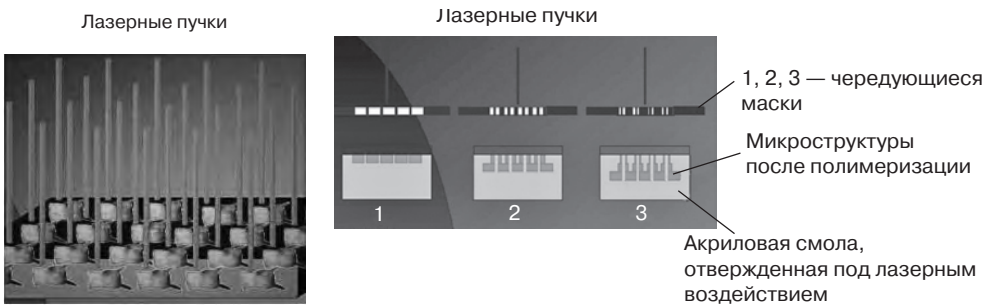


Рис. 3.30. Процесс MicroTEC: *а* — лазерные пучки проходят через маску; *б* — чередующиеся маски (1, 2, 3…) создают объемные микроструктуры в акриловом олигомере

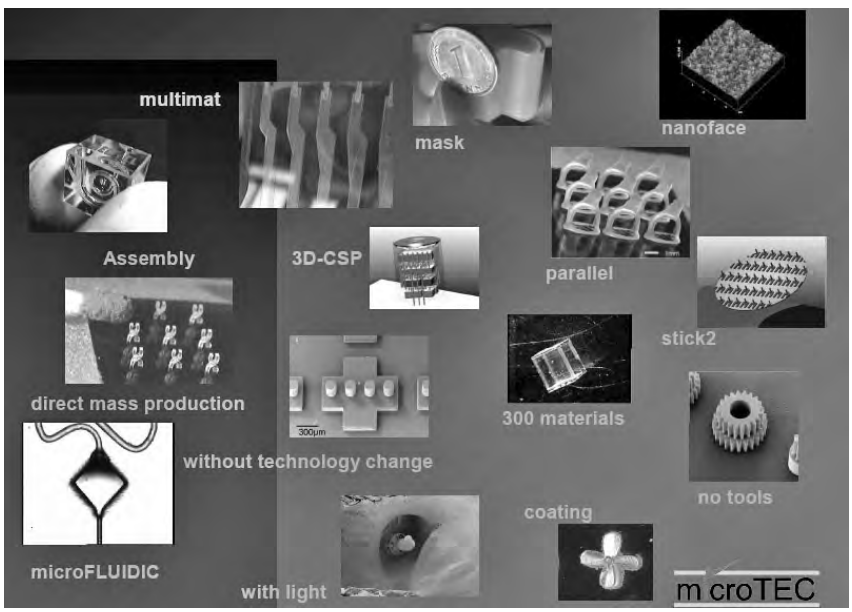


Рис. 3.31. Области применения (с разрешения MicroTEC GmbH)

(microfluidic — микрофлюидика; with light — на просвет; without technology change — без изменения технологии; coating — покрытие; materials — материалы; assembly — сборка; direct mass production — массовое производство; no tools — без оснастки; stick2 — двумерная система микрошприцев; parallel — параллельный; multimat — многоматериальный; mask — маска; nanoface — наноэкран)

(PVD approach) используются для металлизации и создания интегральных структур на подготовленных путем RMPD® площадях.

Преимущества метода состоят в высокой скорости реализации процесса, дешевых масочных материалах, высокой точности воспроизведения, возможности создания сложных микро- и макроструктур (изделий).

Такие high-tech-приложения (рис. 3.29), как процессорные микросхемы, элементы памяти, сенсоры, пассивные элементы, системы структурирования газовых и/или жидкостных потоков, могут быть интегрированы в одно интеллектуальное устройство.

3.9. Двухфотонная стереолитография и субмикронные изделия высокой точности

В Laser Zentrum Hannover (Германия) была предложена новая инновационная методика двухфотонной лазерной стереолитографии (см. [9]). С помощью этого метода в объеме фотополимера последовательной поточечной записью сфокусированным излучением фемтосекундного лазера могут быть сформированы произвольные 3D-структуры с разрешением ~100 нм. Поглощение света фотополимером на определенной длине волны приводит к реакции полимеризации, а двухфотонный характер поглощения излучения позволяет добиться того, чтобы этот процесс был локализован только в области перетяжки пучка (рис. 3.32), а не распределен вдоль его оси.

В качестве фотополимера авторами был предложен термически и химически стабильный олигомер ORMOSER (рис. 3.33, *а*), концевые группы которого могут быть дополнены функциональными группами, содержащими кремний, керамику и пр. Поглощательная способность ORMOSER (рис. 3.33, *б*) высока в УФ-области и имеет провалы в областях 780, 1310, 1550 нм.

Область применения двухфотонной лазерной стереолитографии продолжает расширяться и по сей день. Это новомодные метаматериалы — фотонные кристаллы (рис. 3.34, *а*), 3D-волноводные структуры (рис. 3.34, *б*), lab-on-chip — нанофлюидные чипы (рис. 3.34, *в*), 3D-нано- и микроструктуры (рис. 3.34, *г*), 3D-дифракционные оптические элементы, медицинские имплантаты и пористые тканево-клеточные каркасы (scaffolds).

Безусловно, данный метод обладает наилучшими показателями по точности разрешения, степени воспроизводимости и применимости в MEMS/NEMS-технологиях. На рис. 3.35 показаны работы студентов Венского технического университета (http://www.tuwien.ac.at) в области многофотонной полимеризации.

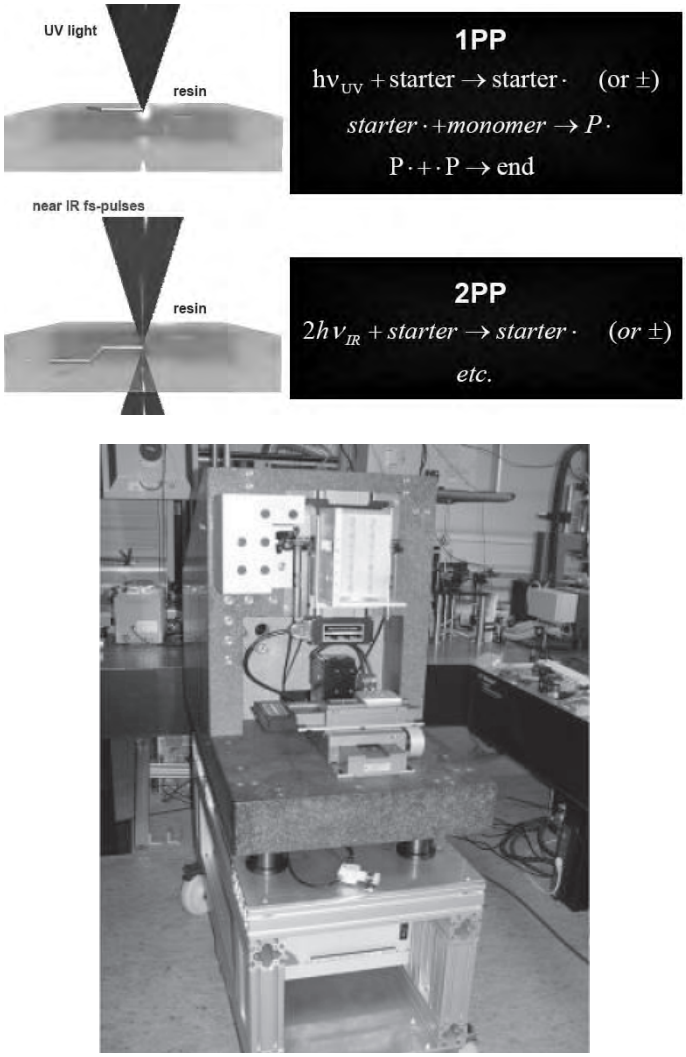
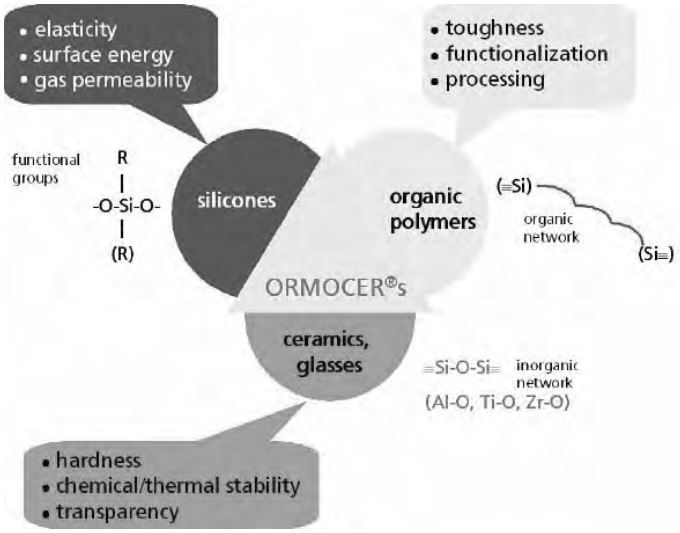
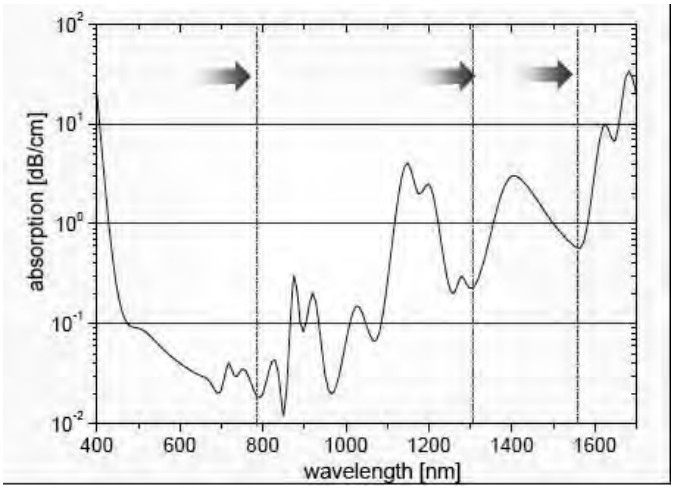


Рис. 3.32. Сравнение одно- и двухфотонной поляризации и установка для трехмерного наноструктурирования методом 3D2S (UV light — источник УФ; resin — полимер; near IR fs-pulses — ближний ИК фс-импульс; starter — инициатор; monomer — мономер)



а



б

Рис. 3.33. Схема и свойства: *а* — функциональный олигомер ORMOSER; *б* — его спектр поглощения

(elasticity — упругость; surface energy — поверхностная энергия; gas permeability — газовая проницаемость; toughness — жесткость; functionalization — функциональность; processing — переработка; functional groups — функциональные группы; organic network — сеть органики; silicones — силиконы; organic polymers — органические полимеры; inorganic network — сеть неорганики; ceramics — керамика; glasses — стекла; hardness — твердость; chemical/thermal stability — химическая/термическая стабильность; transparency — прозрачность; absorption — поглощение; wavelength — длина волны)

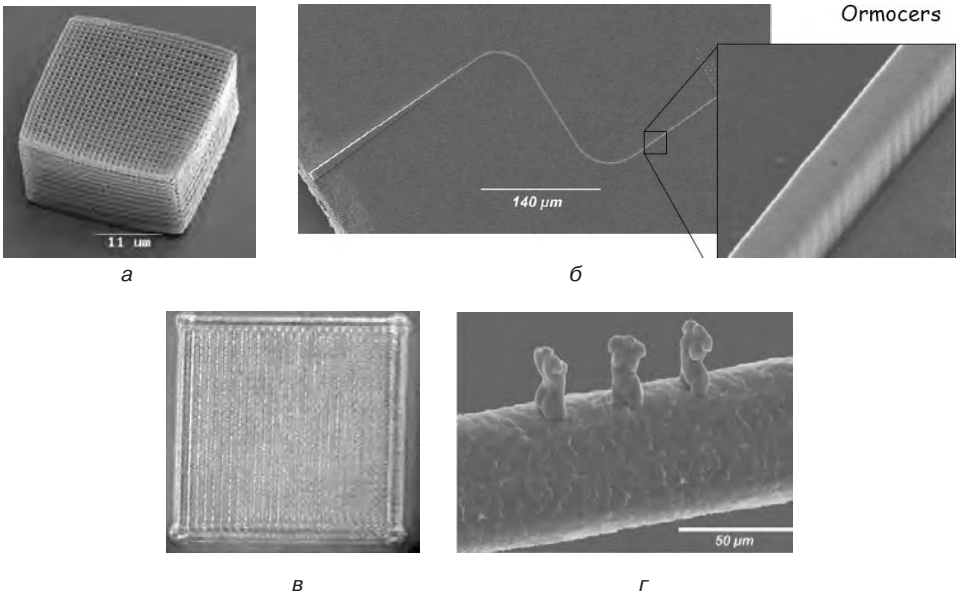


Рис. 3.34. Примеры приложений двухфотонной лазерной стереолитографии[1]: *а* — фотонный кристалл; *б* — 3D-волноводная структура; *в* — нанофлюидный чип; *г* — 3D-нано- и микроструктуры

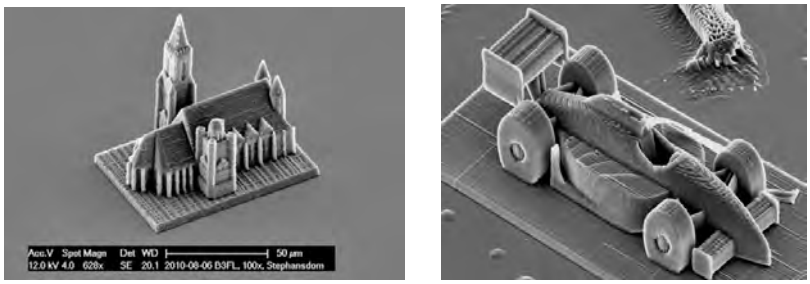


Рис. 3.35. Примеры субмикронных изделий высокой точности

[1] *Chichkov B.* Femtosecond laser technologies at the LZH. St Etienne, 2005.

Глава 4
Твердофазные методы БП

4.1. Материалы и процессы листового ламинирования

Процессы, использующие раскрой по контуру с помощью ЛИ различных листовых материалов и последующее их склеивание слой за слоем, так что создается трехмерное изделие, мы будем относить к твердофазным методам БП [1]. Приращение слоев регулируется в зависимости от толщины листового материала и количества клея между слоями. В качестве листового материала могут быть использованы бумага, пластмассовые пленки, металлические фольги, в том числе с наполнителями (керамика, наночастицы и т. д.). Твердофазные процессы считаются неэкономичными, поскольку обрезки листового материала нельзя использовать вторично. Вместе с тем простота их реализации привлекает многих.

Кроме того, есть еще ряд процессов, например ультразвуковое компактирование, послойная экструзия, непосредственное создание литейных форм, которые также следует отнести к твердофазным методикам БП исходя из физического состояния используемых в этих методиках материалов. Именно поэтому о них пойдет разговор в данной главе.

4.2. Склеивание и адгезивное связывание листовых материалов

Наиболее популярным листовым материалом является бумага с термопластичным покрытием с одной стороны толщиной ~0,07...0,2 мм. Похожее адгезионное покрытие с тыльной стороны имеет, например, оберточная бумага. Существует несколько подходов. При одном слой бумаги сразу закрепляется на подложке, а затем процесс повторяется и слой за слоем наращивается изделие. При другом слои сначала нарезаются, а потом ламинируются в единое целое.

Первая процедура построения проходит в три шага. Ламинат (бумага с клеевой основой) наносится на подложку, скрепляется с ней, затем по контуру отрезается сечение изделия. Специальные терморолики плавят пластик покрытия и тем самым закрепляют слой на основании. Эти ролики прокатываются по поверхности после наложения каждого нового слоя. Лазер (или механический резак) вырезает контур следующего сечения, затем процесс повторяется. Обрезки остаются на столе-платформе и исполняют роль поддержки. После завершения нужен постпроцесс по удалению отходов. Когда изделие остыло, довольно трудно убрать обрезки вокруг него, поэтому это нужно делать сразу. Так реализован процесс 3D-синтеза в установках Laser Object Manufacturing (LOM), производимых Helisys Inc. (США),

а теперь принадлежащих Cubic Technologies. Похожие подходы использованы в процессах Solid Slicing Manufacturing (SSM) (Пекин, Китай); Zippy RP Systems (Kinergy Ltd., Сингапур). В процессе Paper Lamination Technology (PLT) (Kira Co., Япония) бумага не имеет адгезионного покрытия и режется по контуру. Затем лазерный принтер наносит клеящий порошок на поверхность предыдущего слоя или подложки там, где предстоит приклеивание. Так как адгезионного покрытия нет, убирать отходы проще.

Первый подход «связывание, а затем формирование» был успешно применен для листовых материалов с включениями из керамики, металла и других композитов в установках фирм SolidDimention (Израиль) и 3D Systems (машина названа InVision 3D Modeler). В этом случае листовой материал (полимер плюс керамика — SiC, Al_2O_3 или фольга металла плюс композит TiC-Ni) нарезался слоями, строился полуфабрикат (green part), а затем в высокотемпературной печи происходило спекание изделия. Все эти процессы могут сопровождаться значительной усадкой изделия, остаточные напряжения приводят к расслоению листов материала, края изделия имеют характерную для фанеры структуру, но стоимость таких изделий весьма низка, производительность процесса высока, есть возможность изготавливать крупные изделия, а сам процесс нетоксичен. Есть еще ряд ограничений и проблем:

- надо поддерживать определенную влажность в помещениях, где изготавливаются и хранятся изделия;
- контролировать точность приращения в вертикальном направлении трудно, так как кроме листового материала нужен слой клея, а его толщина может изменяться;
- механические и термические свойства изделий неоднородны из-за слоистости и наличия клея;
- существуют серьезные проблемы с изготовлением миниатюрных изделий.

Как отмечалось ранее, при втором подходе, наоборот, идет формование, а затем связывание изделия. Для керамических и металлических фольг этот подход более привлекателен. Толщины фольг составляют от 30 мкм до 1,3 мм. Обрезки листов могут удаляться не только механически, но и термохимическим путем. Проблемы существуют и здесь на стадии постпроцессов, когда значительная усадка (до 12...18%) и деформации приводят к потере изделием первоначальной формы. Между тем изделия, структурирующие микропотоки жидкостей или газов в CAM-LEM-процессе, были созданы таким образом. Процесс StratoConception также был реализован с применением этого подхода.

4.2.1. Термическое связывание

Собственно термическое связывание металлических фольг, предварительно раскроенных по слоям, может быть осуществлено методами диффузионного связывания, лазерной сварки или пайки. Как отмечалось, проблемы тут возникают, когда надо убрать излишки материала и продукты связывания.

Таким способом можно создавать функциональные изделия из стальной и алюминиевой фольги. После диффузионного связывания структура поперечного сечения изделия имеет непрерывную микроструктуру без каких-либо неоднородностей. Но, поскольку лазерная сварка или пайка требуют постоперационной обработки (финишной шлифовки), края сложной геометрии трудно обрабатывать. Листовое ламинирование используют еще в одном технологическом процессе — Shape Deposition Manufacturing (SDM) (см. раздел 4.10).

При ультразвуковой консолидации (УЗК) ламинированных слоев вращающийся УЗ-датчик двигается по краю фольги и передает поперечные УЗ-колебания (~20 кГц) (рис. 4.1). Использование станков с координатным управлением позволяет повысить точность позиционирования в месте УЗ-воздействия, а дополнительная постпроцессорная фрезерная обработка краев убирает шероховатости. Ламинирование с УЗК позволяет создавать сложноконтурные изделия с внутренними пустотами — сенсоры, инструментарий, оптронику.

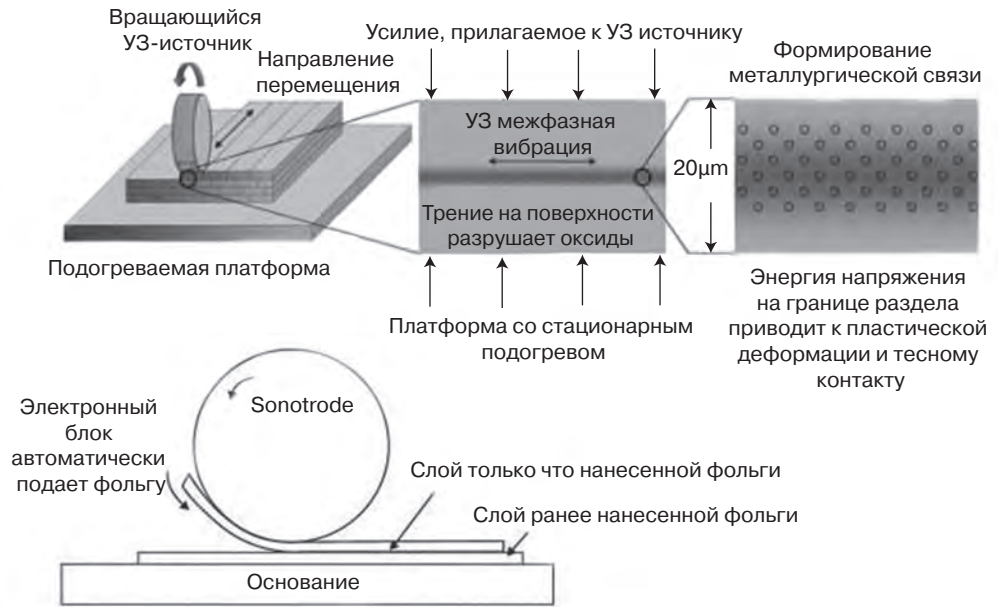


Рис. 4.1. Схема процесса УЗК

4.2.2. Процессы, основанные на фиксации листового металла

Качество фиксации листового материала характеризуют три основных параметра: линейная плотность сварного шва (ЛПШ) между слоями, точность позиционирования и собственно прочность изделия. ЛПШ определяется металлографическим способом как процент пор (несплошностей) к общему сплошному соединению вдоль линии шва. Прочностные свойства изделия определяются традиционными средствами механических измерений.

4.3. Ультразвуковая консолидация ламината

УЗ-сварка известна с конца 1950-х годов и применяется в электронике, точном машиностроении, авто- и авиастроении. Это метод консолидации материалов в твердом состоянии без высокотемпературной диффузии или плавления металла. Максимальные температуры в зоне УЗК составляют ~50% от температуры плавления, поэтому термические напряжения, обычно возникающие после плавления материалов, тут можно не рассматривать. УЗК позволяет обеспечить механическое сцепление металлов, подплавление их в зоне контакта, диффузионное связывание и т. п.

В нашем случае УЗК ламината все перечисленные процессы также наблюдаются. Более того — и это важно! — возможно связывание разнородных материалов.

4.3.1. Основы процесса УЗК и их оптимизация

На качество УЗК влияют чистота обработки соприкасающихся слоев и тесный контакт между слоями. Поэтому дополнительное пластическое деформирование в зоне контакта желательно. Также слои металла надо очистить от оксидных пленок для увеличения эффекта связывания. Очевидно, что пластичные и хорошо передающие УЗ-колебания материалы будут лучше связываться. Предварительное «акустическое размягчение» листового материала, например дополнительный подогрев при лазерной обработке, позволяет снизить прикладываемое в зоне контакта напряжение, меньше думать о шероховатости поверхности соприкасающихся слоев. Пластическое деформирование материала в зоне УЗ-воздействия активирует образование вакансий, по которым более активно пойдет диффузионный процесс связывания.

Амплитуда УЗ-колебаний должна быть оптимизирована, как и скорость перемещения УЗ-концентратора по поверхности. Обычно УЗК проводят при комнатной температуре. Однако известно, что для некоторых материалов (стали, алюминиевые сплавы) незначительный подогрев (~150 °C) рекомендован, в то время как для медных сплавов он нежелателен из-за дополнительного оксидирования меди.

4.3.2. Микроструктуры и механические свойства УЗК-связанных изделий

Наиболее значимыми дефектами УЗК являются поры, которые ухудшают параметр ЛПШ. Выделяют несколько типов дефектов при УЗК. Первый тип дефектов связан со значительной шероховатостью соприкасающихся слоев листового материала и/или недостаточным подводом (рассеянием) энергии УЗ-воздействия. Второй тип дефектов образуется при избытке подводимой энергии УЗ-воздействия, приводящем к разрушению связей. Наконец, третий тип дефектов связан с разрушением самой фольги при УЗ-воздействии. Таким образом, оптимизация параметров УЗК сводится к достижению максимальной величины ЛПШ и минимизации дефектов третьего типа. На рис. 4.2 показаны характерные структуры поперечного сечения двух слоев фольги из никеля с включениями из пор.

Механические свойства изделий после УЗК-слоев имеют анизотропный характер, что связано с неоднородностью соприкасающихся слоев фольги, наличием пор между слоями и дефектной структурой после пластического деформирования.

К настоящему времени экспериментально показана возможность УЗК-фольг из алюминиевых сплавов, бронзы, чистой меди, никелевых сплавов, сталей, титановых сплавов. В эти фольги можно внедрить керамику — Al_2O_3, SiC еще на стадии их производства. Кроме того, возможна консолидация разнородных листовых материалов, что открывает перспективы создания функционально-градиентных (ФГ) изделий. Например, можно реализовать оптимальное чередование

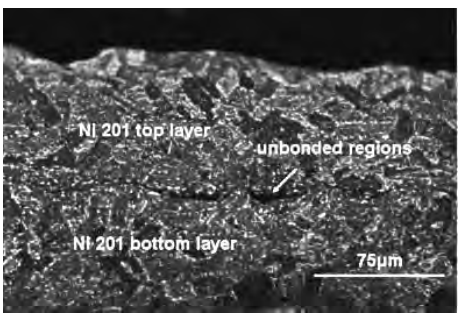


Рис. 4.2. Дефекты УЗС никелевой фольги (top layer — верхний слой; unbonded regions — несвязанные области; bottom layer — нижний слой)

листовых материалов с различными теплопроводностью, пластичностью, износостойкостью и т. д., что может дать интересные приложения [2].

4.4. Установки для послойного ламинирования объемных изделий

Как отмечалось ранее, известны следующие методики БП путем послойного ламинирования:

- Laser Object Manufacturing (Helisys Co., США);
- Solid Slicing Manufacturing (Beijing, Китай);
- Zippy RP Systems (Kinergy Ltd., Сингапур);
- Paper Lamination Technology (PLT) (Kira Co., Япония).

В последнее время появился ряд новых процессов, использующих подходы послойного ламинирования. Так, при CAM-LEM-подходе исходные данные CAD-модели раскладываются на слои, по которым лазерный луч нарезает листовой материал в стопке (так называемый green ceramic tape) (рис. 4.3). Толщины листовых материалов 30...1300 мкм.

Установка для CAM-LEM-ламинирования показана на рис. 4.4.

В процессе удаления связующего выполняется теплое изостатическое прессование, обеспечивающее межслоевой контакт и высокую связность слоев при последующем спекании в печи. Отжиг green-part-полуфабриката изделия увеличивает плотность структуры практически до монолитной. Данный метод отличают следующие преимущества:

- возможность использования большого спектра материалов;
- возможность чередования типов материалов (ФГ-структуры);
- создание внутренних функциональных каналов и пустот в изделии;
- комплексная геометрия изделия.

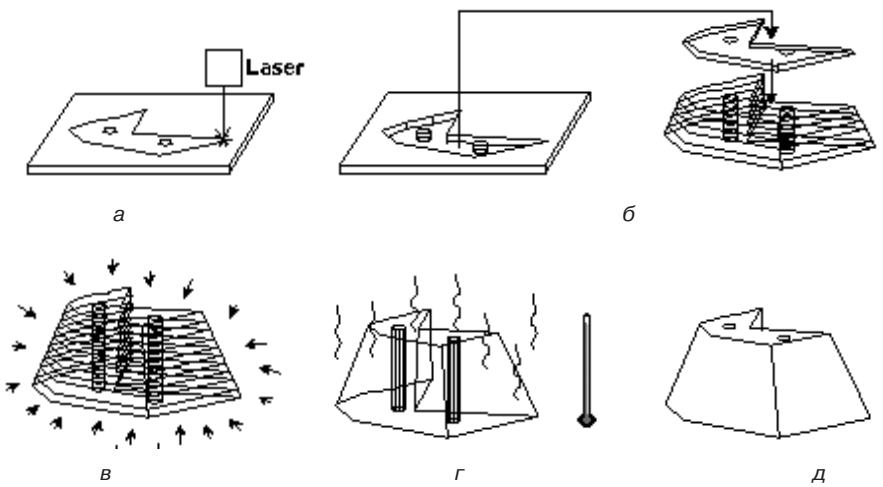


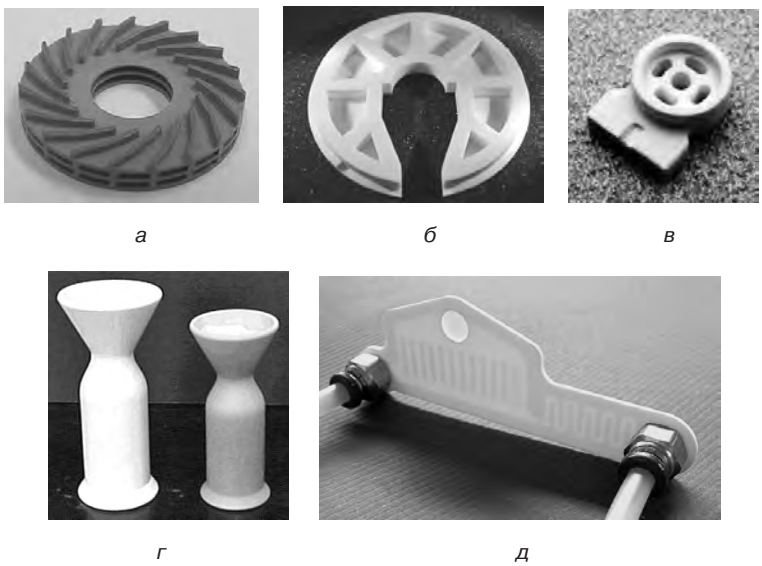
Рис. 4.3. Схема CAM-LEM-процесса: *а* — лазерная резка слоев; *б* — наложение слоев; *в* — ламинирование; *г* — удаление связующего и дополнительное спекание; *д* — готовое изделие

Рис. 4.4. Машина для CAM-LEM-ламинирования, размер 2,0 × 1,6 × 1,0 м^3

Университет Case Western Reserve (США) предлагает использовать при этой методике следующие материалы:

- керамику на основе оксида алюминия;
- керамику на основе нитрида кремния;
- железоникелевые порошковые сплавы;
- порошки нержавеющей стали.

Для каждого из материалов разработан свой тип связующего — обычно в виде прессованного порошка, который подвергается лазерной термообработке (резке, раскрою). Данная технология применяется весьма широко (рис. 4.5).



а *б* *в*

г *д*

Рис. 4.5. Примеры CAM-LEM-технологии: *а* — трехслойный стальной ротор диаметром 26 мм; *б* — деталь из оксида алюминия; *в* — деталь из оксида циркония и смеси $ZrO_2 + Al_2O_3$ (ZTA); *г* — деталь из нитрида кремния; *д* — устройство сепарации жидкости с внутренними каналами

4.4.1. Методика построения изделий из листового материала Laminated Object Manufacturing LOM (Cubic Inc.)

Метод послойного формирования объемных моделей из листового материала в технологии БП (англ. Laser Object Manufacturing (LOM)) одним из первых предложил Михаил Фейгин (Michael Feygin — советский изобретатель, эмигрировавший в США) в 1988 году. В настоящее время фирма Helisys Co. (США) выпускает промышленные технологические установки LOM 1015, LOM 2030 и т. п. Существуют и другие производители установок — Paradigm, Sparx AB (HotPlot). В них используется листовой материал (в основном бумага или полиэстер), который раскраивается по заданному контуру ЛИ и затем скрепляется в стопке путем склеивания или спайки (сварки) (рис. 4.6). Толщина листов зависит от материала и изменяется в интер-

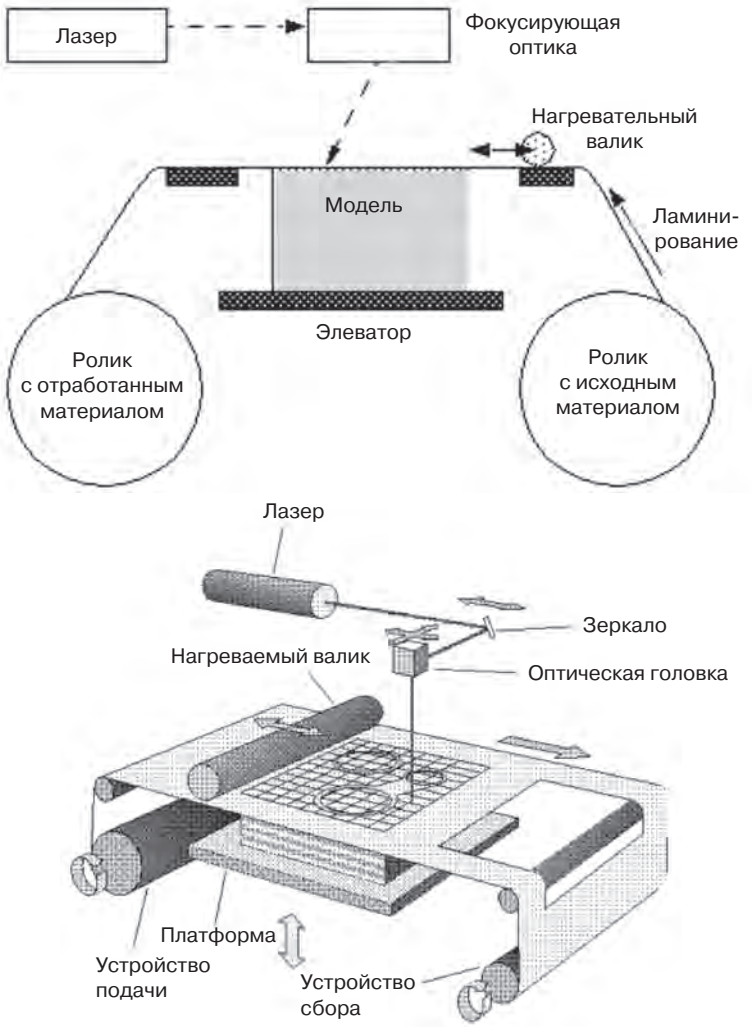


Рис. 4.6. Послойная раскройка — LOM-процесс

вале от 50 до 500 мкм. В настоящее время существует возможность использования следующих прессованных материалов: бумаги, пластиков, керамики, композитов.

ЛИ в плоскости $X–Y$ сканируется поверхность раскраиваемого материала. Заметим, что здесь сканирование производится только по контурам. Это делает процесс более эффективным, чем процессы, требующие растрового сканирования. Можно одновременно раскраивать более чем один лист, однако точность метода из-за ошибок позиционирования при этом увеличивается. Обрезки материала удаляются и в дальнейшем не используются. В случае ошибки при синтезе объемного изделия часть слоев может быть удалена и тем самым ошибка устранена.

При синтезе объемной модели возможно наличие переборок и подпорок. Нагреваемый валик сразу осуществляет ламинирование слоев друг с другом. Толщину слоев трудно контролировать, поэтому для повышения точности воспроизведения деталей их взвешивают. По окончании синтеза требуется удалить все подпорки и тщательно контролировать влажность детали, чтобы избежать расслоения при чрезмерной просушке. Для раскроя используется CO_2-лазер, сканирование ЛИ осуществляется так же, как в описанных ранее процессах. В табл. 4.1 приведены спецификации известных LOM-установок.

Таблица 4.1. Спецификации LOM-1015PlusTM и LOM-2030HTM

Параметр (в скобках даны размеры в английских единицах измерения)	**LOM-1015PlusTM**	**LOM-2030HTM**
Максимальный размер изделия, мм (in)	381 × 254 × 356 (15 × 10 × 14)	813 × 559 × 508 (32 × 22 × 20)
Максимальный вес изделия, кг (lbs)	32 (70)	204 (405)
Тип лазера и мощность	Отпаянный CO_2-лазер, 25 Вт	Отпаянный CO_2-лазер, 50 Вт
Диаметр пучка, мм (in)	0,20...0,25 (0,008...0,010)	0,203...0,254 (0,008...0,010)
Привод координатного стола	Плата управления перемещениями в плоскости $X–Y$ через серводвигатели со скоростью до 457 мм/с (18"/s); типичная обратная связь Z-платформы для системы движения	Плата управления перемещениями в плоскости $X–Y$ через бесщеточный серводвигатель со скоростью до 457 мм/с (18"/s); типичная обратная связь Z-платформы для системы движения
Точность XYZ-позиционирования, мм (in)	±0,127 (±0,005)	±0,127 (±0,005)
Толщина материала, мм (in)	0,08...0,25 (0,003...0,008)	0,076...0,254 (0,003...0,008)
Размер материала	До 356 мм (14") ширина и диаметр рулона	До 711 мм (28") ширина и диаметр рулона
Площадь, м (ft)	3,66 × 3,66 (12 × 12)	4,88 × 3,66 (16 × 12)
Потребляемая энергия	Две (2) 110 VAC, 50/60 Гц, 20 А, одна фаза; две (2) 220 VAC, 50/60 Гц, 15 А, одна фаза	220 VAC, 50/60 Гц, 30 А, одна фаза
Тип материала	LOMPaper®: LPH и LPS серий, LOMPlastics® LPX серия	LOMPaper® LPS серия, LOMPlastics® LPX серия, LOMComposite® LGF серия

Преимущества метода LOM:

- отсутствие физико-химических превращений при синтезе, минимальный прогрев слоев делают усадку и деформации минимальными;
- усадка может быть компенсирована за счет дополнительных слоев;
- не требуется дополнительный подогрев материала;
- ЛИ только раскраивает материал и не воздействует на его внутренние части;
- подпорки не нужны;
- большой выбор тонких листовых материалов по доступным ценам;
- быстрое обучение персонала;
- материалы не токсичны;
- установка легко управляема и миниатюрна.

Недостатки:

- удаление отходов затруднено, так как иногда лазер прорезает материал не полностью, и слои оказываются не связанными друг с другом;
- сложноконтурные детали можно повредить при удалении отходов (обрезков);
- свойства материала изменяются в направлении ламинирования;
- большой расход материала;
- боковая поверхность шероховата;
- синтезированную модель трудно обрабатывать из-за возможности деламинации (расслоения);
- вентиляция необходима, так как при пайке (склеивании) возможны испарения.

Точность процесса ±50 мкм в плоскости X–Y и ±25 мкм в направлении Z. Время изготовления — от часов до дней, для склеивания слоев можно использовать воск. Методика может быть использована для концептуального проектирования, конструкторской верификации (проверки) соотношения формы/размеров изделия, литья по выплавляемым формам. Фирма Cubic Technologies в 2000 году была закрыта с передачей ее патентов и другой интеллектуальной собственности. Последние версии машин Cubic имели название 1015 Plus, 2030H.

На базе метода лазерного листового раскроя, как и в лазерной стереолитографии, отрабатывались принципиальные вопросы воспроизводимости, точности формы поверхности синтезируемых деталей, возможность добавки порошковых материалов (керамики, полимеров) как при прессовании листового материала, так и в процессе ламинирования [2]–[4].

4.4.2. Kira (PLT) Paper lamination Technology — технология бумажной ламинации

Kira Corporation Ltd разработала свой процесс послойного синтеза, названный Paper Lamination Technology (PLT), а ранее он был известен как процесс селективной адгезии и горячего прессования — Selective Adhesive and Hot Press (SAHP). Спецификация установок представлена в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Параметры установок бумажной ламинации Kira Ltd.

Параметр	KSC-50N	
Методика	Paper Lamination Technology (PLT)	
Материалы	Обыкновенная бумага и тонер	Специальная бумага
Максимальные рабочие размеры изделия, мм	400 × 280 × 300	190 × 280 × 200

Параметр	KSC-50N	
Точность, мм	*X*, *Y*: ±0,05, *Z*: ±0,10	
Потребляемая мощность	200 В, 3 фазы, 30 А	100 В, одна фаза, 15 А + 5 А
Размеры установки, мм	2130 × 1000 × 1400	850 × 870 × 200
Вес, кг	600	450
Управление	IBM compatible PC	

Процесс аналогичен LOM™ процессу, за исключением того, что вместо роликов для прессования используется пресс [5]. Последовательность процесса изображена на рис. 4.7.

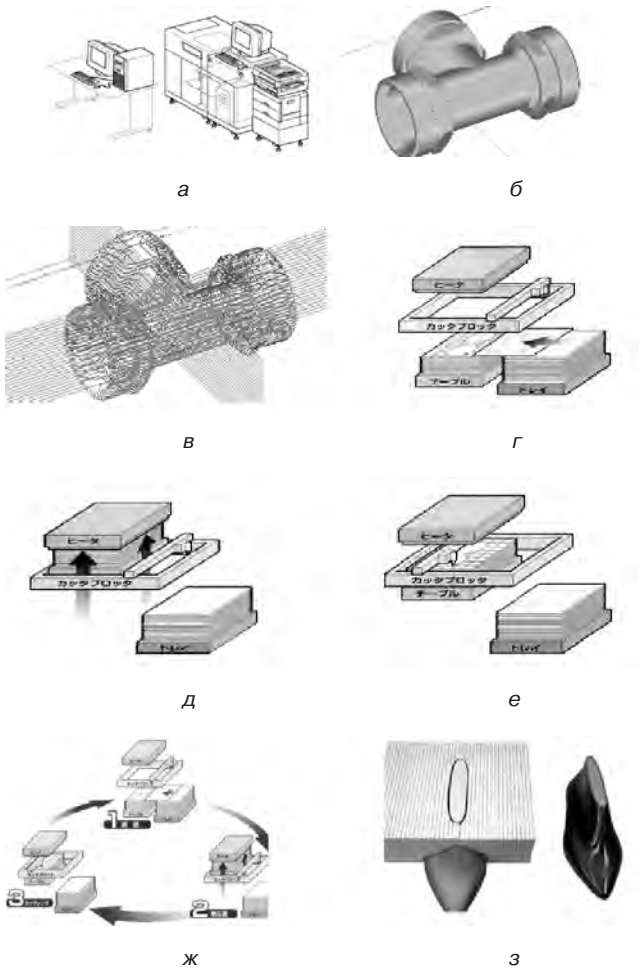


Рис. 4.7. Последовательность процесса PLT от Kira: *а* — создание STL-файла; *б* — ориентирование модели относительно плоскости синтеза; *в* — разделение модели на сечения; *г* — подача бумаги для раскроя; *д* — повторение процесса для следующих слоев бумаги; *е* — формовка стопки листов и подрезка по краям резаком; *ж* — повторение процесса для следующих сечений детали; *з* — удаление излишков

Недостатки процесса традиционны для данной технологии: тяжело контролировать толщину приращения в слое, есть сложности при создании тонкостенных изделий, в модели с внутренними пустотами нельзя удалить материал, удаление излишков тоже проблемно. Однако дешевизна процесса, высокая прочность из-за усилий при прессовании, отсутствие лазерного оборудования привлекают неискушенных пользователей.

4.5. Физические основы процессов экструзии

Принцип создания моделей-прототипов по технологии экструзии FDM (Fused Deposition Modeling) заключается в послойной укладке расплавленной до полужидкого состояния полимерной нити в соответствии с геометрией математической модели детали, разработанной в системе CAD (рис. 4.8). Математическая модель в формате STL передается в специальное программное обеспечение Catalyst или Insight, которое позволяет оператору оптимально ориентировать ее в рабочей зоне установки и автоматически разбивает на горизонтальные слои. Затем автоматически определяется необходимость применения поддерживающих элементов для нависающих частей модели. Сгенерированные данные передаются на установку, и начинается процесс послойного создания модели.

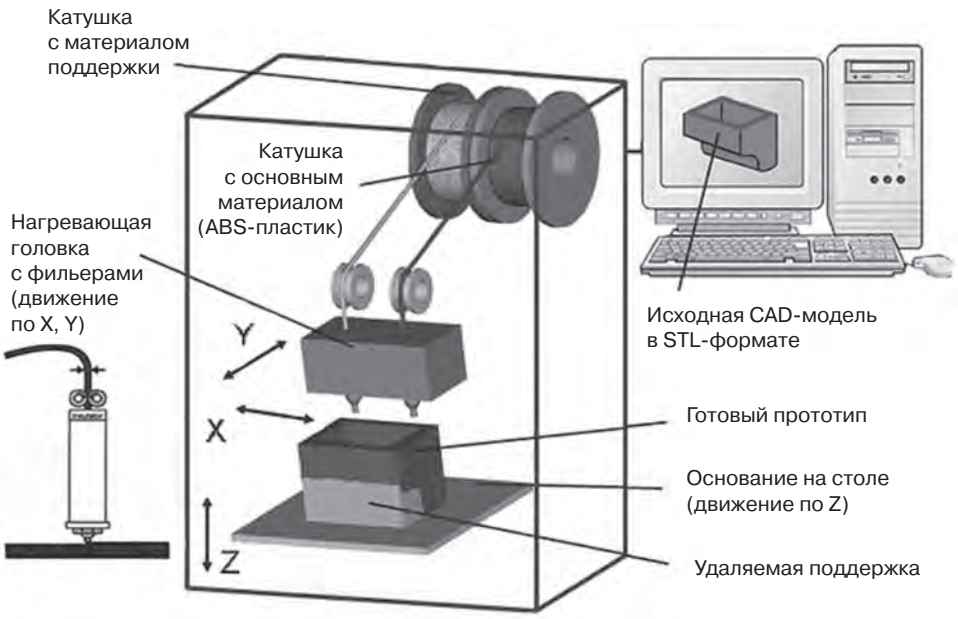


Рис. 4.8. Схема процесса экструзии

4.5.1. Размягчение и нагрузка на материал

Существует два основных подхода к описанию и контролю экструзионных процессов. Наиболее очевидный — это контроль температуры, с которой материал выдавливается из сопла. Расплавленный материал течет через сопло и затвердевает на поверхности изделия.

Второй подход — контроль химических изменений при затвердевании. В этом случае остаточный растворитель реагирует на воздухе (высыхает), приводя к затвердеванию расплава. Изделие может быть либо полностью отвердевшим (высохшим), либо находиться в размягченном состоянии. Это полезно для биохимических приложений FDM-метода, когда материал должен иметь свойства биосовместимости с живыми клетками. Но есть и промышленное приложение — заливка материала в форму под давлением методом впрыска (инжекционное прессование).

4.5.2. Экструзия и плавление

С математической точки зрения описать процесс экструзии довольно сложно, поскольку имеет место вязкое течение ньютоновской жидкости через сопло. Но базовые принципы и требования для успешного экструдирования известны.

- Материал должен быть удобен для загрузки.
- Материал должен течь.
- Приложение давления должно влиять на скорость течения из сопла.
- Экструзия должна быть контролируема.
- Должна существовать возможность контролируемого рисования выдавливаемым материалом по поверхности.
- При затвердевании должно происходить связывание материала с подложкой или другим материалом.
- Поддержки должны быть легко встраиваемыми и легко убираемыми.

Итак, должна иметься камера для загрузки исходного материала. Материал может быть предварительно подогрет. Если он находится в жидкой форме, то идеальной камерой должна быть камера насоса.

Конфигурация экструзионного сопла определяет форму и скорость истечения материала из него. При большом диаметре сопла материал течет быстро, в результате чего точность изделия будет низкой. Размер сопла не должен быть и слишком мал, иначе материал будет застревать в нем.

Обычно сопло имеет винтовую закрутку, определяющую направление и скорость подачи потока при прикладываемом давлении. Количество (масса) выдавливаемой жидкости зависит от перепада давления, диаметра сопла и вязкости материала. Вязкость зависит от температуры, поэтому желателен предварительный нагрев материала. В [1] скорость течения материала v в направлении канала экструзионного сопла определяется так:

$$v = \pi DN\cos(\varphi), \tag{4.1}$$

где D — диаметр канала; N — скорость подачи; φ — угол винта. Тогда расход материала Q_d для плоского канала определяют по формуле

$$Q_d = vWH/2 = \pi/2WHDN\cos(\varphi), \tag{4.2}$$

где W — ширина канала; H — глубина канала. Количество продавливаемого материала Q_p зависит от изменения давления P:

$$Q_p = BH^2/(12\eta)dP/dz, \tag{4.3}$$

где B — резьбовой калибр; η — динамическая вязкость. В результате общий расход материала будет определен как

$$Q = Q_p - Q_d = BH^2/(12\pi)dP/dz - vWH/2, \tag{4.4}$$

Выражения (4.1)–(4.4) являются оценочными. Более строгий подход, как отмечалось ранее, требует решения системы интегрально-дифференциальных уравнений Навье—Стокса и учета гравитации.

4.5.3. Затвердевание

Сила тяжести и поверхностное натяжение будут влиять на форму выдавливаемых из сопла капель материала (если процесс идет импульсно, важен будет и временной параметр) и степень усадки при высыхании на подложке. Охлаждение (затвердевание) материала имеет нелинейный характер, что приводит к деформированию нанесенного слоя. Если свести к минимуму разность температур на выходе из сопла и у подложки (то есть контролировать температуру в камере синтеза), степень деформации можно уменьшить. Предполагая, что на стенках сопла скорость стремится к нулю, скорость сдвиговых деформаций γ' и сдвиговые напряжения τ можно оценить по формулам

$$\gamma' = -dv/dr; \quad \tau = (\gamma'/\psi)^{1/m},$$

где m и ψ — константы ньютоновского процесса течения материала.

4.5.4. Дополнительные операции (генерация поддержек, контроль позиционирования)

Разбиение на сечения и генерация поддержек инициируется программным обеспечением, разработанным компанией Catalyst (рис. 4.9).

При построении модели-прототипа используется так называемая поддержка, а после завершения процесса она легко отделяется от модели механическим способом или вымывается специальным водным раствором в ультразвуковой ванне. Модель, изготовленная с применением этой технологии, называющейся WaterWorks (рис. 4.10), остается гладкой и чистой, без рисок и царапин, с сохранением мельчайших деталей. Технология WaterWorks предоставляет неограниченные возможности для моделирования тонкостенных деталей и деталей со сложными внутренними полостями (рис. 4.11).

4.5.5. Биоэкструзия и гелеобразование

Для экструзии можно использовать большое количество материалов. Если возможно ускоренно перевести материал в жидкое состояние и быстро его кристаллизовать, он применяется для экструзионных методик. Существуют химические методики перевода материала в гелеобразное состояние с последующим его высушиванием. Они применимы в биотехнологиях. Иными словами, есть биосовместимые и/или биодеградируемые материалы, из которых можно делать клеточные каркасы или матриксы, поддерживающие рост живых тканей. В FDM-технологии это поликапролактон. Также многие полимеры хорошо впитывают воду. Такие водонасыщенные полимеры (гидрогели) хорошо экструдируют и, возможно, биосовместимы. Находясь в пористом состоянии, они способствуют прорастанию клеток в поры. Надо сказать, что количество пор в матриксе для прорастания имеет ограничение ~60%. Очень большая пористость ведет к ухудшению механической прочности, а малая — к слабым контактам с живыми тканями. Размеры пор тоже имеют значение.

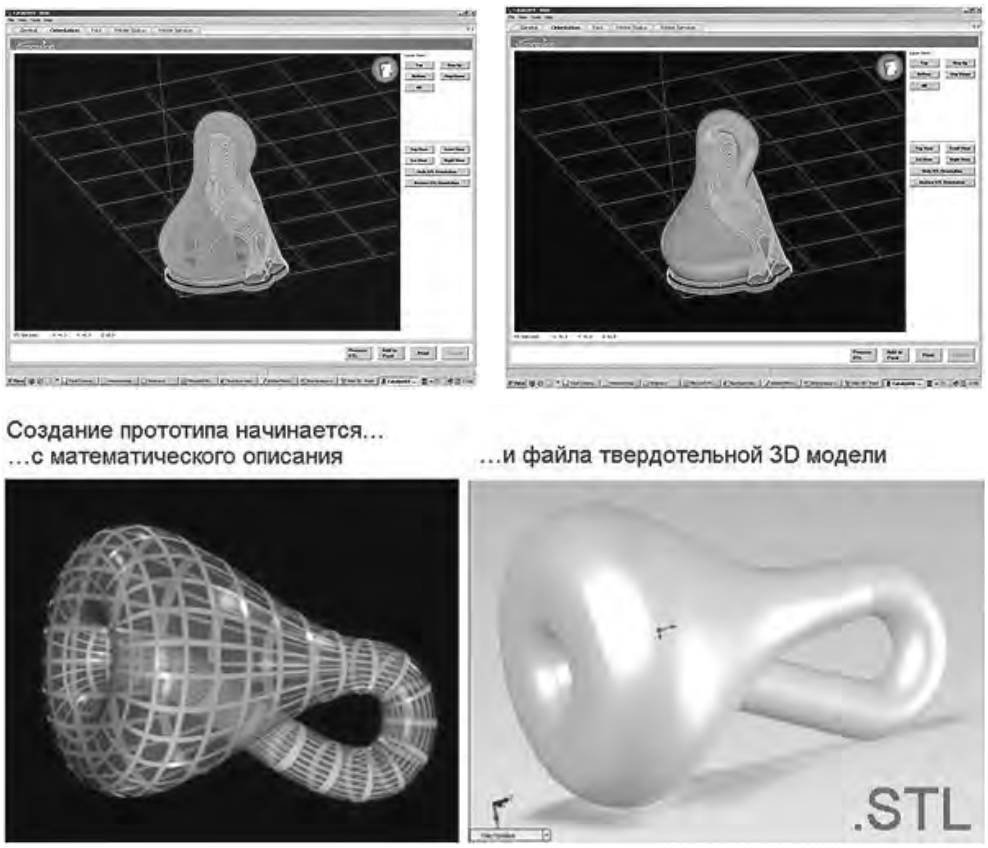


Рис. 4.9. Программное обеспечение Catalyst для автоматического разбиения на слои и формирования поддержки

4.5.6. Материалы для экструзии (полимеры, керамика) и цветовые решения

Традиционно для экструзии используется ABS-пластик — сополимер акрилонитрила (Acrylonitrile), бутадиена (Butadiene) и этиленбензола (Styrene). Различные пропорции компонентов определяют физико-механические свойства материала. Как видно из табл. 4.3, ABS-подобные материалы Stratasys по ряду параметров не соответствуют оригинальному ABS.

Как видите, полимерные материалы SLA и Objet по характеристикам больше соответствуют ABS, чем Stratasys. В табл. 4.4 представлен весь ряд используемых материалов и цветовых решений.

В качестве материала поддержки используются два решения — SST (soluble support technology — растворимая поддержка) и BST (breakaway support technology — разрушаемая поддержка). Это значит, что после создания модели материал поддержки SST можно растворить в специальном химическом составе. Материал поддержки BST необходимо удалять (срывать и срезать) механическим способом.

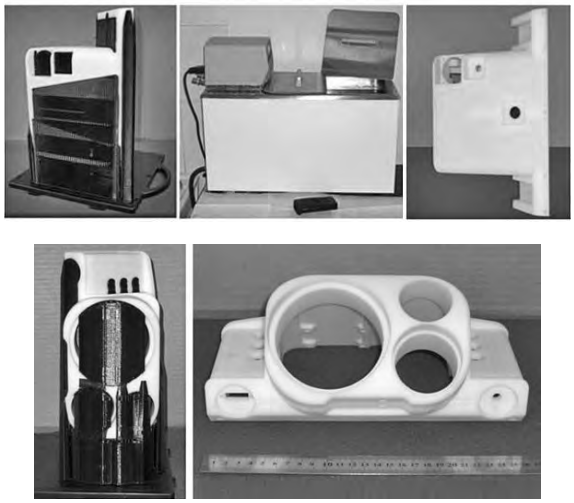


Рис. 4.10. Использование воднорастворимого материала поддержки — технология WaterWorks

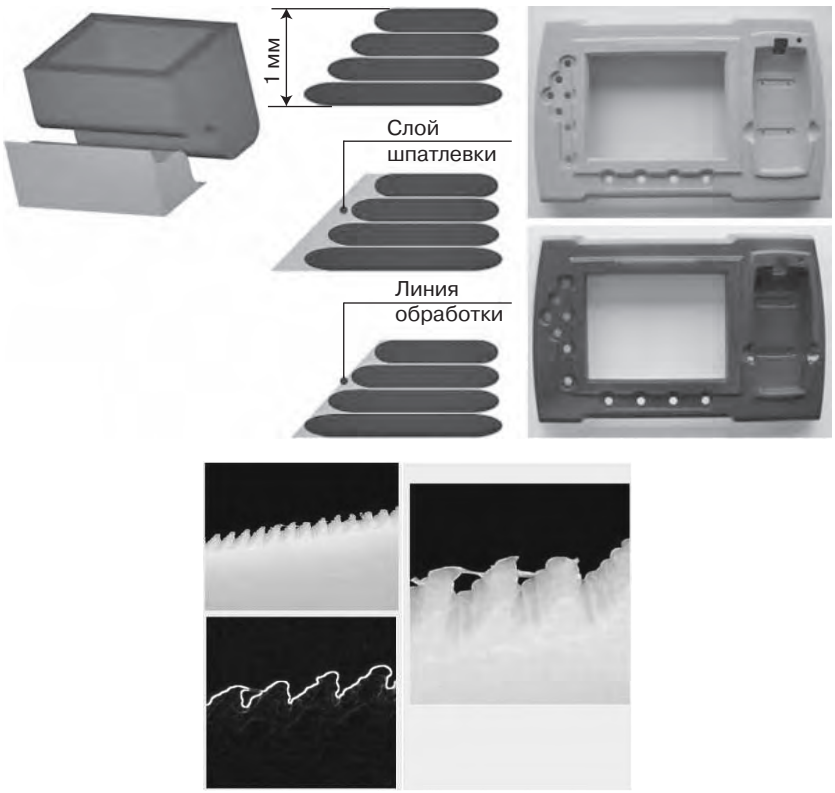


Рис. 4.11. Финишная обработка внешней поверхности прототипов

Таблица 4.3 Свойства ABS-пластиков для экструзии

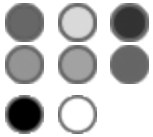
Параметр	Оригинальный ABS от компании Boedeker Plastics	Stratasys ABS	Stratasys ABS Plus	3D Systems Accura 50	Objet VeroWhite
Предел прочности на разрыв, psi	6500	3200	5295	7030	7221
Модуль упругости, psi	340 000	236 000	329 500	360 000	361 775
Предел растяжения на разрыв, %	25	6	4	5,3	25
Прочность на изгиб, psi	11 000	6000	7604	10 400	10 817
Модуль изгиба, psi	320 000	266 000	319 737	320 000	309 865
Ударные испытания по методу Изода, ft lb/in	7	2	1,8	0,31	0,66
Температура деформации при нагреве 264 psi, °C	102	96	82	43	43,6

Технологию SST поддерживают только дорогие системы БП — на них можно получать детали сложной геометрии. Но требуются дополнительное оборудование и расходники, а именно ванна и химический состав, который периодически необходимо обновлять. Технология BST грязная и трудоемкая. Есть риск повредить модель при очистке и нет возможности полностью очистить изделия сложной геометрии.

В Рутжерском университете (Rutgers, США) было предложено (метод был назван по аналогии — Fused Deposition Ceramics (FDC)) не просто связывать послойно экструдируемый расплав полимера (например, термопластичный поливинилиденфторид — PVDF, поливинилацетат — PVA), а дозированно заливать этот полимер в порошок (например, ЦТС-керамики, $Al_2O_3 + SiO_2 + MgO$, Si_3N_4, гидроксиапатита, стали, $Al_2O_3 + Ti$) [6], [7]. Эта идея, впервые зародившаяся у основателей именно FDC-методики, в синергетическом объединении с подходом по созданию функционально-градиентных материалов (ФГМ) из SDM-методики и структурным программированием материалов Р. Наймана [2] позволила расширить диапазон используемых в FDM-FDC-методике материалов и направлений применения [8]. Стало возможным создание пьезосенсоров, MEMS-устройств (биодозаторов и фильтров, пьезодетекторов для УЗИ-диагностики, каталитических поддержек, обшивки сандвичей, радиационных барьеров) программируемых формы и внутренней структуры (за счет укладки керамических блоков контролируемой пористости) [9].

Безусловно, по точности и шероховатости FDM-модели уступают созданным при использовании SLA-подхода, однако значительное число дизайнерских, конструкторских, технологических и других задач может быть успешно решено с помощью этой более доступной и дешевой технологии. В 2009 году истек срок действия основного патента FDM, что привело к радикальному снижению цен в этом сегменте АТ и способствовало развитию движения *RepRap* (*Fabers*) — см. раздел 4.11.

Таблица 4.4. Материалы Fused Deposition Modeling™ (http://www.solidconcepts.com/materials-fused-deposition-modeling.html)

Марка	Описание	Изменение цвета	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, МПа	Относительное удлинение при растяжении, %	Прочность на изгиб, МПа	Модуль изгиба, МПа	Ударная вязкость по Изоду, Дж/м	Heat Deflection Temp. — 264 psi, °C
ABS-M30	Прочные, функциональные, гладкие изделия с хорошей детализировкой		36,00	2,413	4,0	61	2,317	139,0	82
PC-ISO	ISO 10993-1. Сертифицированный поликарбонат		57,00	998	4,3	90	2,140	86,0	127
ULTEM 9085	Огнестойкие высокопроизводительные термопласты		71,64	2,220	5,9	115	2,507	106,0	153
ABS[1]	Прочный, термопластичный, пригодный для многих приложений полимер		22,00	1,627	6,0	41	1,834	106,0	76
ABSi	Сверхпрочный, светопрозрачный полимер, FDA-гамма- и химически стерилизованный		37,00	1,920	4,4	62	1,920	96,4	73
ABS-M30	Прочный, функциональный, гладкие изделия с хорошей детализировкой		36,00	2,413	4,0	61	2,317	139,0	82
ABS-M30i	Высокопрочный полимер, пригодный в медицине, фармакологии и при изготовлении пищевой упаковки		36,00	2,400	4,0	61	2,300	139,0	82

PC[2]	Точный, прочный, износостойкий полимер, пригодный для функционального тестирования		68,00	2,300	5,0	104	2,200	153,0	127
PC-ISO	Сертификат ISO 10993-1. FDA-гамма и химически стерилизованные. Прозрачный для изображений		57,00	998	4,3	190	2,140	86,0	127
PC-ABS	Сверхпрочный, жаропрочный, упругий и широко используемый полимер (то есть смесь ПК и АБС)		41,00	1,900	6,0	68	1,900	196,0	96
ULTEM 9085	Огнестойкие высокопроизводительные термопласты		71,64	2,220	5,9	115	2,507	106,0	153

[1] ABS — АБС — акрилбутадиенстирол.
[2] PC — ПК — поликарбонат.

4.6. Типоряд установок для послойной заливки экструдируемым расплавом

Процесс послойной заливки экструдируемым расплавом полимера (Fused Deposition Modeling (FDM)) был предложен Скоттом Крумпом (Scott Crump), а компания Stratasys Co. (США) выпускает установки с 1992 года.

Концепция этого нелазерного процесса включает предварительный подогрев ленточного (или нитевидного) материала и контролируемую экструзию (выдавливание) расплава и укладку его в объемное изделие. Материал поступает на катушках длиной ~926 м, его стоимость варьирует от $175 до $260. Диаметр сечения нити ~0,127 см.

Основной частью установки является экструдируемая головка (см. рис. 4.8), через которую дозированно подается материал, предварительно подогретый до температуры плавления. Он скрепляется с предыдущим слоем. Головка перемещается в направлении X–Y или сам координатный стол позиционируется, синтезируя модель слой за слоем. Платформа опускается на толщину одного слоя, и процесс повторяется.

В качестве материалов для ленты (нити) используется литейный воск, пластик. Толщины наносимых слоев 50...760 мкм. Смена материала требует времени. Новые материалы для FDM — это смеси поликарбоната и АБС-пластика (2005 год). В современную линейку FDM-машин входят установки Vantage, Titan, Maxum, а стоят они ~$100 000...250 000. Спецификация установок для FDM-процесса показана в табл. 4.5.

Таблица 4.5. Спецификация установок FDM-технологии

Параметр	Dimension	Prodigy Plus	FDM 3000	FDM Maxum	FDM Titan
Технология	3D-печать методом FDM	FDM			
Размер деталей, мм	305 × 203 × 203	203 × 203 × 305	254 × 254 × 406	600 × 500 × 600	355 × 406 × 406
Точность, мм	±0,127	±0,127	±0,127	До 127 мм ± 0,127; больше 127 мм ± 0,038 мм	
Ширина дорожки, мм	«Стандарт» — 0,245, «Черновик» — 0,33	Выбор пользователя: «Высокое качество» — 0,178, «Стандарт» — 0,245, «Черновик» — 0,33	0,250...0,965	0,305...0,965	Нет данных
Толщина слоя, мм	—	—	0,178...0,356	0,178...0,356	0,250
Структуры поддержки	Софт Catalyst™, импорт в STL-файлы и авторазбиение на слои, создание структур поддержки и генерация файлов построения	Софт Catalyst™, автоимпорт в STL-файлы, создание слоев, выбор ориентации в камере для синтеза, генерация структур поддержки	Софт SupportWorks, WaterWorks или Break-Away Support System (BASS)	Автогенерация с помощью софта Insight; система WaterWorks	

Параметр	Dimension	Prodigy Plus	FDM 3000	FDM Maxum	FDM Titan
Размеры установки, мм	914 × 686 × × 1041	864 × 686 × × 1041	660 × 1067 × × 914	2235 × 1981 × × 1118	1270 × 1981 × × 876
Вес, кг	136	128	160	1134	726
Потребляемая мощность	220...240 VAC, 50/60 Гц, 6 А или 110...120 VAC, 60 Гц, 12 А	110...120 VAC, 60 Гц, максимум 15 А или 220...240 VAC, 50/60 Гц, максимум 7 А	208...240 VAC, 50/60 Гц, 10 А 110...120 VAC, 60 Гц, 20 А	208...240 VAC, 50/60 Гц, 32 А одна фаза (минимум 50 А, выделенная линия)	230 V, 50/60 Гц, 3 фазы, 16 А/фаза (минимум 20 А, выделенная линия)
Модельные материалы	Белый ABS-пластик (стандарт), голубой, желтый, красный, зеленый цвета на заказ	—	Белый ABS-пластик, ABSi, воск для литья по выплавляемым моделям, эластомер	Белый ABS-пластик	ABS-пластик, поликарбонат, Polyphenyl-sulfone
Софт	Один автозагружаемый картридж с 950 см^3 ABS-материала и один автозагружаемый картридж объемом 950 см^3 материала поддержки	Один картридж с 950 см^3 ABS-материала и один автозагружаемый картридж объемом 950 см^3 материала поддержки	QuickSlice® и Support-Works™	Insight	Insight

Среди преимуществ метода FDM отмечают следующее: используются материалы, с которыми легко работать; можно быстро перестроиться с материала на материал; низкая стоимость затрат; высокая производительность; точность ±127 мкм; контроль оператора минимален; материалы нетоксичны; установка компактна; температуры переработки малы.

К недостаткам относят то, что заметны швы между слоями; головка экструдера должна все время работать — двигаться, иначе материал застынет и засорит ее; могут потребоваться подпорки; мала сдвиговая прочность изделий; большие площади сканирования требуют большего времени; температура в течение цикла обработки может колебаться, что приводит к расслоению готового изделия.

Технологии БП методом FDM востребованы как крупными промышленными компаниями, так и малыми предприятиями. Поэтому Stratasys Inc. предоставляет широкий спектр услуг, включая сервис производства по требованию, дешевые трехмерные принтеры и высокоэффективные трехмерные системы производства. На 2009 год Stratasys занимает первое место в мире по общему количеству проданных установок. Растущую популярность установок Stratasys объясняют такие их качества, как большой выбор моделирующих материалов, надежная конструкция, широкий модельный ряд и доступная цена. Если в 1988 году Stratasys изобрела и только запатентовала технологию FDM, то в 2003 году FDM уже заняла первое место по уровню продаж среди других технологий БП. Stratasys использует технологию FDM в своих линейках Dimension 3D Printers и Fortus 3D Production Systems (рис. 4.12), которые предназначены для прямого цифрового производства и БП. Компания также управляет производственным сервисом RedEye On Demand,

Рис. 4.12. Внешний вид FDM-установок

изготавливая детали по требованию. В 2007 году Stratasys поставила 44% от мирового оборота трехмерных систем производства, став лидером рынка шестой год подряд.

В начале 2010 года Stratasys заключила соглашение с HP. В соответствии с ним Stratasys разрабатывает и производит для HP эксклюзивную линию 3D-принтеров, основанных на технологии FDM. Через год HP планирует начать поэтапный вывод механических 3D-принтеров (MCAD) с рынков выбранных стран с правом глобально расширить распределение 3D-принтеров. С развитием международного движения RepRap (Fabers) данная методика БП получает шансы прийти в каждый дом.

3D-принтер Dimension Elite работает с уникальным материалом ABSplus™ и позволяет выращивать прочные детали. Отличная функциональность получаемых прототипов, изготовленных по технологии FDM от компании Stratasys, не раз подтверждалась самыми серьезными испытаниями. Теперь разработчики, использующие Dimension Elite, смогут строить прочные функциональные прототипы с еще более точной проработкой мелких деталей в самое короткое время.

Результат использования 3D-принтера: меньше изменений, вносимых в разработку будущего изделия, более качественная конструкция продукта, более низкие производственные расходы и более короткое время выхода конечного изделия на рынок. Достаточно нажать лишь одну кнопку Print — и ваш виртуальный прототип за считанные часы станет функциональным изделием.

Установка и подключение принтера выполняются быстро, а работа с ним интуитивно понятна и проста. С помощью программного обеспечения Catalyst® EX

STL-файл автоматически ориентируется в камере построения и разбивается на слои, рассчитывается необходимая структура поддержки, специально генерируется файл движения печатающей головки в соответствии с геометрией модели, и все это отправляется на принтер. Для максимальной эффективности работы в камере построения принтера можно размещать одновременно несколько моделей. Поскольку принтер работает без помощи оператора, в это время вы спокойно можете заниматься другими делами, дожидаясь завершения изготовления детали.

Применение технологии БП фирмы Stratasys Co. позволяет:

- провести патентование и маркетинговые работы на ранней стадии создания изделия;
- проверить конструкторскую идею без изготовления дорогостоящей оснастки;
- сократить время и затраты на изготовление опытных образцов;
- сократить затраты на изготовление оснастки;
- сократить время выхода продукции на рынок;
- получить реальные конкурентные преимущества.

Интересно, что в Stratasys Co. (см. также о подобном поведении в 3D system (MJM) в разделе 4.7 и рассуждения в разделе 4.11) в последнее время активно эксплуатируется название «3D-принтер» при описании собственных установок, работающих по методу FDM. Однако методологически технология трехмерной печати относится к порошковой методике, и мы будет говорить о ней в следующей главе (разделы 5.14–5.15). Между тем, если через экструдер, который можно назвать печатной головкой, вместо порошка подается термопленка или полимерная нить, то аналогия с 3D-печатью напрашивается сама. Здесь мы лишь отметим, что это, видимо, чисто маркетинговый ход компании, осознающей, что рынок дешевых 3D-принтеров очень привлекателен и растет невиданными темпами.

4.7. 3D system — (MJM) Multi-Jet Modeling-метод

В основе MJM (3D Systems, Co.) — технологии 3D-печати лежит послойное сечение CAD-файла на горизонтальные слои, которые последовательно отправляются на 3D-принтер. Каждый слой формируется печатающей головкой, которая через группы сопл выпускает на горизонтальную движущуюся платформу или расплавленный фотополимер (температура около 80 °C), или расплавленный воск. Заметим (см. рассуждения в конце раздела 4.6), что в исходном состоянии это твердые материалы, поэтому MJM-метод — это аналог FDM-метода, а в целом они оба должны считаться твердотельными методиками БП. Итак, фотополимер или воск расплавляются в системе подачи материала до того, как попадают в печатающую головку (рис. 4.13).

Если выполняется 3D-печать фотополимером, то после печати каждого слоя платформа, на которой выращен слой, отъезжает за печатающую головку под УФ-лампу. Вспышка лампы вызывает реакцию фотополимера, вследствие которой материал твердеет. После этого платформа опять въезжает под печатающую головку, и цикл формирования слоя повторяется — головка образует новый слой. Если используемый материал — воск, то УФ-лампа отсутствует и происходит естественное твердение слоя под действием температуры, так как температура в рабочей камере ниже, чем в системе подачи материала в печатающую головку. Особенностями технологии MJM является возможность воспроизводить 3D-модели с высокой точностью. В процессе 3D-печати в качестве материала поддержки используется воск (поставляется отдельными картриджами). Если выполняется 3D-печать

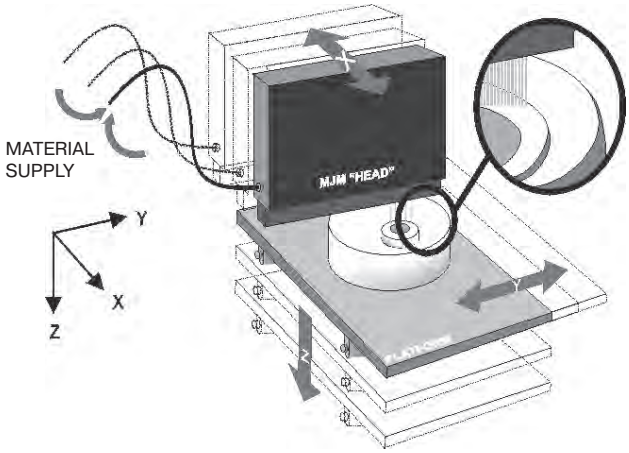


Рис. 4.13. Схема процесса

фотополимером, то материал поддержки удаляется посредством нагревания: деталь с поддержкой помещается в печь с температурой ~60 °С. Если 3D-печать выполняется воском, то поддержка удаляется с помощью специального раствора.

Возможно одновременное изготовление нескольких деталей, расположенных на рабочей плате. Модели, размеры которых превосходят габариты рабочей зоны, можно строить по частям, а затем собирать в единое целое (например, склеивая отдельные части).

Таблица 4.6. Спецификация принтера ThermoJet

Параметр	ThermoJet® Printer
Технология	Multi-Jet Modeling
Разрешение (*X*, *Y*, *Z*)	300 × 400 × 600 dpi (dots per inch)
Максимальный размер модели, мм	250 × 190 × 200
Названия исходных материалов для БП	ThermoJet 2000 и ThermoJet 88 (термопластичный строительный материал)
Цвет материала	Бесцветный, серый или черный
Интерфейс	TCP/IP протокол; Ethernet 10/100-TX сеть; RJ-разъем
Поддерживаемые серверные платформы	Silicon Graphics IRIX v6.5.2 (open GL required); Hewlett Packard HP-UX v10.2 ACE (open GL); Sun Microsystems Solaris v2.6.0 (Open GL); IBM RS/6000 AIX v4.3.2 (Open GL); Windows NT v4.0, Windows 98, 2000 или ME
Потребляемая энергия	100 VAC, 50/60 Гц, 12,5 А 115 VAC, 50/60 Гц, 10,0 А 230 VAC, 50/60 Гц, 6,3 А
Размеры, м	1,37 × 0,76 × 1,12

Основное применение приложений — концептуальное моделирование, офисные приложения.

4.8. Solidscape's Model Maker и Pattern Master/Sanders Prototype, Inc.

Solidscape Co., ранее известная как Sanders Prototype Inc., также продвигает на рынки свои машины ModelMaker II и PatternMaster для концептуального моделирования. С их помощью можно создавать и модели для литья. Работают установки с объединением FDM-технологии и 3D-печати. В них одна головка принтера распределяет термопластичное связующее, а вторая — воск для создания поддержек. Температура в зоне синтеза 54...76 °C.

Таблица 4.7. Спецификация установок Sanders Prototype, Inc.

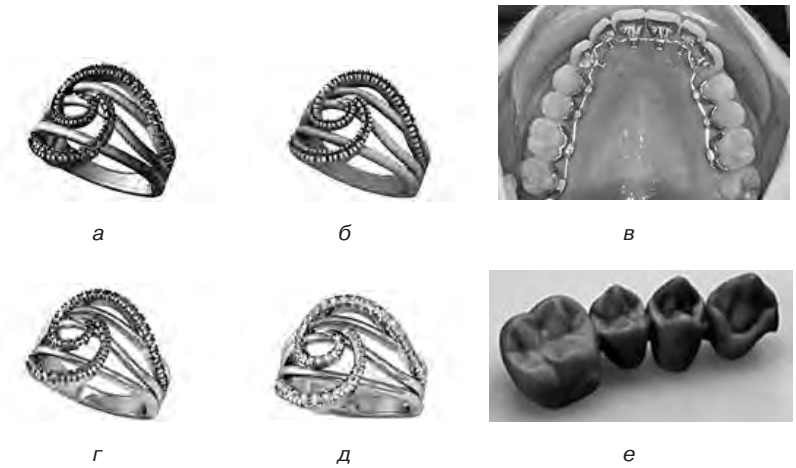
Параметр	ModelMaker II	PatternMaster
Процесс	Ink-jet-based-технология	
Зона синтеза, мм	304,8 × 152,4 × 215,9	
Толщина слоев, мм	0,013...0,076	
Точность, мм	±0,025	
Поверхностная шероховатость (RMS)	0,8...1,6 мкм	
Минимальный размер изделия, мм	0,254	

Новая линейка принтеров представлена на рис. 4.14.

а *б* *в* *г*

Рис. 4.14. Машины производства Solidscape Co: *а* — Solidscape® R66®PLUS, предназначена для ювелиров; *б* — универсальная Solidscape® T76®PLUS для сервисных бюро для традиционного прототипирования; *в* — стоматологическая машина Solidscape®'s D66®+ с устройством разравнивания preXacto® Series; *г* — Solidscape® D76®+ из серии настольных стоматологических принтеров (данные с сайта http://www.solid-scape.com/solutions-for-investment-casting/3D-wax-printers.html)

Магистральные области, в которых используются устройства Solidscape Co., — это ювелирная промышленность и стоматология. Компанией был разработан материал DentaCast® и специализированный софт для создания коронок, мостов и брекетов. На рис. 4.15 показаны примеры получаемых изделий.



а *б* *в*

г *д* *е*

Рис. 4.15. Примеры применения машин Solidscape Co.: *а* — CAD-эскиз; *б* — восковая модель, готовая к литью; *в* — скобки, смонтированные у внутренней поверхности зубов; *г* — серебряная мастер-форма; *д* — готовое изделие; *е* — коронки (данные с сайта http://www.solid-scape.com/case-studies)

4.9. Beijing Yinhua's Slicing Solid Manufacturing (SSM), Velted Extrusion Modeling (MEM) и Multi-Functional RPM Systems (M-PRM)

Beijing Yinhua Rapid Prototypes Making и Mold Technology Co. Ltd. совместно с Center for Laser Rapid Forming (CLPF) в Tsinghua University подготовили три установки для БП. Это устройства Slicing Solid Manufacturing (SSM), Melted Extrusion Modeling (MEM) и Multi-functional Rapid Prototyping Manufacturing (M-RPM). В табл. 4.8 даны их параметры.

Технология *Slicing Solid Manufacturing* (SSM) очень похожа на LOM™ (Cubic Technology), где CO_2-лазер используют для резки листов (см. раздел 4.4.1). Вместо роликов для прокатки ламината использован другой тип нагревателя. Метод *Melted Extrusion Modeling* (MEM) очень похож на FDM-метод (Stratasys) (см. раздел 4.6). Термопластики или воск экструдируются на поверхность модели, расположенной на неподвижной платформе. А вот экструдер имеет трехкоординатный контроллер для позиционирования. Есть мнение, что китайские инженеры просто скопировали данные методики и назвали их своими собственными именами. Однако в любом справочном пособии по БП (включая обзоры Wohlers Associates, США) эти установки представлены как самостоятельные достижения китайской науки.

Разработка Beijing Yinhua была названа *Multi-functional RPM System*. Здесь в единой методике скомбинированы подходы SSM- и MEM-процессов. Компания анонсировала выпуск модели M-RPMS-II, для нее был разработан и свой софт (Lark '97) для обслуживания STL-файлов, подготовки сечений, выбора расположения и гене-

рации поддержек, а главное, совмещения SSM- и MEM-процессов. В зависимости от нужд потребителя эта машина может выполнять оба этих процесса по отдельности.

Таблица 4.8. Спецификация установок Beijing Yinhua's (с разрешения Center for Laser Rapid Forming, Tsinghua University)

Параметр	SSM 600	SSM1600	MEM-250-II	M-RPMS-II	
Технология	Slicing Solid Manufacturing		Melted Extrusion Manufacturing	Slicing Solid Manufacturing	Melted Extrusion Manufacturing
Максимальный размер изделий, мм	600 × 400 × 500	1600 × 800 × 700	250 × 250 × 250	600 × 400 × 500	500 × 400 × 500
Точность, мм	~0,10	~0,15	~0,15	~0,10	~0,15
Скорость сканирования, мм/с	0...500	0...500	0...500	0...500	0...400
Тип лазера	40 Вт, CO_2	40 Вт, CO_2	—	40 Вт, CO_2	—
Изменение температуры	—	—	±1 °C	—	±1 °C
Материалы	Листы со связующим (клей)	Листы со связующим (клей)	Воск, ABS и нейлоновые нити	Листы со связующим (клей)	Воск, ABS и нейлоновые нити

4.10. Послойное создание литьевой формы

Метод послойного создания литьевой формы (англ. Shape Deposition Manufacturing (SDM)) идейно отличается от ранее описанных методик тем, что послойно синтезируется не само изделие, а форма, используя которую можно далее отлить объемное изделие [10]. Впервые предложен Мерцем и Принцем (Merz & Prinz) в 1994 году в Карнеги-Мелон и Стэндфорском университетах.

Процесс вытачивания формы для отливки может быть осуществлен посредством 3–5-позиционного координатного стола, оснащенного механическими фрезами различного типа, электроразрядным аппаратом, лазерной режущей головкой и т. п. Внутренность формы заполняется поддерживающим материалом (рис. 4.16), что важно при создании сложноконтурных деталей. Перед стадией литья поддерживающий материал удаляется (выжигается). Принципиальная особенность SDM-методики в том, что удается полностью решить проблему деламинации (расслоения) объемного изделия, характерную для других твердофазных методик БП. Сами отливки выполняются из различных материалов — воска, полиуретана, керамики, металлов.

Более того, в процессе отливки можно чередовать материалы, создавая функционально-градиентное изделие. Эта плодотворная идея впервые в мире БП, по нашему мнению, была реализована именно SDM-методом (инвар (сплав Fe-Ni) + TiC) [11]. Внутрь изделия могут быть внедрены (сформированы из разнородных материалов) термопары, решетка Брэгга [12] и т. п. Это позволяет создавать микросенсоры (MEMS-устройства (см. главу 11) для контроля температуры, напряжений) и внедрять их в готовые детали машин (лопатки турбин, микророторы электро-

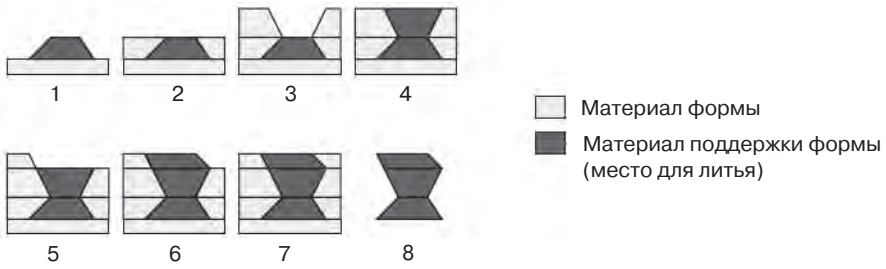


Рис. 4.16. Основы методики послойного создания литьевой формы

двигателя [13], микродозаторы и т. п.). Такие мезоподходы (под мезоструктурами (3D-объектами) мы в дальнейшем будем понимать структуры размерами от 10 мкм до 10 мм) также впервые были опробованы на базе SDM-методики.

4.11. Движение RepRap и народный 3D-принтер

Последние 5 лет в мире наблюдается развитие инициативного движения персональных фабрикаторов (ПФ) — Faber (от англ. fabrication), называющих себя *RepRap* [14]. RepRap — это сокращение англ. *Replicating Rapid-prototyper*, то есть «(само) реплицирующий(ся) механизм для БП». Это практически самокопирующийся 3D-принтер, пример самовоспроизводящихся машин. Этот 3D-принтер создает изделия из пластика послойно по FDM-методике. И он изначально не предназначался для самокопирования. Поэтому то, чем занималась команда RepRap в Массачусетском технологическом институте, заключалось в разработке и представлении на всеобщее обозрение конструкций намного более дешевых машин с оригинальной возможностью самокопирования (при этом материальные затраты составляли около 350 евро). Таким образом, RepRap доступен для небольших сообществ в развивающихся странах и отдельно взятых людей в развитых странах. Следуя принципам движения за свободное программное обеспечение, команда RepRap распространяет свою машину и ее описание на безвозмездной основе для всех в соответствии

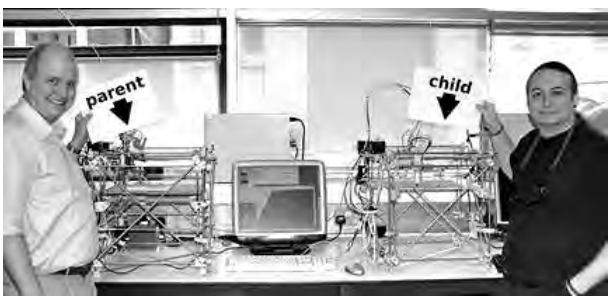


Рис. 4.17. Эдриан Бауэр (*слева*) и Вик Олливер (*справа*) с RepRap-машиной-родителем, изготовленной на традиционной машине для БП, и первой полностью рабочей RepRap-машиной-потомком, изготовленной с помощью RepRap-родителя. Дочерняя машина успешно создала «внучатую» по отношению к машине-родителю часть в Университете Bath в Великобритании в 14.00 29 мая 2008 года, и несколько минут спустя та была собрана (http://reprap.org/wiki/RepRap/ru)

с GNU (General Public Licence). Поэтому, если у вас уже есть RepRap, вы можете создать еще одну машину и отдать ее друзьям или другим людям (рис. 4.17). Проект RepRap стал широко известен после того, как был освещен в прессе в марте 2005 года, хотя идея восходит к статье Эдриана Бауэра, опубликованной в Интернете 2 февраля 2004 года. RepRap версии II «Мендель» может быть создан любым желающим уже сейчас — смотрите, например, описание конструкции на странице http://reprap.org/wiki/Mendel.

Дальнейший текст взят с сайта http://reprap.org/wiki/RepRap/ru: «Не считая основных элементов, RepRap может воспроизвести до 50% своих частей; другие части подобраны так, чтобы быть дешевыми и доступными практически по всему миру. Чтобы увеличить эти 50%, в следующей версии RepRap сможет воспроизводить свои собственные электрические схемы — технология, которую команда RepRap уже экспериментально доказала, хотя и не на примере своих электронных микросхем.

Основной целью проекта RepRap является создание и представление на всеобщее обозрение полезной машины “все-в-одном”, которая, среди прочего, позволяет ее владельцу дешево и просто создать еще одну такую же для кого-то другого».

Глава 5
Методы БП на порошковой основе

5.1. Физические основы селективного лазерного спекания

Метод селективного лазерного спекания (СЛС) (англ. Selective Laser Sintering (SLS)) является способом создания объемных моделей, альтернативным по отношению к известным методам стереолитографии FDM, LOM и пр., поскольку реализуется практически аналогично. Проблемы и положительные стороны объемной стереолитографии присутствуют и здесь. Однако, в отличие от перечисленных методик, СЛС и его производные позволяют создавать реальные функциональные изделия, что, безусловно, является неоспоримым преимуществом. С учетом дешевизны отечественных порошковых материалов существуют, по нашему мнению, серьезные основания надеяться на большую востребованность метода СЛС среди прочих равных подходов БП. Порошковый материал послойно спекается ЛИ. Для этой методики нужны мелкодисперсные, термопластичные, быстро затвердевающие порошки с хорошей вязкостью, например полимеры, воск, нейлон, керамика или металлические порошки с добавкой легкоплавкого связующего.

Впервые методика была предложена Карлом Декардом (Carl Deckard) в 1989 году. В конце 1990-х годов установки начала производить фирма DTM Corp. (Sinterstation 2000, 2500 и т. п., фирма теперь принадлежит 3D Systems) в США, а затем и фирма EOS GmbH в Германии. Теперь фирм и выпускаемых ими установок, работающих по данной методике, гораздо больше (табл. 5.3).

Предварительно синтезируемая модель разделяется в компьютере на сечения по информации из *.STL-файла. В рабочей камере порошок предварительно подогревается до температуры несколько меньшей, чем температура плавления легкоплавкой фазы. После распределения валиком порошка по поверхности зоны обработки ЛИ CO_2-лазера (длина волны излучения 10,6 мкм) спекает требуемый контур. Затем новый слой порошка насыпается, разравнивается (рис. 5.1), и процесс повторяется. Когда модель готова, ее извлекают из камеры, а излишки порошка удаляют встряхиванием или зачисткой специальным шпателем.

В данной методике подпорки не нужны, так как сам порошок поддерживает спекаемую модель, а удаляемый материал можно использовать повторно, как и жидкий олигомер при стереолитографическом методе. Медленное остывание порошков предотвращает изделие от нежелательного расслоения и деформации.

Мощность лазеров в СЛС-установках составляет не более 100 Вт в инфракрасном (ИК) диапазоне (обычно длина волны 10,6 мкм, есть и установки с длиной волны 1,06 мкм). Уровень порошка в камере контролируется так же, как в процессе стереолитографии. Сканирование ЛИ по направлениям X–Y также подробно описано

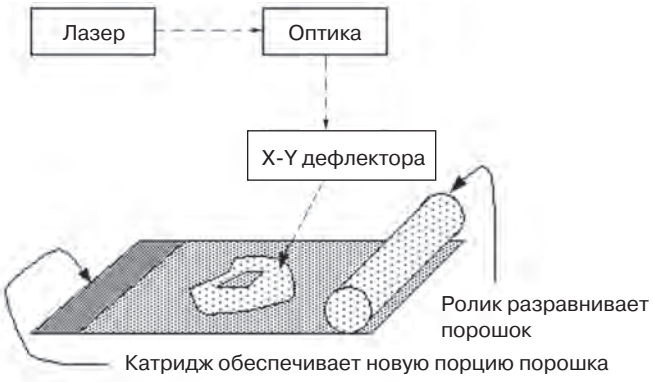


Рис. 5.1. Устройство разравнивания порошковой смеси

в главе 3. В рабочую камеру можно подавать азот или аргон, чтобы избежать окисления порошка при нагреве. Изделие вырастает на ~1,5...2,5 см за час.

Перечислим преимущества метода СЛС:

- нетоксичные недорогие материалы;
- используется широкий спектр порошков, от литейного воска до полимеров для соединения сложных и/или крупный деталей;
- не нужно поддержки;
- малые деформации и напряжения.

К недостаткам можно отнести:

- высокую шероховатость;
- пористость моделей (хотя это может найти применение);
- первый слой необходимо формировать из подобного материала для снижения термических эффектов;
- плотность моделей может изменяться (это и плюс, и минус);
- изменение порошкового материала требует чистки всей камеры.

Развитие технологии идет по пути внедрения:

- новых порошковых материалов (в том числе субмикронных размеров);
- повышения мощности ЛИ (для металлических порошков) и получения более прочных и даже функциональных изделий.

На практике можно покрыть частицы металлических порошков термопластическим связующим материалом либо добавить в них легкоплавкое связующее, чтобы реализовать косвенное жидкофазное спекание (ЖФС) (см. раздел 5.3.3). Под лучом лазера связующий материал расплавляется и склеивает частицы металлического порошка, придавая ему желаемую форму, которая называется green part. В этом случае достаточно, чтобы мощности лазера хватало для расплавления связующего, как правило, более легкоплавкого материала. Затем green part подвергается обработке в печи, в ходе которой связующий материал выжигается, а частицы металлического порошка связываются за счет обычных механизмов спекания. Получившаяся деталь называется brown part. Без дальнейшей обработки деталь будет довольно пористой из-за наличия пустот, которые раньше занимали частицы связующего материала. Чтобы уменьшить пористость, в печь помещается еще один мате-

риал — инфильтрат. Он расплавляется при рабочей температуре печи и проникает в поры детали за счет капиллярного эффекта. Данный метод используется для изготовления форм для литья непосредственно по их геометрическим моделям. Ресурса таких форм достаточно для изготовления до 10 000 деталей-прототипов. Таким образом, процесс СЛС, как и SLA-метод, требует ряда дополнительных операций, что отразилось в его названии — Non Direct SLS. Однако в последние годы активно внедряется метод Direct SLS (DSLS), предполагающий изготовление функциональных изделий непосредственно в установке (см. раздел 5.9 и последующие).

5.2. Классификация порошков

По своему строению любая порошковая среда может быть охарактеризована как непрерывная система дисперсных твердых частиц (конгломератов, зерен), находящихся одновременно в контакте друг с другом и окружающей средой. Им присущи некоторые свойства коллоидных систем, а именно: проявление роли поверхности, диффузия и т. д. Наиболее важными параметрами порошков являются их форма, строение, величина межчастичного взаимодействия (внутреннее трение). По форме различаются частицы изометрические (равноосные) — кубические, шарообразные и неизометрические — в виде волокон, хлопьев, пластин и т. д. Неизометричность частиц сказывается на их пространственном расположении друг относительно друга (степень укладки), поэтому свойства порошков (теплопроводность, пористость, проницаемость) не одинаковы в разных направлениях.

Порошки могут быть монодисперсными и полидисперсными. Высокая внутричастичная и межчастичная пористость порошков влияет на плотность порошковых материалов. На плотность укладки влияет шероховатость поверхности частиц; в частности, с этим связано образование арочных эффектов в насыпке порошка. Механическое зацепление — одна из форм связи таких частиц. Трение между ними является не только функцией внешнего давления, но и результатом адгезионного взаимодействия. Поэтому в последние годы уделяют значительное внимание механической активации (интенсивный помол) порошковых систем. После такого помола с уменьшением размеров частиц величина площади их контакта резко возрастает, что ведет к возрастанию химической активности. По мнению различных авторов, взаимодействие частиц в порошковом материале обусловлено проявлением многих сил — молекулярных, электростатических, химических и т. д. Внешнее давление в порошковых материалах не распространяется равномерно во все стороны, а передается в основном в направлении нагрузки и локализуется в контактных участках частиц. Деформация порошка при этом, как правило, необратима. Порошковые материалы из-за наличия высокоразвитой поверхности обладают повышенной сорбционной способностью, то есть способны содержать на поверхности примеси других веществ, адсорбированных из окружающей среды в процессе получения и хранения. Гидрофильность свойственна в основном мелкодисперсным порошкам.

Порошковое состояние не является специфическим свойством материала, поэтому основные свойства соответствующих твердых материалов в целом присущи и их порошкам. Поэтому, для того чтобы лучше понимать особенности поведения порошковых материалов, которые используются при СЛС, рассмотрим некоторые положения, касающиеся строения и физико-механических свойств твердых материалов, из которых составлены используемые в методе СЛС порошковые смеси.

Изначально при СЛС в качестве исходного порошка использовали следующие материалы: акрилонитрилбутадиенстирольный пластик (ABS), поливинилхлорид

(ПВХ), полиуретан, поликарбонаты (ПК), найлон, парафин, сложные полиэфиры, стеарат цинка и различные пластифицирующие добавки, керамику и металлы. Были изучены оптические и термические свойства, микроструктура и механика как исходных порошков, так и синтезируемых на их основе изделий. Для оптимизации СЛС-процесса были созданы одно-, двух- и трехмерные модели расчетов тепловых полей методами конечных элементов, модели клеточных автоматов и конечных разностей, а также напряжений и деформаций в спекаемых изделиях [1]. Главное, что образцы, синтезируемые методом СЛС, находят применение не только в традиционном для БП модельном деле, но и в качестве функциональных изделий: фильтров, медицинских имплантатов (на базе Ti, гидроксиапатита, NiTi, NiTi + HA), электродов для электроразрядных машин, деталей машин-роботов, функционально-градиентных изделий и интеллектуальных микроустройств (см. об этом в главе 9).

5.2.1. Полимерные порошки

Полимеры представляют собой высокомолекулярные соединения с цепным строением макромолекул, обусловливающих гибкость полимерных цепей. Все полимеры в зависимости от внешних условий и строения могут находиться в двух фазовых состояниях: аморфном и кристаллическом. Например, поливинилхлорид, полистирол (ПС) являются аморфными и не имеют строгого порядка в расположении цепей. Они могут находиться в трех физических состояниях: стеклообразном, высокоэластичном и вязкотекучем [2].

Высокоэластичное состояние характеризуется извилистостью сегментов (коротких участков) макромолекул и свойственно только высокомолекулярным соединениям. Переход молекул из одного физического состояния в другое происходит в определенном интервале температур. Средние температуры этих интервалов называются температурой стеклования T_g и температурой текучести T_L. Заметим, что это не температуры фазовых переходов, так как структура полимера остается аморфной и сам переход не сопровождается скачкообразным изменением физико-механических свойств.

В вязкотекучем (пластическом) состоянии, то есть при $T > T_L$, подвижность макромолекул возрастает настолько, что полимер теряет механическую прочность (рис. 5.2).

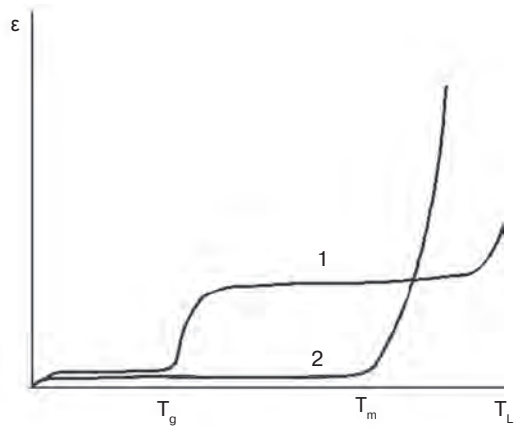


Рис. 5.2. Термомеханическая кривая зависимости деформации от температуры для аморфного *1* и кристаллического *2* полимеров

Кристаллическое состояние свойственно регулярным полимерам: полиметилакрилату (ПМА), фторопластам (ФТ), полиамиду (ПА) и др. Упорядоченность в расположении выражается в существовании элементов кристаллической структуры (ламелей, фибрилл, лент, сфероидов, доменов, глобул и т. д.) размером ~30...100 А.

Вообще, большинство технических полимеров не являются в полной мере аморфными или кристаллическими, а содержат соответствующие структурные области той или иной фазы. Степень кристалличности полимера во многом определяет область температур T_L, T_m (температура плавления) и механические свойства. В табл. 5.1 представлены основные теплофизические свойства полимеров, с которыми нам приходилось работать в СФ ФИАН, где ρ — плотность, T_d — температура деструкции, λ — теплопроводность, c_p — теплоемкость, D — дисперсность. Марка ПК — ЛЭТ7,0 (ГОСТ ПК-ЛЭТ-7,0Т4-6-06-68–90), марка полиамида — П12 (ПА 6-12 ТУ 6-13-00203967-61–99).

Таблица 5.1. Теплофизические свойства полимеров

Наименование	ρ, г/см³	T_m, °С	T_d, °С	λ, Вт/(м К°)	c_p, кал/г · К°	D, мкм
ПМА	1,05...1,20	220...240	250...300	0,15...0,24	0,40...0,50	250...500
ПК	1,23...1,15	220...250	270...300	0,08...0,28	0,20...0,40	30...100
ПС	1,05...1,07	180...200	220...280	0,12...0,18	0,28...0,48	50...150
ПВХ	1,18...1,30	180...200	220...280	0,13...0,20	0,20...0,30	100..250
ПА	1,01...1,23	180...240	280...320	0,07...0,25	0,25...0,45	60...80
ФТ	2,10...2,20	170...230	310...350	0,19...0,27	0,20...0,30	50...150

Наличие воздушной окислительной среды и высокоразвитая поверхность порошков полимеров приводит к тому, что разложение (деструкция) таких порошков наступает при более низких температурах, чем при нагреве их в литом состоянии. Термоокислительная деструкция в основном сводится к образованию низкомолекулярных продуктов — CO_2, CO, H_2O и т. д. Низкие значения теплопроводности полимеров (на два порядка меньше, чем у стали) обусловливают плохую передачу тепла в массу полимерного материала, вызывая неравномерный нагрев отдельных участков образца, очаговую деструкцию, а разные скорости нагрева и охлаждения приводят к образованию остаточных напряжений. Теплоемкость полимеров в 3–5 раз выше, чем у металлов. Теплофизические свойства изменяются (увеличиваются) при переходе полимеров из стеклообразного в высокоэластичное и вязкотекучее состояния. При охлаждении полимеров из расплава может происходить значительная усадка из-за различий в коэффициенте объемного расширения до и после плавления, что также приводит к появлению внутренних напряжений в изделиях, а следовательно, будет способствовать расслоению синтезируемых методом СЛС образцов.

Добавкой различных пластификаторов удается регулировать физико-механические свойства полимеров, например смещать интервалы между T_g и T_L, T_m и T_d, снижать или повышать модуль упругости и твердость, увеличивать гибкость и т. д. Однако в дозировке и пределах совместимости полимерных композиций существуют ограничения, которыми нельзя пренебрегать.

Механические модели поведения полимерных систем после приложения деформации носят релаксационный характер. В зависимости от типа полимера эти теоретические модели могут соответствовать вязкому течению ньютоновской жидкости, подходам Максвелла, Кельвина—Фойхта, Бенгама.

5.2.2. Металлические порошки

Дисперсные порошки тугоплавких соединений и наплавочные материалы широко используются в промышленности (композиционные сплавы, электроника, атомная энергетика и т. д.). Особенности их электронного строения и высокая доля ковалентных связей определяют уникальное сочетание механических, электрофизических, химических и других свойств. Эти свойства реализуются в порошковой металлургии через методы спекания и/или горячего прессования. При изменении размеров частиц проявляются размерные эффекты и изменение физических свойств [3]. Электронные структуры отдельного атома и твердого тела из этих атомов различаются. С увеличением числа атомов в частице энергия Ферми, энергия сродства, энергия связи увеличиваются, а потенциал ионизации уменьшается, причем изменение этих величин замедляется, а сами они стремятся к значениям, характерным для массивного (литого) состояния. При обобществлении *d*-электронов (переходные металлы) в формировании электронной структуры определяющим оказывается ближний порядок, поэтому малые частицы Ni, Au, Cu, содержащие 20...30 атомов, уже имеют электронную структуру, соответствующую массивному телу. Размер таких частиц (ГЦК-решетки) ~0,5...1 нм. Иная картина возникает при обобществлении *s*- и *p*-электронов. Необходимо взять уже ~150...200 атомов, чтобы электронная структура бериллия чем-то напоминала массивное состояние, а соответственно размеры частиц достигают десятков и сотен нанометров.

Для оптимизации процесса СЛС представляют интерес теплофизические и механические свойства дисперсных металлических систем. Температура плавления таких порошков понижается с возрастанием степени дисперсности [3]. Поскольку в порошках налицо наблюдаемая соизмеримость числа наружных и внутренних атомов у частиц, то вклад поверхностной энергии в свободную энергию частиц оказывается определяющим, особенно это принципиально для наноразмерных порошков. Это объясняет эффект двойникования, уменьшения периода решетки, особенности фононного спектра, а следовательно, теплофизических свойств. Но поскольку в порошковой металлургии используются главным образом частицы микрометровых размеров, то описанные ранее эффекты малости незначительны. Надо также отметить, что для СЛС оптимальными считаются размеры частиц не ниже 20 мкм, а для 3D-лазерной наплавки уже необходимы частицы размерами более 80 мкм. О причинах возникновения таких требований мы будем говорить далее в этой главе.

В табл. 5.2 представлены основные теплофизические свойства используемых металлов и наплавочных порошков, с которыми нам также приходилось работать в СФ ФИАН (обозначения см. в описании к табл. 5.1).

Никелевый наплавочный порошок марки ПГ-СР3,4 (ГОСТ 21448–75) имеет состав: 1,5...3,8 B, %; 0,6...1,0 C,%; 2,0...4,5 Si,%; 12...18 Cr,%; ≤5,0 Fe,%; 0,04 P,%; 0,04 S,%; остальное Ni,% по массе; 55 HRC. Порошок наплавочный бронзовый ПГ-19М-01 (или БрА-10, ТУ 48-4206-156–82) имеет состав: 9...11 Al, %; <4,0 Fe, %; остальное Cu,% по массе. Порошок чистого никеля имел марку ПНК; титана — марки ПТОМ, ПТХ, ПТС; алюминия — АСД4, ПАД; железа — ПЖ РНЛ-А.

При лазерном спекании биметаллических порошковых композиций также использовались:

- припой ПО-2 (ГОСТ 21931–76). Состав: 97...98 Sn, %; 1,5...2,0 Pb, %; не более 0,08 Cu, %; не более 0,02 As, %; не более 0,02 S, % по массе;
- припой ПОССу 30-2 (ГОСТ 21931–76). Состав: 29...31 Sn, %; 1,5...2,0 Sb, %; не более 0,08 Cu, %; не более 0,02 As, %; остальное Pb, % по массе;

- порошок канифоли (ГОСТ 797–41 — высший сорт). Цвет светлый, содержание влаги — не более 0,3%; содержание механических примесей — не более 0,05%; температура размягчения — не более 68 °С.

Таблица 5.2. Теплофизические свойства металлов и наплавочных порошков

Наименование	Плотность/ насыпная плотность/ пористость $\rho_м/\rho_н$, г/см^3/θ	Температура плавления T_m, °С	Теплопроводность λ, Вт/(м · К)	Теплоемкость c, Дж/кг · К	Температуропроводность $a \cdot 10^6$, м^2/с	Удельное электросопротивление $\rho \cdot 10^8$, Ом · м	Дисперсность D, мкм
ПГСР3,4*	8,9/4,7/0,47	1200...1400	$6{,}7...7{,}4 \cdot 10^{-1}$	–	–	–	50...160
ПГ-19М-01*	8,5/3,5/0,59	885...1020	$8...15 \cdot 10^{-1}$	–	–	–	50...100
Al (при 300 К)	2,7/1,25/0,54	660	209...221	896	86,4	2,733	10...50
Ni (при 300 К)	8,9/ /	1453	67...90,4	448	10,0...14,3	8,7	–
Ti (при 300 К)	4,5/ /	1673	17,7...22,3	530,8	7,1...9,3	48,3	–
Fe (при 300 К)	7,87/ /	1535	47...74	465	21,9...12,8	10	–
Cu (при 300 К)	8,9/ /	1083	384...401	385	1246,8	1,72	–

* $\rho_м$, T_m, c, λ, $a = \lambda/(c\ )$ для наплавочных порошков взяты из данных по основному материалу порошка.

5.2.3. Керамические порошки

Керамические материалы широко востребованы в современных приложениях. В зависимости от состава, теплофизических, механических, электрофизических и/или химических свойств существуют разные направления применений и способы их классификации. Так, по составу их разделяют следующим образом:

1. **Силикатная керамика:**

- Алюмосиликатная:
  - SiO_2-Al_2O_3 ($T_m(SiO_2)$ ~ 1715 °С, ($T_m(Al_2O_3)$ ~ 2060 °С, ($T_m(SiO_2$ — 60% Al_2O_3) ~ 1850 °С (муллит), эвтектики муллит — SiO_2 при 1595 °С, муллит — Al_2O_3 при 1840 °С);
  - кремнеземистая (>80% SiO_2), кварцевая (чистый SiO_2), динасовая (с добавками оксида кальция, оксидов железа);
  - $xSiO_2$-$(1 - x)Al_2O_3$ с увеличенной прочностью и термостойкостью в качестве огнеупоров, художественная керамика;
  - корундовая (>90% Al_2O_3) — высокая плотность вплоть до 1500 °С, предел прочности на сжатие — 4 ГПа, изгиб — 1 ГПА; прозрачный Al_2O_3 (0,2% MgO) для тиглей, подложек, радиодеталей, изоляции, огнеупоров.
- Другие оксиды:
  - кордиеритовая, SiO_2-Al_2O_3-MgO;
  - цирконовая, $ZrSiO_4$;
  - сподуменовая, SiO_2-Al_2O_3-Li_2O;
  - >80% MgO (добавки CaO, Cr_2O_3, Al_2O_3) — огнеупоры, изоляторы, носители для катализаторов.

2. **Огнеупорная керамика:**

- Материалы тиглей:
  - оксиды — Al_2O_3, MgO, ZrO_2 (YSZ), BeO, R_2O_3 (R = Y, Nd, стабилизация спекания 0,5...1% TiO_2);
  - сложные системы — $BaZrO_3$, аэрогели.
- Тугоплавкая керамика:
  - нитриды BN, AlN, Si_3N_4, сиалоны Si_3N_4 + Al_2O_3, Y-Zr-O-N;
  - карбиды Si, Ti, Nb, W.

  Их температура плавления, °C: SiC (~2700), Si_3N_4 (1900), BN (~3000), B_4C (~2350), NbB_2 (2900), HfC (3890), HfN (3305), TaN (3350), TaC (3880), ZrC (3540) — высокая прочность, электро- и теплопроводность, огнеупорность, химическая стабильность (без O_2). Изготавливают конструкционные материалы, огнеупоры, высокотемпературные нагреватели, используют в металлообработке.

3. **Магнитная и электротехническая керамика:**

- Оксиды IV и V группы:
  - TiO_2, ZrO_2 (YSZ, стабилизация оксидами иттрия или кальция), титанаты, цирконаты, ниобаты, танталлаты Ba, Sr, Pb, K, Na, титанат-цирконат свинца (PZT) — высокая плотность, необходимые диэлектрическая проницаемость, ионная проводимость и тангенс потерь. Используют в пьезоэлектронике и радиотехнике, изготавливают датчики кислорода (ZrO_2);
  - Al_2O_3, MgO, SiO_2 — электроизоляция.
- Ферриты: шпинели, ферриты Ni, Co, Mn, Ca, Mg, Zn, Li — магнитопроводы, сердечники, устройства памяти.
- Силициды: $MoSi_2$, сопротивление ~200 мкОм · см, устойчивость в окислительной атмосфере до 1650 °C — электронагреватели.
- Высокотемпературные сверхпроводники:
  - перовскиты (и структуры срастания) $REEBa_2Cu_3O_7$, $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ (2212, 2223);
  - токовводы, ограничители предельно допустимого тока, сверхпроводящие ленты, соленоиды, магнитная левитация;
  - MgB_2.

4. **Ядерные приложения:**

- Изоляция:
  - теплоизоляция — Al_2O_3, SiO_2, в плазменной камере — SiC, Si_3N_4;
  - ограничители плазмы — SiC, Al_2O_3;
  - окна плазменной камеры — Al_2O_3, BeO;
  - электроизоляция — Al_2O_3, MgO, SiO_2.
- Ядерное топливо:
  - UO_2, UC, UN, PuO_2;
  - оболочка тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) — SiC, Si_3N_4.
- Замедление и отражение нейтронов:
  - замедлители и отражатели нейтронов — BeO, ZrO_2, Be_2C;
  - нейтронная защита — B_4C, HfO_2, Sm_2O_3.

К настоящему времени известно большое количество опробованных материалов для СЛС (см. полный обзор в [1]):

- однокомпонентные — поликарбонат, нейлон, железо, титан, медь;
- многокомпонентные и интерметаллидные системы (Ni, Al, Ti, W, их карбиды и интерметаллиды, сплав Inconel 625, Ti-6Al-V, Mo-Cu, Cu-Ni, Cu-Sn, Cu-Sn-Ni, Fe-Cu, бронза-Cu_3P, WC-Co, TiC-Ni/Co/Mo, TiCN-Ni, TiB_2-Ni, ZrB_2-Cu, Fe_3C-Fe);
- низко- и высоколегированные стали;
- конструкционные (ZrO_2, Al_2O_3, Al_2O_3-$Al_4B_2O_9$, Al_2O_3-SiO_2-B_2O_3, Si_3N_4-Al_2O_3, Ti-Zr-Al/Al_2O_3, Ti + ZrO_2, ZrO_2-Al_2O_3-Al, ZrO_2-Al-Y_2O_3) и сегнетоэлектрические ($Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$, $Bi_4Ti_3O_{12}$, $Li_{0,5}Fe_{2,5-x}Cr_xO_4$, $BaFe_{12x}Cr_xO_{19}$) керамики, керамо-(Al_2O_3 + полиметилметакрилат) и пьезопласты (ЦТС + PVDF).

Реализовано совмещение процесса СЛС с процессом горячего изостатического прессования (на базе сплавов Inconel 625, Ti-6Al-4V) и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) (смеси на основе TiO_2 + C + Al, Ni + Ti, Ni + Al, Ti + Al, PbO + ZrO_2 + TiO_2, Li_2CO_3 + Fe_2O_3 + Cr_2O_3 + Fe BaO_2 + Fe_2O_3 + Cr_2O_3 + Fe), с химически реакционными газовыми добавками (получение SiN из Si + N_2, SiC/Si_3N_4 из C_2H_2/$Si(CH_3)_4$ и NH_3, AlN, TiN из N_2), процессом гелевого литья (ЦТС керамика + полимер), послойным нанесением покрытий (Al/Cu на стекло). Наконец, как альтернатива СЛС предложен нелазерный метод селективного спекания (Selective Inhibition Sintering) путем подогрева любым нагревательным элементом ингибитора (изопропиловый спирт, органические растворители, силикон, пероксид водорода и т. п.), предварительно внесенного в разровненный порошковый слой через сопло (см. аналогию с методом трехмерной печати в разделе 5.12).

5.3. Реология и макрокинетика спекания

Спекание — это термически активируемый, самопроизвольный или инициируемый внешним воздействием переход системы контактирующих твердых тел или пористой среды в термодинамически более равновесное состояние путем уменьшения площади свободной поверхности. При спекании порошки или их смеси нагревают до температуры ниже температуры плавления основного компонента ($0,7...0,9T_m$) с целью обеспечения заданных механических и физико-химических свойств [3].

Внешне спекание проявляется в изменении размеров спекаемых порошковых тел. В большинстве случаев в результате этого процесса увеличивается плотность и уменьшается объем спекаемых порошковых тел, то есть происходит усадка. В результате спекания порошковое тело, обладающее избыточной свободной энергией, переходит в более стабильное спеченное тело большей плотности.

Одно из распространенных и важных для практического применения проявлений спекания — взаимное припекание контактирующих твердых тел. Оно может происходить как при контактировании макроскопических тел, так и при взаимодействии дисперсных частиц. При этом процесс протекает как спонтанно, так и при наличии сил, стимулирующих контактирующие тела. Его характерными чертами являются рост во времени первоначально точечных контактов, уменьшение во времени относительной доли несплошностей в контактах, возникновение и рост сопротивления растягивающим силам. Взаимного перемещения твердых тел при этом может либо вовсе не наблюдаться, либо оно существенно меньше линейных размеров контактирующих тел.

Другой важный случай — спекание дисперсных систем, представляющих собой свободно насыпанные дисперсные порошки. Их характерным признаком является высокая степень рыхлости, определяемая малым относительным объемом пространства, заполненным веществом, и в связи с этим большим числом внутренних

степеней свободы для взаимного перемещения частиц порошка. Такие перемещения соизмеримы с линейными размерами частиц и даже могут превосходить их. Спекание в таких условиях проявляется не только в описанных ранее изменениях на контактах между частицами, но и в стремлении к образованию как можно большего числа новых контактов между структурными элементами дисперсной системы, главным образом за счет взаимного их перемещения. При этом, как правило, увеличивается степень заполнения веществом пространства, то есть возрастает микроскопическая плотность системы [4].

Эволюцию структуры порошкового материала в процессе спекания обычно рассматривают в двух аспектах. Во-первых, общепринятым является представление о спекании как структурно-чувствительном процессе. Коэффициенты линейной вязкости поликристаллического тела существенно зависят от характерного линейного размера элементов структуры. Во-вторых, структура определяет физико-механические свойства спеченных поликристаллических материалов, при этом к структурным параметрам относят пористость и размер зерен. Роль пористости и изменения размеров зерен неоднократно отмечалась и в исследованиях. При одной и той же плотности механические и электрические свойства спеченных образцов тем выше, чем дисперснее исходный. Интенсификации спекания способствуют легко восстанавливающиеся оксиды, содержание которых в порошке тем больше, чем он мельче.

Феноменология макрокинетики уплотнения была разработана В. А. Ивенсеном [6]. Уравнение Ивенсена, полученное полуэмпирическим путем, имеет вид

$$V = V_{н}(qmt + 1),$$

где V — текущее значение объема пор; $V_{н}$ — начальный объем пор; t — время; m — кинетический параметр; q — относительная скорость сокращения объема пор в начале изотермического спекания.

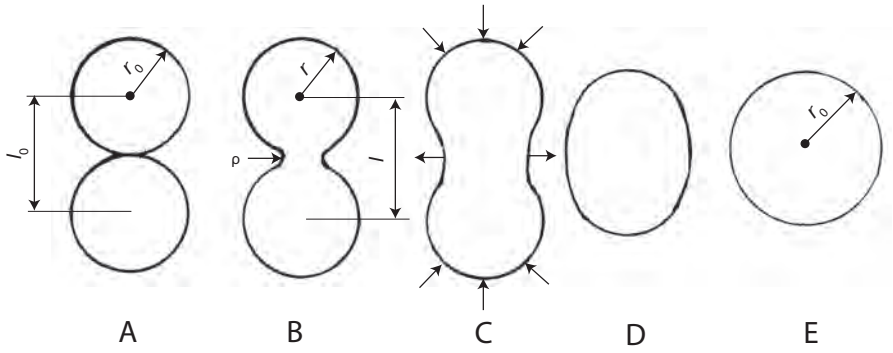
Однако это уравнение не учитывает изменения пористой структуры при нагреве. Эффект роста размера пор (коалесценция) удовлетворительно описывается при спекании механизмом поверхностной самодиффузии. Различают объемную и линейную усадку при спекании, источником которой является стремление к уменьшению свободной энергии системы и сокращению доли поверхности. Целесообразно рассматривать процесс спекания как состоящий из двух последовательных этапов: образования и роста межчастичных контактов и повышения плотности спекаемого тела вследствие уменьшения числа и объема пор.

Две соприкасающиеся в условиях спекания сферические частицы радиусом r_0 (рис. 5.3, *а*) обнаруживают тенденцию к образованию общей сферы радиусом r_f путем уменьшения их суммарной поверхности на промежуточных стадиях спекания. Процесс конгломерации может идти в соответствии с различными механизмами (рис. 5.3, *б*): *A* — диффузия из объема с образованием перешейка; *B* — диффузия объема с наплыванием частиц и образование области контакта; *C* — поверхностная диффузия; *D* — массоперенос из газовой фазы; *E* — вязкий поток. Образование и расширение прочного контакта, приводящее к появлению шейки (рис. 5.3, *а*—*в*), происходит под действием капиллярных сил Лапласа, определяемых в общем виде соотношением [6]:

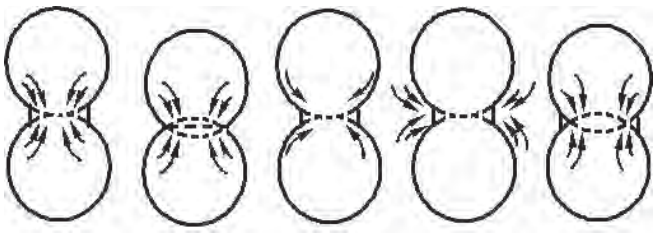
$$P = \gamma(1/r_1 - 1/r_2),$$

где γ — поверхностное натяжение; r_1 и r_2 — максимальный и минимальный радиусы кривизны поверхности. Для выпуклой (положительной кривизны) поверхности сферы величина P принимает вид

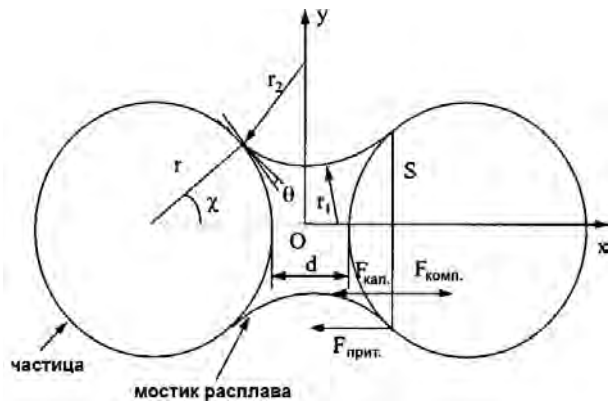
$$P = 2\gamma/r. \qquad (5.1)$$



а



б



в

Рис. 5.3. Различные стадии припекания двух сферических частиц: *а* — классическая реология спекания; *б* — спекание при ЛВ; *в* — модель [7]

Для вогнутой спеченной поверхности шейки, имеющей отрицательную кривизну, радиусом r

$$P = \gamma(1/x - 1/r), \tag{5.2}$$

где x — радиус площади контакта.

Из уравнений (5.1) и (5.2) следует, что на поверхности сферы действует растягивающее (положительное) напряжение Лапласа, а на поверхности шейки — отрицательное, то есть сжимающее ($1/r > 1/x$).

Под действием сил поверхностного натяжения материал перемещается в область шейки путем объемной, зернограничной или поверхностной диффузии. Начальная стадия спекания за счет объемной диффузии может быть описана уравнением [6]

$$x^5/a^2 = (40\gamma\Omega D/RT)t, \quad (5.3)$$

где a — радиус сферы; D — коэффициент объемной диффузии; Ω — атомный объем; T — температура; t — время. Из (5.3) видно, что скорость спекания возрастает с увеличением T и уменьшением размера частиц. В первом приближении можно считать, что частицы размером меньше 20 мкм активно спекаются в твердой фазе, тогда как более крупные (>100 мкм) не спекаются вовсе или для их спекания необходимо присутствие жидкой фазы. Возрастанию пор препятствуют включения в виде невосстанавливающихся оксидов. При спекании многокомпонентных систем ход процесса уплотнения в значительной степени определяется характером диаграммы состояния. При быстром подъеме температуры в крупных брикетах может наблюдаться локальное различие в величине усадки из-за неравномерности нагрева, что приводит к искажению формы изделия. На рис. 5.3, *в* изображена одна из первых моделей лазерного спекания через жидкую фазу в рамках геометроподобного подхода. На схеме показано образование перетяжки из жидкой фазы (расплава) между двумя частицами, где r_1 и r_2 — радиусы кривизны мениска расплава. Следует отметить, что коэффициент поверхностного натяжения обратно пропорционален температуре, $\gamma = \gamma(1/T)$, и в условиях крайне неоднородного распределения температур при спекании вследствие ЛВ использовать приближение Лапласа следует осторожно.

Атмосфера, в которой проводят спекание, существенно влияет на достигаемые результаты. Плотность и прочность порошковых изделий будут выше при спекании их в восстановительной среде по сравнению со спеканием в нейтральной среде. Активировать процесс спекания, как отмечалось ранее, можно механически (размол), повышая давление, и термохимическим способом. Примеры такой активации известны в технологии СВС порошков и взрывного компактирования. Возможно также использование циклического изменения температур, воздействия ультразвука, наложения внешних электрических и/или магнитных полей. ЖФС эффективнее твердофазного за счет большей стягиваемости поверхности твердых частиц одного компонента расплавом другого.

5.3.1. Твердофазное спекание

Возможны две разновидности процесса спекания — твердофазное, то есть без образования жидкой фазы, и жидкофазное, при котором нагрев одного из компонентов порошка происходит при температуре $T > T_m$.

Все металлы имеют кристаллическое строение, характерной особенностью которого является упорядоченное положение атомов, занимающих вполне определенные места в соответствующей кристаллической решетке. Уже при комнатной температуре атомы, обладающие некоторой энергией, совершают колебания относительно среднего положения равновесия. С повышением температуры энергия и амплитуда колебаний атомов увеличивается и возникает вероятность их ухода из занимаемого положения. При переходе атома из одного положения в другое затрачивается некоторая энергия, и на новом месте атом опять совершает колебательные движения до тех пор, пока его энергия снова не увеличится. Такое скачкообразное перемещение атомов носит название диффузии и может совершаться как по поверхности тела (поверхностная диффузия), так и в его объеме (объемная

диффузия). Атомы на контактных участках более подвижны, чем на других участках поверхности. Поэтому от свободных, не контактирующих участков к местам контактов переходит значительно большее число атомов, чем в обратном направлении. В результате происходит расширение контактного участка, приводящее к развитию межчастичного сцепления и его упрочнению, а поры между частицами приобретают округлую форму, не изменяя своего объема. Упрочнение порошкового тела без уменьшения суммарного объема пор, вызываемое поверхностной диффузией, есть один из важнейших признаков спекания.

5.3.2. Жидкофазное спекание

Прочность спеченных тел определяется силами сцепления между отдельными частицами порошка, величина которых зависит от того, насколько тесный контакт на границах, разделяющих частицы порошка, удалось создать. При спекании появление жидкой фазы, образующейся за счет расплавления более легкоплавкого компонента или структурной составляющей, приводит к увеличению скорости диффузии атомов и облегчает перемещение частиц твердой фазы друг относительно друга, способствуя заполнению пор веществом. В связи с этим при ЖФС можно обеспечить получение практически беспористых готовых изделий. Степень уплотнения является существенно большей, чем при твердофазном спекании.

Различают три стадии ЖФС:

1) перегруппировка твердых частиц под воздействием течения жидкости;
2) образование жесткого скелета из твердых частиц в результате их припекания;
3) процесс уплотнения.

Сначала усадка идет наиболее интенсивно, так как частицы легко перемещаются жидкостью и заполняют межчастичные промежутки. На третьей стадии спекания уплотнение идет очень медленно. Твердые частицы срастаются, расплав уже не может затекать в межчастичные промежутки, и усадка связана только с процессами, имеющими место при твердофазном спекании. В результате срастания частиц в спекаемом порошковом теле образуется жесткий скелет, тормозящий усадку и препятствующий быстрому зарастанию пор. Можно показать, что эти стадии наблюдаются и при СЛС.

5.3.3. Химически индуцированное (реакционное) спекание

При выборе перспективных порошковых композиций для СЛС традиционно исходят из возможности реализации процесса ЖФС при ЛВ. Как отмечалось ранее, в таких случаях порошковая композиция представляет собой смесь двух или более порошков со значительно различающимися температурами плавления (см. подробнее в разделе 5.3.2). При спекании легкоплавкая фаза растекается по границам зерен тугоплавкой фазы и, кристаллизуясь, выступает в роли связки, которая придает прочность обработанной ЛИ области спекания. Выращенные в результате послойного синтеза трехмерные объекты представляют собой полуфабрикаты (green part), требующие последующей доработки (например, отжига в печи, инфильтрации наполнителем и т. п.). Необходимость предварительной подготовки порошка, контроль окружающей атмосферы и температуры порошковой среды на платформе, где осуществляется спекание, делает процесс СЛС относительно долгим и сложным. Все это вместе уменьшает преимущества метода СЛС по сравнению с другими методами БП, например лазерной стереолитографией. Поэтому наряду с поиском новых, перспективных для СЛС порошковых систем и расши-

рением функциональных возможностей синтезированных изделий нам представлялось разумным идти по пути не только исследования новых композиционных и/или градиентных материалов, но и совмещения процесса лазерного спекания с другими процессами [5]. Так, совмещение лазерного спекания и пайки позволяет получать объемные модели из биметаллов, в которых высокая адгезия расплава припоя к металлической фазе улучшает механические свойства изделий.

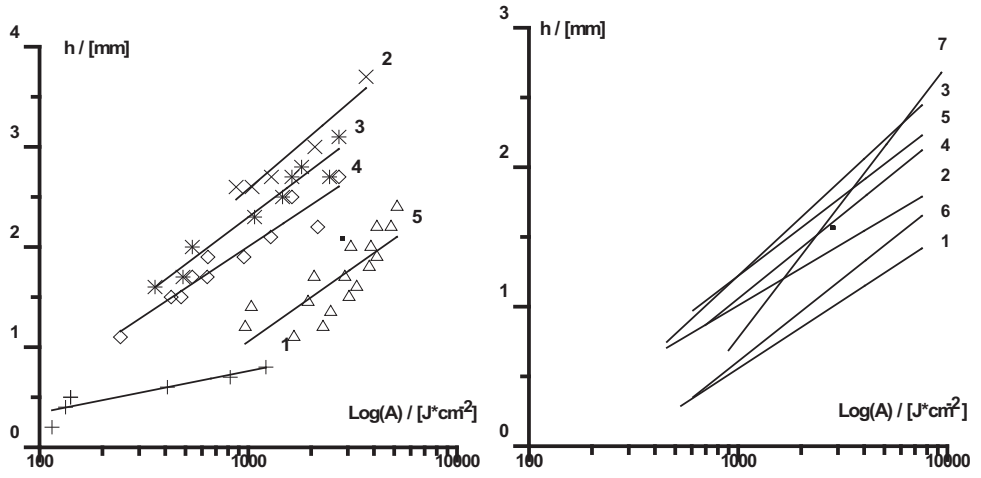
Нами [1], [5] впервые в практике БП было предложено использование для СЛС порошковых экзотермических смесей, традиционно применяемых в технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). При этом важно каждый раз убеждаться, что контролируемая экзотермическая реакция горения реализуется точно в пятне ЛИ при сканировании последним поверхности порошковой композиции, поскольку только пространственно-селективное спекание с высоким разрешением позволяет строго выдерживать форму синтезируемого объекта и отвечает конечным целям настоящего исследования. Реализация СВС-процесса методом СЛС впервые позволила не только получать более прочные вещественные копии изделий сложной формы, но и расширить функциональные характеристики этих трехмерных объектов за счет синтеза новых фаз (интерметаллидных, сегнето- и ферроэлектрических и т. п.).

К настоящему времени в наших работах [1] было впервые предложено и в едином технологическом процессе реализовано контролируемое энергией лазера совмещение процессов СЛС и СВС с использованием следующих порошковых композиций:

- смеси металлов для синтеза интерметаллидов в системах Ni + Ti, Ni + Al, Ti + Al;
- спекание металла в газовой фазе (аналог — процесс Laser chemical vapour deposition (LCVD)): Ti + N_2, Al + N_2, Ti + O_2;
- смеси оксидов металлов для синтеза керамик TiO_2 + ZrO_2 + PbO, Al(Al_2O_3) + + Zr(ZrO_2);
- смеси компонентов для синтеза бариевых гексаферритов и литиевых ферритов — шпинелей из BaO_2 + Fe_2O_3 + Cr_2O_3 + Fe, Li_2CO_3 + Fe_2O_3 + Cr_2O_3 + Fe.

Были определены оптимальные режимы ЛВ для поддержания контролируемой экзотермической реакции точно в пятне ЛИ. Для некоторых систем получены трехмерные образцы изделий из композиционных материалов.

На рис. 5.4 представлены сведенные воедино экспериментальные данные по контролируемому ЛИ СВС изученных реакционно способных порошковых систем. Общие тенденции таковы [8]. Увеличение энерговклада — А приводит к росту толщины монослоев при контролируемом СЛС. Более низкие значения параметра — А дают рассыпающиеся монослои, а более высокие, чем приведены на рис. 5.4, — СВС взрывного типа. Разный угол наклона кривых (то есть скорость лазерного энерговклада) на рис. 5.4 и сами величины А свидетельствуют о различной реакционной способности исследованных систем. Также можно утверждать следующее. Использование наплавочного порошка ПГСР4 обычно дает более высокие глубины спекания, чем в смесях с чистым никелем (ПНК), из чего следует, что плакирующие добавки в ПГСР4 улучшают прочность монослоев. Высокодисперсный титан (марки ПТОМ) более реакционно способен, чем ПТХ (кривые 3, 4 на рис. 5.4, *а*) при СЛС. Энергия активации реакции СВС в системе Ni-Al много выше, чем в системах Ni-Ti, Ti- Al, поэтому объемные изделия из алюминида никеля пока не получены (то есть при совмещении СЛС+СВС последний процесс практически не управляем). Алюминид титана при объемном СЛС получить также тяжело (рис. 5.4, *б*). В частности, система Al-Ti «горит» практически на всех режимах



а *б*

Рис. 5.4. Зависимость глубины контролируемого спекания *h* от логарифма лазерного энерговклада log *A*: *а* — *1* — Ni + Al (1:1); *2–4* — Ni + Ti (1:1), *2* — ПГСР4 + ПТХ; *3* — ПГСР4 + ПТОМ, *4* — ПНК + ПТХ, *5* — ЦТС. *1*, *2*, *5* — СЛС на воздухе, *3*, *4* — в атмосфере Ar; *б* — *1*, *4*, *6* — Al + Ti (3:1), *2*, *5* — Al + Ti (1:1), *3* — Al + Ti (1:3), *7* — $BaFe_{12x}Cr_xO_{19}$. *1–3* — СЛС на воздухе, *4*, *7* — в атмосфере Ar, *5*, *6* — в атмосфере N_2

в среде азота и на воздухе, из чего следует, что для СЛС в аргоне (такие режимы все же были успешно реализованы) требуется тщательная предподготовка смеси (удаление кислорода и азота из пор).

В чем же состоят фундаментальные причины возможности «удержать» реакцию СВС при ЛВ? Наши экспериментальные исследования тепловой обстановки в зоне ЛВ склонных к СВС порошковых смесей [9] и выявление факта возникновения ЭДС на фронте горения [10] свидетельствуют, что нам удалось осуществить не самораспространяющийся, а лазерно-контролируемый высокотемпературный синтез (ЛВС) новых химических соединений из смеси исходных реакционных порошков. Заметим также, что не всякий традиционный СВС может обеспечить 100%-ную полноту превращения в реакции синтеза, поэтому и в данном случае (как и в классическом СВС) могут потребоваться операции постобработки (печной отжиг, инфильтрация и пр.).

5.3.4. Полный переплав порошка

Полная переплавка порошка имеет место при переходе от процесса ЖФС к плавлению. Послойный лазерный синтез готовых к работе функциональных изделий (а не моделей деталей машин!) из металлических порошков — Direct Metal Fabrication (DMF) — может быть реализован на базе ряда технологических подходов (основные перечислены в табл. 5.3). Как видно из таблицы, в их основе лежат именно процессы лазерного плавления. Современные установки для DMF обладают высокой производительностью (особенно при трехмерной печати), точностью воспроизведения (СЛП-процесс), позволяют получать поверхности низкой шероховатости (DMLS, Selective Laser Melting, Laser Cusing), создавать функционально-градиентные структуры и ФГ-изделия (DMD-, LENS-процессы). Но поскольку

Таблица 5.3. Методы синтеза функциональных изделий путем переплавления

Технология	Материалы	Стоимость машины	Рабочий объем камеры, мм	Производительность, $см^3/ч$	Точность, мм	Минимальная толщина слоя, мкм	Поверхностная шероховатость Ra, мкм	Возможность использования нескольких материалов
Direct Metal Laser Sintering (EOS)	Бронза, сталь	$350K...450K	250 × 250 × 185	30	±0,05	10	4...9	Да, ограничено
Selective Laser Melting (MCP)	Сталь, inox, нержавеющая сталь	€350K	200 × 200 × 240	5	±0,10	15	<10	Да
Electron Beam Melting (ARCAM)	Ti, Z38CDV5, сталь (H13)	$500K	250 × 250 × 200	100	±0,40	25	20...40	Да
Laser Cusing (Concept Laser — Hofmann)	Сталь, inox 1.4404 инструментальная сталь 1.2343 (X38 CrMoV5-1)	—	250 × 250 × 170	—	—	—	2...6	Нет
Renishaw AM 250	Нержавеющая сталь 316L, 17-4PH, инструментальная сталь H13, Ti, Al, Co-Cr, Inconel	—	250 × 250 × 300	5...20	—	20...100	—	Да
SLM Solution SLM 500	Нержавеющая сталь 316L; инструментальная сталь H13; Ti; Al; Co-Cr; Inconel	—	500 × 280 × 325	60...70	—	20...200	—	Да
Laser Sintering (Phenix)	Керамика, inox	€380K	D 250 × 300	30	±0,05	—	Финишная обработка	Нет
Laser Engineered Net Shaping (Optomec)	Z38, inox, 304, 316, Inconel 625, 690, алюминий, 2024, TA6V	$450K	457 × 457 × 1066	25	±0,15	—	5...8	ФГМ*

Технология	Материалы	Стоимость машины	Рабочий объем камеры, мм	Производительность, $см^3/ч$	Точность, мм	Минимальная толщина слоя, мкм	Поверхностная шероховатость Ra, мкм	Возможность использования нескольких материалов
Laser Additive Manufacturing (Aeromet)	Сплавы Ti	—	3000 × 3000 × 1200	—	±1,00	—	3...9	Да, ограничено
Direct Metal Deposition (POM)	Сталь inox, инструментальная сталь, суперсплавы, никель	—	610 × 1525 × 455	22	—	—	8	ФГМ*
Sciaky EBDM	Проволока — нержавеющая сталь 316L; сплавы Ti; Al; Ni	—	5700 × 1200 × 1200	—	—	7...18 кг/ч	—	—
Selective Laser Sintering (3D Systems)	Сталь, inox серия 420	$320K	381 × 330 × 457	100	±0,10	6	7...50	Нет
3D Printing (Prometal)	316 L (X2CrNiMo17-2), 420 (X40Cr14)	$150K...650K	190 × 190 × 150... 1000 × 500 × 250	4100	±0,15	—	8...10	Ограничено
SratoConception (Cirtes)	Алюминий, сталь	€200K	Максимум 2000 × 3000	—	---	—	<7	—

* ФГМ — возможность послойного синтеза функционально-градиентных материалов и изделий.

современные технологии требуют, чтобы размеры синтезируемых структур и функциональных изделий могли быть не только сколь угодно большими, но сколь угодно маленькими (микро- и нанотехнологии), то существует насущная потребность в развитии процессов послойного синтеза мезо-, микро- и наноструктур, в том числе с градиентом свойств.

В последнее время в литературе появились предложения классифицировать аддитивные методы по способу нанесения порошка. В случае его разравнивания на платформе подход предлагают называть *Bed Deposition*, при подаче порошка (проволоки) в зону расплава — *Direct Deposition*. Следует отметить, что если методы Bed Deposition обеспечивают высокую точность и прецизионность изделий, то методы Direct Deposition подходят лишь для восстановления деталей машин.

В соответствии с такой классификацией методики:

- SLM — Selective Laser Melting (компании SLM Solutions, Германия; Realizes, Германия; Renishaw, Великобритания);
- DMLS — Direct metal laser sintering (EOS, Германия);
- EBM — Electron Beam Melting (Arcam, Швеция);
- LaserCusing (Concept Laser, Германия);
- SLS — Selective Laser Sintering (Phenix Systems, Франция)

являются подходами первого, «пастельного» вида, а ко второму виду, Direct, можно отнести следующие технологии:

- DMD — Direct Metal Deposition (компании POM, США; Trumpf, Германия);
- LENS — Laser Engineered Net Shape (Optomec, США);
- DM — Direct Manufacturing (Sciaky, США);
- Irepa Laser (EasyCLAD — Construction Laser Additive Directe, Франция);
- IFF — Ion fusion formation (Honeywell Aerospace, США).

5.4. Работа и уход за порошками

5.4.1. Способы доставки и укладки порошка

Свойствами порошковых материалов определяется способ нанесения слоев порошка при объемном синтезе. На рис. 5.5 изображены возможные методы разравнивания порошка.

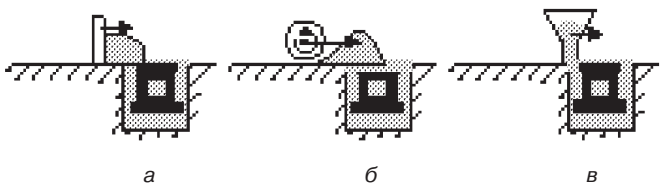


Рис. 5.5. Способы нанесения и разравнивания порошка на платформе-основании: *а* — скребок; *б* — валик; *в* — бункер

В работе [1] было показано, что наиболее перспективными являются способы *б* и *в*. В СФ ФИАН был реализован последний. Действительно, в способах *а* и *б* разравнивающее устройство должно проталкивать перед собой значительное количе-

ство порошка, которое за счет межчастичного трения может привести к деформации и даже отрыву предыдущего слоя от основания. Справедливости ради следует отметить, что вращающийся ролик (здесь принципиально даже направление вращения!) в случае *б* позволяет одновременно с разравниванием механически уплотнять порошковую среду. Это представляется положительным фактором, хотя дополнительное усилие может способствовать разрушению уже спеченного основания.

Существуют предложения об уплотнении насыпаемых порошков за счет вибрации, но в случае использования многокомпонентных смесей может произойти разделение фракций. В настоящий момент неясно, как может повлиять намагничивание порошковой среды [1] на процесс СЛС. В перспективе представляется разумным реализовать для нанесения и разравнивания порошка последовательную комбинацию способов *в* и *б* либо совместить сопловой способ подачи порошка (рис. 5.6) с одним из методов разравнивания. Одно из неоспоримых преимуществ сопловых дозаторов (см. раздел 5.4.2) состоит в возможности реализации процесса СЛС/П многокомпонентных порошков.

5.4.2. Типы порошковых дозаторов

Порошковые дозаторы — неотъемлемая часть любой установки для трехмерной (3D или объемной) лазерной наплавки. Существует несколько типов дозаторов, которые можно классифицировать по принципу действия [11] (см. рис. 5.6): подача порошка под действием гравитационных сил, механические дозаторы, подача порошка в потоке газа (или жидкости — по аналогии со струйной 3D-печатью), дозаторы вибрационного типа. Скорость подачи порошкового материала зависит от размера и формы частиц (ультрадисперсные (наноразмерные) порошки имеют склонность к агломерации) порошка, его влажности, условий изготовления, хранения, предподготовки (сушка, механоактивация). Порошковый дозатор гравитационного типа напоминает песочные часы (см. рис. 5.6, *а—в*), контроль прошедшего порошка осуществляется здесь оригинальными датчиками. Противодавление создает стабильность в подаче порошка. Механический способ (см. рис. 5.6, *г*) был известен еще со времен Архимеда. Однако абразивный износ существенно нарушает стабильность характеристик.

Подача порошка в потоке газа (см. рис. 5.6, *е*) сводит к минимуму количество трущихся частей при работе питателя. Наконец, дозаторы вибрационного типа (см. рис. 5.6, *д*) позволяют в широких пределах (от 8 до 200 г/мин с точностью ±1%) обеспечивать поток частиц порошка. Однако наиболее перспективными считаются сопловые системы (рис. 5.7). При этом приток частиц порошка может осуществляться как соосно падающему ЛИ (рис. 5.7, *а*), так и с боковым вдувом (рис. 5.7, *б*).

Интегрирование в сопловой блок оптической системы позволяет защитить оптику от продуктов плавления, деструкции или копоти. Конфигурация сопла является предметом патентования у фирм — производителей машин для DMD. На рис. 5.8, *а*, показан внешний вид соплового блока, на рис. 5.8, *б* — установка для трехмерной лазерной наплавки, созданные в ENISE, DIPI (Франция).

Порошковая двухканальная дозирующая система Medicoat (см. рис. 5.8, *б*, *слева*) позволяет регулировать скорость подачи материала отдельно по каждому каналу и играет определяющую роль в обеспечении качества наплавки. Аргон, азот или их смеси могут быть использованы в качестве сопутствующих газов. От типа сопла, взаимодействия потока ЛИ с потоком порошка (рис. 5.9), соотношения диаметров падающего ЛИ и потока частиц, расстояния от сопла до подложки, скорости и однородности подачи частиц порошка будет зависеть механическая прочность наплавленного слоя.

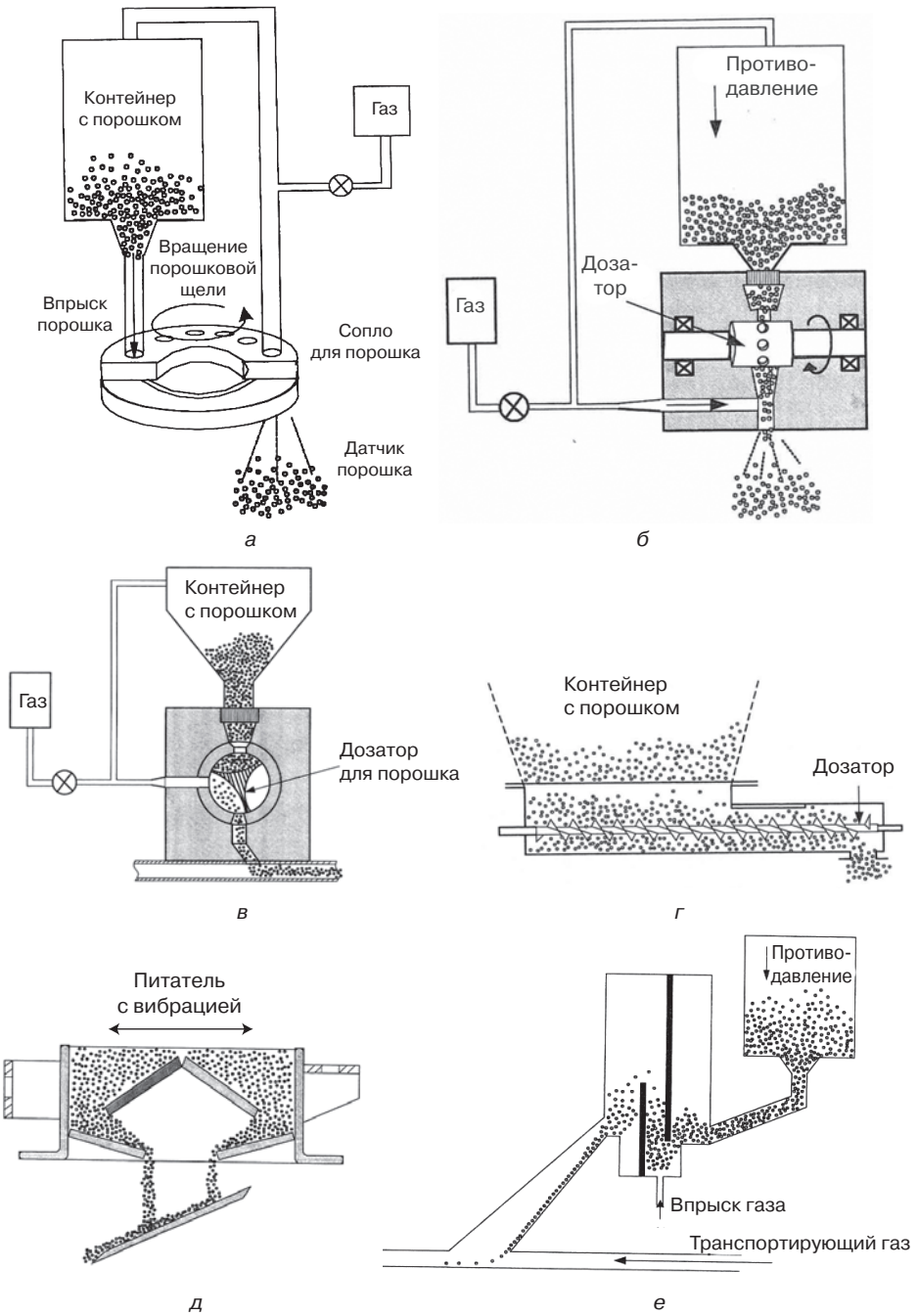
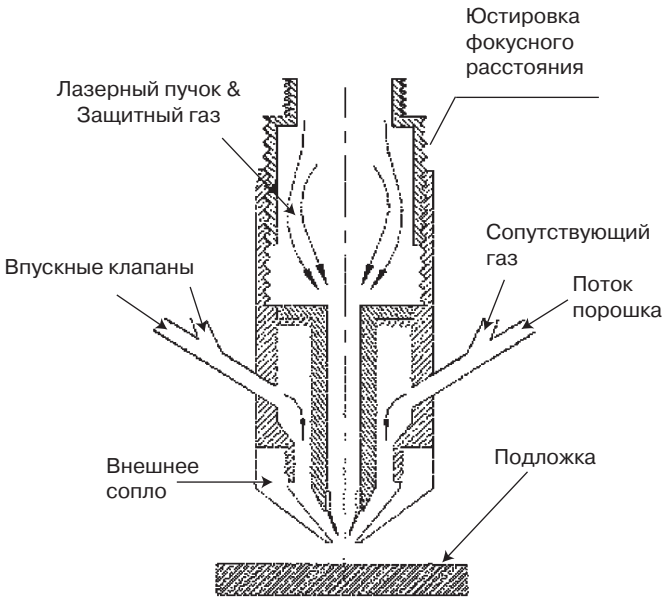
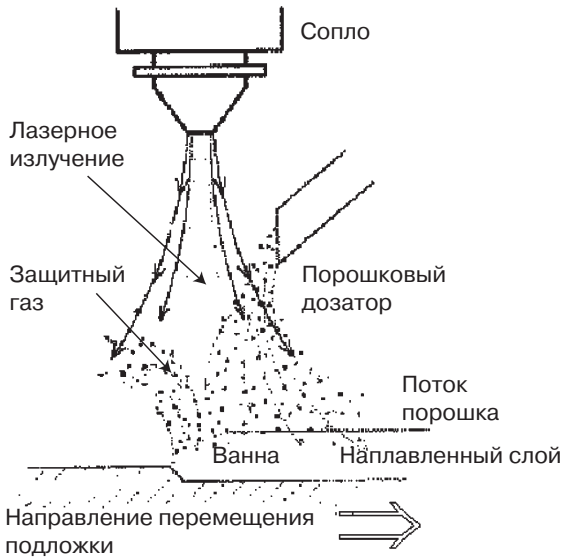


Рис. 5.6. Способы дозирования порошков под действием сил гравитации: *а* — с вращающим колесом; *б* — с измерительным колесом; *в* — с делительным механизмом; и механических усилий: *г* — с винтовой передачей; *д* — с вибрацией; *е* — с давлением газа

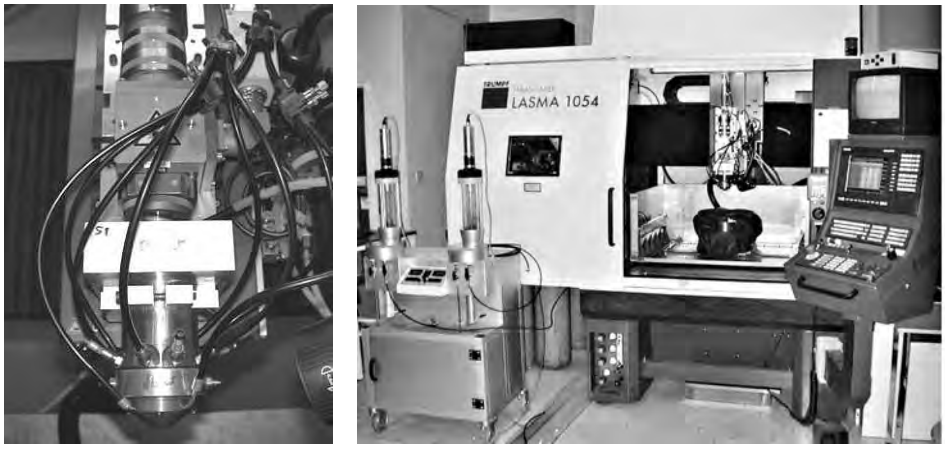


а



б

Рис. 5.7. Схемы дозаторов и способы доставки порошковых материалов:
а — соосно падающему ЛИ; *б* — с боковым вдувом



а *б*

Рис. 5.8. Установка Trumph Haas Lasma 1054 с координатным столом и дозирующей системой: *а* — сопловой блок; *б* — общий вид

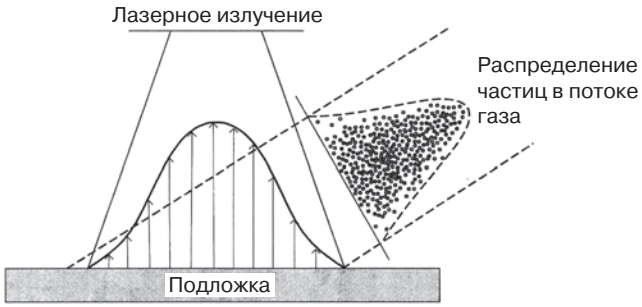


Рис. 5.9. Гауссово распределение энергии ЛИ и параболическое распределение по скоростям в потоке частиц [11]

Количество степеней свободы координатного стола (от 3 до 5) и точность его позиционирования также важны для создания комплексных изделий, снижения количества излишних перемещений лазерной головки при синтезе, оптимизации технологического процесса.

В современной установке для трехмерной лазерной наплавки фирмы Trumpf DMD 5000 предусмотрена возможность засыпки одновременно до четырех бункеров с различными порошками (рис. 5.10, *а*) для создания функционально-градиентных покрытий и изделий. Визуализация и контроль процесса синтеза осуществлены тремя видеокамерами (рис. 5.10, *б*). На рис. 5.10, *в*, *г* показаны этапы создания 3D-наплавленной поверхности сложного контура.

5.4.3. Системы обработки порошка

Существует много исследований, где отмечается необходимость предварительной сушки порошков. Действительно, это облегчает процесс послойного нанесения порошка на поверхность ранее спеченного слоя за счет уменьшения межчастичных

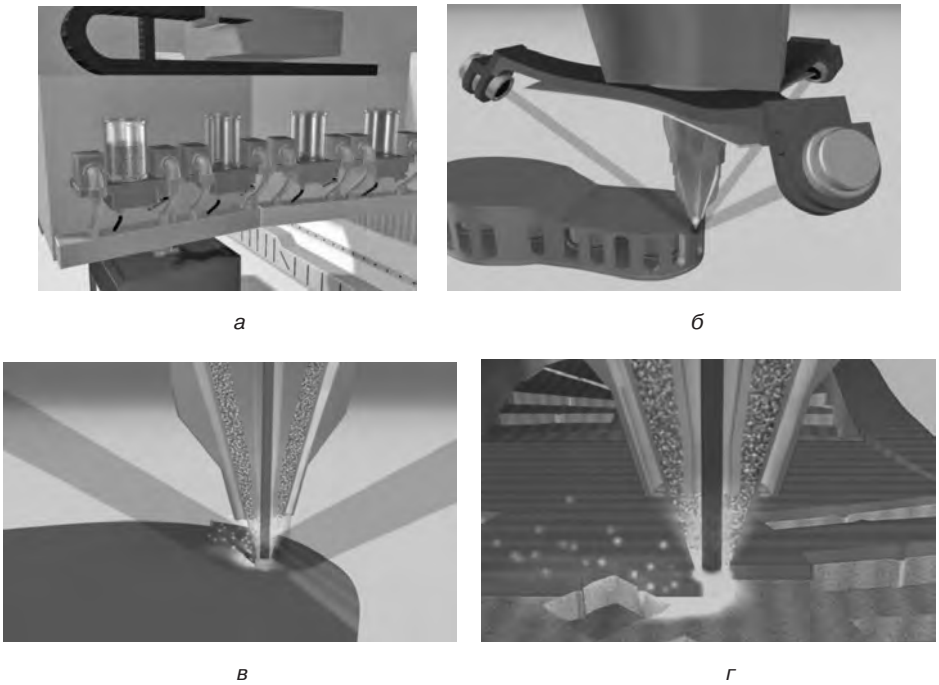


Рис. 5.10. Фрагменты работы DMD 5000: *а* — система из четырех бункеров для порошков; *б* — система видеонаблюдения; *в* — начало процесса наплавки; *г* — обход контура при наплавке

контактов в сухом порошке. Контроль влажности и наличие защитной атмосферы особенно важны для реакционно-способных порошков или составляющих металлополимерных и металлокерамических композиций. Например, известно, что темпы окислительной деструкции полимеров при высоких температурах во влажной среде сравнимы с темпами термодеструкции и даже превышают их. Поэтому СЛС в инертной среде является более предпочтительным. Кроме того, контролируемая атмосфера и дополнительный подогрев также могут изменить условия каплеобразования расплава (balling-эффект).

5.4.4. Системы восстановления порошков

Цели регенерации порошка — восстановить его свойства для повторного использования. Механическим путем отработанные порошки просеивают, сепарируют на фракции, отсеивают спеченные и сплавленные агломераты. Крупные агломераты пытаются дробить. Магнитная сепарация порошков позволяет отобрать из непроводящей фракции магнитные порошки (например, никель, железо и т. п.). Химическая регенерация обычно достигается за счет вакуумирования порошка либо пропускания через порошок потока водорода. Существуют способы использования помимо дорогого водорода и других активных газов — хлора и фтора. Электролитические системы восстановления порошков стоят на втором месте после водородного восстановления. Более сложные системы отчистки подразумевают селективное воздействие на определенную фракцию порошка, например, промывкой в слабых растворах солей и кислот при определенных температурах.

5.5. Поглощение и рассеивание концентрированных потоков энергии в порошковых средах

Анализ процессов СЛС порошковых сред естественно начать с пространственных характеристик тепловых источников, обусловленных поглощением ЛИ средой. Общие механизмы и методы анализа и расчета поглощенной энергии в сильно рассеивающих порошковых средах известны давно [12], [15]. Однако многокомпонентные порошковые материалы типа «металл — полимер» в литературе не рассматриваются. Общеизвестно, что металлы лучше поглощают на длине волны $\lambda = 1{,}064$ мкм, в то время как полимеры — на длине волны $\lambda = 10{,}64$ мкм (рис. 5.11). Оптимально длина волны излучения лазера должна быть адаптирована к порошковому материалу, который спекается.

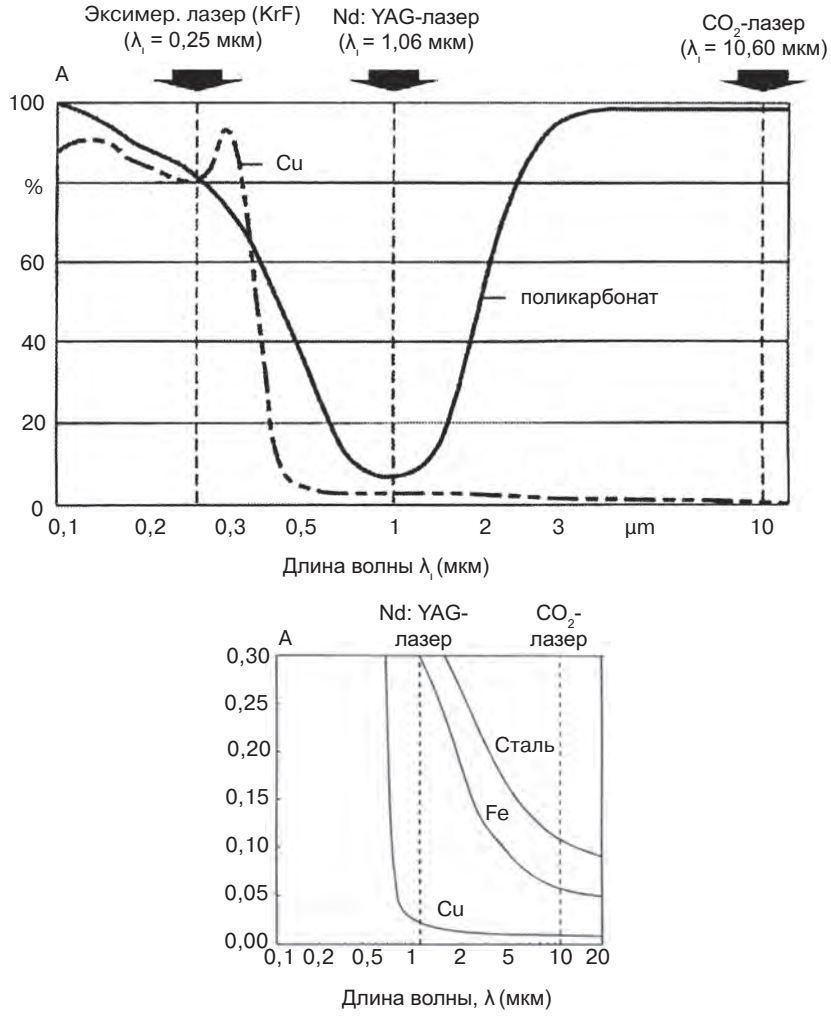


Рис. 5.11. Поглощательная способность *A* металлов и полимеров на различных длинах волн ЛИ

Сильное рассеяние ЛИ в порошковых средах значительно осложняет описание распределения поглощенной энергии по сравнению с нерассеивающими средами, для которых хорошо работает модель экспоненциального бугеровского поглощения. Кроме того, падающий на поверхность порошка пучок необходимо рассматривать как ограниченный в силу очевидных размерных соотношений. Последнее обстоятельство исключает использование целого ряда моделей, широко применяемых для описания прохождения света через рассеивающие среды (варианты многопотоковых приближений). Поэтому нами был использован подход, основанный на применении численного моделирования переноса излучения методом Монте-Карло [13].

Оптические свойства рассеивающих сред обычно характеризуются параметрами μ_a и μ_s — коэффициентами поглощения и рассеяния, которыми обозначают вероятность того, что на единице пути в среде фотон будет поглощен или рассеян, а также g — средним косинусом рассеяния (для заданного вида углового распределения рассеяния). Если эти параметры известны, то задача определения теплового источника сводится к запуску процедуры Монте-Карло. Для ускорения расчетов можно использовать так называемое транспортное приближение, при котором анизотропное рассеяние заменяется изотропным, а среда характеризуется транспортным коэффициентом рассеяния $\mu_s' = \mu_s (1 - g)$.

Результаты измерений представлены в табл. 5.4.

Таблица 5.4. Коэффициенты поглощения R и транспортное альбедо μ_s' / μ_t' порошковых композиций

Наименование (марка) порошковой композиции	Состав	R, %	μ_s' / μ_t'
Полимер П12	Полиамид	92	0,99
Никелевый наплавочный ПГСР4	См. табл. 5.2	30	0,80
Смесь ПГСР4:П12	1:1	47	0,93
Смесь ПГСР4:П12	10:1	30	0,80
Латунный наплавочный ПР-19М-01	См. табл. 5.2	46	0,91
Смесь ПГ-19М-01:П12	1:1	53	0,94
Смесь ПГ-19М-01:П12	10:1	45	0,91

Таким образом, картину взаимодействия излучения Nd:YAG-лазера с многокомпонентными металлополимерными композициями можно представить следующим образом. Чистые полимерные порошки обладают очень слабым поглощением. Об этом свидетельствует близость к единице коэффициентов диффузного отражения. Поглощение света в металлополимерной порошковой среде обусловлено практически только поверхностным поглощением частиц металла. Они же дают и основной вклад в рассеяние фотонов на большие углы. Исходя из этих представлений длину рассеяния можно оценить как среднее расстояние между металлическими поверхностями в порошковой среде. Эта величина возрастает с добавлением в металлический порошок полимерных частиц.

В лазерной технологии [14] объемный характер поглощения ЛИ принято определять из сопоставления величины зоны термического влияния ($\sim\sqrt{at}$, где a — температуропроводность материала, t — время воздействия) с глубиной проникновения ЛИ. Например, в литом железе $\alpha \sim 2 \cdot 10^5$ 1/м (см. [14]), что означает, что на глубине ~50 мкм ЛИ практически полностью поглощается, и в этом случае ЛИ есть поверхностный тепловой источник. Этими измерениями было показано, что

для изучаемых порошковых композиций $\alpha \sim 10^0 - 10^2$ 1/м и объемность поглощения очевидна.

В наших работах [1] было впервые показано, что поглощение ЛИ на длине волны $\lambda = 1{,}064$ мкм при СЛС/П имеет *существенно объемный* характер, что принципиально важно для теплофизических расчетов. Зарубежные исследователи стали обращать внимание на этот момент сравнительно недавно (см. работы Fischer et al. (2003 г.), Kruth et al. (2002 г.)). Поэтому, фактически, большинство известных численных расчетов по распределению тепловых полей в зоне лазерного спекания у зарубежных исследователей (Kandis, Zhang, Dai et al., Kolossov et al., Will et al.) можно поставить под сомнение. В то же время довольно часто в зарубежных расчетах можно встретить предложение учитывать радиационный отток тепла со спекаемой поверхности по закону Стефана — Больцмана $\sim\sigma T^4$. Между тем простые оценки показывают, что при температурах спекания (и даже плавления) его величина столь мала, что он заведомо может быть отброшен.

Бесконтактная оптическая диагностика зоны лазерного спекания (плавления) порошковых композиций является прямой альтернативой термопарных измерений. Здесь возникают следующие методические проблемы: широкий диапазон измеряемых температур — 3000 °С и более, большие градиенты температур ($\sim 10^3 ... 10^4$ °С/м) в локальной зоне термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения ($\sim 10^3 ... 10^6$ °С/с), отражательная способность оптических систем, широкий спектральный диапазон теплового излучения, плазмохимические явления при ЛВ.

Большинство пирометров работают в определенном спектральном интервале. Поэтому процесс интегрирования измеренных данных (пересчет с яркостной на истинную температуру) требует экспериментальных знаний по излучательной и поглощательной способности исследуемых сред, что само по себе является нетривиальной проблемой. Использование многоволнового пирометра облегчает эту задачу. На рис. 5.12 представлен экспериментальный стенд [15] для онлайн-диагностики процесса лазерной наплавки.

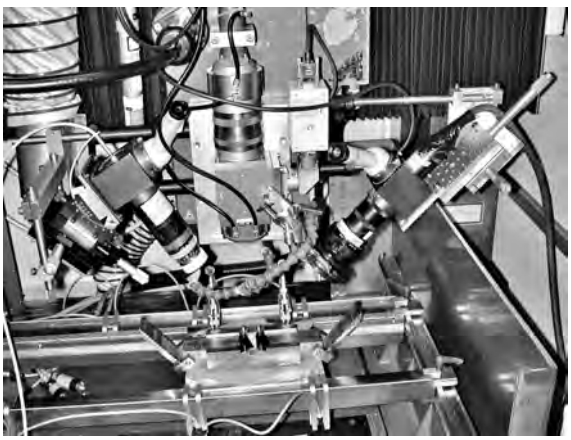


Рис. 5.12. Сопловой блок (*в центре*) с импульсно-периодическим Nd:YAG-лазером HAAS HL62P. *Слева* — многоволновой пирометр: 12 длин волн, 1,061...1,573 мкм, температурный диапазон 900...3800 °С, пространственное разрешение 800 мкм, время экспозиции 50 мкс. *Справа* — 2D-пирометр: матрица фотодиодов 10 × 10, $\lambda = 0{,}87$мкм, температурный диапазон 1200...3800 °С, время экспозиции 17 мкс, пространственное разрешение 250 мкм для каждого фотодиода

Одновременная съемка процесса наплавки на цифровую CCD-камеру позволяет не только визуализовать процесс СЛС или DMD (как на рис. 5.10, *б*), но и синхронизировать процесс измерения (оцифровки данных) температур с наблюдаемыми на поверхности порошка структурно-фазовыми превращениями. Это дает возможность осознанно управлять параметрами ЛО, изучить динамику нестационарных тепловых процессов в зоне плавления. На рис. 5.13 и 5.14 показаны стабильность пирометрического сигнала и результаты пересчета истинных температур в зоне ЛО соответственно [15]. Такие данные позволяют не только анализировать кинетические характеристики процесса ЛО, но и локализовать (измерять) области зоны термического влияния (ЗТВ), где возможно образование тех или иных структурных фаз.

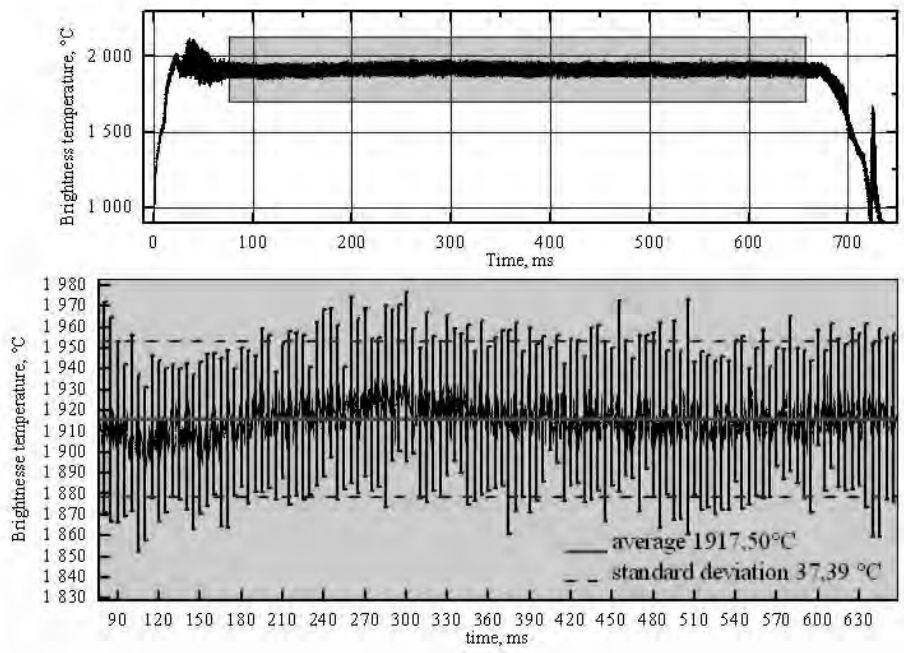


Рис. 5.13. Стабильность пирометрического сигнала. Многоволновой пирометр, Nd:YAG-лазер, скорость ЛО 2500 мм/мин, лазерная мощность 2 кВт, перекрытие 0,7 мм

В совокупности с широко развиваемыми в последнее время программными средствами мониторинга морфологии поверхностных структур по их бинарным изображениям (см. пример использования системы SIAM, http://www.siams.com/) открывается возможность автоматизации при выполнении комплексных процедур описания и измерения объектов и фаз при СЛС/П-, LENS-, DMD-процессах, включая оценку и измерение геометрических размеров фаз, границ, зерен, характеристик их пространственного и временного распределения и упорядочения, морфологии, состава, а также процессов самоорганизации ансамблей частиц на микро-, мезо- и наноуровне. По нашему мнению, только после этого задача интерактивной (онлайн) оптимизации этих процессов, когда установлены взаимозависимости «структура ↔ свойства ↔ лазерные параметры» (стрелками показано существование как прямой, так и обратной взаимосвязи), может считаться полностью завершенной.

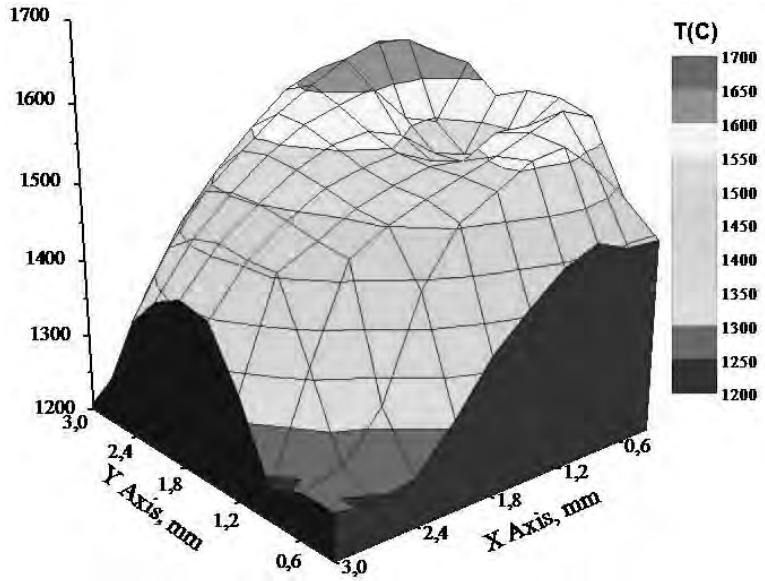


Рис. 5.14. Распределение температур на поверхности стали при лазерной наплавке. 2D-пирометр — матрица

5.6. Варианты порошковых методик БП

5.6.1. Лазерные системы, работающие с легкоплавкими порошками

Опыт работы показал: поскольку в основе метода СЛС лежит физический процесс ЖФС, выбирать компоненты порошковых композиций нужно так, чтобы они имели значительно различающиеся температуры плавления. Например, в металл-полимерной композиции (МПК) легкоплавкой фазой, а следовательно, связующим является полимер (полиамид П12 или поликарбонат ЛЭТ 7,0). В биметаллической композиции (БМК) роль легкоплавкой фазы играет припой (ПОССУ-30-2 или ПО-2 с канифолью). Тугоплавкий компонент составляет скелет будущего изделия. Среди известных типов полимерных порошков для СЛС рекомендуются термопласты, которые, в отличие от эластомеров, могут использоваться многократно. Для реализации процесса ЖФС режим ЛВ должен быть выбран так, чтобы температура в зоне спекания была много меньше T_m тугоплавкого компонента и немного более T_m легкоплавкого компонента порошковой смеси. При этом желательно дополнительно подогревать зону обработки до температур выше T_c для поликристаллических и T_a — для аморфных полимеров. В БМП температура подогрева может составить ~0,5 от T_m припоя. Такой подогрев обеспечит известный эффект уменьшения градиента температур в течение лазерного цикла «нагрев — охлаждение», а следовательно, минимизирует деформацию формы спекаемого изделия. По нашим оценкам, температура в зоне спекания бывает и много больше T_m легкоплавкого связующего. Однако было показано [1], что по причине эффективного теплоотвода в металлическую составляющую порошковой композиции это не приводит к значительной деструкции полимеров в МПК или испарению припоя в БМК. В противном случае трехмерные изделия просто рассыпались бы. Эффек-

тивность теплоотвода определяется как соотношением теплофизических свойств порошковых композиций, так и наличием в ней поровых промежутков. Поэтому немаловажную роль играют фактор формы частиц и соразмерность частиц порошка в спекаемых фракциях. Поскольку форма частиц зависит от способа (технологии) получения порошка, она должна быть подобрана так, чтобы при смешении уменьшить размер пор. Известно, что сферические частицы лучше укладываются со сферическими, а дендритные — с хлопьевидными. При этом реакционная способность таких композиций значительно выше за счет увеличения площади контакта между частицами. Очевидно, что в многокомпонентной порошковой композиции следует выбирать размер частиц не более $d_{\text{п}}$ ЛИ. Это позволяет производить обработку без перекрытия лазерных проходов и успешно спекать рядом расположенные порошинки различных фракций. Наконец, уменьшение общей дисперсности порошковой композиции позволяет надеяться на значительно меньшую финишную шероховатость поверхности синтезируемого трехмерного изделия. Между тем стремление использовать частицы размером порядка 1 мкм или менее наталкивается, с одной стороны, на технические трудности в работе с такими фракциями (излишняя запыленность зоны спекания или, наоборот, прилипание частиц друг к другу из-за их электризации и/или намагничивания и т. п.), а с другой — на отсутствие ясных физических представлений о поведении больших уплотненных ансамблей наноразмерных и субмикронных частиц под воздействием ЛИ.

Продолжительность стадии ЖФС должна быть достаточной для перераспределения в расплаве твердых частиц за счет капиллярных сил и завершения диффузионных процессов, что не всегда реализуемо при скоростном ЛВ. Поэтому хорошая смачиваемость твердых частиц расплавом должна интенсифицировать эти процессы. Следует обратить внимание и на то, что в зависимости от соотношения удельных поверхностных энергий на границах раздела фаз σ_{s-f}, σ_{l-f}, σ_{s-l} расплав может собираться в капли (balling-эффект [16]) и не обеспечивать поддержание формы изделия. Видимо, соотношение компонентов в сложных порошковых композициях должно быть подобрано так, чтобы вязкость жидкой фазы была достаточной для капиллярного перераспределения. Малая вязкость расплава может привести к седиментации частиц твердой фазы в направлении дна платформы-основания за счет силы тяжести. В этих условиях соразмерность плотностей смешиваемых порошков становится важным фактором. Все сказанное обозначает пути целенаправленной модификации порошковых композиций. Любые порошковые добавки, изменяющие параметры смачиваемости и вязкости расплава, могут значительно влиять на качество синтезируемых изделий.

5.6.2. Лазерные системы, работающие с металлическими и керамическими порошками

В табл. 5.3 были перечислены основные лазерные системы и фирмы — производители машин, работающих с металлическими и/или керамическими порошками. Фактически официально только PHENIX Systems анонсировала возможность работы с керамическими материалами (оксиды алюминия и циркония). Это связано с тем, что в PHENIX-машинах используется оригинальная опция по подогреву порошка в процессе спекания. Такая опция реализована у многих производителей СЛС-систем, но в данном случае речь идет о возможности нагрева до 900 °С. Именно существенное повышение температуры в зоне спекания позволяет надеяться на успешность работы с высокотемпературной керамикой.

5.6.3. Электронно-лучевое плавление порошка

Использование вместо ЛИ энергии электронного луча является оригинальной разработкой шведской фирмы Acram (см. раздел 5.9.2). Известно, что электронный луч, в отличие от лазерного, обладает целым рядом положительных особенностей. Во-первых, поскольку масса электрона больше массы фотона (о которой стоит говорить лишь при наличии импульса), то в ускоряющем поле электрон набирает больше кинетической энергии, чем фотон ЛИ. Вследствие этого энергоэффективность электронно-лучевой обработки (ЭЛО) много выше лазерной. Во-вторых, ЭЛО является объемным тепловым источником для любых, в том числе порошковых, материалов, поскольку электрон глубже проникает в среду. Следовательно, процессы нагрева и плавления будут иметь свою особенность. Наконец, есть третий момент, который является как недостатком, там и преимуществом ЭЛО, — это необходимость работы в вакууме. Достоинством это является потому, что при ЭЛО не будет нежелательного окисления, нитридации поверхности изделия из воздуха. А недостатком это следует назвать по причине усложнения и укрупнения оборудования ЭЛО за счет наличия вакуумных насосов, специальной вакуумной камеры для синтеза.

5.6.4. УЗК порошков

Порошки металлов, керамику в виде фольги можно спекать (сплавлять) под воздействием ультразвука (метод Ultrasonic Consolidation (UC), Solidica Inc.). УЗ-компактирование с помощью концентратора (sonotrode) УЗ-колебаний (~20 кГц)

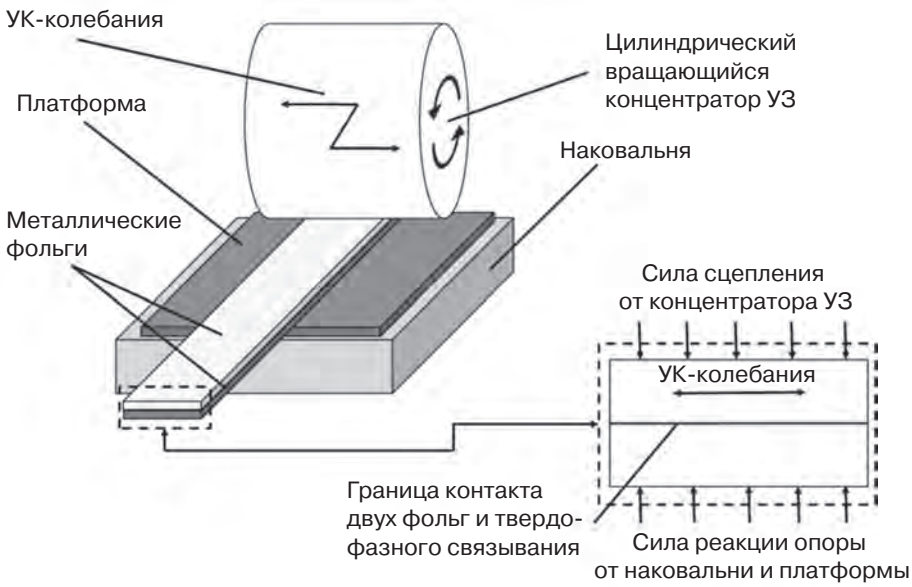


Рис. 5.15. Схема процесса УКЗ порошков (http://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_consolidation)

и 2D-координатного стола позволяет восстанавливать лопатки турбин с точностью ±0,075 мм. Отсутствие значительного нагрева материала во время УЗК полезно при работе с электронными компонентами. Схема процесса показана на рис. 5.15. После УЗК, совмещенного с подпресовкой фольги, координатный стол перемещается для наложения новых слоев. Форму слоям придает совмещенный с установкой фрезерный станок с ЧПУ. Он обрезает лишние края фольги.

5.7. Технологические параметры процесса

Несмотря на то что сам метод СЛС/П уже давно полностью автоматизирован в промышленно выпускаемых технологических установках (системы Sinterstation, DTM Co., США; SINTER-PM EOS GmbH, Германия), процесс интерактивного общения оператора с СЛС-машиной для задания оптимальных параметров синтеза остается в некотором роде искусством. Выбор этих параметров на названных технологических установках даже с рекомендуемыми производителями порошками порой приводит к неудачам. Это связано с необходимостью учитывать как свойства порошковых композиций (их дисперсность, способ приготовления, теплофизические и механические характеристики исходных порошков), так и технические возможности СЛС/П-установки. К ним относятся (рис. 5.16) тип используемого лазера (его длина волны, мощность, диаметр пятна, скорость его перемещения, коэффициент перекрытия пятен) и технические решения проектировщиков СЛС/П-машины, обеспечивающие способы сканирования ЛИ по обрабатываемой поверхности, послойного нанесения и разравнивания порошка на платформе-основании, реализация и контроль защитной атмосферы и температуры в зоне спекания и т. д. Наконец, если процесс создания изделия не ограничивается только лазерным спеканием, то выбор инфильтранта и методика фильтрации наполнителем порового пространства синтезированного трехмерного полуфабриката также должны быть оптимизированы под конечного потребителя данной продукции.

Рис. 5.16. Факторы взаимовлияния при оптимизации СЛС/П [16]

5.8. Типоряд установок для СЛС/П, использующих подход Bed Deposition

5.8.1. DTM — 3D System's-машины для СЛС/П

В апреле 2005 года 3D Systems анонсировала машину Sinterstation Pro (рис. 5.17), которая наряду с модулем БП включает станцию для очистки изделия от излишков порошка, модуль для восстановления свойств порошка после его многократного использования, замкнутую систему контроля над процессом синтеза, возможность предварительного подогрева рабочей камеры, генератор азота, камеру охлаждения. Pro 230 имеет размер рабочей камеры 550 × 550 × 750 мм и стоит ~$750 000. Другой продукт фирмы — Sinterstation HiQ (апгрейд известной серии машин Vanguard — см. ее параметры по табл. 5.5). Тогда же 3D Systems были предложены два новых порошковых материала: DuraForm Flex — пластик с резиноподобными свойствами, DuraForm AF — полиамид, наполненный алюминием.

Рис. 5.17. Машина Sinterstation Pro с дополнительными модулями

Таблица 5.5. Спецификация установки для СЛС фирмы 3D Systems

Модель	VanguardTM si2TM SLS®
Процесс	Селективное лазерное спекание
Тип лазера	CO_2
Мощность лазера, Вт	25 или 100
Размер пятна, мм	0,47
Максимальная скорость сканирования, мм/с	7500 (стандартная система доставки лазерного излучения), 10 000 (Celerity™ BDS)
Разрешение по *XY*, мм	0,178
Размер рабочей камеры, мм	370 × 320 × 445
Минимальная толщина слоя, мм	0,076
Размер установки, *XYZ*, м	2,1 × 1,3 × 1,9
Среднее время на один слой, с	10
Рабочая станция	933 МГц Pentium III Windows 2000 OS
Потребляемая мощность	240 VAC, 12,5 кВт, 50/60 Гц, 3 фазы

Рис. 5.18. DSLS(M)-процесс — установка EOS M250Xtended (спекаемый объем 250 × 250 × 180 мм, CO_2-лазер мощностью 240…180 Вт, толщина слоя 0,02 мм, точность ±0,05 мм)

Рис. 5.19. Машина фирмы ARCAM AB

5.8.2. Установки EOS GmbH

Европейский производитель EOS GmbH сейчас производит серии машин EOSINT P (для работы с термопластиками), EOSINT S (печной песок), EOSINT M (рис. 5.18) (металлические порошки). Индексы 250, 385, 750 (табл. 5.6) характеризуют размеры зоны построения модели. В машинах серии 700 используются два лазера, что позволяет существенно увеличить скорость построения. Из порошковых материалов фирмой EOS в последние годы были предложены металлополимерный (30% Al + нейлон) порошок, смесь для тонких стенок (~2 мм) UL94, в работе кобальт-хромовые, титановые, железоникелевые сплавы и даже золото.

5.8.3. Электронно-лучевое плавление — Acram's Electron Beam Melting (EBM)

Аналитики БП считают очень перспективной разработку шведской фирмы ARCAM AB, в которой процесс спекания (сплавления) порошков осуществляется в вакууме при воздействии на него электронного пучка (рис. 5.19, спецификация приведена в табл. 5.7). Машина EBM — Electron Beam Melting S12 (~$499 000) — может работать с порошками нержавеющей стали, смеси Inconel, титановых и кобальт-хромовых сплавов. Работа в вакууме позволяет избежать нежелательного окисления, азотирования и прочих явлений, которые наблюдаются при ЛВ на воздухе, а высокий КПД электронной обработки в сравнении с лазерной обеспечивает хорошие перспективы для данной методики на производстве при получении полностью литых изделий. Нагрев камеры до 750 °C позволяет минимизировать напряжение при послойном синтезе. Проблематичным в данном подходе следует признать зависимость диаметра пятна электронного луча от тока накачки. Это не позволяет надеяться на получение строго управляемых тонкостенных изделий.

5.8.4. Процессы Laser cusing (Concept Laser GmbH)

Еще один флагман порошковой технологии АП, Concept Laser GmbH — Hofmann Innovation Group (машины серии M1, M2 или, например, M3 Linear — $550 000),

Таблица 5.6. Спецификация машин EOS для БП

Параметр	EOSINT P 360	EOSINT M250 Xtended	EOSINT S	EOSINT P 700
Тип лазера	CO_2	CO_2	CO_2	CO_2
Лазерная мощность, Вт	50	Минимум 200	2 × 50	50
XY-скорость развертки, м/с	5	3	5	5
Разрешение по *XY*, мм	±0,05	±0,05	±0,05	±0,05
Размер рабочей камеры, мм	340 × 340 × 620	250 × 250 × 185	700 × 380 × 380	700 × 380 × 580
Толщина слоя, мм	0,1...0,2	0,05...0,1	0,2	0,15
Размер установки, м	2,15 × 1,3 × 1,25	1,95 × 1,85 × 1,1	2,1 × 1,4 × 1,4	2,1 × 1,41 × 2,27
Рабочая станция	PC Pentium Win 95, Win NT	PC Pentium Win 95, Win NT	PC Pentium Win 95, Win NT	PC Pentium Win 95, Win NT
Потребляемая мощность	400 VAC, 32 A	400 VAC, 32 A	400 VAC, 32 A	400 VAC, 32 A

Таблица 5.7. Acram — электронно-лучевая установка

Модель	ARCAM EBM S12
Размер, мм	1800 × 900 × 2200
Рабочий объем, мм	250 × 250 × 200
Скорость сплавления, м/с	0,5...1 (в зависимости от материала)
Толщина слоя, мм	0,05...0,5
Скорость сканирования электронным лучом	До 1 км/с
Точность позиционирования электронного луча, нм	+50
Вакуумная установка	4,5 бар, 0,1 $м^3$/ч
Потребляемая мощность	3 × 400 В, 32 А
Рабочая станция	PC, Windows NT
Программное обеспечение	Arcam, Magics RP/Materialise

создал установку, сочетающую в едином подходе процессы лазерной маркировки, наплавки порошка и лазерной обработки (рис. 5.20). Установка оснащена системой восстановления отработанного порошка. Работа идет с порошками нержавеющей и инструментальной стали, сплавами железо-медь, кобальт-хром, Inconel. При толщине сплавляемого слоя ~25...100 мкм и диаметре лазерного луча 0,15...0,2 мм (Nd-YAG-иттербиевый лазер) удается получать практически литые изделия. Титановые и алюминиевые порошки находятся в стадии разработки.

5.8.5. Установки Phenix Systems, SLM Solution, Renishaw

Спрос рождает предложение, и на рынке машин для СЛС/П в последние десятилетия появилось большое количество фирм, оригинальность конструкции выпускаемых которыми установок порой тяжело обнаружить. Так, в 2004 году молодая французская фирма Phenix Inc. (коллектив единомышленников 15–20 человек). разработала машину PM100 для СЛС/П (рис. 5.21), отличительной особенностью которой являлась интегрированная в технологический процесс печь, позволяющая получить температуру до 900 °С, что принципиально важно для синтеза керамических изделий (порошки Al_2O_3, ZrO_2 их смеси). Машина оснащена волоконным

Рис. 5.20. Внешний вид установок фирмы Hofmann Innovation Group

Рис. 5.21. Внешний вид установки для СЛС фирмы Phenix

лазером (50 и 100 Вт), с диаметром пятна ЛИ ~60 мкм, могла работать с порошками с частицами микрометрового размера (~20 мкм) и создавать слои толщиной ~20 мкм. Последняя версия данной машины PM250 (цифрой обозначен рабочий объем) еще довольно широко распространена в исследовательских лабораториях Европы, а фирма продала свой патент индустриальному гиганту АП 3D Systems и, похоже, прекратила существование.

Компания SLM Solution (Германия) — еще один из недавно созданных молодых «гигантов» индустрии АП. Выпускает установки для лазерного послойного плавления порошков с различным объемом камеры синтеза — от 250 до 500 × 280 × 335 мм. Машина SLM 280 (рис. 5.22) стоит около 250 тыс. евро, в нее может быть интегрирован второй лазер мощностью 1000 Вт. Внешний контур детали и тонкие стенки прорабатывает первый лазер мощностью 400 Вт, а внутреннее сечение детали — второй, мощный лазер. Использование второго лазера, видимо, считается оригинальным решением SLM Solution, хотя в начале 1990-х уже был известен патент одного из институтов Фраунгофера на использование двухлучевой системы сканирования.

Компания Realiser (Германия) ранее работала совместно с SLM Solutions, поэтому ее установки имеют много общего с машинами бывшего партнера. Особенностью машин Realiser (2010 год) является оригинальная оптическая система, уменьшающая диаметр пятна лазера и позволяющая строить детали с повышенной точностью, но на уменьшенной зоне построения. Из линейки машин Realiser выделяются модель SLM 50 класса Desktop и SLM 100 (рис. 5.23), наименьшие из всех «металлических» машин и подходящие как для проведения НИР, так и для изготовления ювелирных изделий и дентальных имплантатов.

Рис. 5.22. Установка SLM Solution 280M

Компания Renishaw производит две машины — AM 125 и AM 250 (рис. 5.24, спецификация приведена в табл. 5.8), которые во многом похожи на установки SLM Solutions. Достоинство этих машин — высокая степень герметизации рабочей камеры, что позволяет вакуумировать ее перед началом построения, а после заполнения камеры аргоном (или азотом — для нереактивных металлов) — обеспечивать рабочий процесс при концентрации кислорода в камере ниже 50 ppm и весьма умеренном расходе инертного газа.

Рис. 5.23. Машина Realiser SLM 100

Рис. 5.24. Машина AM 250 компании Renishaw

Таблица 5.8. Спецификация машины AM 250

Параметр	AM250
Максимальный размеры камеры	250 × 250 × 300 мм Ось *Z*, расширяемая до 360 мм
Скорость построения	5...20 см^3/ч
Скорость сканирования ЛИ	До 2000 мм/с
Скорость позиционирования (максимальная)	7000 мм/с
Толщина слоев	20...100 мкм
Диаметр пятна ЛИ	70 мкм (диаметр в плоскости порошка) 135 мкм (диаметр при лазере мощностью 400 Вт)
Мощность лазера (опционально)	200 Вт или 400 Вт
Внешние размеры	1700 × 800 × 2025 мм
Вес	Общий — 1225 кг, нетто — 1100 кг
Потребляемая мощность	230 В, 1 фаза, 16 А
Рабочие порошки	Нержавеющие стали 316L и 17-4PH, сплавы алюминия AlSi10Mg, титана Ti6Al4V, кобальт-хрома (ASTM75), inconel 718 и 625

5.9. Типоряд установок для Direct Deposition

Используются следующие лазерные методики:

- процесс лазерного инжиниринга точных форм (*Laser Engineered Net Shaping* (*LENSTM*), Optomec Inc., США, с 2000 года; Sandia National Laboratories & Sandia University, США, 1996) — см. раздел 5.9.1;
- направленное нанесение металла (*Direct Metal Deposition* (*DMD*), POM, AeroMet, Accufusion Inc., Michigan University, США, 1993) — см. раздел 5.9.2;
- Aeromet Corporation's Lasform Technology-процесс — см. раздел 5.9.3;
- объемная лазерная наплавка (*3D Laser Cladding*, Liverpool University, Великобритания, 1994) — см. раздел 5.9.3;
- объемная лазерная сварка (*3D Laser Welding*, Southern Methodist University, США, 1999) — см. раздел 5.9.3;
- объемная лазерная генерация (*3D Laser generating*, Fraunhofer-Institute of Production Technology (IPT), Германия, 1994) — см. раздел 5.9.3;
- Irepa Laser (EasyCLAD — Construction Laser Additive Directe, Франция);
- EBDM — E-beam Direct Manufacturing (Sciaky, США).

Идейно эти методики имеют много общего, поскольку базируются на похожих технологических процессах соосной ЛИ подачи порошка (проволоки).

Так, в LENS-методике, в отличие от процесса СЛС/П (видимо, он и был взят за основу), ЛИ большой мощности (рис. 5.25) используется, чтобы расплавить порошок металла, доставляемый в зону наплавки соосно лазерному лучу через специальное сопло. ЛИ идет по центральной части сопла и фокусируется одной или более линзами. Координатный стол (или сопло) перемещается по направлениям *X*, *Y*, *Z*, чтобы сплавить каждый слой 3D-объекта. Порошковый материал поставляется и распро-

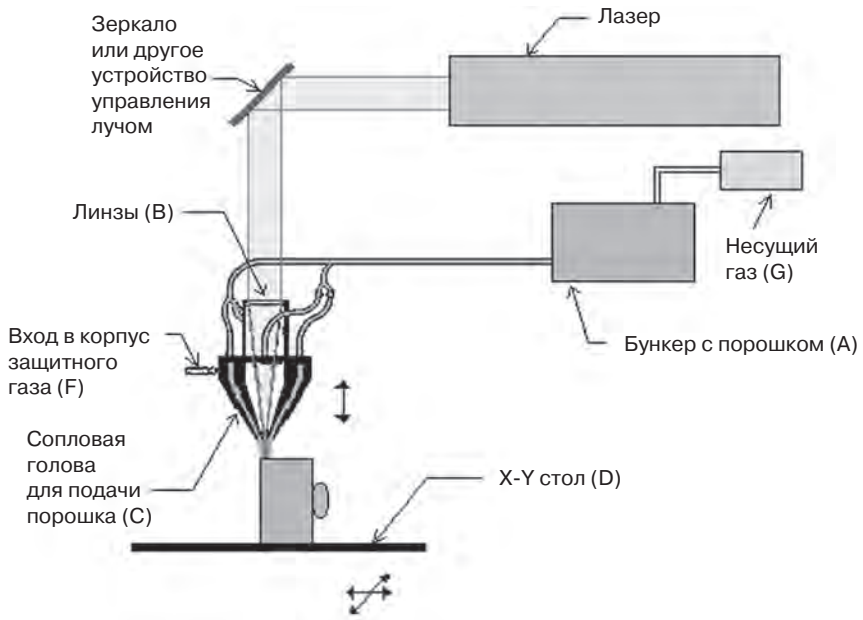


Рис. 5.25. LENS-процесс лазерного формования

страняется вокруг окружности сопла самостоятельно или с использованием транспортного газа. Газ применяется также для того, чтобы экранировать зону наплавки от атмосферного кислорода, защитить оптику, снизить окисление и обеспечить высокую смачиваемость поверхности. А также того, чтобы процессом было легче управлять.

Здесь может быть использован целый ряд порошковых материалов: нержавеющая сталь, сплав Inconel, медь, алюминий, титан, никель, вольфрам и т. п. Состав порошковой композиции может меняться динамически и непрерывно в зависимости от целей синтеза.

5.9.1. Процесс лазерного формования

Процесс лазерного формования, или лазерного инжиниринга точных форм, — Optomec's Laser Engineering Net Shaping (LENS), запатентованный Optomec Inc., США, будучи изначально ориентированным на применение металлических порошков, использует лазер на Nd:YAG (λ = 1,06 мкм). PartPrep software используется для обработки STL-файлов, а LENS Work Station Control software — для управления синтезом. Принципиально важной особенностью LENS-процесса является подача порошка через сопло соосно падающему ЛИ. Например, в LENS-установке серии 850-R (2003 год) (табл. 5.9) уже предлагается наряду со стальными порошками использовать сплавы на основе никеля, алюминия, кобальта, титана, в том числе с легирующими добавками, типа Ti-6Al-V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2MO, Ti-48Al-2Cr-2Nb, Ti-22Al-23Nb. Установка теперь оснащена 5- и 7-координатным манипулятором, мощность диодного волоконного лазера увеличена с 500 до 4000 Вт, скорость наплавки — от 66 до 197 см^3/ч, а стоимость машины ~$830 000...1 400 000. Технология широко применяется для восстановления изношенных поверхностей деталей машин и не требует предварительной подготовки поверхности (рис. 5.26, *а*).

а *б*

Рис. 5.26. Установки фирмы Optomec Inc., США: *а* — LENS 750, 550 Вт (Nd-YAG-лазер), точность позиционирования по *X*–*Y* ±0/003, *Z* ~ 0,02 дюйма; *б* — M3D, 5 Вт лазер (532 нм), рабочее поле 305 × 305 мм

Довольно перспективной является разработка Optomec Inc., США, для миниатюрных объектов электроники — микрочипов, сенсоров, биомембран, дозаторов лекарств, имплантатов, названная Maskless Mesoscale Material Deposition (M3D) (рис. 5.26, *б*). Производителями заявлено, что ширина наплавляемой дорожки может составлять ~25 мкм, а ее толщина 10...75 мкм. Для работы могут использоваться порошки нанометрового диапазона (до 20 нм, скорость осаждения 10^8 частиц в секунду), что крайне перспективно в свете современных тенденций развития наноиндустрии.

Таблица 5.9. Спецификации Optomec's LENS™ систем (Courtesy Optomec Inc.)

Параметр	LENSTM 750	LENSTM 850
Процесс	LENS	LENS
Размер рабочей камеры, мм	300 × 300 × 300	460 × 460 × 1070
Тип лазера	Nd:YAG — одна головка	Nd:YAG — две головки
Мощность лазера, Вт	600	1000
Длина волны, мм	1064	1064
Разрешение по *XY*, мм	0,5	0,5
Разрешение по *Z*, мм	5	5
Размеры установки, мм	1830 × 1040 × 2080	1170 × 1245 × 2080
Вес установки, кг	2540...2858	2540...2858
Потребляемая мощность	208 или 240 VAC, 3 фазы, 75 А	460 VAC, 3 фазы, 75 А
Рабочая станция	Pentium III Windows NT	Pentium III Windows NT
Используемые материалы	Нержавеющие стали, инструментальная сталь H13, титан, суперсплавы типа Inconel с добавками вольфрама, меди, алюминия	

5.9.2. Направленное нанесение металла POM's Direct Metal Deposition (DMD)

В DMD-установке фирмы POM используется CO_2-лазер: скорость наплавки от 14 до 147 см^3/ч, толщина слоев 0,3...0,6 мм, шероховатость слоев ~0,125 мм. Европейский лазерный гигант фирма Trumpf, используя лицензию POM Inc., создала собственные установки DMD-505 и -5000 с 5-координатным манипулятором и опцией вращения, размером рабочего пространства 200 × 106 × 61 см, оригинальным сопловым блоком, 4–5 бункерами для различных порошков (то есть в них имеется возможность создания ФГ-слоев и изделий), лазером мощностью 5 кВт (рис. 5.27).

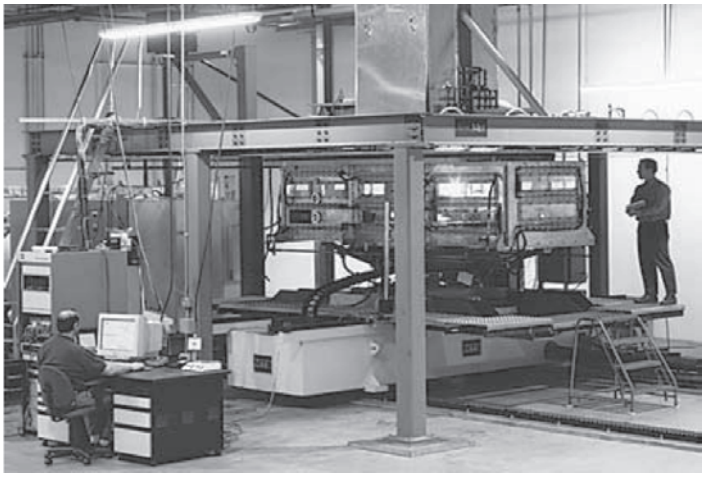
Рис. 5.27. Установка фирмы Trumpf для послойной 3D-лазерной наплавки

Видеомониторинг процесса наплавки (точность позиционирования, размер сварной ванны — см. рис. 5.10) позволяет в замкнутом цикле управлять параметрами технологического процесса и обеспечивает толщину стенок ~0,75 мм. Анонсировано применение порошков никелевых, медных, кобальтовых, вольфрамовых сплавов, керметов, нержавеющей и инструментальной сталей. Заметим, что DMD все-таки пока позиционируется как технология для восстановления изношенных поверхностей, но не синтеза 3D-изделий, однако и работы по БП идут полным ходом.

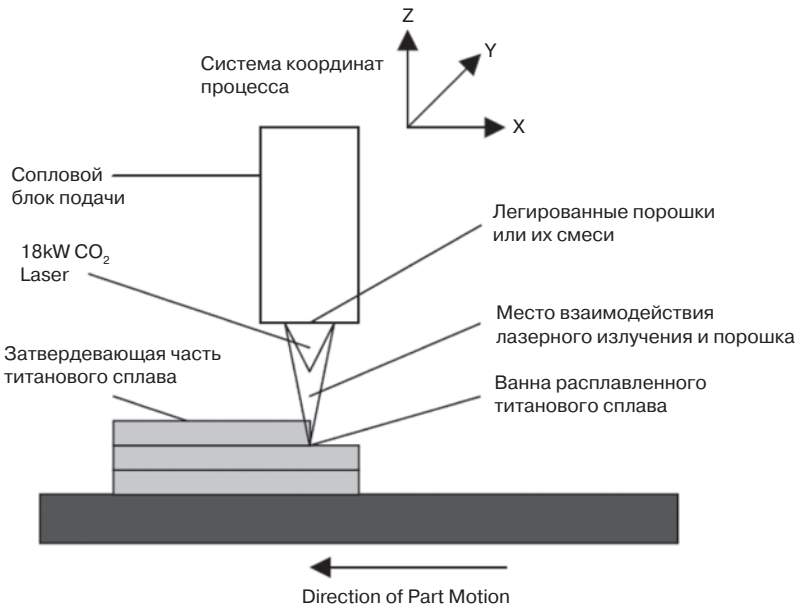
5.9.3. Процессы Lasform Technology, 3D Laser Cladding, 3D Laser Welding

Процесс Aeromet Corporation's Lasform Technology (рис. 5.28) использует ЛИ, которое подается соосно потоку порошка (например, титанового сплава Ti-6AL-4V) в зону обработки (рис. 5.28, *б*). Трехкоординатная портальная система позиционирует сопловой блок относительно платформы, где идет сплавление порошка. Процесс ориентирован на титановые сплавы, идет в защитной среде аргона и очень напоминает DMD-технологию.

Объемная лазерная наплавка (3D Laser Cladding), которой занимаются в Liverpool University (Великобритания) — это фактически продолжение их работ по поверхностной наплавке, применяемой традиционно для восстановления деталей машин. Каких-либо новых идейных решений на сайте группы http://www.lasers.org.uk/Liv/applications.htm не отмечается.



а



б

Рис. 5.28. Lasform Technology: *а* — внешний вид установки Aeromet Co; *б* — схема процесса

Объемной лазерной сваркой (3D Laser Welding) занимаются в Центре по БП в Southern Methodist University (США). Здесь предложено совмещение LENS- и/или DMD-процессов с процессами аргонно-дуговой сварки (АДС). АДС, будучи более дешевой и высокоэнергоемкой по сравнению с другими видами, является фактически способом быстрого разогрева области БП. Очистку от окалины и грата, возникающих после лазерной сварки, проводят автоматизированной газо- и водоструйной обработкой.

Процесс 3D Laser generating был анонсирован в Fraunhofer Institute of Production Technology (IPT) (Германия) еще 1994 году. Так что это в некотором роде пионер процесса 3D-лазерной наплавки (сварки). В исследованиях данной группы были интересные предложения по использованию *двух соосно совмещенных лазерных лучей разных длин волн для процесса наплавки*. Полезность этого начинания может заключаться в том, что поглощательные способности разнородных материалов или даже одного и того же материала, но при разных температурах значительно различаются. Умело управляя этой характеристикой, можно изменять условия нагрева и плавления материалов при наплавке. Кроме того, КПД ЛИ невысок, и выбор более экономичного, но более мощного для данного материала источника ЛИ может быть целесообразен.

5.9.4. Процесс EasyCLAD — Construction Laser Additive Directe (Франция)

Французская компания Irepa Laser (BeAM — Be Additive Manufacturing, Франция), видимо, идет по следам фирмы Pheinix Inc. (см. раздел 5.8.5) и, отвечая современным запросам промышленности, осуществила коммерческую реализацию технологии EasyCLAD (CLAD — Construction Laser Additive Directe). Irepa Laser предлагает несколько типов машин для объемной лазерной наплавки — с возможностью выбора размеров рабочей зоны, мощности лазера и одно- или двухсопловой системы ввода порошковых материалов в зону расплава. В зависимости от применяемого сопла ширина наносимого слоя варьирует от 0,6 до 5 мм. В рабочей камере поддерживается инертная атмосфера с содержанием $O_2 < 40$ ppm и $H_2O < 50$ ppm. Модель MAGIC LF6000 с рабочей зоной построения $1500 \times 800 \times 800$ мм оснащена двумя соплами для подачи строительного материала (рис. 5.29). Базовая цена машины — около €750 000. На рис. 5.30 показан результат объемной лазерной наплавки по технологии EasyCLAD — сандвич-структура из титанового сплава, имитирующая аэродинамический профиль крыла. Как видно, качество чистоты поверхности и точность воспроизведения очень далеки от Bed Deposition-методик (см. разделы 5.8.1–5.8.5).

Рис. 5.29. Машина MAGIC LF6000

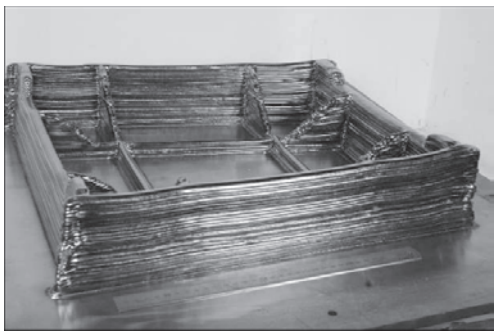
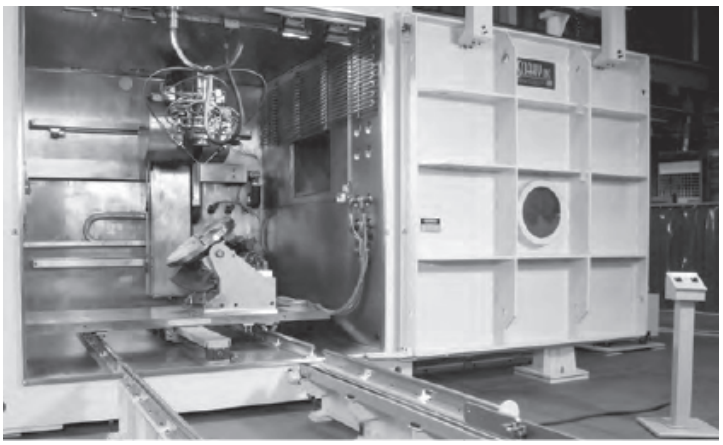


Рис. 5.30. Сандвич-структура из титанового сплава, имитирующая аэродинамический профиль крыла

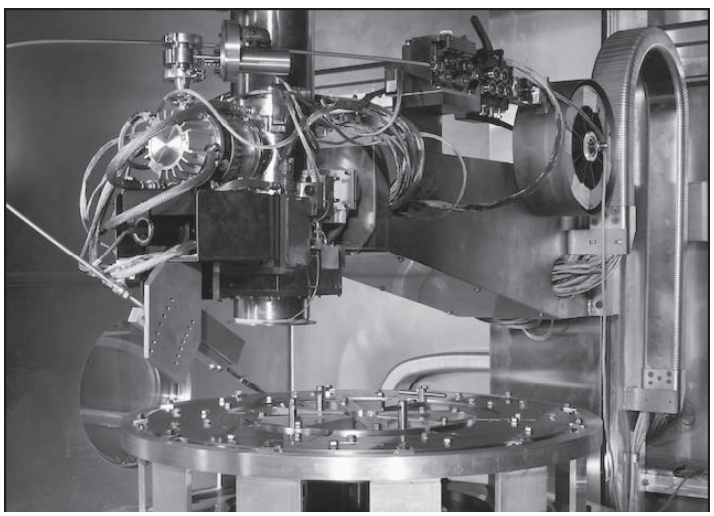
5.9.5. Процесс EBDM

Компания Sciaky (США), ранее специализировавшаяся на разработке технологий и оборудования для сварки, предложила свой процесс АП. В машине компании Sciaky (рис. 5.31) деталь строится методом послойного наваривания материала в расплаве, сформированном электронным лучом (рис. 5.31, *б*). Эта технология была названа EBDM — Electron beam Direct Manufacturing, здесь в качестве исходного материала используется не порошок, а проволока.

Схематически блок электронной пушки с боковым вводом расходной проволоки (рис. 5.31, *б*) более детально представлен на рис. 5.32. Высокая производительность (7...18 кг/ч) технологии EBDM позволяет выращивать детали, размеры которых исчисляются метрами, что невозможно или чрезмерно дорого обеспечить при использовании других АТ. Сам принцип формирования детали, к сожалению,



а



б

Рис. 5.31. Установка для EBDM фирмы Sciaky: *а* — внешний вид; *б* — блок электронной пушки с боковым вводом расходной проволоки

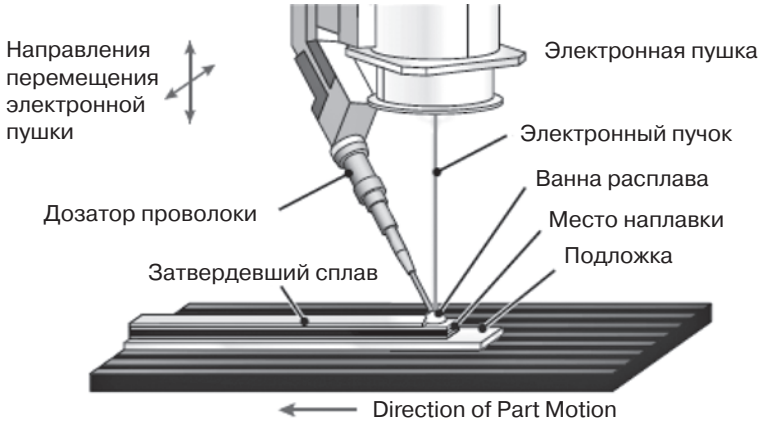


Рис. 5.32. Схема подвода расходной проволоки и электронного луча

Рис. 5.33. Изделие, созданное по технологии EBDM фирмы Sciaky, до и после механообработки

обусловливает низкое качество поверхности синтезированной детали, однако последующая механообработка позволяет получить результат с приемлемыми затратами (рис. 5.33).

В настоящее время компания производит базовую модель Sciaky's DM с размерами зоны построения $5700 \times 1200 \times 1200$ мм. Машина позволяет в автоматическом режиме последовательно строить до 10 различных деталей в течение одного цикла вакуумизации рабочей камеры. Стоимость машины — более $2 млн. Металлическая проволока может быть сделана из широкого спектра материалов: никелевых сплавов, нержавеющих и инструментальных сталей, сплавов Co-Cr.

Таким образом, краткий обзор типоряда установок для Direct Deposition показывает, что отличие описанных в разделах 5.9.1–5.9.5 методик друг от друга чисто формальное, связанное порой, по нашему мнению, с желанием их авторов войти в историю. Сопряжение лазерной головки с 3–5-координатным столом (взято из SDM-методики) превращает объемный синтез из послойного в процесс, подобный работе скульптора. Для увеличения поглощательной способности порошко-

вого материала соосно можно подавать ЛИ сразу нескольких длин волн. Конечно, использование электронного пучка и проволоки резко увеличивает производительность процесса синтеза. Использование нескольких сопл одновременно (взято из методики трехмерной печати), целенаправленное чередование материалов при наплавке слоев (взято из SDM- и FDC-методик) позволяет формировать функционально-градиентные объемные изделия [1]. Вопросы оптимизации и воспроизводимости процесса, расчет тепловых полей и напряжений решаются, поскольку подходы к ним отработаны, как отмечалось ранее, на примере других подобных методик (SLA, SLS, LOM и т. д.).

DMD-, 3D welding-, LENS-методики позволяют изготовлять полностью литые (монолитные) 3D-объекты с хорошими металлургическими свойствами за разумное время (зависит от материалов и сложности формы). Изделия обычно требуют чистовой механической обработки. Но у них хорошо сформированная структура зерна и имеются некоторые особенности, позволяющие надеяться на приобретение изделиями свойств, даже лучших, чем у исходных материалов. Таким образом, методики объемной лазерной наплавки являются в настоящее время наиболее перспективными методами АП для создания функциональных готовых изделий любой наперед заданной формы.

5.10. Другие установки, работающие на основе порошковых материалов

5.10.1. Процесс Fraunhofer's Multiphase Jet Solidification

Два института, Fraunhofer Institute for Applied Materials Research (IFAM) и Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation (IPA), объединились для разработки процесса Multiphase Jet Solidification (MJS). Легкоплавкий сплав или порошок-связующее выдавливается из соплового блока (рис. 5.34), что напоминает FDM-процесс (см. раздел 4.5, где для экструзии используется проволока).

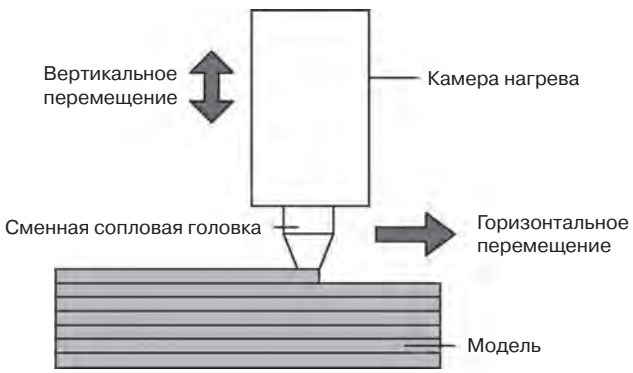


Рис. 5.34. Схема работы MJS-процесса

Литейный воск, сплавы на основе цинка или алюминия могут быть использованы в процессе синтеза. К легкоплавкому связующему могут быть примешаны порошки тугоплавкой керамики (Al_2O_3, ZrO_2) или титан, что расширяет область применения данного процесса.

5.10.2. Процесс Soligen's Direct Shell Production Casting

Компания Soligen Technologies Inc. приобрела патент MIT по 3D-печати (см. раздел 5.12) для развития своей методики Direct Shell Production Casting (DSPC) (рис. 5.35). Это не лазерный метод создания изделий. Порошок разравнивается роликом на платформе, а затем в нужных местах скрепляется за счет впрыска связующего из струйной головки принтера. После создания слоя наносится новый, и процесс повторяется. В табл. 5.10 указаны параметры установки DSPC 300.

Рис. 5.35. Внешний вид установки DSPC

Таблица 5.10. Спецификация установки DSPC 300

Параметр	DSPC 300
Процесс	Direct Shell Production Casting
XY-разрешение, мм	0,05
Размер рабочей камеры, мм	304 × 304 × 304
Толщина слоя, мм	0,178
Скорость вертикального роста, мм/ч	12,7...19,0
Размеры установки, м, оценочно	2300 × 1300 × 2600
Система управления	EWS
Потребляемая энергия	110 или 220 VAC, 10 A

Установка производит в основном керамические формы для литья.

Процесс, применяемый в компании Generis RP Systems (GS), также базируется на патенте MIT по 3D-печати. Фирма Soligen, обладатель патента MIT, выдала разрешение Generis выпускать в США установки GS 1500, на которых производят песчаные формы для литья.

5.10.3. Therics Inc.'s Theriform-процесс

Биофармацевтическая компания Therics Inc. также взяла за основу патент MIT по 3D-печати, но смогла запатентовать собственный процесс TheriFom™. Выпускает машины серий 1100 и 2100 для *биомедицинских приложений*. По данным магниторезонансной терапии (МРТ) и компьютерной томографии (КТ) формируется CAD-файл данных будущего имплантата.

На рис. 5.36 показан технологический процесс TheriFom™. Принтерная головка формирует капли связующего (возможно, фармацевтического препарата), которые внедряются в порошок биополимера. Эти капли высыхают (застывают) и формируют слой. Платформа опускается, новый слой полимера разравнивается, и процесс повторяется.

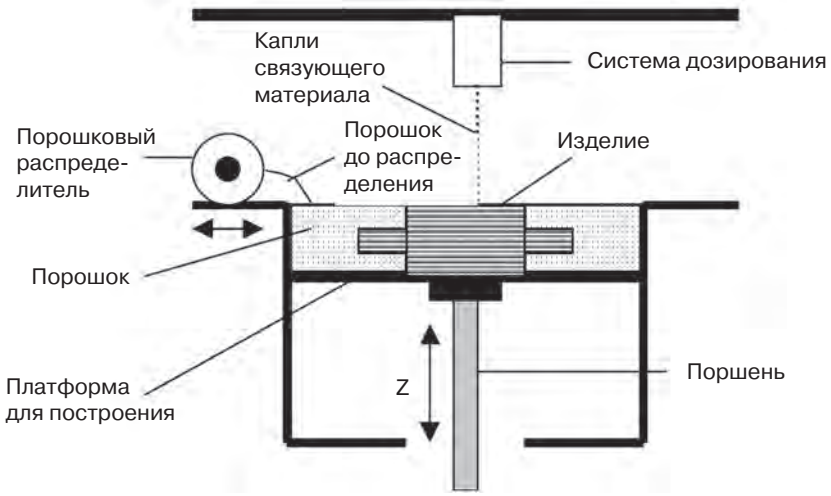


Рис. 5.36. Схема процесса TheriForm™

5.11. Эволюция от настольного 2D-принтера к аддитивным 3D-технологиям

Настольные струйные и лазерные принтеры были, по-видимому, прототипами принтеров для трехмерной (3D) печати. Как в свое время был совершен технологический рывок, выразившийся в переходе от больших ЭВМ к персональным компьютерам (ПК), так на наших глаза фактически осуществляется переход к новому технологическому укладу общества. 3D-принтеры — это устройства, которые в последнее десятилетие за счет своей дешевизны (см. раздел 4.11 «Движение RepRap и народный 3D-принтер») становятся доступными обыкновенным людям в форме *персональных фабрикаторов* (*ПФ*). Это время близко, хотя последствия такого перехода могут быть посерьезнее перехода к ПК, потому что будет персонализирован и переведен в цифровое представление компьютеров реальный физический мир, окружающий нас.

С философской точки зрения ПФ — это такие машины будущего, которые не просто будут делать другие машины, как настольный принтер печатает сейчас изображения этих машин. Под ПФ мы будем подразумевать не только машины, способные изготовить трехмерные структуры и изделия, но интеграцию воедино логики, чувств, действия и внешнего вида 3D-объекта, то есть все, что нужно, чтобы этот объект как законченная система стал полностью функциональным. Имея ПФ, вместо того чтобы пойти в магазин или воспользоваться сервисом по доставке товаров, вы сможете, описав компьютеру, что хотите, и снабдив фабрикатор материалами (набором картриджей), сделать его сами.

Проектирование и программирование ПФ — не футуристическое пророчество, а реальность сегодняшнего дня [17]. Завтрашний мир может быть мимолетным видением машин, окружающих нас сегодня. ПФ будет сохранять в памяти и сможет вам рассказать, как придумывали и производили великие машины прошлого (первый печатный станок, автомобиль, аэроплан и т. д.), он объяснит, из чего их делали и как они работали.

5.12. Физические основы трехмерной печати

Процесс трехмерной печати (3D printing, InkJet technology) был предложен в 1993 году Эмануэлем Сачсом (Emanuel Sachs) из Массачусетского технологического института. Впоследствии установки 3D-печати начала производить фирма Soligen, Co., США. Основы процесса таковы (рис. 5.37).

1. Слои порошка равномерно распределяются и укатываются (трамбуются) на поддоне-основании.
2. Порошковый материал связывается послойно расплавом из нагреваемой принтерной головки, которая сканирует поверхность порошка.
3. Процесс повторяется до завершения синтеза.

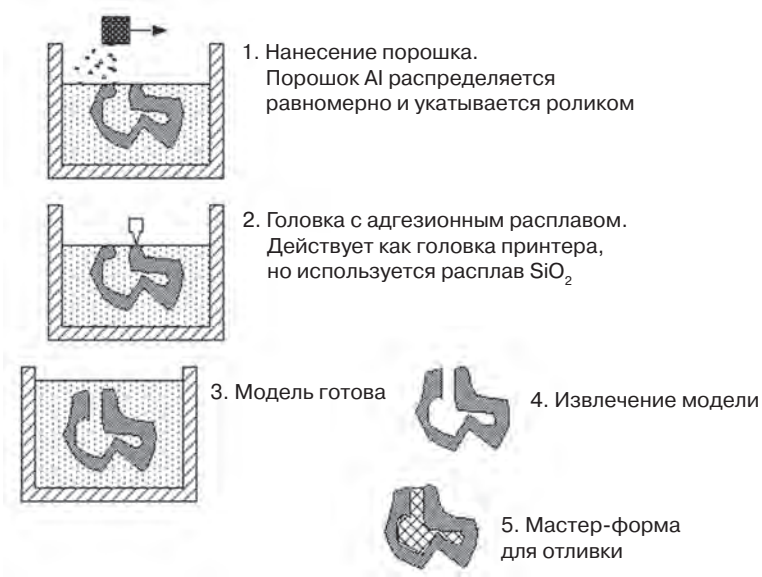


Рис. 5.37. Процесс трехмерной печати

Как видите, метод напоминает FDM(C) подход (см. раздел 4.5). Но существуют и свои особенности. Несвязанный порошок вокруг модели поддерживает и предохраняет ее от разрушения. По окончании процесса его удаляют. Созданные оболочки могут быть использованы в качестве литьевых форм. Формы могут сразу включать литниковую систему для заливки расплава металла. Рабочий размер камеры для синтеза составляет ~20,3 × 30,5 × 20,3 см, разрешение принтерной головки ~180 мкм. Используются следующие порошковые материалы: карбиды кремния, алюминия, циркония, оксиды алюминия, кремния.

Преимущества методики: прямое производство литьевых форм; можно использовать различные крупнозернистые порошки; литьевые формы выдерживают металлический расплав; уменьшается время изготовления, так как исключаются промежуточные этапы синтеза; возможно производство сложноконтурных изделий; форма может быть очищена в щелочных ваннах; много образцов можно синтезировать за один раз; материалы нетоксичны; коробления и деформации готовых изделий незначительны; перемещение головки и связывание порошка идет

быстрее, чем при лазерной обработке; синтезируемые образцы можно использовать не только для литья.

Недостатки: шероховатость поверхности до 0,175 мм; точность ±0,05 мм; несвязанный порошок может закупоривать полости детали; принтерная головка может также закупориваться.

Метод трехмерной печати также внес в теорию и практику БП ряд полезных новшеств. Это конструкции сопл для многокомпонентных порошков, использование водных растворов порошков (slurry) для нанесения слоев (например, Si_3N_4 + + Al_2O_3 + Y_2O_3 в растворе полиэтиленгликоля, SiC в растворе полиизобутана), что уменьшает запыление при подаче порошков через сопло и позволяет работать с мелкодисперсными фракциями.

5.13. Материалы для трехмерной печати

5.13.1. Полимеры

Исследование плавления полимеров (свечной и литейный воск) показало возможность управления процессом образования капель расплава, что было важно для технологических применений в печати. Были разработаны три подхода (модели) для описания образования микрокапель при 3D-печати: столбчатая, колебательная и линейная. В зависимости от контактного угла смачивания, размера капли, частоты колебания можно формировать различные условия нанесения капель на подложку при печати (рис. 5.38).

На рис. 5.39 показано, как изменение скорости перемещения печатающей головки принтера влияет на качество образования вектора прохода. Последние исследования показали возможность печати воском при температуре 80 °С (это на 10 °С ниже температуры плавления данного материала), при этом получаются слои толщиной 13...16 мкм.

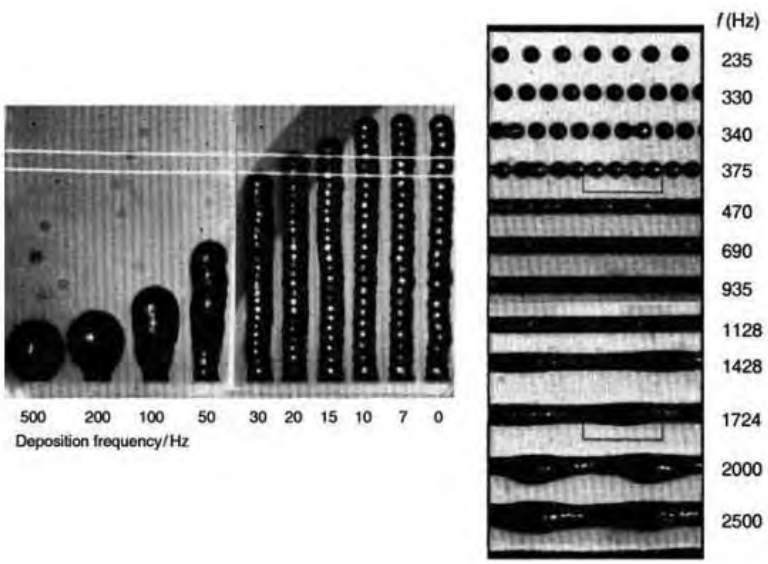


Рис. 5.38. Столбчатое и линейное образование капель в зависимости от частоты

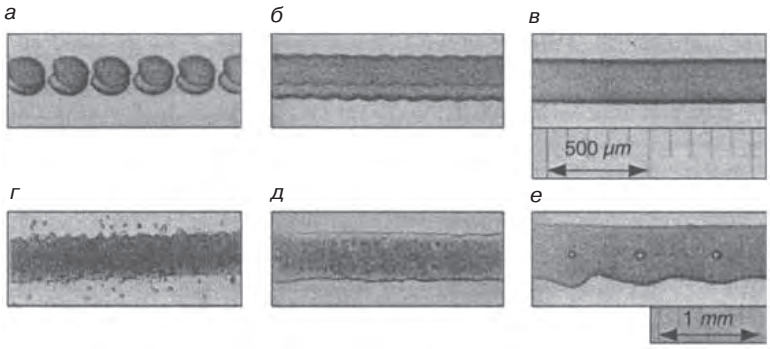


Рис. 5.39. Влияние скорости на каплеобразование

5.13.2. Керамика

Керамические суспензии также привлекательны для 3D-печати. Как и в случае с полимерами, в ходе исследований суспензии с оксидом циркония удалось определить оптимальные режимы подачи капель на подложку в зависимости от скорости перемещения сопла, расстояние между каплями при импульсном впрыске, ширину и высоту одного прохода. Интересно было знать, при каких условиях отдельно расположенные капли начинают формировать сплошную линию, какова морфология структуры затвердевших капель — шероховатость поверхности, трещины, каналы, поры на ней.

Подобные исследования суспензии, содержащей оксид алюминия в среде воска, также были успешны.

5.13.3. Металлы

Наконец, в суспензию могут быть добавлены металлы — медь, алюминий, олово, ртуть, различные припои. Работы со сплавом висмута, свинца и олова показали возможность создания капель размером от 47 до 280 мкм при его подаче через сопло диаметром 150...250 мкм. Используя пьезоактивацию, получили капли контролируемого размера в сплаве Bi-Pb-Sn-Cd-In, имеющем температуру плавления 47 °C (рис. 5.40). Как видите, было достигнуто высокое разрешение при печати.

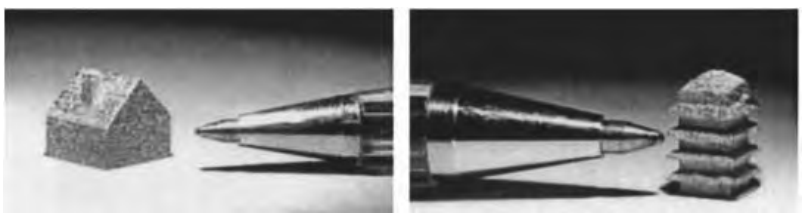


Рис. 5.40. Пример 3D-печати металлом

5.13.4. Создание цветовых оттенков изделия

Использование нескольких суспензий, расплавов полимеров, подаваемых через отдельное сопло, — основной путь создания цветовых оттенков у 3D-изделия. Оперативное управление работой нескольких печатающих головок осуществляется

программными средствами. Характер взаимодействия цветовых суспензий на подложке при высыхании (затвердевании) является самостоятельной задачей технологии 3D-печати. У многих машин процессы очистки, переналадки оборудования с одного материала на другой, несовместимость некоторых суспензий друг с другом являются проблемными факторами.

Например, для технологии ZCorp стоит отметить высокую скорость печати. А использование четырех печатающих головок вместо одной позволяет создавать цветные модели. В этом случае одна головка распыляет прозрачное клеящее вещество, а три дополнительных — клеящее вещество с красителями трех основных цветов. Принтеры от компании ZCorporation являются единственными в мире цветными 3D-принтерами.

5.14. Параметры технологического процесса трехмерной печати

Процесс трехмерной печати является комплексным и зависит от большого числа параметров. Первым условием является правильный выбор жидкого связующего. Это может быть собственно расплав или растворенные в полимерной суспензии твердые включения. В любом случае существует ряд принципиальных требований к жидкой фракции по вязкости, смачиваемости и пр.

Вторым моментом является сам процесс каплеобразования. При струйном впрыске через сопло непрерывный поток жидкого материала должен хорошо сепарироваться (распадаться) на отдельные капли. Оптимизация материала, условий перемещения и работы сопла является определяющим фактором. Наконец, еще один фактор: как взаимодействуют капли в течение полета к подложке, каковы их размеры, скорость, траектории движения, условия коагуляции в крупные капли.

Изменение фазового состояния материала (испарение, затвердевание, полимеризация) также требуют изучения.

Высокое разрешение при печати требует от материала способности образовывать отдельные мелкие и сверхмелкие капли на выходе из сопла.

5.14.1. Техника образования капель

Следует отметить, что все упомянутые вопросы изучались еще при работе двухмерных, то есть настольных, принтеров. Известны два подхода: создание при печати непрерывного потока (струи) и капание по требованию, то есть капля за каплей.

5.14.2. Непрерывный режим и режим капания по требованию

Непрерывный режим работы обеспечивается за счет создания постоянного давления на входе насоса для подачи жидкости в сопло (рис. 5.41).

После попадания в сопло поток разбивается на капли из-за релеевской неустойчивости.

5.14.3. Другие способы образования капель

Вибрация и модуляция частотных характеристик могут способствовать управлению процессом непрерывной подачи материала. Создание электростатического заряда на капле и ее прохождение через пластины конденсатора помогают управлять точностью позиционирования капель на подложке (см. рис. 5.41). Преимущество непрерывного режима — высокая скорость подачи материала.

При типичных режимах вибрационного воздействия — частоте колебаний 80...100 кГц — размеры капель составляют ~150 мкм, а увеличение частоты до 1 МГц дает капли размером ~6 мкм.

5.14.4. Осаждение горячего расплава

Известны результаты использования алюминиевых сплавов. При температуре 750 °С на выходе из сопла диаметром 300 мкм и температуре подложки ~300 °С были получены капли размером 300...500 мкм, дающие линию ~1 мм высотой 0,17 мм. При этом плотность изделия после высыхания была ~92%.

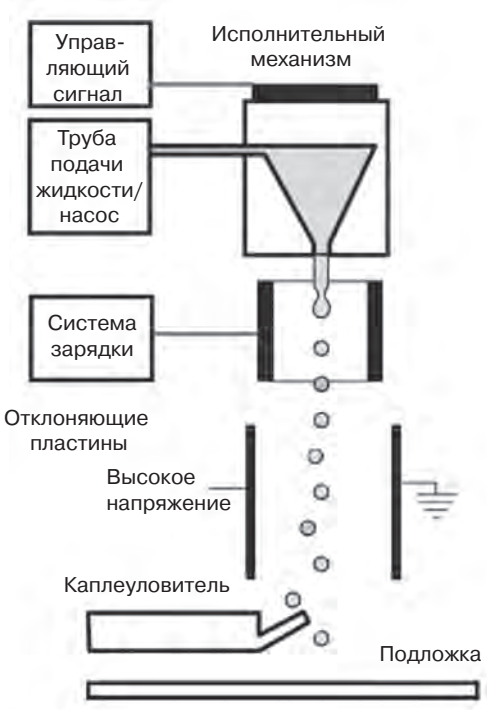


Рис. 5.41. Непрерывный режим работы принтера

5.15. Типоряд установок для трехмерной печати

Фирмы Z Corp., SolidScape, Stratasys, Objet Geometries (серия Eden) в настоящее время являются гигантами индустрии БП, их установки (3D-принтеры) получили широкое распространение за счет дешевизны. Установки Benchtop T66, T612 (SolidScape) имеют размер рабочей камеры 150(300) × 150 × 150 мм и стоят $40 000...50 000. Рабочим материалом для них является воск. Они применяются в литье по выплавляемым формам, ювелирной индустрии, медицине. Установка Dimension (Stratasys) совмещает особенности методов FDM и 3D Print, а стоит всего $30 000...35 000. Комплексная установка Spectrum Z510 (Z Corp.) стоимостью ~$450 000 позволяет изготавливать цветные изделия (24 bit color), состоящие из слоев толщиной ~0,25 мм. Компания Z Corp. развивает собственный софт (ZEdit), подобный Magic (Materialise). Цветные модели нужны не только для дизайнерских целей. Они активно используются также в работах, связанных с конечноэлементными расчетами. Фирма предлагает различные модельные материалы для разных целей прототипирования. Это пластик zp300, специальные композиты на основе гипса, целлюлозы, резиноподобный материал, специальный гипсокерамический порошок для изготовления литейных форм

Рис. 5.42. Установка фирмы ProMetal

и стержней для цветного литья. В табл. 5.11 приведено сравнение продуктов (установок) компаний, работающих в БП методом 3D-печати.

Фирма ProMetal Inc. по лицензии MIT производит установки S15, SR-2 (работает с печным песком), RX-D (со сплавами золота для стоматологии, слои толщиной 50 мкм), R2-R10 (с порошками нержавеющей стали с инфильтрацией их бронзой, толщина слоев ~0,2 мм, производительность объемов изделий — 0,18...1,8 л/ч) (рис. 5.42). Используется постобработка (инфильтрация, отжиг) для получения после трехмерной печати цельнолитых изделий.

Необходимо отметить, что в цветном 3D-принтере от Z Corporation — Z450 установлены 4 струйные головки с чернилами основных цветов, так что полученная модель может воспроизводить не только форму, но и окраску получаемого прототипа.

Таблица 5.11. Сравнение параметров установок для 3D-печати [18]

Компания/ продукт	Цена в 1000 долларов	Размеры установки, дюймов	Минимальная толщина слоя, дюймов	Разрешение по *XYZ*, dpi	Материал	Поддержки
Solidscape						
T66	$40	6 × 6 × 6	0,0005	25M капель на квадратный дюйм	Термопластик	Воск
T612	$50	6 × 6 × 12	0,0005			
3D Systems						
ProJect CPX 3000	—	11,7 × 7,3 × 8 или 5 × 7 × 6	0,036 мм/ 0,016 мм	328 × 328 × 700/ 656 × 656 × 1600	Воск	Растворимый воск
ProJect CP 3000	—	11,7 × 7,3 × 8	0,036 мм	328 × 328 × 700		
ProJect HP 3000	—	11,7 × 7,3 × 8	0,040 мм	328 × 328 × 700		
ProJect SD 3000	—	11,7 × 7,3 × 8	0,040 мм	328 × 328 × 700		
Object						
Eden 250	$60	10,2 × 9,8 × 8,1	0,0006	600 × 300 × 1600	Акриловый фотополимер	Гелеподобный фотополимер, герметичное удаление воды
Eden 260	$80	10,2 × 9,8 × 8,1				
Eden 350V	$107/130	13,4 × 13,4 × 7,9				
Eden 500V	$170	19,3 × 15,4 × 7,9				
Connex 500	$250	19,3 × 15,4 × 7,9				

Таблица 5.12. Спецификация ProMetal™ машин

Параметр	R10 system	R4 system
Размеры рабочей камеры	1000 × 500 × 250 мм	400 × 400 × 250 мм
Опции принтерной головки	8, 32 или 96 Prometal струйных принтерных головок	8, 16 или 32 Prometal струйные принтерные головки
Скорость капель, дюза/с	30 000...50 000	30 000...50 000
Точность позиционирования капель	0,025 мм	0,025 мм
Рабочая станция	Pentium III 800 МГц	Pentium III 800 МГц
Программное обеспечение	Windows NT — Prometal software	Windows NT — Prometal software
Потребляемая энергия	240 VAC, 50 A, 50/60 Гц, 3 фазы	240 VAC, 50 A, 50/60 Гц, 3 фазы

А в следующей модели — Z650 уже само клеящее вещество поставляется окрашенным в основные цвета.

После завершения построения модели лишний порошок убирается очистительной станцией и затем может использоваться повторно (рис. 5.43). Это означает, что порошково-струйная технология ZCorp также является безотходной. Учитывая, что стоимость расходных материалов (порошка и клея) невысока, использование 3D-принтеров этого производителя является экономически привлекательным для широкого круга потребителей.

Рис. 5.43. Пример исполнения детали

Технология PolyJet компании Objet Geometries названа комбинированной (рис. 5.44), потому что это удачный симбиоз простой и дешевой технологии струйной печати и аккуратной, точной технологии лазерной печати. Процесс печати заключается в следующем. На плоскость построения согласно программному алгоритму печатающей головкой Objet наносится жидкий фотополимер. Печатающая головка Objet — это 768 сопл малого диаметра и 16 млн (!!!) капель в минуту. На печатающей головке размещены две УФ-лампы, которые заменяют лазер в SLA-установках. После нанесения фотополимер полимеризуется под воздействием УФ. Этим завершается построение одного слоя. Далее плоскость построения опускается на очень небольшое расстояние, и головка наносит следующий слой.

Сейчас технология PolyJet по праву считается революционной и самой прогрессивной. Толщина одного слоя составляет 16 мкм, что позволяет создавать модели с мельчайшей детализацией и гладкими поверхностями. При этом стоимость 3D-принтеров Objet более чем в 4 (четыре!!!) раза дешевле лазерных SLA-, SLS-, LOM-машин. 3D-модели Objet не требуют финишной обработки и готовы к целевому использованию сразу после печати. За счет этого значительно сокращено время печати прототипов по сравнению с другими системами быстрого прототипирования.

Особенностью систем Objet является наличие широкой линейки материалов построения моделей. Модели, построенные из различных материалов, имеют разные физические характеристики и цветовые решения. В табл. 5.13, *а*—5.13, *б* описаны основные параметры материалов и их значения при проведении стандартных методик тестирования.

Революционная технология PolyJet — это действительно новая эра трехмерной печати физических моделей, позволяющая значительно повысить темпы выхода новых товаров на все более конкурентный рынок.

Рис. 5.44. Технология PolyJet

На сегодняшний момент 3D-принтерами Objet и ZCorp пользуются более 15 тыс. компаний, среди которых широкоизвестные BMV, Audi, Nokia, Motorola, Bosh, Black & Dacker, Adidas, Nike, Lego, Walt Disney, Microsoft и многие другие, которые держат высокую планку и задают направление развития дизайна и функциональности своей продукции.

Принтеры ZCorp под торговыми марками ZPrinter и SpectrumZ, а также Objet Geometries под торговой маркой Eden наиболее полно соответствуют требованиям существующего рынка.

5.15.1. Z Corporation

Как отмечено ранее, оборудование ZCorp также отличается низкой стоимостью и представлено линейкой, которая состоит из модели начального уровня ZPrinter310 Plus, профессионального цветного 3D-принтера Spectrum Z510 и нового ZPrinter450 (рис. 5.45 и табл. 5.14). Некоторые сравнения возможностей 3D-принтеров даны в табл. 5.15.

Рис. 5.45. Внешний вид

Таблица 5.13, а. Жесткие материалы

Параметр	Метод		FullCure 720	VeroWhite	VeroBlue	VeroBlack
Цвет	—		Желто-прозрачный	Белый	Синий	Черный
Предел прочности на разрыв, МПа	D-638		60,3	49,8	55,1	50,7
Предел растяжения на разрыв, %	D-638		15,0...25,0	15,0...25,0	15,0...25,0	17,7
Модуль упругости, МПа	D-638		2870,0	2495,0	2740,0	2192,0
Прочность на изгиб, МПа	D790		75,8	74,6	83,6	79,6
Модуль изгиба, МПа	D790		1718,0	2137,0	1983,0	2276,0
Ударные испытания по методу Изода, Дж/м	D256		39,6	37,5	42,5	—
Сопротивление сжатию, МПа	D695		84,3	—	79,3	—
Твердость по Шору	—		83,0	83,0	83,0	83,0
Твердость по Роквеллу	—		81,0	81,0	81,0	81,0
Температура деформации при нагреве, °С	D648	0,45 МПа	48,4	47,6	48,8	47,0
		1,82 МПа	44,4	43,6	44,8	42,9
Температура стеклования T_g, °С	DMA,E»		48,7	58,0	48,7	62,7
Зольность, %	—		<0,01	<0,40	<0,30	—

Таблица 5.13, б. Эластичные материалы

Параметр	Метод	TangoBlack	TangoGray
TangoGray	—	черный	серый
Предел прочности на разрыв, МПа	ASTM D-412	2,0	4,36
Предел растяжения на разрыв, %	ASTM D-412	47,7	47,00
Остаточная деформация при сжатии, %	ASTM D-395	0,8	1,00
Твердость по Шору А	ASTM D-2240	61,0	75,00
Сопротивление разрыву, кг/см	ASTM D-624	3,8	9,50
Температура стеклования T_g, °C	DSC (–80 °C + + 100 °C)	–10,7	+2,60

Таблица 5.14. Основные характеристики принтеров ZCorp

Параметр	ZPrinter 310 Plus	ZPrinter 450	Spectrum Z 510
Скорость печати	2–4 слоя в минуту		
Режим печати	Монохромный	Цветной	Цветной
Размер области построения, мм	203 × 254 × 203	203 × 254 × 203	254 × 356 × 203
Типы материалов, используемых для построения объектов	Высококачественный композитный эластомер, эпоксидный, для прямого литья, для точного литья	Высококачественный композитный материал	Высококачественный композитный эластомер для прямого литья
Толщина слоя печати, мм	0,089...0,203		
Разрешение, dpi	300 × 450	300 × 450	600 × 540
Количество печатающих головок	1	2	4
Количество сопл	304	604	1216
Размеры оборудования, см	74 × 86 × 109	122 × 79 × 140	107 × 79 × 127
Вес оборудования, кг	115	263	204
Требования к электросети	115 В, 4,3 А, 230 В, 2,4 А	110 В, 14,4 А, 115 В, 14,0 А, 230 В, 6,2 А	100 В, 7,8 А, 115 В, 6,8 А, 230 В, 3,4 А

Параметр	ZPrinter 310 Plus	ZPrinter 450	Spectrum Z 510
Поддержка LAN-соединения	TCP/IP 100/10 base T		
Совместимость с ОС	Windows 2000 Professional and Windows XP Professional		
Соответствие нормам	CE, CSA		
Поддерживаемые форматы печати	STL, VRML, PLY, 3DS		
Лицензионное ПО	ZPrint Software, ZEdit Software		

Таблица 5.15. Сравнение 3D printers

Параметр	ZTM 400 3DP	ZTM 406 3DP	ZTM 810 3DP
Скорость построения	2 слоя/мин	Цветной: 2 слоя/мин, монохромный: 6 слоев/мин	—
Размер области построения, мм	203 × 254 × 203	203 × 254 × 203	500 × 600 × 400
Толщина слоя, мм	0,076...0,254	0,076...0,254	0,076...0,254
Размеры установки, мм	740 × 910 × 1070	740 × 910 × 1070	1020 × 790 × 1120
Вес установки, кг	136	136	210
Программное обеспечение	ZCorp.'s запатентован софт на базе Microsoft Windows 2000 и NT. Поддержка VRML-, ZCP-, PLY- и SFX-форматов файлов с цветовым выходом. STL-формат файла используется только для монохромных изделий		
Используемые материалы	Крахмал и пластические наполнители		

5.15.2. ExtrudeHone-печать

Bits From Bytes (BFB) — ведущий поставщик готовых 3D-принтеров и наборов деталей для самостоятельной сборки принтеров пользователями (рис. 5.46). Компания известна своими низкими ценами и участием в проекте RepRap (см. раздел 4.11). 3D-принтеры этой компании могут печатать реальные модели из большого количества материалов и даже нескольких материалов одновременно. Они отлично подходят для дома, учебы и бизнеса.

RepRap — это настольный 3D-принтер с открытым исходником (open source), создающий пластиковые объекты. Уникальность принтера RepRap заключается в том, что он способен печатать собственные пластиковые детали. Соответственно его можно назвать первой самовоспроизводящейся машиной. Это означает, что если у вас есть RepRap, то вы можете, помимо всего остального, напечатать еще один экземпляр для друга. Информация о создании RepRap имеется в Интернете в свободном доступе.

Рис. 5.46. BFB 3000

На первом году своего существования BFB по уровню продаж получили 17% мирового рынка 3D-принтеров. В 2010 году корпорация 3D Systems сообщила о приобретении BFB и о том, что планирует сохранить ее текущий курс развития. В результате слияния 3D Systems включила в свое портфолио линейку бюджетной продукции, а BFB — финансовую поддержку и новые рынки сбыта.

BFB 3000 — первый настольный 3D-принтер с большим объемом рабочей камеры и стоимостью меньше чем $10 тыс. BFB 3000 прост в использовании и может применяться как для БП, так и для быстрого производства изделий. Опционально можно приобрести несколько печатающих головок для материала поддержки и возможности печатать цветные детали. Характеристики BFB приведены в табл. 5.16.

Таблица 5.16. Технические характеристики BFB

Параметр	FDM
Размер рабочей камеры, мм	275 × 275 × 210 (одна головка); 230 × 275 × 210 (две головки); 185 × 275 × 210 (три головки)
Разрешение, dpi	—
Толщина слоя, мм	0,125
Минимальная толщина стенки по оси *Z*, мм	1
Цветность	Да
Скорость печати по оси *Z*, мм/ч	15
Материалы	ABS (акрилбутадиенстирол), HDPE (полиэтилен высокой плотности), LDPE (полиэтилен низкой плотности), PLA (полилактид), PP (полипропилен), uPVC (непластифицированный ПВХ)
Форматы файлов для печати	BFB
Габаритные размеры, мм	515 × 515 × 590
Вес, кг	36 (с одной головкой); 37 (с двумя головками); 38 (с тремя головками)
Требования к электропитанию	—
Энергопотребление, Вт	90

Часть III

ГИБРИДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БП

Глава 6
Субтрактивные технологии БП

Данная глава посвящена введению в *субтрактивные* (от англ. subtraction — вычитание) процессы лазерной обработки, то есть процессы изготовления объемного изделия путем избирательного удаления определенных участков материала. Образно говоря, если аддитивные методы БП сродни работе скульптора с глиной или гипсом при создании послойно объемного произведения искусства, то субтрактивные методы БП похожи на работу того же скульптора с камнем. Удалить (разделить) материал можно в основном следующими методами:

- лазерной резкой;
- лазерной сваркой;
- лазерной прошивкой отверстий;
- лазерным формованием;
- лазерным фрезерованием;
- лазерной шлифовкой (рихтовкой) и гравировкой;
- лазерным структурированием (интерференционная металлургия);
- лазерным ударным упрочнением.

Разумеется, все перечисленные операции (методики) могут быть реализованы и без участия лазера. Однако, когда идет речь о создании прецизионного изделия, применение лазера обеспечивает явное преимущество за счет своей бесконтактности, локальности, минимума деформаций, высокой степени автоматизации и скорости выполнения работы. Каждый из названных процессов будет обсуждаться далее в связи с перспективами их применения для создания функциональных изделий АТ.

В противоположность аддитивному подходу (см. главы 3–5) создание объемного изделия в субтрактивных технологиях обычно достигается за счет использования одновременно или поочередно совокупности названных методик. Например, лазерному микрофрезерованию, микрошлифованию (гравировке) предшествуют более грубые операции лазерной микрорезки, сварки, прошивки. Поэтому субтрактивные технологии в основном являются *гибридными*, то есть объединяют в себе несколько процессов, направленных на достижение конечной цели. Гибридные технологии стали появляться в последнее время и в АП (например, разработка фирмы Concept M3 Linear, о которой говорилось в разделе 5.9.3, и MicroTEC — см. раздел 3.8.2), однако именно при избирательном удалении они впервые оказались востребованы в полной мере.

6.1. Особенности 3D-микромеханической обработки с использованием лазеров

Несмотря на обозначенные ранее преимущества лазерных методов обработки, существует ряд факторов (свойства материалов, качество выполнения операции, эко-

номическая целесообразность и пр.), которые также следует анализировать перед выбором метода микрообработки.

Свойства материалов. Материалы можно разделить на четыре основных класса: металлы, полимеры, керамику, композиты.

- *Металлические материалы* могут обрабатываться как традиционными (резка, сварка, литье, формование, сверление, фрезерование и пр.), так и специальными (лазерными, плазменными, ионными и т. д.) методами. Существуют тугоплавкие и легкоплавкие металлы, также металлические изделия могут быть созданы из порошковых материалов. Специфика ЛО начинается с поглощения (см. рис. 5.11). ЛИ хорошо отражается от проводящей поверхности металлов, поэтому нужно подбирать длину волны ЛВ или наносить специальное поглощающее покрытие для увеличения эффективности ЛВ. Лазерный нагрев металлов сопровождается рядом структурно-фазовых превращений (это собственно нагрев, плавление, кипение, испарение металлов, явление абляции, пробой и образование плазмы у поверхности при ЛВ).
- *Полимеры*. Лазеры могут быть использованы для формования и механической обработки пластиков. Такое воздействие обычно сопровождается деструкцией полимеров, возможна абляция пластика. Формование полимеров обычно ассоциируется с воздействием на них ЛИ. При этом фотополимеры отверждаются (принимают форму), что используют в лазерной стереолитографии.
- *Керамические материалы* хорошо поглощают ЛИ и легко обрабатываются таким способом. Лазерная резка и прошивка отверстий, лазерное формование и фрезерование керамики хорошо известны.
- *Композиты* — это комбинации двух или нескольких материалов с различающимися теплофизическими и/или механическими свойствами, например металломатричные, металлополимерные, металлокерамические, керамико-полимерные и прочие композиты. Лазерная обработка тут также применима, поскольку легче управлять параметрами ЛВ и изменять их, сообразуясь с технологическими задачами. Соединение (лазерная сварка) разнородных материалов даже в рамках одного класса не менее актуально.

Сложность формы поверхности. Форма, размеры, толщина изделий имеют значение при поиске оптимальных параметров ЛВ. Например, процесс литья крупных заготовок отличается необходимостью разбиения большой детали на составные части и их отливки независимо друг от друга. При обработке (создании) микроизделий традиционные подходы могут оказаться неприменимыми. Лазерные методы лучше автоматизированы, бесконтактны, что дает им преимущество перед другими.

Точность воспроизведения и параметры качества. Качество микрообработки, наличие металлургических дефектов, чистота обработки, точность воспроизведения также требуют контроля. На рис. 6.1 отражены результаты сравнения традиционных и нетрадиционных методов обработки с позиции точности.

Как видим, некоторые технологические процессы имеют точность размеров, соизмеримую с зоной обработки. При этом качество обработанной поверхности и точность обработки также могут оказаться сравнимыми. Это вызывает проблемы, особенно при микрообработке. Поверхностные дефекты, остаточные напряжения, оксиды будут влиять на качество поверхности и, следовательно, качество и точность обработки. Нетрадиционные методы обработки имеют лучшие показатели качества и точности.

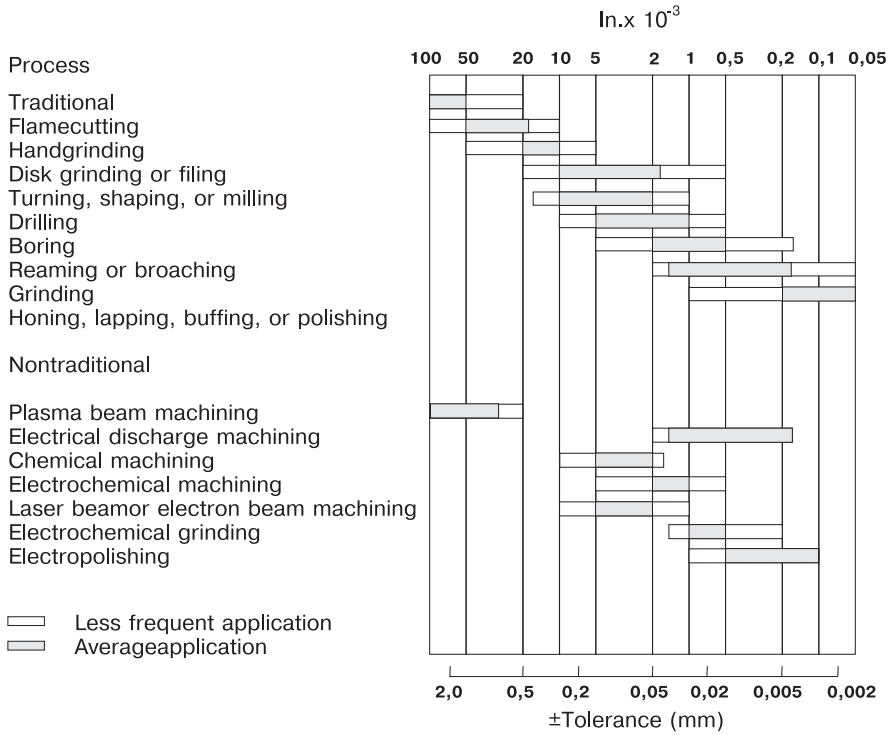


Рис. 6.1. Точность размеров при выполнении различных процессов (с разрешения Pearson Education, Inc., Kalpakjian and Schmid, 2001)

6.2. Лазерные технологии в микромашиностроении

Существуют разные подходы к классификации машиностроительных процессов удаления материалов, например с точки зрения геометрии изделия, температуры воздействия, прикладываемых напряжений и пр.

6.2.1. Лазерная резка, сварка и прошивка отверстий

Традиционно лазерная резка (рис. 6.2) применяется для разделения трудно обрабатываемых материалов наподобие стали или керамики. Однако лазерная резка может быть использована и для удаления материала (испарением, выплавлением, химическими реакциями и пр.), что расширяет область применения лазеров для механической обработки. Импульсными и непрерывными лазерами можно резать при больших скоростях изделия сложной геометрии, выполненные из широкого диапазона материалов. Малая зона термического влияния (ЗТВ), незначительные деформации, отсутствие окалины (чистота резки) привлекают пользователей.

Лазеры давно применяются для процессов сварки и пайки разнообразных материалов. Есть точечная, шовная сварка, сварка с глубоким проникновением. При сварке методом кинжального проплавления образуется ванна расплава с интенсивным испарением из паровой каверны. На стенках паровой каверны идет интенсивное

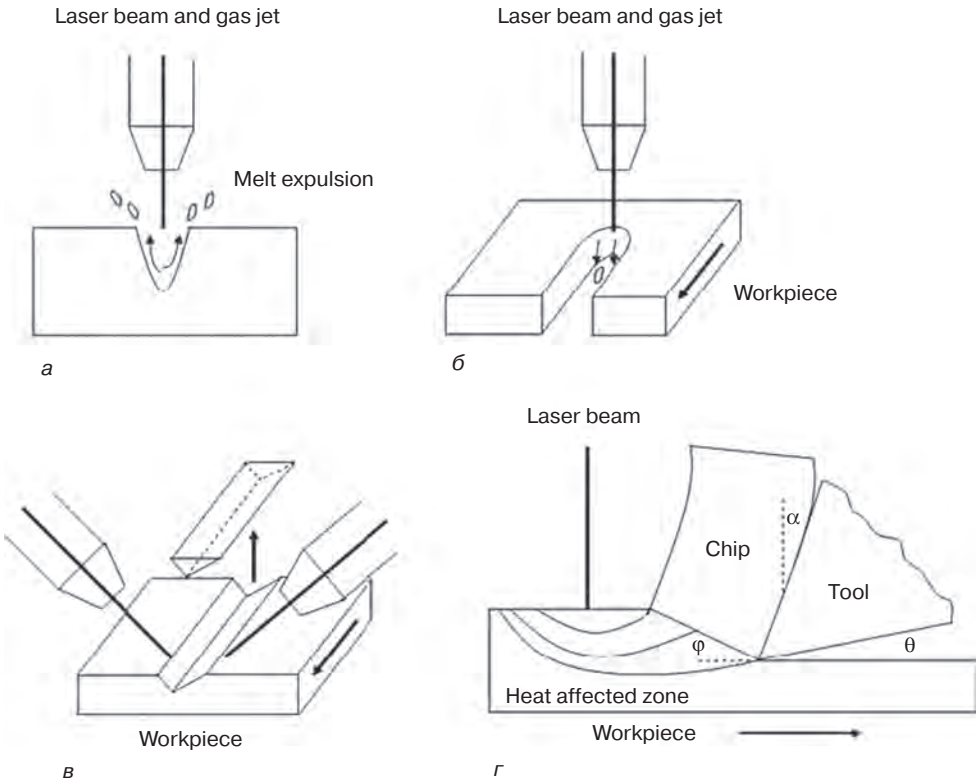


Рис. 6.2. Микромеханическая обработка ЛИ: *а* — лазерная прошивка отверстий (одномерное приближение); *б* — лазерная резка (двумерное приближение); *в* — лазерное фрезерование (трехмерное приближение); *г* — комбинированная лазерно-механическая обработка

парообразование и поглощение ЛИ. По сравнению с традиционными методами сварки лазерная имеет ряд преимуществ: высокая скорость процесса, возможность сварки разнородных материалов, прецизионность микросварки, малая ЗТВ. Существует ряд процессов, например сварка внутренних швов, сварка микроустройств, где лазеры имеют неоспоримые преимущества. Но есть ограничения по толщине свариваемых материалов и скорости процесса.

Лазерная прошивка полезна при создании высокоаспектных микроотверстий, когда обычные методики применить невозможно. Сверлить лазером можно практически любые материалы — металлы, полимеры, керамику, композиты и пр. Могут существовать ограничения по диаметру и глубине прошиваемого отверстия. Однако тщательным выбором способа прошивки (кольцевое или ударное сверление) с помощью ЛИ можно получить глубокие и/или широкие отверстия. Конечно, при прошивке возможно возникновение металлургических или геометрических дефектов (канавки, окалина и пр.), но оптимизация параметров ЛВ (форма импульса, размер пучка, мощность ЛИ) и применение покрытий, защитных газов, специальных конструкций сопла может уменьшить или исключить их. Таким образом, при выборе соотношения «цена/качество» лазерная прошивка оказывается привлекательной (рис. 6.3).

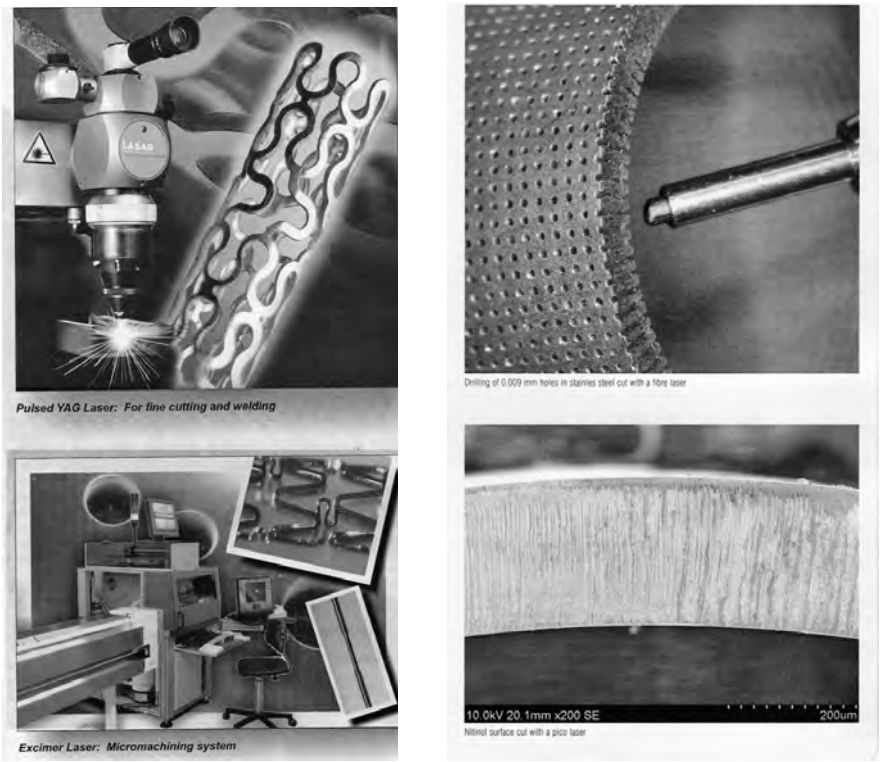


Рис. 6.3. Оборудование для лазерной микрорезки и микропрошивки и результаты операций

6.2.2. Лазерное микроформование и литье

Обычные методы литья еще долго будут определяющими для создания первоначальной формы изделий. Однако в последнее время были продемонстрированы возможности использования лазеров в фигурном литье из различных материалов. Это главным образом методы с использованием наплавки и плакирования материалов ЛИ. Если поверхность материала подвергается коррозии или износу, то наплавление на поверхность (ее восстановление) имеет явные перспективы. ЛИ плавит распределенный по восстанавливаемой поверхности порошок, который, подплавляя поверхность, закрепляется на ней. При лазерном литье металлический порошок определенного размера (фракции) размещается в пресс-форме и переплавляется. На рис. 6.4 показаны примеры процесса. Таким образом можно как сплавить в пресс-форме само изделие (отливку), так и, наоборот, изготовить саму пресс-форму. Это становится особенно важным, когда необходимо прецизионное литье или создание высокоточной пресс-формы.

Процесс формования включает ряд операций по пластическому деформированию (экструзия, прокатка, ковка), когда металлический лист изменяет форму. Порошковые методики (наплавка, плакирование) также могут изменить форму изделия. Таким образом, лазерное формование, в отличие от АТ методами СЛС/П, — это технологический процесс, при котором в результате лазерного нагрева температурные градиенты делают материал (лист металла) более пластичным на изгиб

(то есть способным изменять форму) в месте нагрева, и это не приводит к разрушению материала.

На рис. 6.5 показан процесс изгиба с использованием ЛИ. Если температурный нагрев приводит к напряжениям выше предела текучести, то пластическая деформация листа осуществима. ЛИ, будучи легко автоматизируемым, бесконтактным и высокоточным методом, позволяет выполнять такие изгибы с высокой точностью и по сложному контуру, заранее сформированному на компьютере. Лазерное формование полезно в мелкосерийном производстве, когда затраты на подготовку оснастки могут сделать нецелесообразным использование традиционных методов формования.

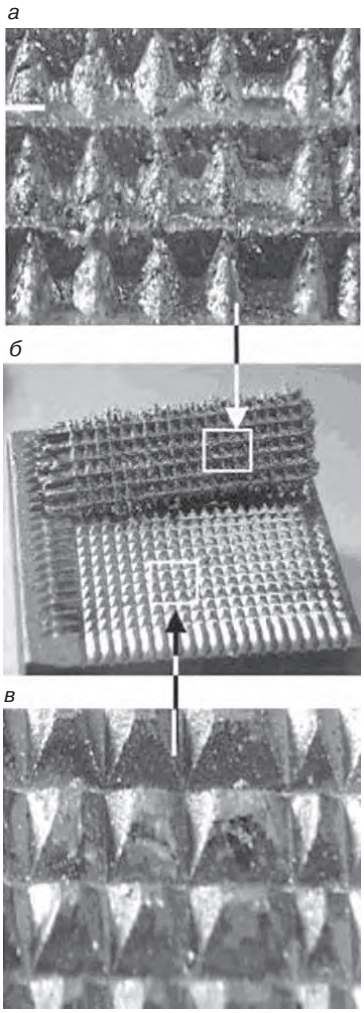


Рис. 6.4. Процесс лазерного литья: *а* — литье; *б* — литье и пресс-форма; *в* — пресс-форма

6.2.3. Лазерные микрофрезерование, рихтовка, шлифовка

Еще одно важное направление применения лазера в машиностроительном производстве — микромеханическая обработка с использованием ЛИ. Применяя системы доставки и точного позиционирования лазерного пучка при обработке трехмерного изделия, можно контролировать характер его перемещения, форму и геометрию (см. рис. 6.2).

Лазер активно используется в промышленности для прошивки отверстий (сверления), резки, формования, комбинированной лазерно-механической обработки, при этом результат микрофрезерования лазером имеет ряд преимуществ (рис. 6.6). Как видно из рисунка, микрообработка лазером характеризуется гораздо меньшей зоной термомеханического воздействия, большими прецизионностью и точностью, а также высокой управляемостью.

При этом следует разделять удаление материала в режиме абляции (при лазерной микросварке, прошивке, фрезеровке) на длительностях микро-, нано-, пико- и фемтосекундных масштабов (рис. 6.7). Если результаты ЛВ при микро- и (частично) нанодлительностях имеют явно термическую природу, так как за это время энергия ЛВ успевает перераспределиться от электронной к ионной составляющей кристаллической решетки, то пико- и фемтосекундные длительности такой возможности не дают. Как результат (рис. 6.8) — отсутствие явной ЗТВ, продуктов разрушения, деформации поверхности за счет ударных эффектов и пр.

Атермический характер ЛВ существенно улучшает прецизионность лазерных микроопераций (рис. 6.9, *б*). Внешний вид роботизированного комплекта и его технические характеристики представлены на рис. 6.9, *а* и в табл. 6.1.

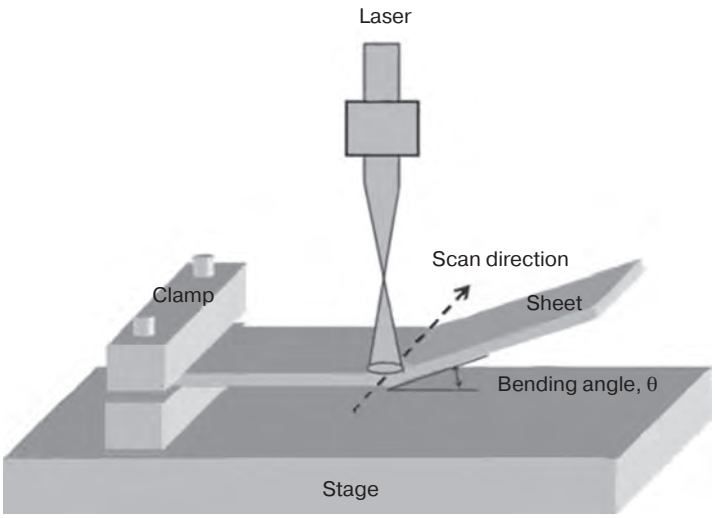


Рис. 6.5. Схема процесса лазерного формования по месту изгиба

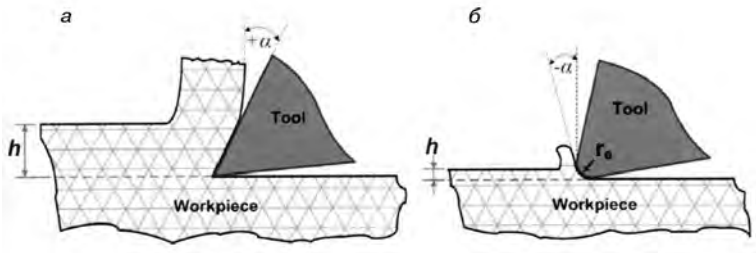


Рис. 6.6. Различие фрезерования: *а* — механическое; *б* — лазерное

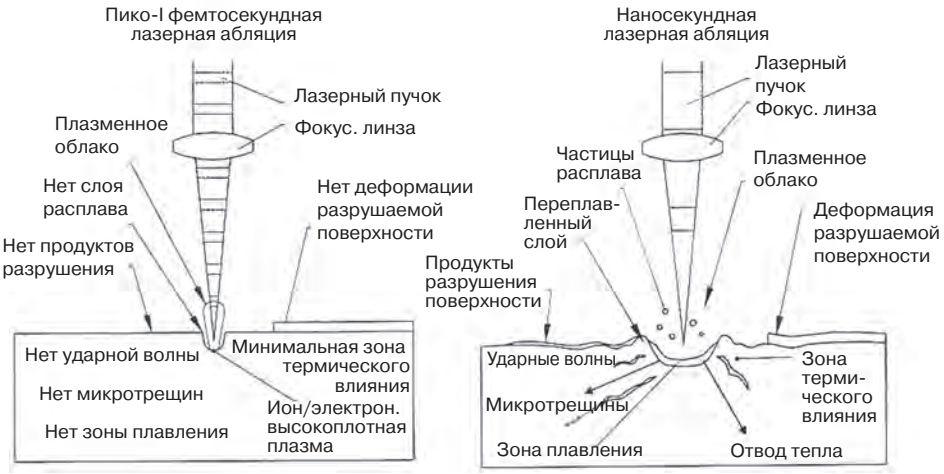
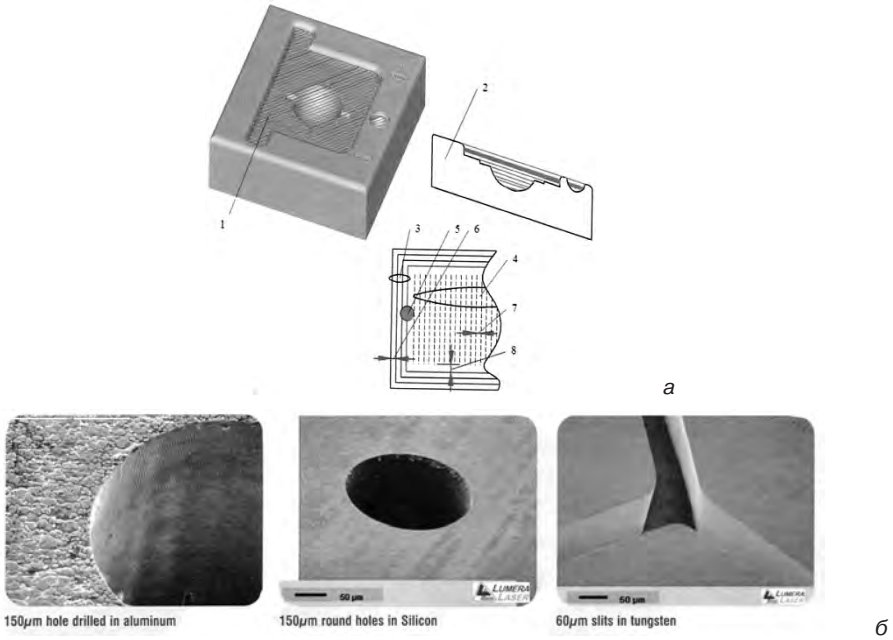
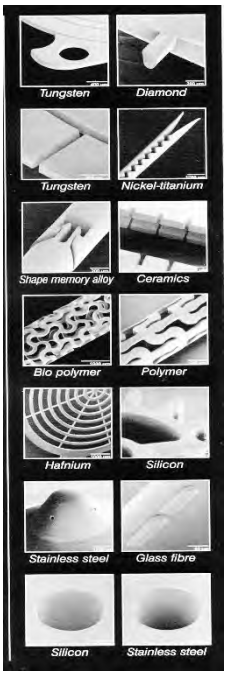


Рис. 6.7. Основные различия пико- и наносекундной абляции ЛИ



а *б*

Рис. 6.8. Различие результатов лазерного микрофрезерования и прошивки: *а* — фемтосекундное; *б* — пикосекундное



а *б*

Рис. 6.9. Лазерное фрезерование: *а* — оборудование фирмы DMG GmbH; *б* — примеры его работы

Таблица 6.1. Параметры установки для лазерного фрезерования фирмы DMG GmbH

Рабочее поле обработки		
Ось *X*	мм	400
Ось *Y*	мм	300
Ось *Z*	мм	550
Размер стола	мм	300 × 400
Рабочее поле лазера	мм	60 × 60
Максимальная глубина фрезерования	мм	10
Поверхностная шероховатость, Ra	мкм	0,6
Скорость удаления (сталь)	мм^3/мин	2–6
Диаметр пятна	мкм	40
Параметры лазера		
Тип	—	Генерация 3-й гармоники волокон. лазера
Выходные параметры	—	Непрерывный режим (CW), импульсный 1...500 кГц
Длительность импульса	нс	9...200
Выходная мощность (импульс)	Вт	20
Длина волны	нм	1062 ± 3
Энергия в импульсе	мДж	500
Скорость сканирования	мм/с	5000

6.2.4. Инициированное лазером физическое и химическое травление/осаждение (LPVD/LCVD). Лазерное ударное воздействие

Данная группа методов часто обозначается английской аббревиатурой PVD (Physical Vapour Deposition). Эта группа методов объединена общей схемой нанесения покрытия и использованием вакуума (рис. 6.10). Здесь *1* — материал для покрытия, *2* — система перевода материала в паровую фазу, *3* — поток испарившегося вещества, *4* — подложка, *5* — формирующееся покрытие, *6* — система транспортировки материала покрытия в паровой фазе к подложке, *7* — система фокусировки (и/или сканирования) потока вещества, осаждающегося на подложку, *8* — система закрепления подложки и ее контролируемого перемещения, *9* — система регулирования температуры нагрева подложки, *10* — система управления технологическими параметрами (температура подложки, скорость перевода материала в паровую фазу, давление в камере, скорость осаждения покрытия, толщина покрытия и др.) и их контроля, *11* — вакуумная камера, *12* — система создания и поддержания высокого вакуума (система вакуумных задвижек, форвакуумных и высоковакуумных насосов, азотная ловушка и др.), *13* — шлюзовая камера и система подачи и смены подложек, *14* — смотровые контрольные окна, *15* — система охлаждения, *16* — внешний источник нагрева (лазерный, ионный, электронный пучок), *17* — CVD-система доставки. Сначала материал для покрытия переводится из конденсированного состояния в состояние пара, затем его транспортируют к подложке (материалу, на который наносится покрытие), где происходит осаждение

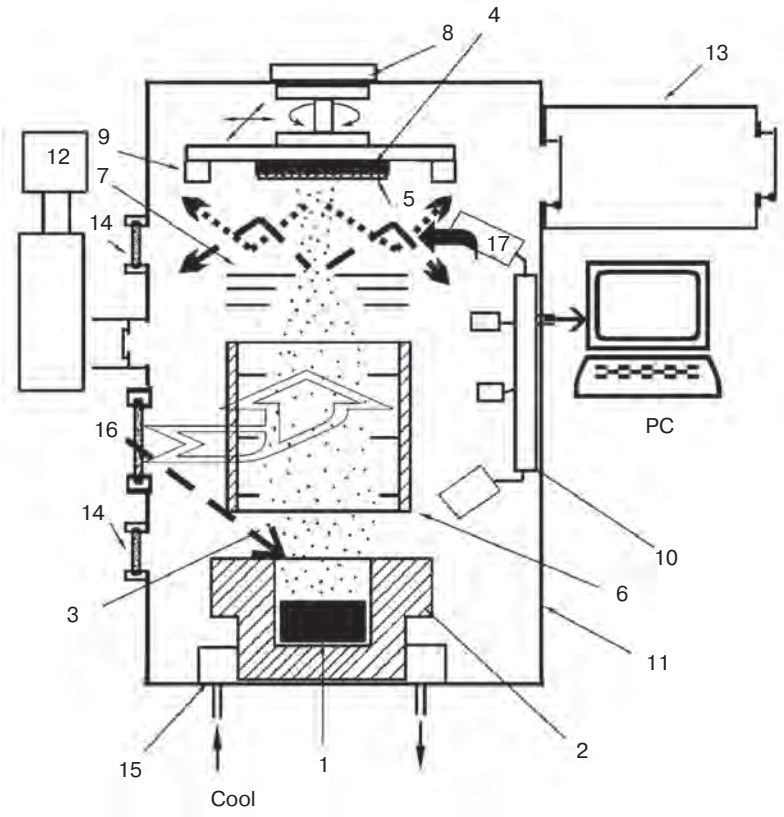


Рис. 6.10. Типичная схема установки для нанесения покрытия LPVD/LCVD-методом

материала покрытия из паровой фазы и формирование покрытия. Использование вакуума облегчает перевод материала в паровую фазу.

Химическая составляющая методов основана на осаждении на поверхность нагретых деталей пленок из соединений металлов, находящихся в газообразном состоянии. Осаждение, как правило, происходит в специальной камере при пониженном давлении, при этом протекают химические реакции восстановления, пиролиза, диспропорционирования. В ряде случаев могут использоваться реакции взаимодействия основного газообразного реагента с дополнительным. Наиболее часто в качестве таких соединений применяют карбонилы, галогены, металлоорганические соединения. Например, галогениды металлов восстанавливаются водородом до металла с образованием соединения галогенов с водородом, а карбонилы с помощью реакции пиролиза разлагают на металл и оксид углерода. Наиболее оптимальное протекание химических реакций наблюдается при температурах 500...1500 °С. Поэтому обрабатываемые детали нагревают до этих температур, что обеспечивает локализацию химической реакции у поверхности деталей, а также оптимальный ход процесса, высокие свойства покрытия и хорошую адгезию. Покрытие образуется путем последовательного наслоения осаждающегося материала. Высокие температуры процесса могут активизировать также процессы твердофазной или газофазной диффузии элементов между покрытием и подложкой. Метод обеспечива-

ет получение покрытий толщиной 1...20 мкм со скоростью 0,01...0,1 мкм/мин. Его можно использовать для нанесения покрытий на внутренние поверхности трубок и отверстий. Кроме металлических пленок можно получать пленки из бора, боридов, углерода, карбидов, нитридов, оксидов, кремния и силицидов. Основным недостатком CVD-метода является необходимость нагрева деталей до высоких температур. С одной стороны, это отрицательно влияет на механические свойства и структуру подложки, а с другой — вызывает дополнительные проблемы в случае необходимости получения наноструктурного состояния самого покрытия.

Наноструктурное состояние при данных методах достигается в тонких поверхностных слоях металлических материалов или изделий, полученных по традиционным технологиям, путем взаимодействия вещества с ЛИ высокой плотности. Используется импульсное ЛИ с плотностью энергии $10^3...10^{10}$ Вт/см^2 и временем импульса $10^{-2}...10^{-9}$ с. В ряде случаев применяется и непрерывное излучение CO_2-лазеров с плотностью энергии $10^5...10^7$ Вт/см^2 со скоростями сканирования, обеспечивающими время взаимодействия материала с излучением $10^{-3}...10^{-8}$ с. Под действием лазерного облучения поверхностный слой материала толщиной 0,1...100 мкм очень быстро расплавляется и затем затвердевает со скоростями охлаждения $10^4...10^8$ К/с. При этом основная масса металлического материала вследствие кратковременности термического воздействия не нагревается и обеспечивает высокую скорость теплоотвода. Высокая скорость охлаждения позволяет получать нанокристаллическую или даже аморфную структуру. В последнем случае нанокристаллическое состояние получают с помощью дополнительной контролируемой кристаллизации при термообработке.

Лазерное легирование или лазерная имплантация связаны с дополнительным введением в оплавляемый поверхностный слой легирующих веществ. Оно может проводиться как за счет предварительного нанесения тонкой пленки легирующего вещества на поверхность обрабатываемого материала, так и за счет инжекции частиц порошка (в том числе наночастиц) в струе газа в зону воздействия лазерного излучения. При этом легирование может преследовать две основные цели:

- создание на поверхности модифицированного слоя, химическим составом и, следовательно, свойствами отличающегося от основного металла;
- облегчение формирования наноструктурного или аморфного состояния при затвердевании оплавленного поверхностного слоя.

Лазерная техника с нано-, пико- и фемтосекундными длительностями воздействия позволяет получать высокие (~$10^{10}...10^{15}$ Вт/см^2 и более) плотности мощности. При таких плотностях возникают нелинейные эффекты, выражающиеся, в частности, в образовании лазерной плазмы и ударной волны. Если ударная волна формируется на поверхности металла, то в поверхностном нанослое происходит перестройка кристаллической структуры. Традиционная технология упрочнения взрывом является плохо управляемой, менее локальной и обладает меньшей энергетикой процесса пластического деформирования. Технологию *лазерного ударного воздействия* (Laser shock peening) обычно относят к области интересов военных ведомств. Однако есть значительное число примеров ее мирного применения. Например, к двигателям летательных аппаратов предъявляются жесткие требования по удельной тяге, расходу топлива, ресурсу работы, массогабаритным характеристикам. Лазерное ударное воздействие дает возможность сформировать нанослой металла, обладающий высокими прочностными и термозащитными свойствами. Ударная волна лазерной плазмы создает в поверхностном слое условия для интенсивной пластической деформации (~1 ГПа — 1 ТПа), в результате которой формируется ультрамелкозернистая структура с нанокристаллическими зернами разме-

ром менее 100 нм. При этом достигаются высокая ударопрочность, динамическая и температурная стойкость покрытия, что увеличивает ресурс работы изделия.

6.2.5. Лазерные скрайбирование, маркировка и гравировка

Лазерная маркировка — это процесс нанесения определенной информации на детали изделия с целью их дальнейшего распознавания. Гравировка (глубокая маркировка) предназначена для получения надписей, рисунков, а также схематических художественных изображений с целью увеличения срока их пользования. При скрайбировании важны не столько наносимая информация, сколько количество удаленного материала (например, при доводке резисторов).

Эти операции можно осуществить механическими или электрохимическими методами. Однако при малых размерах изделий, хрупкости материала и других ограничениях эти методы не всегда приемлемы. При обеспечении относительной простоты маркировки, снижении ее себестоимости и повышении производительности на поверхность изделия или детали может быть нанесен в закодированном виде необходимый объем информации (она потом считывается и преобразуется в электрические сигналы), которая обычно находится в сопровождающей документации. Это позволяет оперативно управлять технологическим процессом в условиях автоматизированного производства. Реализовать эту возможность можно путем маркировки и гравировки с помощью ЛИ.

При воздействии на материалы ЛИ материал в зоне облучения разрушается и на поверхности мишени возникает характерный кратер. Вблизи мишени наблюдается яркое свечение плазменного факела. Реактивное давление пара, выбрасываемого с поверхности металла, сообщает мишени импульс отдачи.

В процессе лазерной гравировки лазерный луч фокусируется на поверхность гравируемого изделия. В результате происходит локальный нагрев, который приводит к изменению свойств материала (изменению цвета) и его частичному испарению.

Испарение происходит с поверхности тонкого слоя жидкого металла, нагретого до температуры в несколько тысяч градусов. Температура слоя определяется равенством поглощенной энергии и потерь на охлаждение, связанное с испарением. Роль теплопроводности в охлаждении слоя при этом несущественна. В отличие от обычного испарения, такой процесс называется развитым испарением.

Давление в слое определяется силой отдачи пара и при сформировавшемся газодинамическом течении пара от мишени составляет 1/2 значения давления насыщенного пара при температуре поверхности. Таким образом, жидкий слой является перегретым, его состояние — метастабильным. Это позволяет исследовать условия предельного перегрева металлов, при достижении которого происходит бурное объемное вскипание жидкости. При нагреве до температуры, близкой к критической, в жидком слое металла может происходить скачкообразное уменьшение электропроводности, и он приобретает свойства диэлектрика. При этом наблюдается скачкообразное уменьшение коэффициента отражения света.

Глубина маркировки металлов при обычных режимах составляет около 10 мкм. Варьируя технологические параметры оборудования, можно легко изменять ее. Например, для увеличения глубины маркировки необходимо повысить мощность излучения и уменьшить скорость маркировки.

Когда требуется выполнить гравировку металла на значительную глубину (например, 200 мкм), применяют многопроходные режимы маркировки при средних технологических режимах. При этом за каждый проход испаряется около 10 мкм

Рис. 6.11. Примеры 3D-лазерной гравировки

металла. Таким способом можно, например, изготавливать металлические клише, делать гравировку надписей на поверхности, печати, таблички и т. п.

Еще одна схема основана на том, что маркировку выполняют с помощью маски. Формирование маркируемого изображения осуществляется путем проецирования ЛИ сквозь трафаретную маску.

Лазерная трехмерная гравировка позволяет создавать на поверхности изделия рельефные изображения. При этом получаемый рисунок может быть выпуклым (рельефным) или углубленным. Глубокая гравировка лазером позволяет изготавливать в металле трехмерные клише, которые не требуют никакой дополнительной обработки. Данная технология находит применение при изготовлении ювелирных и сувенирных штампов, металлических клише для тиснения, матриц-штампов, пуансонов, пресс-форм.

6.2.6. Лазерное структурирование и интерференционная металлургия

Формирование на поверхности листовых материалов из сталей и сплавов цветных металлов, керамики или полимеров элементов микрорельефа (например, штырьков сложной формы — микроантенн, решетки Брэгга) может быть осуществлено путем лазерного структурирования. Оно имеет широкую область применения:

- изготовление:
  - алмазного инструмента;
  - фильтров грубой очистки;
  - тепловых экранов;
  - подложек для катализаторов;
- дистанционное зондирование поверхности (измерение температуры, давления, использование гироскопических датчиков и пр.);
- биомимикрирование (имитирование свойств природных поверхностей — гигроскопичности, лиофильности, оптических и пр.).

Селективное структурирование поверхности осуществляется сфокусированным лучом ультрафиолетового лазера. При определенной плотности мощности ЛИ происходит селективное испарение материала основы без разрушения частичек ее наполнителя. Поэтому после обработки поверхность приобретает необходимую степень шероховатости. Одновременно с этим в местах облучения происходит распад металлоорганического комплекса, входящего в состав материала. Образовавшиеся в результате разложения частицы металла остаются на обработанных участках поверхности изделия и служат центрами металлизации при последующей обработке.

Запатентованный компанией LPKF GmbH процесс прямого лазерного формирования рисунка LDS® (Laser Direct Structuring) позволяет изготавливать из активированного в ходе процесса LDS термопластика литьем под давлением за 1 впрыск микроэлектронное изделие. С помощью лазера на подложке формируется рисунок топологии микросхемы (рис. 6.12). Металлизация этих структур производится методом химического восстановления. После окончания процесса трехмерные носители электрических схем могут поступать на сборку.

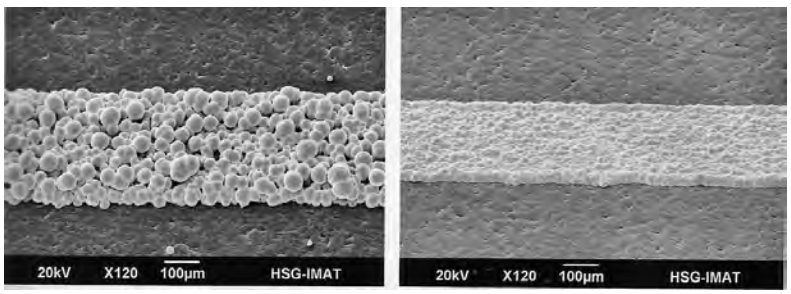


Рис. 6.12. Качество LDS-процесса микроструктурирования

Фирма LPKF GmbH начинала свою деятельность со станка для лазерной обработки и доводки печатных плат *LPKF ProtoLaser* (рис. 6.13, см. также раздел 6.2.5), который был дополнительной приставкой к стандартному сверлильно-фрезерному станку ProtoMat 95s. Это устройство позволяло вдвое повысить точность изготовления (проводники шириной 60 мкм с зазором между проводниками 40 мкм). Лазерная головка ProtoLaser закреплена непосредственно на рабочей головке станка ProtoMat. Такая комбинированная конструкция совместила в себе лучшие черты обеих технологий — механической и лазерной обработки. Использование механического инструмента позволяет быстро просверлить отверстия в плате и снять проводящее покрытие в местах, не требующих высокой точности. Поэтому несложные платы можно обработать без использования лазера. Если же точности механического инструмента не хватает, то сфокусированный лазерный луч обеспечивает испарение медной фольги в узких промежутках между проводниками. Малый диаметр пятна фокусировки позволяет довести минимальное расстояние между проводящими дорожками до 40 мкм — это вдвое точнее, чем механическим методом.

Рис. 6.13. Станок для лазерной обработки и доводки печатных плат LPKF ProtoLaser

Лазерная обработка может использоваться также для окончательной доводки уже профрезерованной платы. С помощью лазерного луча можно удалить оставшуюся в промежут-

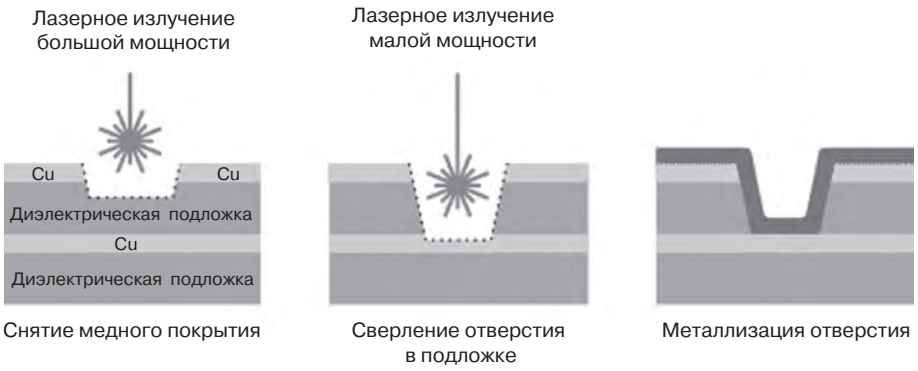


Рис. 6.14. Обработка отверстий

ках между печатными проводниками проводящую стружку или устранить другие дефекты механической обработки.

Обработка прецизионных переходных отверстий (рис. 6.14) в многослойных материалах осуществляется в три этапа.

1. На первом этапе с нужного участка поверхности платы снимается проводящее покрытие. Это осуществляется при плотности мощности излучения, достаточной для испарения металлического покрытия. Когда на поверхности платы остается достаточно тонкий слой металла, излучение лазера начинает частично проникать сквозь него, достигая материала подложки. Поэтому окончательное удаление проводящего покрытия осуществляется не только за счет испарения самого металла, но и за счет взрывообразного разрушения материала подложки, срывающего с поверхности остатки фольги. По окончании первого этапа обработки в нужных местах поверхности платы проводящее покрытие снято и материал подложки под этими участками частично разрушен.
2. На втором этапе плотность мощности ЛИ снижается до уровня, оптимального для обработки полимерного материала подложки, и выполняется дальнейшая обработка отверстия. Поскольку мощности ЛИ уже не хватает для испарения металла, то когда отверстие достигает следующего слоя фольги, его разрушения не происходит. Вместо этого поверхность фольги покрывается микроскопическими раковинами, обеспечивающими необходимую шероховатость поверхности.

   Если переходное отверстие должно соединять три и более слоев печатной платы, то мощность лазера снова повышается для прохода сквозь следующий проводящий слой и обработка повторяется с первого этапа. По окончании второго этапа обработки мы имеем готовое отверстие в плате, уже очищенное от посторонних материалов и с шероховатым дном.
3. На третьем этапе осуществляется металлизация переходного отверстия любым доступным способом. При этом отличное сцепление материала металлизации с внутренним слоем фольги достигается благодаря шероховатости ее поверхности, полученной в результате обработки на втором этапе.

Обработка изолирующих дорожек в проводящем покрытии печатной платы также осуществляется поэтапно (рис. 6.15). Дело в том, что при малой толщине фольги мощное излучение ультрафиолетового лазера начинает проникать сквозь слой металла и разрушает материал подложки под обрабатываемым участком. Поэтому процесс обработки вынужденно разбивается на два этапа.

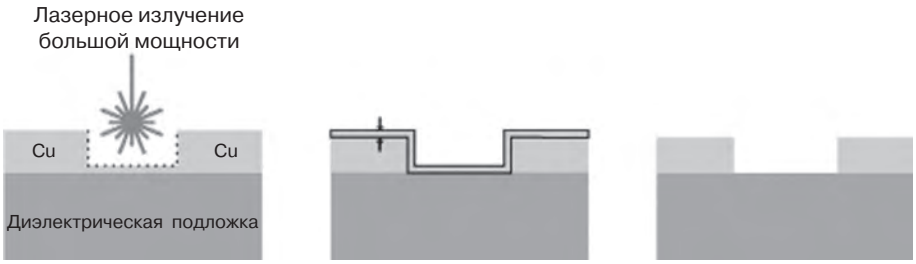
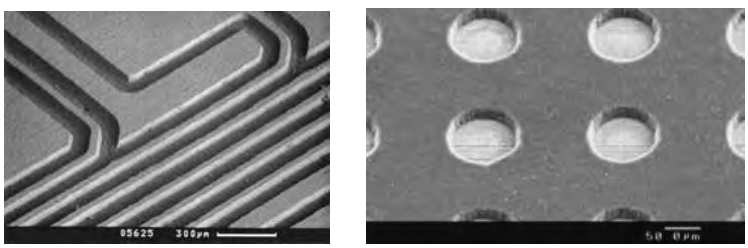


Рис. 6.15. Обработка дорожек на поверхности платы

1. На первом этапе излучение ультрафиолетового лазера большой мощности используется для испарения металлического покрытия на поверхности платы. Когда остаточная толщина покрытия составляет всего единицы микрометров, лазерную обработку прекращают, чтобы избежать разрушения материала подложки.
2. Дальнейшее удаление проводящего покрытия осуществляется стандартным химическим способом. Но поскольку травлением с поверхности платы необходимо снять всего несколько микрометров проводника, то процесс протекает довольно быстро и практически не вызывает подтравливания проводящих дорожек.

В результате комбинированной лазерно-химической обработки материала становится возможно сформировать на поверхности платы структуру проводящих дорожек с шириной и расстоянием между ними, приблизительно равными первоначальной толщине проводящего покрытия. Минимальные же размеры структуры определяются диаметром пятна фокусировки и составляют около 20 мкм. Фотография поверхности печатной платы после лазерной обработки приведена на рис. 6.16, *а*.



а *б*

Рис. 6.16. Результаты лазерного микроструктурирования: *а* — создание бороздок; *б* — прошивка отверстий

Излучение ультрафиолетового лазера позволяет формировать прецизионные структуры не только в медной фольге, но и в других материалах (рис. 6.16, *б*). С помощью станка LPKF MicroLine Drill становятся возможными прецизионная обрезка печатных плат и формирование отверстий сложной формы в материале самой платы или в покрытии на ее поверхности. Типичным примером может служить изготовление защитной маски, используемой при поверхностном монтаже компонентов. Причем большая разница в мощности, необходимой для разрушения полимерного материала и меди, позволяет обрабатывать полимерную защитную маску уже после нанесения ее на поверхность платы. На следующем рисунке представлен фрагмент защитной маски, предназначенной для монтажа на поверхность печатной платы микросхемы в корпусе BGA. Диаметр отверстий в маске составляет около 50 мкм.

Прямое лазерное формирование проводящей структуры реализуется путем формирования необходимого рисунка дорожек на тонком промежуточном слое и последующем химическом наращивании проводящих дорожек до нужной толщины. Слой металла толщиной 20...100 нм, нанесенный на поверхность полимерной подложки, может быть легко удален при облучении поверхности УФ-лазером уже при плотности мощности порядка 50...200 мДж/см^2. При этом излучение лазера, проникая сквозь металлическое покрытие, вызывает взрывообразное разрушение материала подложки, снимающее с поверхности слой металла даже без его испарения. Необходимая для этого плотность мощности значительно ниже уровня, при котором наступает разрушение самого металла, и может быть легко достигнута без фокусировки ЛИ. Это позволяет использовать для формирования рисунка высокопроизводительную проекционную установку. На рис. 6.17 схематично представлен процесс формирования проводящих дорожек на поверхности полимерного материала.

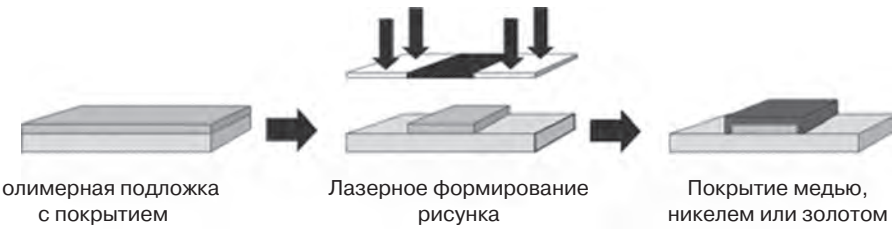


Рис. 6.17. Последовательность шагов формирования проводящих дорожек

Материал подложки, используемой для лазерного формирования проводящей структуры, должен обладать определенным набором физических и химических свойств:

- быть сертифицированным для использования в промышленности;
- иметь подходящие электрические, механические и температурные параметры;
- допускать возможность лазерной обработки поверхности без разрушения основного объема;
- обладать очень хорошим сцеплением с промежуточным покрытием;
- быть химически устойчивым по отношению к реактивам, используемым для осаждения основного проводящего покрытия.

В качестве одного из подходящих для лазерной обработки материалов может использоваться полиамид. После надлежащей подготовки поверхности и сушки на полиамидное основание напыляется промежуточный слой хрома толщиной около 20 нм, а затем медное или золотое покрытие толщиной не более 100 нм. Максимальная толщина покрытия ограничена тем, что как поверхностный слой меди, так и промежуточный слой хрома должны быть прозрачными для УФ-излучения используемого лазера. Прозрачность металлического покрытия гарантирует возникновение плазмы на границе раздела между металлическим покрытием и полиамидной подложкой. Поэтому формирование необходимой структуры происходит не в результате плавления металлического покрытия, а в результате мгновенного испарения материала подложки, приводящего к удалению металла с поверхности.

Модель LPKF Fusion3D (рис. 6.18) предназначена для работы в условиях массового производства (рис. 6.19) и призвана заменить негибкие, основанные на применении инструментальной оснастки методы производства, такие как литье со вставкой или двухкомпонентное литье под давлением.

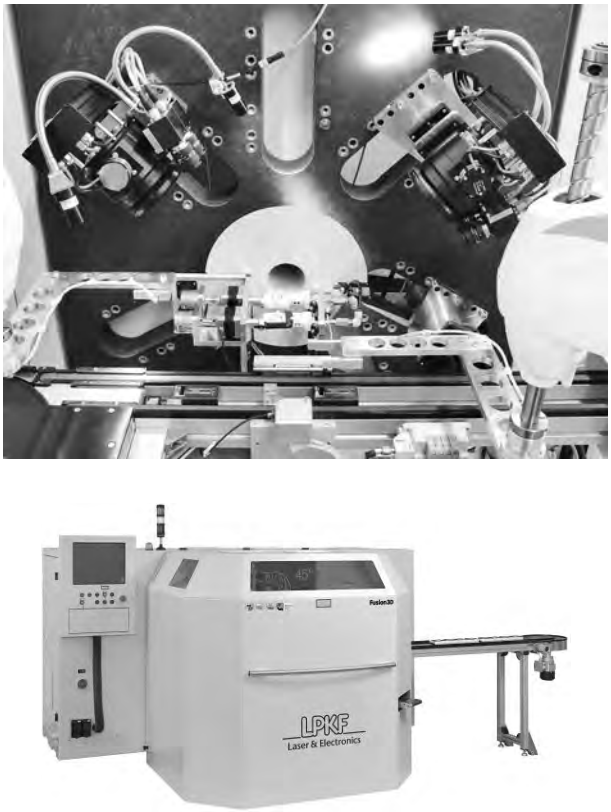


Рис. 6.18. Установка LPKF GmbH для лазерного 2D- и 3D-микро- и наноструктурирования

Рис. 6.19. Примеры использования технологии компании LPKF GmbH

Глава 7
Быстрая инструментовка

Быстрая инструментовка (Rapid Tooling) — новый термин в АТ (рис. 7.1), не имеющий четкого определения. Первоначально его относили в субтрактивным методам АТ — БП (см. главу 6), но потом он стал применяться для описания всех процессов, позволяющих быстро изготавливать именно мастер-модели и литейные формы.

К быстрой инструментовке относятся четыре типа методов, различающихся числом инверсий шаблона: прямая обработка, одноинверсная обработка, двухинверсная обработка и трехинверсная обработка. Увеличивая число инверсий, можно повысить надежность продукта на выходе, но стоимость его при этом будет расти, а точность изготовления — уменьшаться.

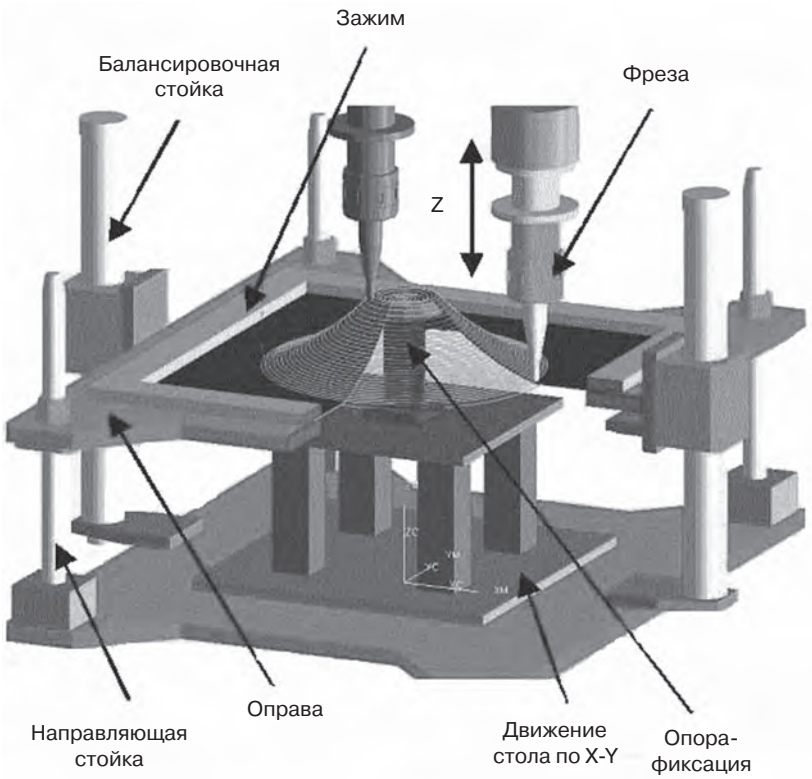


Рис. 7.1. Создание изделия при обработке фрезой

7.1. Принципиальные пути металлической инструментовки

В данной главе будут обсуждаться основные методики, позволяющие реализовать технологию БП при создании моделей и литейных форм. Следует отметить, что перечень методик, с помощью которых можно создавать мастер-формы и литейные прототипы, в технологии АП к настоящему времени также довольно широк:

- вулканизационное литье из силикона при комнатной температуре;
- вакуумное литье;
- формовое блочное литье;
- аэрозольное металлическое литье (процесс Тафа);
- литьевое прессование пластмасс;
- литье алюминия и черных металлов в песчаные формы;
- литье по выплавляемым моделям;
- создание инструментов для электроэрозионной обработки (процесс Хаузермана).

Какая методика будет наиболее выгодной, зависит от размеров и геометрии прототипа, типа материала функционального компонента, требуемой точности и количества компонентов, которые необходимо изготовить. Поэтому в данной главе обсуждаются основные моменты реализации данных методик, их преимущества и недостатки, а также направления применения.

7.2. Металлическая инструментовка, основанная на пластических моделях БП

Точное литье мастер-форм БП. При прямой инструментовке инструменты изготавливаются непосредственно путем БП. ACES-литье под давлением (Direct AIM), реализуемое фирмой 3D Systems, и литье с прямым изготовлением оболочковых форм (DSPC) из порошков для Rapid Tool фирмы DTM, Soliform являются методами прямой инструментовки.

В процессе Direct AIM стержневая и полостная вставки для литейной формы изготавливаются методом стереолитографии из SL-фотополимера с температурой стеклования всего 75 °C. Метод ACES, который мы будем обсуждать позже, — это технология изготовления, разработанная фирмой 3D Systems.

В процессе Rapid Tool фирмы DTM (рис. 7.2) используется сплав железа с малым содержанием углерода в форме частиц размером 50 мкм, покрытых полимером. Полимерный слой расплавляется машиной для лазерного спекания. Полуфабрикат green part, созданный таким способом, пропитывается растворимым в воде полимерным связующим веществом. Пропитка осуществляется путем погружения green part на глубину около 0,5 мм в ванну с полимером. Благодаря капиллярному эффекту компоненты высотой до 100 мм полностью пропитываются за полчаса. В этом состоянии они очень непрочны, поэтому обращаться с ними следует чрезвычайно осторожно. Пропитанная green part высушивается в вакууме и при температуре 50 °C в атмосфере азота. На последнем шаге процесса используется печь для спекания. Сначала усиленная green part взвешивается, по результату взвешивания определяется количество медного сплава, необходимое для пропитки детали.

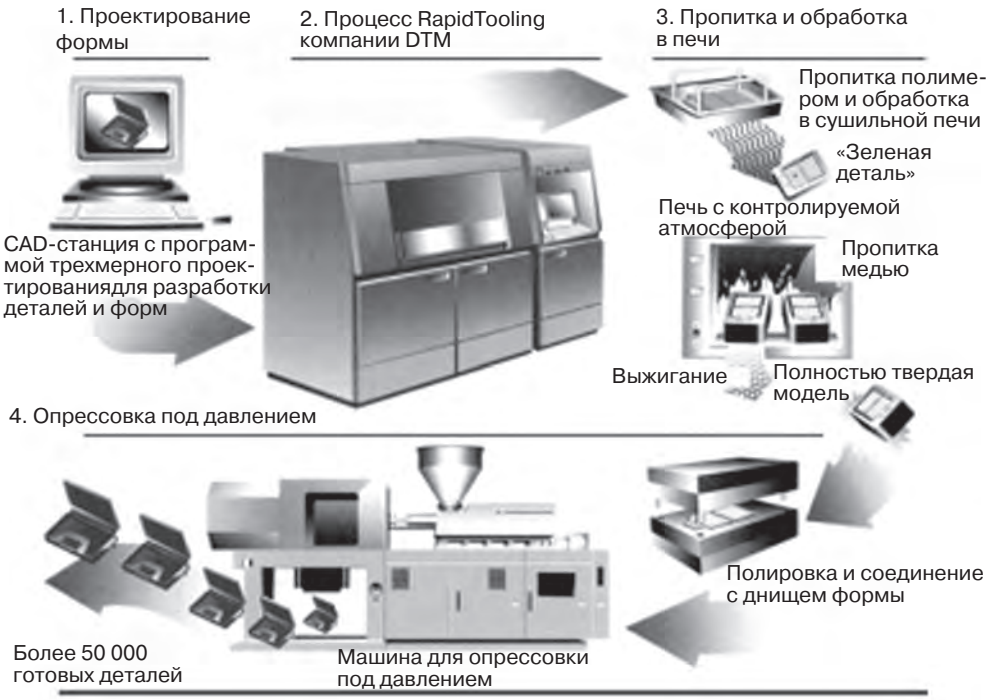


Рис. 7.2. Процесс Rapid Tool для опрессовки под давлением

Усиленная green part и медный сплав помещаются в графитовый тигель. Процесс начинается с того, что в два этапа выдавливается полимерный связывающий агент. Затем деталь нагревается до температуры, при которой железный порошок начинает плавиться и между соседними частицами металла образуются перемычки. Пока железный порошок не расплавился до конца, пористость остается высокой. Температура в печи увеличивается, в результате чего медный сплав, который был помещен в графитовый тигель, начинает проникать внутрь компонента за счет капиллярного эффекта. После охлаждения до комнатной температуры готовый компонент инструмента можно вынимать из печи. Полностью затвердевший компонент имеет в своем составе 60% стали и 40% меди.

Время, требующееся на то, чтобы изготовить green part, зависит в основном от ее размера, а не сложности. При горизонтальных размерах базовой области 180×150 мм и высоте 50 мм процедура лазерного спекания green part длится 2–4 ч. Пропитка полимером и последующая сушка занимают приблизительно 48 ч. Для завершающей обработки в печи требуется около 48 ч. Таким образом, изготовление занимает 5 дней, и эта длительность относительно независима от сложности детали. Все процессы выполняются без какого-либо вмешательства человека. В частности, для завершающего процесса обработки в печи предусмотрены множество различных функций и соответствующие программы безопасности. По этой причине в расписание работ можно включать выходные дни. Совокупное время подготовки составляет около 4 ч.

Литье из стереолитографических моделей. Литье с прямым изготовлением оболочковых форм (Direct Shell Production Casting (DSPC)) — это патентован-

ный процесс безмодельного литья, дающий на выходе функциональные металлические детали (например, головку блока цилиндров автомобильного двигателя) за дни вместо месяцев. В основе технологии DSPC лежит трехмерная печать — процесс, запатентованный Массачусетским технологическим институтом, исключительную лицензию на который имеет фирма Soligen.

CAD-файл спроектированной детали передается по сети в модуль проектирования оболочки (Shell Design Unit (SDU)) системы DSPC. Затем оператор SDU проектирует керамическую форму для отливки металлической детали, добавляя в геометрию детали литниковую систему и преобразуя обновленный файл в полостной файл в CAD-пространстве. Это одноразовый процесс, по результатам которого можно изготовить множество идентичных керамических форм. После этого по полостному файлу сечений автоматически послойно изготавливается керамическая литейная форма. Создание каждого слоя включает в себя три шага. Сначала модель керамической формы «разрезается» — получается поперечное сечение. Затем валиковым механизмом раскатывается слой тонкого порошка. После этого область поперечного сечения формы сканируется многоструйной печатающей головкой, наносящей связующее вещество. Проникая в поры между частицами порошка, связующее вещество формирует из них жесткую структуру. Далее модель керамической формы снова разрезается, теперь уже несколько выше, и процесс повторяется. Так продолжается, пока не затвердеют все слои формы. Затем форма очищается от избыточного порошка и обжигается, после чего в ней можно производить отливку.

DSPC-форма может содержать цельный керамический стержень, что позволяет отливать полые металлические детали. Для литья в DSPC-формы можно использовать практически любые металлы. С помощью этой технологии изготавливались детали автомобилей из алюминия, магния, мягкого железа и нержавеющей стали. Процесс литья с прямым изготовлением оболочковых форм показан на рис. 7.3.

Одноинверсные методы (Single Reverse Methods) предназначены для непосредственного преобразования различных подходов АП в литые детали из других материалов. Литье по выплавляемым моделям, аэрозольное металлическое литье и вулканизационное литье из силиконовой резины являются одноинверсными методами. Процесс одноинверсной инструментовки изображен на рис. 7.4.

Прямое использование стереолитографии. *Литье по выплавляемым моделям* — это прецизионный процесс литья, используемый для изготовления металлических деталей почти из любых сплавов. Хотя в прошлом этот метод использовался главным образом для создания произведений искусства, теперь он широко используется в производстве компонентов, требующих сложного, высокоточного, зачастую тонкого литья высокого качества. В отличие от литья в песчаные формы, где по одной модели можно изготовить большое количество форм, при литье по выплавляемым моделям для каждой отливки необходимо использовать новую форму. Эти модели, обычно изготавливаемые методом литья под давлением, сделаны из воска, формула которого специально подобрана для этого процесса. Готовую восковую модель объединяют с другими восковыми компонентами, образуется система подачи металла, называемая системой литников и желобов (gate and runner systems). Далее восковую конструкцию опускают в суспензию, обсыпают песком и оставляют высыхать. Многократные процедуры погружения и обсыпания повторяются до тех пор, пока не будет наращена оболочка толщиной 6.35...9,50 мм. По высыхании керамики сборка помещается в паровой автоклав, чтобы удалить большую часть воска. После автоклавирования воск, впитавшийся в керамическую оболоч-

ку, выжигается в воздушной печи. В результате получается пустая оболочка. Затем ее нагревают до определенной температуры и заливают в нее расплавленный металл. Нагревание формы помогает заполнить сложные конфигурации и тонкие места. Когда отлитая деталь достаточно охладится, оболочка обламывается с формы, после чего удаляются литники и желобки. Таким образом, процесс требует, чтобы для каждой новой отливки создавалась, а затем разрушалась отдельная модель.

Традиционный метод литья по выплавляемым моделям с опрессовкой под давлением изображен на рис. 7.5, *а*. БП позволяет сэкономить время, устраняя необходимость в изготовлении формы для литья под давлением. Процесс литья по выплавляемым моделям, включающий использование модели, выполненной методом БП, показан на рис. 7.5, *б*.

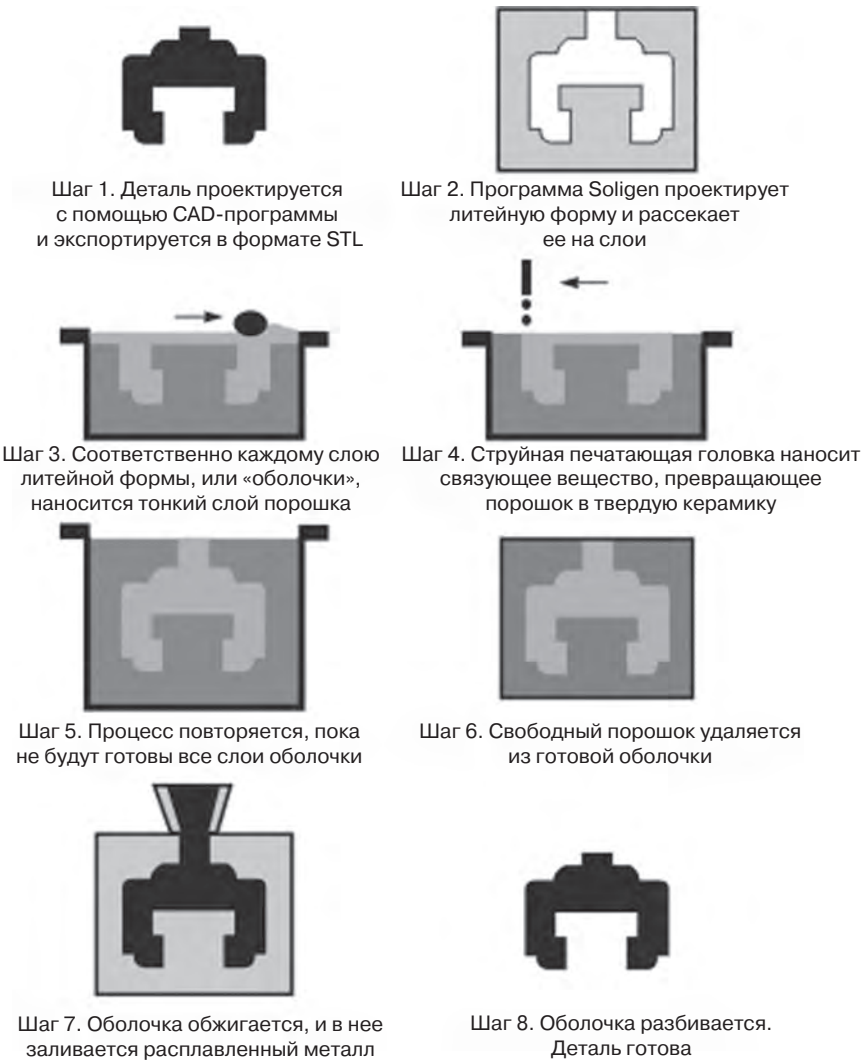


Рис. 7.3. Литье с прямым изготовлением оболочковых форм

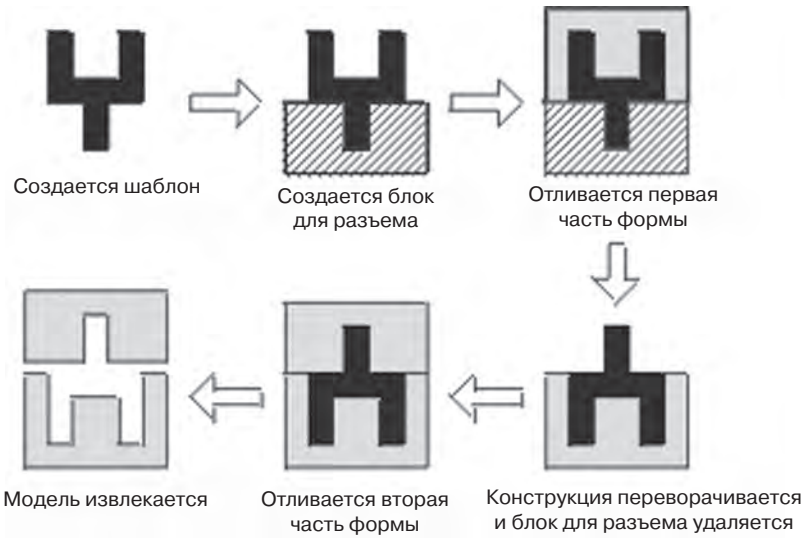


Рис. 7.4. Процесс одноинверсной инструментовки

Косвенное использование стереолитографии. *Литье в песчаные формы* используется в случаях, когда гладкость поверхности готового изделия не является критичной. Это технология крупносерийного производства, требующая стабильных литейных моделей, стержней и стержневых ящиков. Для создания крупных, громоздких моделей и стержней, используемых при литье в песчаные формы, хорошо подходит процесс изготовления ламинированных объектов. Когда требуется 100 компонентов, ламинированные детали можно отполировать, герметизировать, покрасить и использовать непосредственно для создания отпечатков в песке.

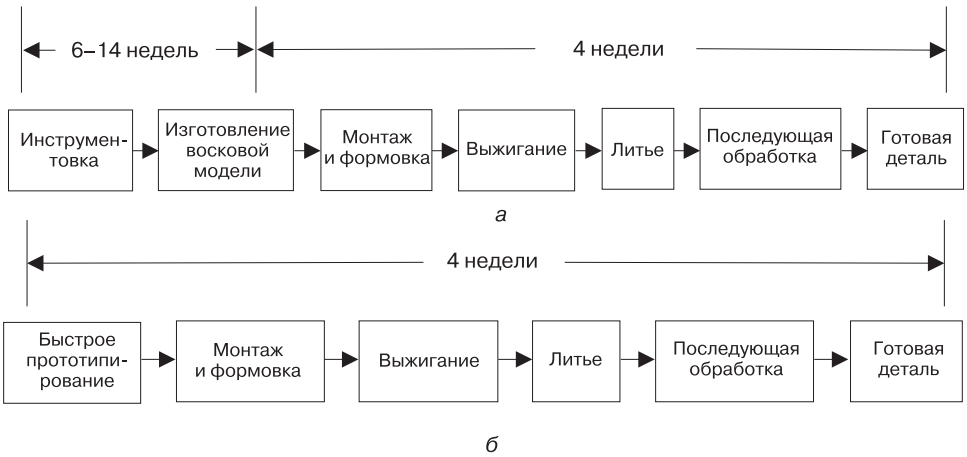


Рис. 7.5. Литье по выплавляемым моделям: *а* — традиционный метод; *б* — использование прототипа, изготовленного методом БП

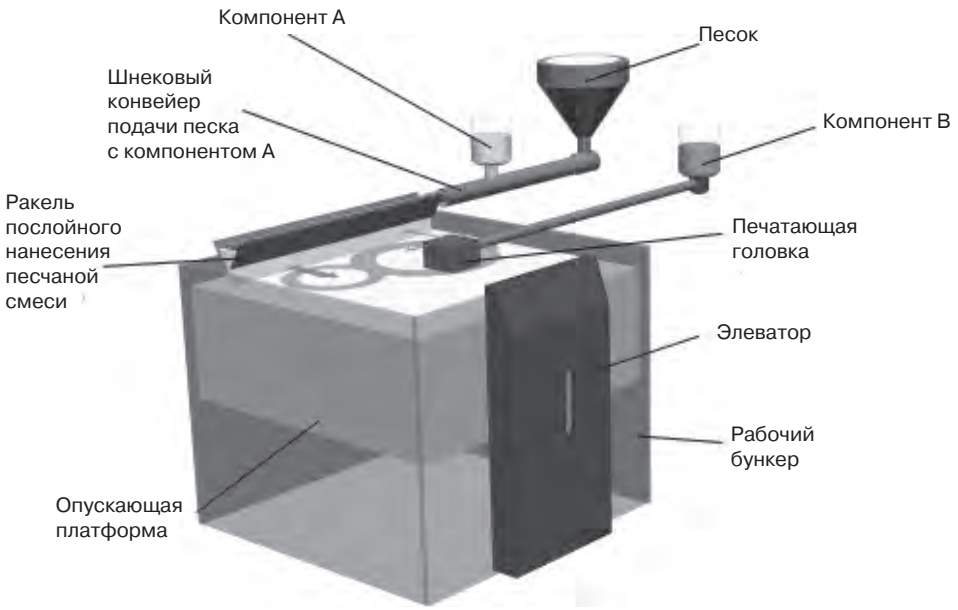


Рис. 7.6. Схема литья в песчаные формы

Метод (рис. 7.6) заключается в послойном нанесении песка, предварительно смешанного с компонентом А (отвердителем), и нанесении в необходимых местах с помощью многоструйной печатающей головки компонента В (смолы). Несвязанный песок впоследствии удаляется пылесосом. Технологический процесс послойного изготовления литейных форм и стержней из песка непосредственно по данным компьютерного проектирования имеет следующие преимущества: применяются формовочные пески и смолы, которые обычно используются в литейной промышленности; можно изготавливать литейные формы и стержни любой сложности; несвязанная смесь, окружающая изготавливаемую форму, обеспечивает фиксацию при построении; технология полностью совместима с технологией литья в землю.

7.3. Металлическая инструментовка, основанная на металлических моделях БП

Многокомпонентный металлический порошок (лазерное спекание). *Аэрозольное металлическое литье* — процесс Тафа (Spray Metal Moulding) применяется для изготовления форм для мелкосерийного литья прототипов под давлением. Технология изготовления форм электродуговым напылением — это процесс, очень точно воспроизводящий модель. Любая модель или образец, изготовленные из таких материалов, как фотополимер, металл, дерево, комбинации дерева, воска, ткани и гипса, могут быть покрыты металлической оболочкой нужной толщины. Это позволяет не только точно скопировать мельчайшие детали поверхности модели, но и точно воспроизвести ее форму и размеры. Технология напыления не имеет проблем тепловой деформации или коробления. Копия настолько точна, что металлическая оболочка сравнима по точности с гальванопластической ре-

пликой, однако процесс протекает намного быстрее. Чтобы напылить оболочку площадью 0,1 м^2, толщиной 1,6 мм, потребуется всего около 10 мин. Процесс универсален и не имеет ограничений по размеру модели. Он применяется как для малых деталей размером с монету, так и для деталей самолета площадью 12 м^2. Процесс аэрозольного металлического литья с использованием модели, выполненной методом БП, иллюстрирует рис. 7.7.

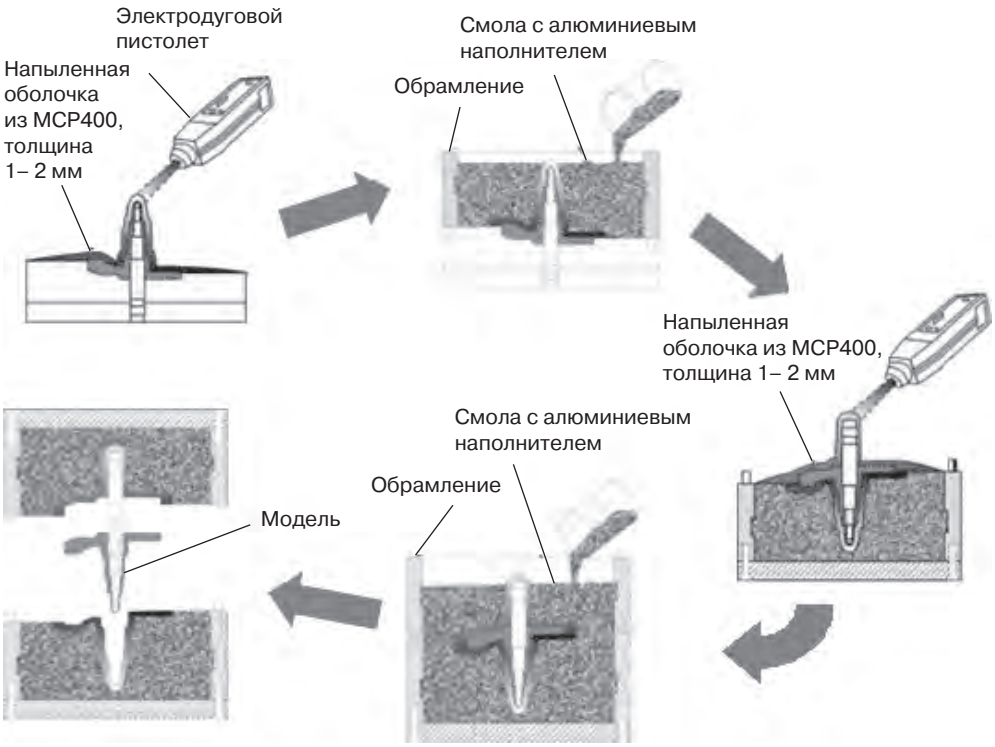


Рис. 7.7. Процесс аэрозольного металлического литья с использованием модели

Вулканизационное литье из силиконовой резины при комнатной температуре (Room Temperature Vulcanizing (RTV)) — быстрый и недорогой процесс, применяемый для создания пластиковых компонентов. Здесь прототип используется в «положительной» форме окончательной детали. К прототипу присоединяется вертикальный литник (обычно с помощью суперклея); литник и прототип промываются не оставляющей ворсинок тряпкой, смоченной изопропиловым спиртом, а затем их осторожно подвешивают внутри чистого ящика из гофрированной бумаги. В ящик заливается силиконовый материал, который полностью покрывает прототип. После этого все вместе — ящик, неотвержденный материал, прототип и литник — помещается в вакуумную камеру и дегазируется при комнатной температуре. Это делается для того, чтобы избавиться от содержащихся в материале пузырьков воздуха, которые могут стать причиной появления дефектов поверхности формы, если окажутся на границе между прототипом и материалом. После дегазации материала, длящейся около 5 минут, все сооружение помещается в термостабилизированную печь и сушится в течение приблизительно четырех часов при температуре 50 °C.

Процесс сушки при вулканизационном литье является экзотермическим, поэтому форму необходимо медленно охлаждать до комнатной температуры (примерно в течение часа), чтобы свести к минимуму искажения. После этого форму с прототипом извлекают из ящика и разрезают скальпелем, в результате чего образуется поверхность разъема. Практика показывает, что в действительности лучше намеренно делать разрез волнистым ближе к краю формы, но значительно более гладким вблизи прототипа. В результате взаимное положение выпуклостей и впадин каждой из половин формы будет точно определено. Процедура вулканизационного литья из силиконовой резины изображена на рис. 7.8.

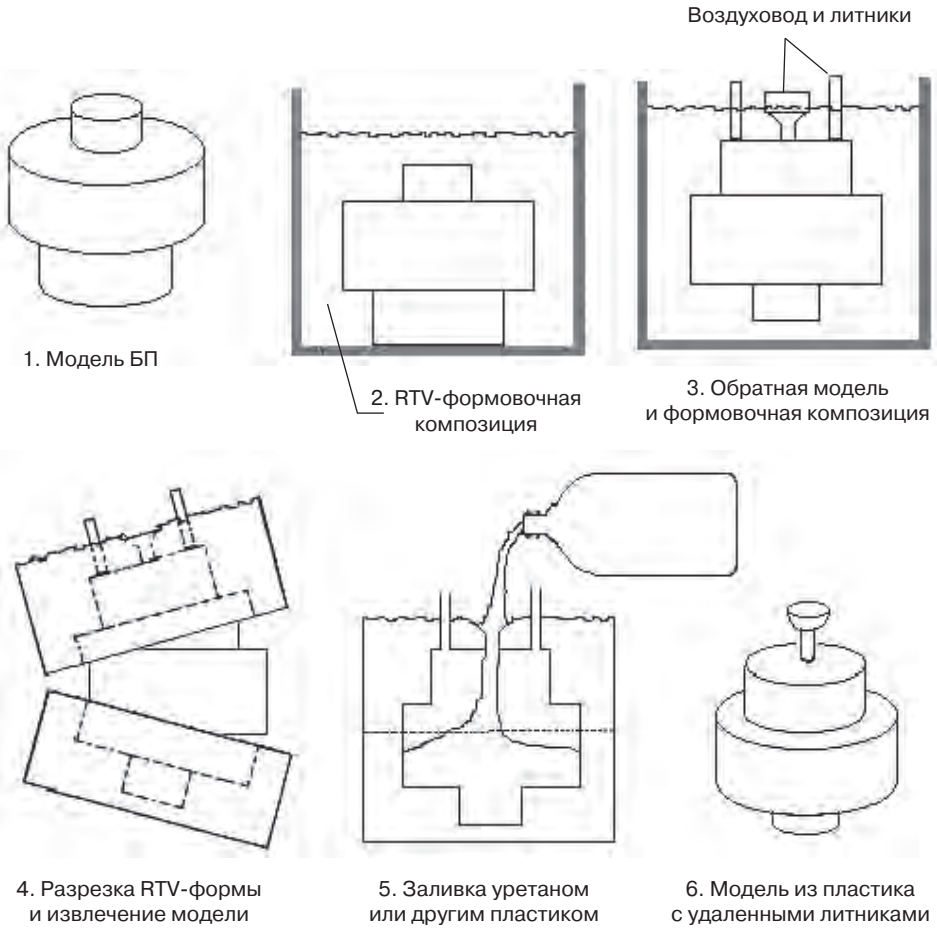


Рис. 7.8. Процедура вулканизационного литья из силиконовой резины при комнатной температуре

В готовую форму можно заливать в вакууме любой из широкой гаммы полиуретанов. Есть множество составов, специально предназначенных для вакуумного литья и обладающих требуемыми свойствами — твердостью, прочностью на изгиб, модулем изгиба, прочностью на разрыв, модулем разрыва, удлинением на разрыв и прочностью на удар с надрезом по Изоду.

Если требуется изготовить тысячи компонентов, стержни и полости можно преобразовать в модели из твердого пластика (методом вулканизационного литья), алюминия или стали (методом литья по выплавляемым моделям). Этот *двухинверсный метод* был разработан с целью преодолеть недостатки методов прямой инструментовки и одноинверсных, в частности ненадежность. Двухинверсный метод инструментовки изображен на рис. 7.9.

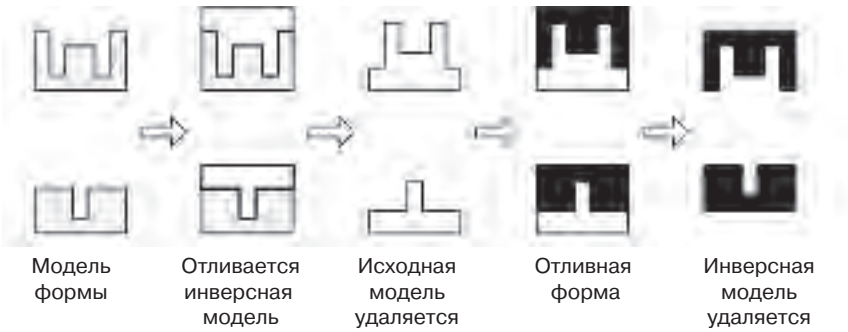


Рис. 7.9. Двухинверсная инструментовка

Однокомпонентный металлический порошок (лазерное спекание). В *трехинверсном методе* литейная модель, изготовленная путем одноинверсной инструментовки (рис. 7.10, *а*), преобразуется в литейную форму (рис. 7.10, *б*). Литье в гипсовые формы и метод 3D Keltool от 3D Systems могут быть отнесены к трехинверсным методам.

Литье в гипсовые формы используется для изготовления алюминиевых компонентов высокой степени сложности, требующих большей гладкости поверхности, чем можно достичь при литье в песчаные формы. Литье в гипсовые формы идеально для компонентов, гладкость поверхности которых должна быть близка к той, которая обеспечивается литьем под давлением. В этом процессе сначала создается дубликат прототипа в виде модели из гибкой резины, которая затем используется для изготовления одноразовых гипсовых форм, куда можно заливать расплавленный металл. Применение гибкой резины обусловлено тем, что ее можно легко удалить из довольно хрупких гипсовых форм.

Первый шаг при литье в гипсовые формы — изготовление формы из резины, эпоксидной смолы или полиуретана, в качестве модели для которой служит прототип (рис. 7.11, *а*). Этот процесс аналогичен тому, с помощью которого изготавливаются формы из силиконовой резины для литья из эпоксидной смолы. Сначала прототип помещается в формовочный ящик. В ящик до планируемой линии разъема заливается жидкий материал, ему дают затвердеть. Когда первая половина формы затвердеет, разъемную поверхность обрабатывают разделительным составом, после чего заливают вторую половину формы и дают ей застыть. Для деталей, не имеющих четко определимой линии разъема, можно сделать форму из нескольких секций. По этой первой форме изготавливается модель из гибкой резины, которая затем устанавливается в формовочный ящик и аналогичным образом заливается ячеистым гипсом. Можно легко разнять готовые половинки гипсовой формы и вынуть резиновую модель, не сломав гипс. После удаления резиновой модели половинки гипсовой формы сушат в печи в течение 24...48 ч для полного затвердевания.

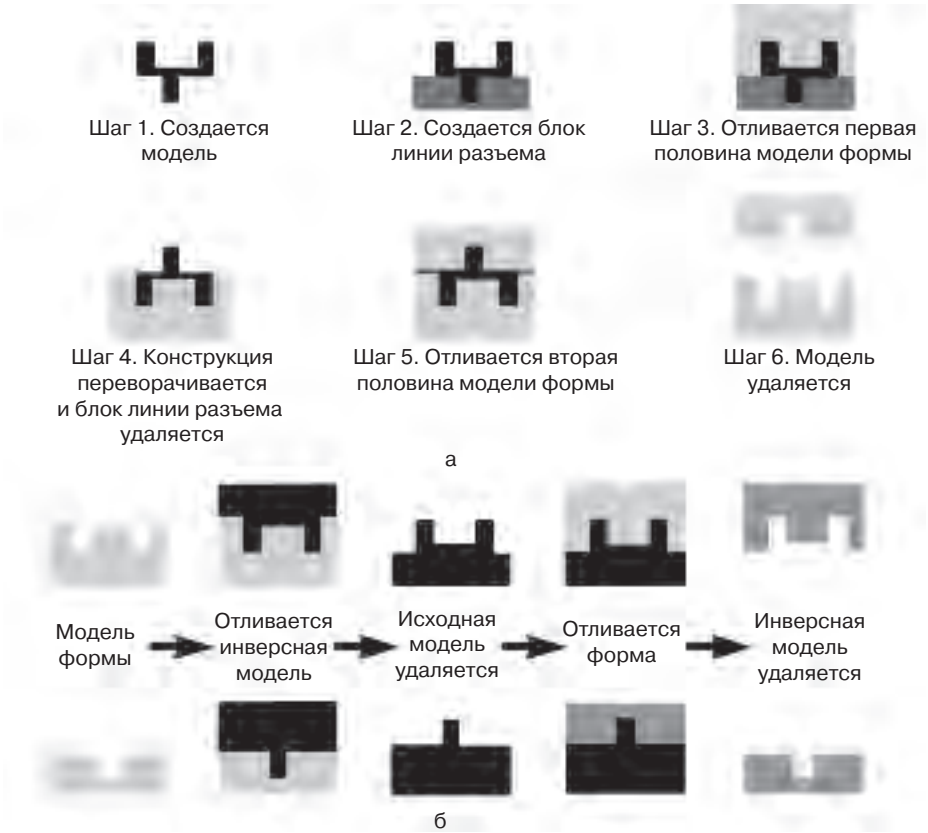


Рис. 7.10. Трехинверсный метод: *а* — одноинверсный процесс создания резиновой формы; *б* — двухинверсный процесс создания инструментов

Высушенные половинки вновь скрепляются, и в них заливается расплавленный алюминий, магний или цинк (рис. 7.11, *б*). Когда металл остынет, гипсовые формы разбивают или смывают струей воды высокого давления. По одной гипсовой модели обычно можно изготовить 25...100 гипсовых форм. Если нужны дополнительные резиновые модели, их можно отлить в исходную форму из эпоксидной смолы.

В *методе 3D Keltool* используется патентованный процесс спекания металла для изготовления стержневых и полостных вставок непосредственно по прототипу, полученному методом стереолитографии. Срок службы форм, созданных методом 3D Keltool (полости и стержни имеют твердость по Роквеллу до 50), близок к сроку службы стандартных стальных форм, а кроме того, эти формы имеют лучшую теплопроводность при меньших длительностях цикла.

После надлежащей обработки прототип готов к процессу 3D Keltool. Здесь прототип может иметь положительную или отрицательную форму (рис. 7.12). Главное преимущество прототипов с положительной геометрией состоит в том, что их гораздо легче шлифовать и полировать. Эти положительные прототипы, используемые в процессе обратной генерации (Reverse Generation), где слово «обратный» относится к процессу инструментовки, очень похожи на законченную деталь, из-

готовленную методом литья под давлением, если не учитывать необходимость компенсации усадки и свойств материала. Прототипы с отрицательной геометрией, используемые в процессе прямой генерации (same generation), аналогичны готовым стержневым и полостным вставкам, даже если не брать в расчет компенсацию усадки и свойства материала.

Для должным образом обработанного положительного прототипа, полученного методом стереолитографии (первый шаг в правой части рис. 7.12), первый шаг процесса 3D Keltool включает формирование прототипа в ящике (второй шаг в правой части рис. 7.12).

Далее в ящик заливается дегазированный в вакууме силикон. После его затвердевания положительный прототип и силикон извлекаются из ящика. Результатом второго дополнительного шага является промежуточная форма с отрицательной геометрией, сделанная из силикона (третий шаг на рис. 7.12). На следующем шаге изготавливается окончательная «положительная в ящике» силиконовая форма (четвертый шаг на рис. 7.12).

Теперь форма является практически дубликатом оригинального положительного прототипа, за исключением того, что она существует в виде «положительной в ящике» формы. Патентованная смесь из металлических частиц (например, инструментальная сталь А6 с патентованным связующим составом) тщательно размешивается и заливается в «положительную в ящике» форму, после чего ей дают затвердеть (пятый шаг на рис. 7.12). То, что получается после затвердевания, представляет собой green part, имеющую достаточную прочность для того, чтобы

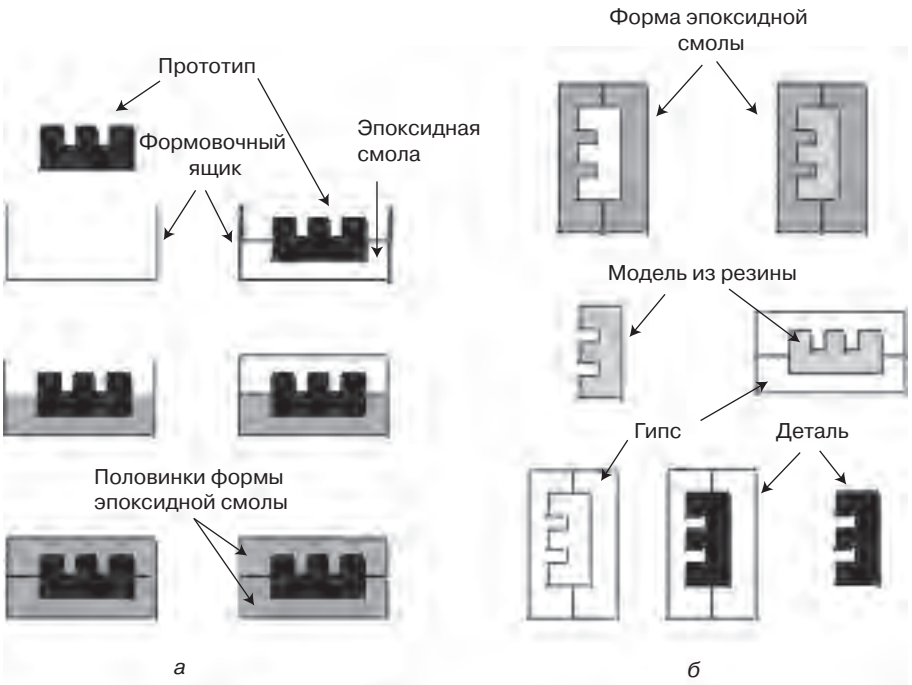


Рис. 7.11. Процесс литья в гипсовые формы: *а* — шаг 1; *б* — шаг 2 (источник: Rapid Prototyping Report. 1995. Vol. 5, № 1. CAD/CAM Publishing, Inc., January)

в точности поддерживать свою геометрическую форму при обычном обращении. Потом green part удаляется из «положительной в ящике» формы и обжигается при температуре, достаточно высокой для того, чтобы сплавить частицы металла и выжечь связующее вещество. Наконец, обожженная деталь, состоящая примерно на 70% из стали, а на 30% — из пустот, пропитывается медью. Конечный результат представляет собой стопроцентно твердую полость формы (шестой шаг на рис. 7.12).

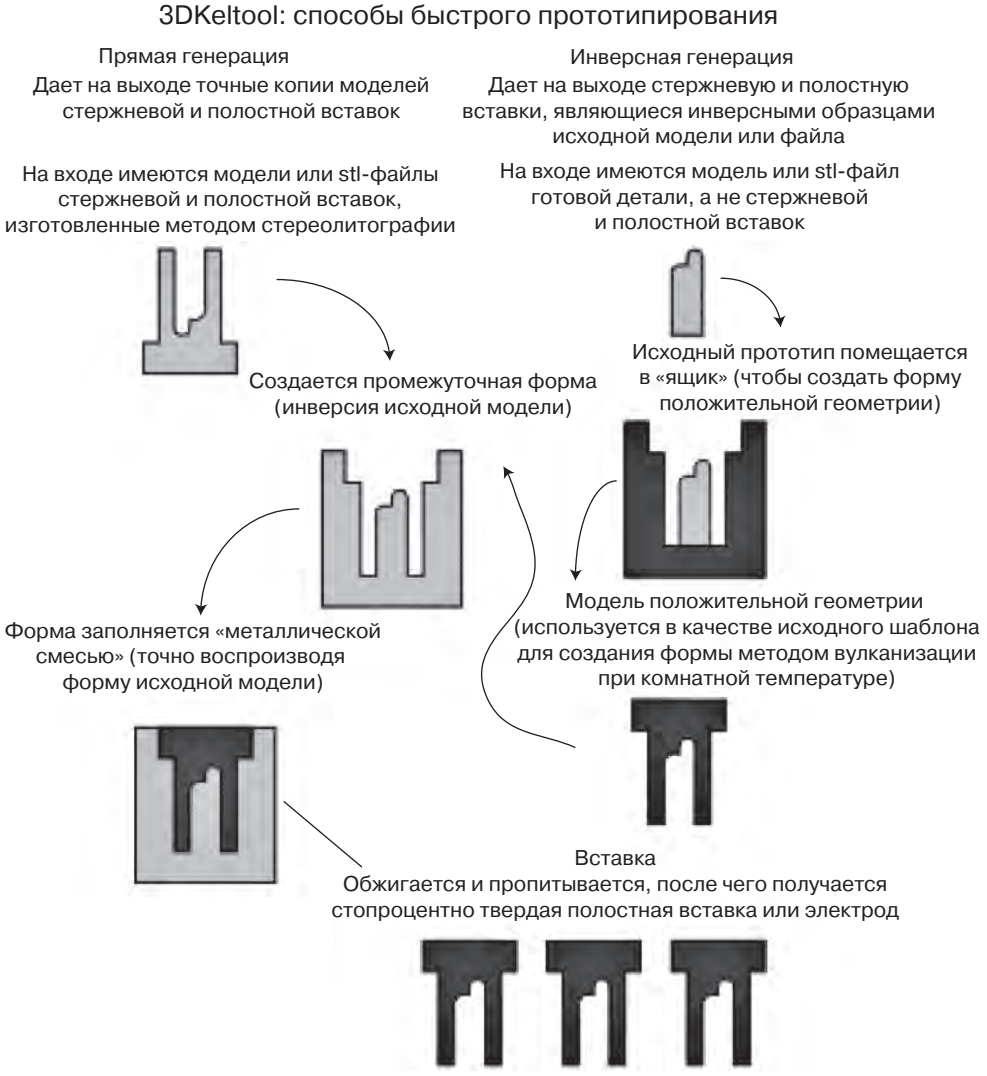


Рис. 7.12. Два способа получения металлических вставок с использованием процесса 3D Keltool (с разрешения 3D Systems, Inc.)

С помощью одной вставки, изготовленной по методу Keltool, было отлито под давлением 10 млн деталей из чистого пластика. На данный момент размер вставок, выполняемых по методу 3D Keltool, ограничен 150 мм по всем трем измерениям, что дает максимальный размер детали около 100 мм. В настоящее время проводятся исследования, целью которых является увеличение размеров изготавливаемых деталей.

μMIM — микроинжекционное формование металла. Рассматриваемый далее метод формования металла методом впрыска (*Metal Injection Molding* (MIM)) нашел применение при изготовлении авиационных деталей. На рис. 7.13 показан процесс производства деталей. Сначала порошок металла смешивают с пластичным наполнителем, потом получившуюся массу впрыскивают в форму. При этом форма должна быть получена методами АП. Сначала полученную заготовку отжигают в печи, чтобы удалить наполнитель, потом выполняют окончательное спекание при высокой температуре.

Рис. 7.13. Процесс производства деталей методом MIM

В зарубежном турбиностроении технологию изготовления деталей из порошковых никелевых материалов методом MIM активно применяют в серийном производстве (рис. 7.14).

Микроинжекционное формование методом впрыска сейчас находится на подъеме и применяется во многих приложениях (рис. 7.15). Причем, если сравнивать затраты на массовое производство (рис. 7.16) и сопоставимую точность воспроизводства микродеталей (рис. 7.17), например с технологией RMPD от фирмы MicroTEC (см. раздел 3.8.2), сравнение может оказаться не в пользу последней.

Рис. 7.14. Блок направляющих лопаток ГТД с сотовым ячеистым уплотнителем, изготовленный методом MIM

Рис. 7.15. Примеры μMIM-материалов и их применения (с разрешения 3D MICROMAC AG)

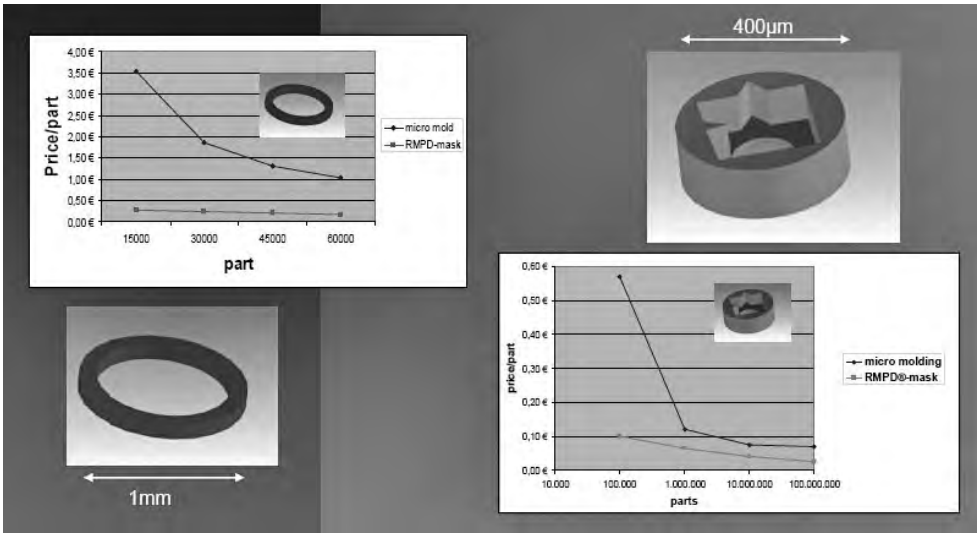


Рис. 7.16. Сравнение µMIM- и RMPD-технологий

Глава 8
Обратный инжиниринг

Быстрое копирование, или реинжиниринг (Reverse Engineering), — это способ получения трехмерных данных об объекте в компьютеризированной форме из физических моделей или продуктов. Он имеет явные преимущества в смысле сокращения времени прохождения продукта от стадии проектирования до выхода на рынок, а также эффективного использования в совокупности с другими технологиями, помогающими экономить время, такими как БП и тиражирование. Процесс инженерного анализа состоит из двух фаз: оцифровки, или измерения геометрии детали, и трехмерного моделирования детали на основе данных оцифровки (рис. 8.1).

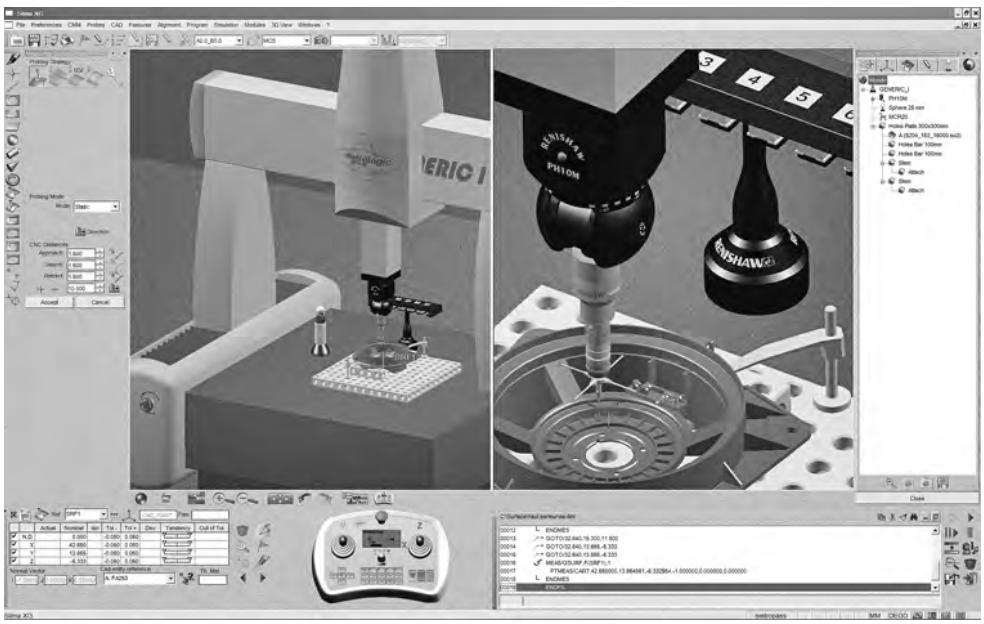


Рис. 8.1. Ручной трехмерный сканер Metrological XG с программным пакетом Silma XG

Поверхности, определенные по данным оцифровки, обрабатываются и превращаются в твердотельную модель, которую можно экспортировать в STL-файл. Перенеся STL-файл на машину для БП, можно изготавливать копии отсканированной модели. Трехмерные сканеры являются основным инструментом для автоматизированного процесса оцифровки. Ряд графических пакетов (Magics) включают в себя опцию — интерфейс оцифровки данных, полученных с трехмерных сканеров, и поддерживаемые сканерами форматы представления данных.

Трехмерное сканирование — это процесс перевода геометрии реальных физических объектов в цифровую форму, то есть создание высокоточных трехмерных моделей объектов. 3D-сканирование (объемное сканирование) может применяться при решении задач обратного инжиниринга, 3D-моделирования или метрологического контроля и анализа.

8.1. Основы обратного проектирования и конструирования

Достижения научно-технического прогресса в области проектирования и изготовления новых изделий позволяют до минимума сократить временные и материальные издержки, необходимые в течение жизненного цикла изделия. При изготовлении нового изделия, как правило, создают его математическую модель в любой CAD-среде. Но часто требуется воссоздать уже существующее изделие, сделать его дубликат. Если изделие имеет простую форму, то процесс проектирования занимает немного времени и требует небольших затрат. Но все далеко не так в случае увеличения сложности объекта (например, если это археологический или криминалистический артефакт), точную копию которого требуется создать. Тогда создание математической модели в CAD-системе становится практически невозможным либо требует больших временных и материальных ресурсов.

В данном случае для формирования компьютерного представления изделия можно применить технологию трехмерного сканирования. Трехмерное сканирование — это систематический процесс определения координат точек, принадлежащих поверхностям сложнопрофильных физических объектов (в частности, деталей), с целью последующего получения их пространственных математических моделей, которые могут модифицироваться с помощью CAD-систем. Полученную математическую модель можно использовать в качестве входных данных для станков с ЧПУ или системы БП.

Устройства, с помощью которых осуществляется сканирование объектов, называют трехмерными сканерами. Эти устройства не только упрощают процесс создания трехмерных моделей, но и позволяют решать эту задачу с максимальной степенью достоверности по отношению к исходному оригиналу. Созданную трехмерную модель в дальнейшем можно использовать как шаблон для формирования параметрической модели в любой CAD-среде.

В отличие от контактного (механического) сканирования поверхности, неконтактное лазерное сканирование является новейшей технологией. Несмотря на относительно небольшой срок существования, она находит применение при решении большого спектра задач, который по мере освоения возможностей метода продолжает расширяться. Задачи, решаемые методом неконтактного лазерного сканирования с использованием неконтактного лазерного сканера, можно условно объединить в четыре большие области применения.

1. Техническое проектирование. Включает такие задачи, как:
   - ❖ индустриальный дизайн, создание вручную трехмерных моделей и их оцифровка с последующей доработкой методами машинной графики;
   - ❖ создание трехмерных моделей имеющихся штампов, пресс-форм и других изделий сложной формы, например уникальных, в случае необходимости их изменения, ремонта или повторного воспроизведения;
   - ❖ инженерный трехмерный анализ, измерение геометрических параметров изделий, которые не могут быть измерены стандартными методами;
   - ❖ онлайн-контроль качества (метрология, то есть проверка точности изготовления).
2. Архитектура, искусство, ювелирное дело. В этих областях трехмерное сканирование применяется:
   - ❖ для реставрации путем создания банка электронных копий (виртуального архива) и последующего изготовления или восстановления (промышленного воспроизведения) оригиналов скульптур и других рельефных изделий (сувениров, ювелирных украшений, барельефов, горельефов и т. д.);
   - ❖ для создания виртуальных архитектурных музеев и баз данных уникальных произведений искусства.
3. Медицина. В медицине основное применение такие системы нашли при хирургическом планировании, в ортопедии, протезировании, пластической хирургии и косметологии.
4. Археология и криминалистика. В последнее время системы трехмерного сканирования стали использовать в этих областях для решения следующих задач:
   - ❖ виртуального сохранения произведений искусства;
   - ❖ создания документации с трехмерными изображениями объектов;
   - ❖ виртуальной реставрации, а также копирования для последующей репликации;
   - ❖ создания виртуальных музеев и криминалистических баз данных.

Принцип работы трехмерного сканера заключается в следующем: пучок, излучаемый лазером I класса, направляется поворотным зеркалом на объект, отражаясь от которого непосредственно через объектив, попадает снова в аппарат, где и регистрируется встроенной цифровой камерой. Согласование включения лазера с электромеханическим приводом зеркала осуществляется в автоматическом режиме. Освещенность обеспечивается самим лазерным пучком. Это очень удобно, так как не требуется мер для создания дополнительного освещения. Управлять процессом сканирования можно как с помощью компьютера, так и вручную.

В связи с тем что средства трехмерного сканирования появились сравнительно недавно, технология быстрого клонирования твердотельных изделий недостаточно хорошо отработана и существует ряд проблем, требующих решения. К таким проблемам можно отнести:

- ❑ наличие шумов при трехмерном сканировании. В процессе сканирования получается скан, имеющий помимо изображения самого объекта множество микрообъектов, представляющих собой мусор. Эти объекты нужно убрать. Сейчас это делается вручную, что занимает довольно много времени;
- ❑ то, что при сканировании объекта всегда имеются области, которые сканер не может охватить (например, основание детали, на котором она стоит в процессе сканирования). Следовательно, требуется выполнить повторное сканирование

недостающих частей изделия. В результате получается набор сканов, из которых впоследствии нужно сформировать единую трехмерную математическую модель объекта.

Для изготовления пресс-формы объекта по его математической модели, созданной с помощью трехмерного сканера, требуется разработка специального программного обеспечения. В данном случае в процессе сканирования можно получить полигон точек, расположенных в пространстве и формирующих поверхность (контуры) изделия. Однако для инверсии в существующих CAD-системах требуется параметрическая либо твердотельная модель объекта. При этом математическая модель, полученная с помощью трехмерного сканера, часто имеет разрывы поверхностей, которые не позволяют использовать ее в качестве входных данных для системы БП.

Для решения поставленных задач был проведен анализ существующих методов сканирования и технологий БП и на их основе разработаны алгоритмы для решения задач трехмерного сканирования и формирования математической модели, используемой в задачах БП.

В процессе сканирования оператор создает несколько сканов — отдельных трехмерных снимков, охватывающих часть объекта, а затем воссоздает математическую модель поверхности объекта. При этом оператор должен очистить каждый скан от мусора. Под мусором понимается множество паразитных трехмерных объектов, выявленных на сканах. Появление данных областей обусловлено технологией лазерного сканирования, когда отражение луча от поверхности объекта создает рассеивание, а детектор сканера фиксирует наличие микрообъектов вокруг объекта сканирования. Для очистки сканов от микрообъектов можно использовать ручную либо автоматическую обработку.

Ручная обработка сканов выполняется стандартными средствами любого 3D-редактора. Однако данный процесс является очень продолжительным и трудоемким. Поэтому предлагают использовать алгоритмы автоматической обработки сканов. Существует ряд алгоритмов, которые можно применить для решения поставленной задачи: плавающего горизонта, Робертса, Варнока, Вейлера—Азертона, построчного сканирования.

Алгоритм плавающего горизонта используется для удаления невидимых линий трехмерного представления функций, описывающих поверхность в виде $F(x, y, z) = 0$. Главная идея данного метода заключается в сведении трехмерной задачи к двумерной путем пересечения исходной поверхности последовательностью параллельных секущих плоскостей, имеющих постоянные значения координат X, Y или Z. Если видимость кривой меняется, то метод с такой простой интерполяцией не даст корректного результата. А это может повлечь за собой дополнительные нежелательные эффекты. В данном случае необходимо решать задачу о поиске точек пересечения сегментов текущей и предшествующей кривых.

Алгоритм Робертса удаляет из каждого тела те ребра или грани, которые (невидимы) экранируются самим телом. Затем каждое из видимых ребер каждого тела сравнивается с каждым из оставшихся тел для определения того, какая его часть или части, если таковые есть, экранируются этими телами. Поэтому вычислительная трудоемкость алгоритма Робертса растет теоретически как квадрат числа объектов.

В *алгоритме Варнока* и его вариантах делается попытка извлечь преимущество из того факта, что большие области изображения однородны. Это свойство известно как когерентность: согласно ему смежные области (пикселы) вдоль осей X и Y имеют тенденцию к однородности. В данном случае происходит аппроксимация картинки, а края сканированных объектов отражаются с недопустимой точностью.

Алгоритм Вейлера—Азертона минимизирует количество шагов в алгоритме разбиения наподобие алгоритма Варнока путем разбиения окна вдоль границ многоугольника. Недостатки данного алгоритма схожи с недостатками алгоритма Варнока.

Перечисленные алгоритмы не позволяют получить очищенное от мусора сканированное трехмерное изображение с любой заданной точностью. Поэтому в литературе встречаются идеи разработать программные компоненты модуля обработки сканов на базе алгоритма построчного сканирования, использующего *Z*-буфер. Такой алгоритм является одним из универсальных алгоритмов *построчного сканирования* и решает задачу удаления невидимых поверхностей. Используемое в этом алгоритме окно визуализации имеет высоту в одну сканирующую строку и ширину во весь экран. Как для буфера кадра, так и для *Z*-буфера требуется память ~1 бит шириной в горизонтальное разрешение экрана и глубиной в зависимости от требуемой точности.

Концептуально этот алгоритм довольно прост. Для каждой сканирующей строки буфер кадра инициализируется с фоновым значением интенсивности, а *Z*-буфер — с минимальным значением *Z*. Затем определяется пересечение сканирующей строки с двумерной проекцией каждого многоугольника сцены, если они существуют. Эти пересечения образуют пары. При рассмотрении каждого пиксела на сканирующей строке в интервале между концами пар его глубина сравнивается с глубиной, содержащейся в соответствующем элементе *Z*-буфера. Если глубина этого пиксела больше глубины из *Z*-буфера, то рассматриваемый отрезок будет текущим видимым отрезком. Следовательно, атрибуты многоугольника, соответствующего данному отрезку, заносятся в буфер кадра в позиции данного пиксела, *Z*-буфер соответственно корректируется в этой позиции. После обработки всех многоугольников сцены буфер кадра размером в одну сканирующую строку содержит решение задачи удаления невидимых поверхностей для данной сканирующей строки. Он выводится на экран дисплея в порядке, определяемом растровым сканированием, то есть слева направо. В этом алгоритме можно использовать методы устранения ступенчатости, основывающиеся как на пре-, так и на постфильтрации.

Полученная математическая модель требует дополнительной обработки, так как почти всегда существуют разрывы поверхности математической модели. Требуется ликвидировать такие разрывы и достроить поверхность. Кроме этого, как минимум требуется решить задачу триангуляции набора точек, задающих поверхность сканированного объекта. Существует две стратегии работы с полученной моделью: можно сначала произвести последовательную триангуляцию облака точек, представляющих отдельные сканы, а затем выполнить их объединение либо сначала объединить сканы и выполнить триангуляцию уже над всем облаком точек математической модели объекта. Использование второй стратегии позволяет применить два метода для обработки поверхности.

Первый из них основан на *воксельной* модели объекта. Воксельная модель — это трехмерный растр. Подобно тому как пикселы располагаются на плоскости двумерного изображения, вокселы образуют трехмерные объекты в определенном объеме. Воксел — это элемент объема (*voxel — volume element*). В воксельной модели каждый воксел также имеет свой цвет и прозрачность. Полная прозрачность воксела означает пустоту соответствующей точки объема. При моделировании объема каждый воксел представляет элемент объема определенного размера. Чем больше вокселов в определенном объеме и меньше размер вокселов, тем точнее моделируются трехмерные объекты — увеличивается разрешающая способность.

Положительная черта воксельной модели — простота при описании сложных объектов и сцен, отображении объемных сцен, выполнении топологических операций над отдельными объектами и сценой в целом. Например, просто выполняется показ разреза — для этого соответствующие вокселы можно сделать прозрачными. В данном случае для ликвидации разрывов в поверхности вокселам, отражающим разрыв, придается цветность. Таким образом разрыв поверхности ликвидируется.

Далее воксельная модель объекта с помощью алгоритма триангуляции трансформируется в стереолитографический формат данных. Он включает в себя, как говорилось в главе 2, описание треугольников, из которых состоит поверхность объекта. Алгоритм работает путем постоянного наращивания к текущей триангуляции по одному треугольнику за шаг. Вначале триангуляция состоит из одного ребра, по окончании работы триангуляция является триангуляцией Делоне. На каждой итерации алгоритм ищет новый треугольник, который подключается к границе текущей триангуляции. Поиск и подключение треугольника образно можно представить как надувание двумерного пузыря, привязанного к одному из ребер границы. Если такой пузырь достигает некоторой еще не включенной в триангуляцию точки из набора, то образуется треугольник. В случае, когда точка не встречена, обрабатывается следующее ребро границы.

Основное достоинство стереолитографического формата — простота по сравнению с другими форматами представления трехмерных данных. Данный формат является основополагающим для всех систем БП, а также используется всеми существующими CAD-системами.

Второй способ обработки поверхностей основан на алгоритме триангуляции полигонов. Математическая модель объекта на предыдущих этапах обработки трансформируется в стереолитографический формат данных. Однако наличие разрывов в поверхности требует применения упомянутого ранее алгоритма. Идея заключается в расщеплении произвольного полигона P (в данном случае полигон — это разрыв поверхности модели) вдоль некоторой хорды и рекурсивной триангуляции получившихся двух подполигонов. В конце возникает ситуация, когда подлежащий триангуляции полигон является треугольником. Алгоритм менее эффективен, чем способ, использующий расщепление полигона на монотонные части и их поочередную триангуляцию, но его гораздо проще запрограммировать.

Проще всего можно осуществить триангуляцию выпуклого полигона. Нужно выбрать одну из n вершин полигона и соединить ее с каждой из $n - 3$ несоседних вершин, получив $n - 2$ треугольников. Другой способ триангуляции выпуклого полигона основан на том факте, что каждая диагональ выпуклого полигона является его хордой: необходимо расщепить полигон вдоль любой диагонали и затем рекурсивно выполнить триангуляцию двух полученных выпуклых полигонов.

Полученная в процессе реализации данного алгоритма математическая модель может быть использована в задачах БП, а также для формирования управляющей программы станков с ЧПУ. Это позволит создать прототип либо дубликат отсканированного изделия.

8.2. САПР для обратного инжиниринга

Еще несколько лет назад для создания сложных 3D-моделей требовались дни и даже недели. Сегодня благодаря использованию 3D-сканеров процесс получения компьютерной модели реального объекта занимает всего несколько минут или часов и не требует специальной подготовки. С появлением 3D-сканеров многие области

науки, промышленности и искусства получили новые возможности. Оно используется, например, в следующих целях:

- реверсный инжиниринг — детальное сканирование частей механизма или всего объекта в целом;
- БП — отслеживание модификаций, внесенных в прототип;
- контроль качества — исследование готовой продукции или сбор данных для воссоздания различных процессов на первом экземпляре;
- археология — создание виртуальных коллекций археологических находок;
- каталогизация — сохранение культурного наследия путем сканирования предметов искусства;
- игры, кино и мультипликация — анимация мимики и реалистичных движений тела.

Сравнительно невысокая цена 3D-сканера и его высокая производительность делают технологию 3D-сканирования и печати незаменимой при создании 3D-моделей и прототипов. Реальный объект легко, дешево и быстро сканируется — это заменяет ряд дорогостоящих работ по моделированию в программном пакете. Более того, отсканированная модель обладает высокой геометрической точностью, что позволяет использовать ее при моделировании и контроле качества готовой продукции.

Конечно, 3D-сканеры применимы не во всех случаях: отражающие, прозрачные объекты пока не могут быть отсканированы. Однако устройства постоянно дорабатываются, поэтому вскоре в них появится и эта функция.

Для решения задач интерактивной векторизации используется программное обеспечение *Autovec* — приложение под AutoCAD R12 и R14. Оно позволяет откорректировать растр по тикам. В 14-й версии AutoCAD это можно осуществить (откорректировать растр) всего одной командой. В Autovec есть возможность автоматической оцифровки линий, но требуется подбирать параметры. Наконец, есть полуавтоматические способы оцифровки. К ним относятся:

- *CAD-Overlay* (приложение под 14-й AutoCAD);
- *Spotlight Pro 3.1* — гибридный (растрово-векторный) редактор. Включает предварительную подготовку растрового изображения, средства селекции и редактирования растровой, векторной и гибридной графики, интерактивную и автоматическую векторизацию, распознавание текстов, экспорт и импорт векторных данных;
- *RasterDesk Pro 3.1* — версии Spotlight, реализованные внутри AutoCAD R13 (AutoCAD R14). Все для удобной и продуктивной работы с растровыми изображениями в AutoCAD. Также известен RasterDesk Pro LT — версия Spotlight, реализованная внутри AutoCAD LT версии 3 и AutoCAD LT 97. Для тех, кто работает с гибридной графикой при двумерном проектировании.

Известны следующие программы *автоматической векторизации* (весь чертеж переводится из растра в векторный формат без участия оператора):

- *Scanoid* — пакет для векторизации предприятия «Компьютер-графика». Более подробная информация об этом программном продукте есть на сайте предприятия «Компьютер-графика»;
- *Vectory 5.1* — программа автоматического преобразования растровых чертежей или их фрагментов в векторные. Полученные в результате векторизации данные можно экспортировать в AutoCAD и другие системы САПР;

- *Easy Trace* — пакет программ для полуавтоматической интерактивной векторизации цветных и черно-белых растровых изображений, функционирующий под Windows 95/NT. Однако, являясь дальнейшим развитием продуктов компании Easy Trace Group, он может рассматриваться как средство интеграции материалов, подготовленных с помощью DOS-версии программы.

  Пакет поставляется в двух модификациях — полной и сокращенной. Использование полной модификации пакета позволяет создавать проектные файлы, подключать к ним растровые слои, производить преобразования растровых подложек и т. д. Полная версия (Starter Kit) необходима для начала работы с программой. Сокращенная модификация (Tracer Kit) предназначена исключительно для векторизации и выполнения операций импорта и экспорта.

  Помимо замены растровых изображений на векторные примитивы с последующей передачей их в ГИС (САПР) программа Easy Trace позволяет в процессе векторизации решить следующие задачи:

  - минимизировать число векторных примитивов — две пересекающиеся линии разных слоев должны остаться двумя линиями, а не четырьмя линиями, сошедшимися в одной точке;
  - восстановить информацию, частично утраченную или искаженную из-за износа бумажного носителя, дефектов чертежных инструментов, дефектов исполнения, погрешностей сканирования;
  - «расслоить» изображение по смысловому содержанию, так как карта может содержать слои рельефа, автодорог, коммуникаций, границ земельных участков и т. д.;
  - ввести атрибутивную информацию для графического объекта — указать напряжение линии электропередачи, диаметр трубопровода, площадь земельного участка, его собственника и т. п.;
  - построить корректную топологическую структуру информации, соответствующую требованиям конечной ГИС или САПР.

Все эти программы объединены в *серию RasterArts*, и с их помощью можно выполнить полную обработку растрового изображения, от сканирования до получения готового — растрового, векторного или гибридного — чертежа, подобрать инструмент. Они способны не только объединить векторные и растровые изображения, но и обеспечить необходимую в САПР и ГИС точность черчения и измерений. Сочетание качества, скорости и простоты использования ставит программы RasterArts (Spotlight, RasterDesk, Vectory) на одно из лидирующих мест в мире в области гибридной графики. Именно поэтому компании типа NASA, BMW, Boeing выбрали программы серии RasterArts.

Программы RasterArts являются гибридными редакторами. Это предполагает одновременную работу с растровыми (сканированными) и векторными данными на чертеже, что обеспечивает ряд преимуществ. Чертежи могут быть отсканированы, отредактированы и сохранены в растровом формате. В дальнейшем изменения могут вноситься как в растровой, так и в векторной формах, а конвертация растра в векторную форму САПР производиться по мере необходимости, так как не всегда целесообразна полная векторизация чертежа. Комбинированные чертежи можно сохранять и выводить на плоттер. Конвертированные объекты в дальнейшем модифицируют так же, как и другие объекты чертежа САПР. Возможно и обратное преобразование векторов — объектов САПР в растр, называемое растеризацией. Двунаправленное преобразование графики обеспечивает гибкость при работе с графическими документами. Вот области применения программ RasterArts:

- *Машиностроение*: повышение качества сканированных чертежей, возможность гибридного редактирования всего изображения или выбранного фрагмента, использование библиотек растровой и векторной графики, автоматическая и интерактивная векторизация, редактирование растровых объектов без их конвертации в вектора, растеризация векторов и другие возможности.
- *Картография*:
  - передовые методы калибровки для исправления линейных и нелинейных деформаций сканированных карт;
  - удобное средство ввода информации при создании цифровых карт в системах ГИС. Преобразование растровых объектов в векторные форматы AutoCAD и ГИС с созданием системы атрибутивной информации. Высокая точность интерактивной векторизации;
  - работа с картами разных масштабов, совмещение нескольких растровых слоев с фоновыми изображениями;
- *Архитектура и строительство*: самый быстрый способ выполнения проекта реконструкции старых зданий и помещений — сканирование поэтажных планов и использование программ RasterArts. С помощью гибридного редактирования в готовые чертежи легко и быстро вносятся любые исправления и изменения.
- *Архивы графической информации*: простой доступ к накопленному до внедрения САПР архиву чертежей, полная или частичная векторизация, повторное использование конструкций, их фрагментов и схем в новых проектах, улучшение качества имеющихся растровых чертежей.
- *Электроника*: все средства для работы со схемами — частичная или полная векторизация, поиск растровых объектов на чертеже и их замена растровыми или векторными, использование библиотек элементов.

8.3. Примеры систем для реконструирования

Как отмечалось ранее, 3D-сканер — это устройство, позволяющее выполнять объемное сканирование реальных объектов и получать их точные 3D-модели (рис. 8.2). Уникальность ручных лазерных 3D-сканеров заключается в том, что они являются

а *б*

Рис. 8.2. Сканеры: *а* — HandyScan 3D — портативная измерительная система для БП, применяемая в автомобилестроении, авиации, медицине, археологии. На выходе — формат CMM-файла, совместимый с STL; *б* — ZScanner 600

самопозиционирующимися и генерируют поверхность сканируемого объекта в реальном времени, позволяя отслеживать процесс на дисплее и исключая склейку сканов. На сегодняшний день 3D-сканирование становится мощнейшим инструментом для решения множества инженерных и художественных задач. Лазерное сканирующее ручное устройство предназначено для сканирования готовых изделий (резьбы, лепнины, прототипов и т. д.) с целью получения математической модели для фрезерования копии этого изделия (рис. 8.3).

Рис. 8.3. Оцифровка произведений искусства

Модель «Штрих 1» применяется при производстве эксклюзивных изделий. В комплекте со сканером идет программа ASHERA с русским интерфейсом и возможностями лазерного сканера (генератор луча и высокоточная цифровая матрица), чем достигается высокоточное создание компьютерной 3D-модели сканируемого образца. Данные сохраняются в стандартном формате .STL, который открывается в программах Type3, ArtCam, 3DMAX, SolidWorks, «Спрут-Кам», MaserCam и многих других CAD- и CAM-программах. Точность сканирования составляет 0,05 мм, благодаря чему модель можно увеличивать без потери точности во много раз, создавать целые композиции и совмещать разные 3D-модели (рис. 8.4).

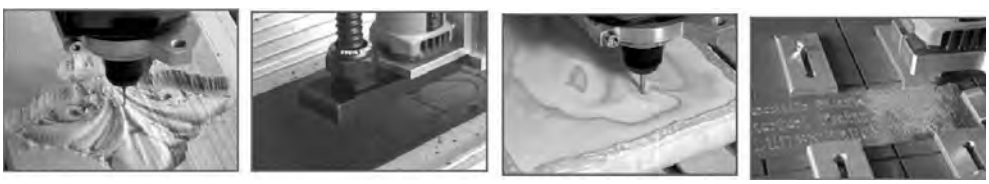


Рис. 8.4. Примеры 3D-фрезерования по результатам оцифровки: а) дерево; б) пластики — камень; в) стекло — ДСП (МДФ); г) алюминий

При сканировании крупногабаритных изделий (рис. 8.5) используются не лазерные портальные системы, в которых закаленные шлифованные направляющие представляют собой рельс с профилем сложной формы с двумя или четырьмя канавками, исполняющими роль дорожек качения, и установленные на нем один или несколько линейных подшипников. Тип привода — винтовая пара. За перемещение по осям *X*, *Y*, *Z* отвечают 3 независимых двухфазных биполярных шаговых двигателя фирмы SANYO (Япония). Шаг составляет 1,8°. Индивидуальный привод

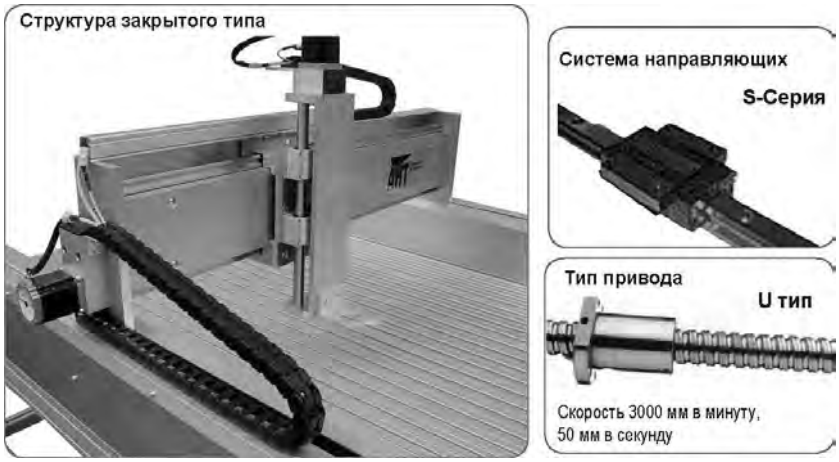


Рис. 8.5. Крупногабаритные сканеры

перемещения портала, суппорта и шпинделя по осям обеспечивает высокую точность шаговых моторов перемещения (до 0,015 мм).

Например, ООО «Лапик» разрабатывает и производит шестиосевые координатно-измерительные машины (КИМ) (рис. 8.6). С появлением шестиосевых КИМ измерительная техника в машиностроении вышла на новейший уровень, позволяющий измерять детали, контролируя размеры и формы изделий как стандартных, так и построенных на основе сплайнов высшего порядка.

Новейшие достижения впервые сделали возможным:

- измерение деталей с внутренними полостями и затененными поверхностями;
- измерение мелкоструктурных объемных поверхностей, в том числе контроль зубчатых колес с модулем 0,2;
- значительное повышение производительности измерений, в том числе за счет исключения ряда дополнительных устройств;
- упрощение условий эксплуатации и снижение себестоимости измерений в несколько раз.

Измерительная техника обладает системой шестиосевого электронно-механического ощупывания изделий, включая полнообъемный контроль зубчатых колес и игольчатый микроконтроль.

Система самокалибровки КИМ позволяет учитывать ее структурные изменения и износ механических частей с целью сохранения метрологических свойств.

8.4. Точность реконструирования

Компания Z Corporation (3D-печать) выпускает целую линейку сканеров. Например, ZScanner 600 (см. рис. 8.2, *б*) — компактный и простой в работе 3D-сканер, идеально подходящий для получения данных при реверсивном проектировании, разработке продукции, сохранении объектов культурного наследия и многих других задачах.

Сканеры ZCorporation получают данные за один проход, а не в виде многочисленных снимков из фиксированных положений, что избавляет от необходимости тра-

тить долгие часы на обработку этих снимков и их объединение в «склеенный» результат. Программное обеспечение ZScan, входящее в комплект поставки сканера, автоматически формирует STL-файл, готовый к экспорту в ПО для 3D-проектирования и выводу на трехмерную печать.

Для сканирования объекта пользователю достаточно взять ZScanner и «закрасить» объект проецируемым лазерным лучом. Поверхность сканируемого объекта регистрируется с помощью бинокулярных камер сканера.

Рис. 8.6. КИМ-1000

Программное обеспечение ZScan в реальном времени формирует на экране компьютера сетку многоугольников, из которых состоит поверхность. Благодаря самопозиционированию и привязанной к объекту системе координат ZScanner 600 позволяет пользователю перемещать объект во время работы. В табл. 8.1 представлены основные свойства устройства.

Таблица 8.1. Показатели точности ZScanner 600

Параметр	Значение
Цвет	Нет
Разрешение текстур	Нет
Скорость сканирования, замеров/с	18 000
Вес, кг	0,98
Размер, мм	160 × 260 × 210
Класс лазера	II (безопасен для глаз)
Разрешение	0,1 мм в плоскости *Z*
Формат выходных данных	.DAE, .FBX, .MA, .OBJ, .PLY, .STL, .TXT, .WRL, .X3D, .X3DZ, .ZPR
Количество камер	2
Тип подключения	FireWire
ISO	50 мкм + 250 мкм/м

ZScanner 700 (цифра означает объем сканирования) — простой в использовании 3D-сканер, позволяющий быстро сканировать модели любой геометрии. Он подключается к компьютеру через Wi-Fi-интерфейс. С помощью нанесенных на объект отражающих меток сканер получает и передает данные о сканируемой поверхности в программу ZScan, которая создает полигональную модель (облако точек) объекта в реальном режиме времени. Таким образом, ZScanner 700 позволяет отсканировать деталь за один раз, наблюдая за появлением полигональной модели на мониторе. Можно изменять местоположение детали без дополнительной привязки к координатам.

Портативность ZScanner 700 позволяет взять его с собой и подключать к ноутбуку, даже если в процессе работы рядом не будет источника питания — питание ZScanner получает от компьютера.

ZScanner 700 CX обладает возможностью сканирования в цвете для получения более реалистичных и информативных концептуальных моделей и 3D-визуализации. ZScanner 700 CX подходит для целого ряда применений: разработки дизайна, оцифровки культурного наследия, антропологии, археологии, использования в искусстве, цифрового хранения данных, анимации, создания упаковки, медицинского протезирования и использования в образовании.

ZScanner PX — ручной 3D-сканер с функцией фотограмметрии, стоит ~3,5 млн рублей. Фотограмметрическая система обеспечивает высокую (до 8 раз) точность при сканировании больших объектов (самолет, памятник, автомобиль) в сравнении с другими портативными 3D-сканерами. Такой сканер незаменим в задачах реверс-инжиниринга крупных объектов с высокой детализацией.

Наконец, ZScanner 800 имеет в 5 раз бóльшую разрешающую способность и в 2–3 раза бóльшую точность по сравнению с предшественником — ZScanner 700, что делает его пригодным для 3D-контроля наравне с применениями в реверс-инжиниринге, дизайне изделий, производстве, цифровом макетировании и симуляции. Третья камера ZScanner 800 увеличивает разрешение сканирования по оси *Z* до 40 мкм и позволяет отслеживать изменения высот поверхности вплоть до 50 мкм. Полезная особенность ZScanner 800 — наличие кнопки для активации режима повышенного разрешения.

Часть IV

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АП

Глава 9
АТ в индустрии, архитектуре, искусстве

9.1. Выбор материала для приложения и метода АП

Выбор материала для конкретных приложения и метода АП базируется на следующем перечне технологий производства, в которых в качестве шаблонов можно использовать прототипы, созданные методом АП:

- вулканизационное литье из силикона при комнатной температуре;
- вакуумное литье;
- формовое блочное литье;
- аэрозольное металлическое литье;
- литьевое прессование пластмасс;
- литье в песчаные формы из алюминия и черных металлов;
- литье по выплавляемым моделям.

В главе 7 все перечисленные подходы нами обсуждались. Какая из технологий окажется наиболее выгодной, зависит от размеров и геометрии прототипа, типа материала функций, требуемой точности и количества компонентов, которые необходимо изготовить.

9.2. Конструирование и дизайн

Область применения АТ (БП) и изготовления изделий (*быстрое прототипирование изделий* — БПИ) определяется достижимой точностью изготовления детали и механическими свойствами используемого материала — растяжимостью, твердостью и прочностью на разрыв. Варианты конструкторского применения прототипов можно разбить на три основные группы:

- прототипы для оценки проекта;
- прототипы для функциональной оценки;
- модели для дальнейшего производственного процесса.

В первое время после появления процессы БПИ использовались в основном для придания спроектированному объекту зримой формы и заполнения коммуникационного пробела, позволяя создавать полноразмерные физические модели, которые можно потрогать. Это произвело революцию в совещаниях по оценке проектов [3]: конструктивный диалог, который ведут члены конструкторской группы,

передавая друг другу модель, дал им возможность формулировать свои критические замечания и предложения на общем уровне зрительного взаимопонимания. В некоторых случаях поддержка конструкторов сама по себе служила главным обоснованием вложения средств в станки для БПИ. Теперь широкое распространение процессов БПИ в сфере производства стало движущей силой их дальнейшего развития, иногда даже говорят о начале новой технологической эры цифрового производства (см. раздел 5.11).

Прототипы для оценки проекта. Современные системы твердотельного моделирования упрощают оценку проекта благодаря наличию таких функций, как просмотр, затенение, вращение и увеличение. Однако не подлежит сомнению, что проект можно оценить более адекватно, когда конструктор может потрогать и подержать в руках физический прототип конструкции. Даже несмотря на огромный опыт в чтении чертежей или CAD-изображений сложных объектов, отчетливо представить себе, как будет выглядеть реальная деталь, — очень сложная задача. Такие особенности, как слепые отверстия, сложные внутренние каналы и поверхности сложной кривизны, зачастую трудно интерпретировать. Сокращение количества ошибок за счет улучшенной визуализации детали может быть значительным. Нет лучшего способа удостовериться в том, что сложная деталь имеет именно те свойства, которые планировались, чем подержать ее в руках, повертеть и посмотреть на нее со всех сторон. Физический объект необходим, в частности, для эстетической оценки дизайна.

Прототипы для функциональной оценки. Когда проект готов, конструктор должен удостовериться, что он обеспечивает выполнение всех функций, которые предполагались изначально. Простая функциональная оценка может включать проверку практичности сборки, кинематических и аэродинамических характеристик.

Часто бывает необходимо проверить, можно ли легко собрать продукт из составляющих или разобрать его для обслуживания. Нередко оказывается, что собрать продукт можно лишь с большими трудностями, а порой и вовсе невозможно. Возможность сборки простых конструкций или ее простоту можно оценить, глядя на чертеж. Однако на практике принято выполнять такую проверку путем реальной сборки. В этом случае прототипы, создаваемые методом БПИ, оказываются весьма полезными, поскольку компоненты, сделанные из другого материала, являются тем не менее достаточно адекватными для выполнения сборки. Использование прототипов вместо реальных компонентов дает значительную экономию времени и средств.

При тестировании кинематических характеристик проверяется, функционируют ли движущиеся части сборной конструкции так, как это задумывалось. Движению деталей часто препятствуют неожиданные помехи или другие компоненты сборки. Иногда невозможность движения некоторых компонентов по причине столкновения с другими может быть выявлена только при тестировании собранного физического прототипа. Поскольку кинематические характеристики могут быть проверены на компонентах, не имеющих такой степени прочности, какая требуется для конечного продукта, прототипы, изготовленные методом АТ, снова оказываются полезными.

Прототип, созданный посредством БПИ, можно использовать также для проверки аэродинамических характеристик конструкции путем ее продувки в аэродинамической трубе. Ключевую роль в определении аэродинамических характеристик детали играет ее геометрическая форма, поэтому здесь подойдет прототип, изготовленный из другого материала. Однако для проверки других характеристик — прочности, пределов рабочей температуры, усталости и коррозионной устойчивости —

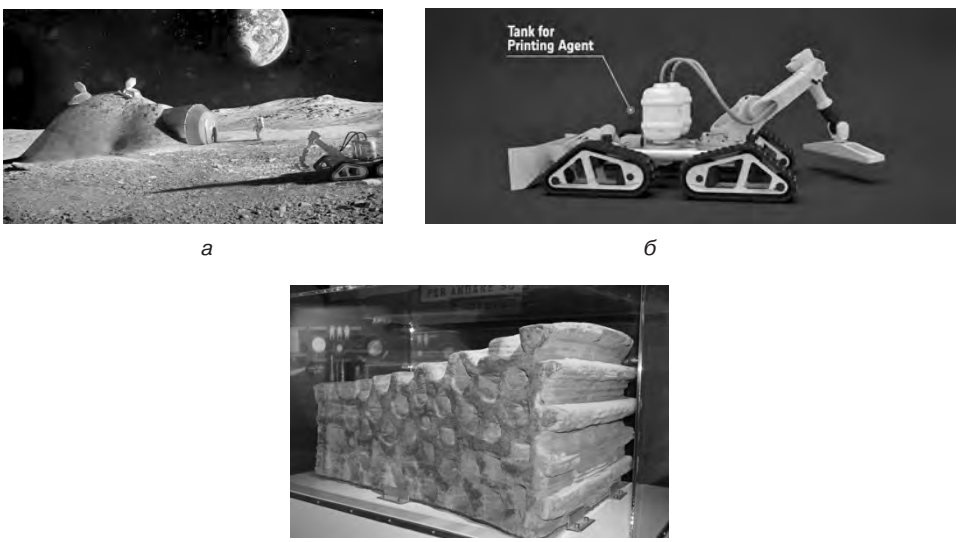
требуется, чтобы прототип был сделан из того же материала, что и оригинальная конструкция. К сожалению, ввиду ограничений на типы материалов, которые могут использоваться для БПИ, многие из материалов, указываемых конструкторами, не подходят для создания прототипов этим методом. Однако такие прототипы могут использоваться в качестве шаблонов для других производственных процессов. Сейчас уже успешно опробован ряд подходов, позволяющих относительно быстро и рентабельно пройти путь от прототипа до реальной функциональной детали.

Значительные преимущества обеспечивает, например, сочетание изготовления моделей для литья. В этом случае литейная модель и стержни изготавливаются АТ и используются так же, как деревянные модели и обычные стержни. Модели могут использоваться также для копирования.

9.3. Построение моделей в архитектуре

Компьютерное моделирование нетиповых 3D-объектов обычно доступно только специалистам, знакомым с профессиональными пакетами типа AUTOCAD, Solid Work, CATIA, Pro/ENGINEER, Autodesk 3DS Max. Однако архитектурная мысль не стоит на месте.

Так, архитектурная фирма Foster&Partners совместно с Европейским космическим агентством (ESA) опубликовали сообщение о планах ESA строить базу (рис. 9.1, *а*) с помощью 3D-печати, используя местный материал (реголит). На Луне для 3D-печати планируется использовать роботов, похожих на бульдозер, которые будут собирать реголит и завозить его на вершину купола. По оценкам ESA, строительство одного купола займет около трех месяцев. Проведенные на Земле эксперименты показали, что строительство подобным способом вполне возможно. В качестве демонстрации с помощью строительного принтера D-Wave (рис. 9.1, *б*), ширина рабочей площадки которого составляет 6 м, был напечатан 1,5-тонный строительный блок (рис. 9.1, *в*).



а *б*

в

Рис. 9.1. 3D-печать лунной базы в планах Европейского космического агентства

Намного упрощают процесс переноса объектов из реального в компьютерный мир специальные 3D-сканеры (глава 8). Например, в будущем при проектировании улиц Москвы планируется использовать специальное мобильное лазерное сканирующее устройство, которое, перемещаясь по улицам города, смогло бы строить 3D-модель.

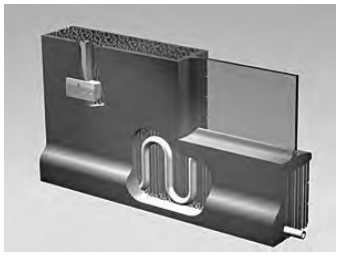


Рис. 9.2. Стена с встроенной электронной начинкой

На архитектурном макете можно проводить тесты еще до того, как будет готов окончательный вариант плана застройки. Более того, реально изготовление прототипов зданий, над которыми проводятся такие тесты, которые на готовом изделии не проведешь. Например, можно использовать прозрачную пластиковую модель системы водоснабжения при проектировании нетиповых сооружений, таких как вращающийся небоскреб, студии с изменяемым внутренним объемом и пр. Но главное то, что такую модель можно сделать очень быстро, а это в наше время высоких скоростей очень важно.

Следующая ступень развития при использовании АП в дизайне и строительстве — это объединение формы и содержания.

Под содержанием здесь подразумевается электронная начинка зданий. Так. исследователи из Центра автоматизации технологий производства при Калифорнийском университете уточняют, что в стены можно вставить датчики деформации, светоотражающие или светопоглощающие панели и другие интеллектуальные компоненты, можно также менять материалы в различных слоях конструкции (рис. 9.2). Сантехника, электрические и охранные системы, управление окнами и все то, что относится к понятию «умный дом», также могут автоматизироваться еще на стадии проектирования.

Например, в Университете Loughborough научно-исследовательская группа по АП работает над способом создания строения вплоть до уровня арматуры и встроенной мебели. Также ведутся работы над проектами исследования экологических материалов, бионики (bio-mimicry), адаптивными построениями и технологиями для проверки и поддержания строений, что во много раз (до нескольких лет) уменьшает создание «умного дома» по проектам, выполняемым под ключ.

На рис. 9.3 показаны образцы работы архитекторов из разных стран, создающих вид современных городов. Специализированный софт ArchiFORM разработан для реализации задумок современных художников от архитектуры.

Рис. 9.3. Внешний вид: *а*, *б* — музея современного искусства Guggenheim Museum (Германия); *в* — здания GLA Building в центре Лондона

Внутренняя структура зданий, несущие конструкции, наполнение этажей техническими решениями также могут быть спроектированы на стадии моделирования (рис. 9.4–9.6).

Рис. 9.4. Проектирование здания с использованием пакета Contour Crafting. Behrokh Khoshnevis (www.contourcrafting.org)

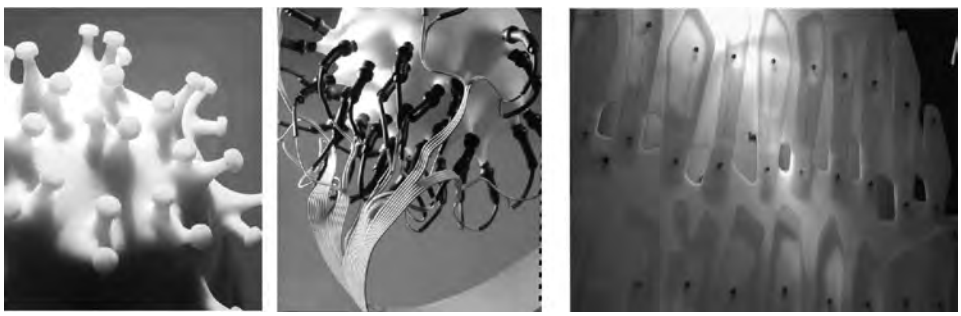


Рис. 9.5. Моделирование внутренней отделки фойе здания. FDM-метод и поддерживающие структуры

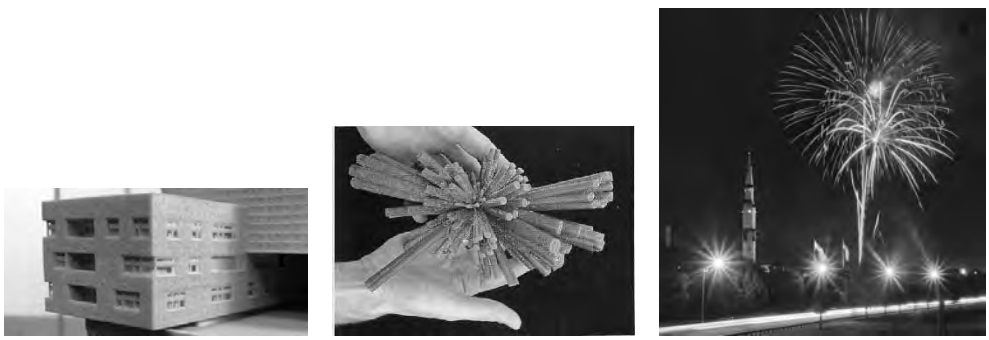


Рис. 9.6. Новые модернистские решения в архитектуре

9.4. Примеры применения АП в машиностроении. Анализ и планирование

Практически в любой отрасли машиностроения технологии АП смогут оказаться полезными. На рис. 9.7 показаны модели, которые в дальнейшем используются в технологии литья.

Рис. 9.7. Образцы изделий

9.5. Производство оснастки в промышленности

Литье под давлением методом впрыска материала в форму (reaction injection mold (RIM)) с успехом применяется в мелкосерийном изготовлении пластмассовых деталей из порошковых композиций по RIM-технологии (литье в форму реакционноспособных материалов со свойствами полиэтилена, полипропилена, ABS-пластика, полиамида и других термоэластопластов) (рис. 9.8).

Проектирование и изготовление форм для RIM-технологии из модельных материалов может быть осуществлено методами 3D-печати или стереолитографии.

Рис. 9.8. Формы из модельных материалов для RIM-технологии и детали, полученные по RIM-технологии

9.6. Аэрокосмические приложения

Любая деталь будущего лайнера или ракеты может быть спроектирована средствами САПР и воспроизведена в натуральную величину как для целей визуализации и экспертной оценки, так и для последующих операций изготовления мастер-форм. Внешний вид изделия — его форму, эргономику, аэродинамические качества — можно оценить уже по модели (рис. 9.9).

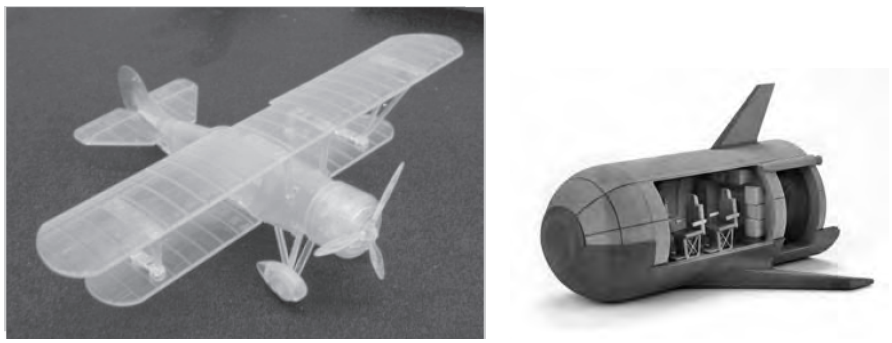


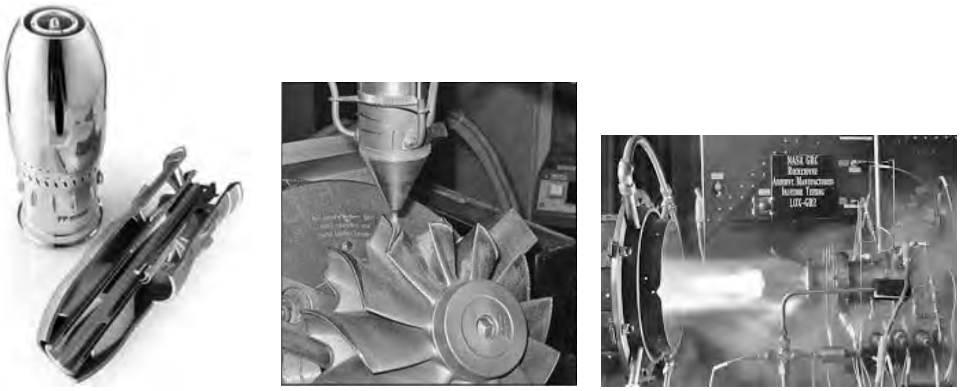
Рис. 9.9. Модели для аэро- и эргономической оценки

В последнее десятилетие в американских вузах аэрокосмического профиля курсы АТ считаются профильными как для конструкторов и проектировщиков новой техники, так и для специалистов авиационного двигателестроения и авионики. На рис. 9.10 показаны учебные экспонаты, созданные методами АТ, — реактивный двигатель с турбонаддувом Rolls-Royce AE3007, изучаемый в Университете Вирджинии (курс David Sheffler's «Jet Engine Manufacturing»).

Рис. 9.10. Реактивный двигатель с турбонаддувом Rolls-Royce AE3007 (Air Force's RQ-4 Global Hawk UAV)

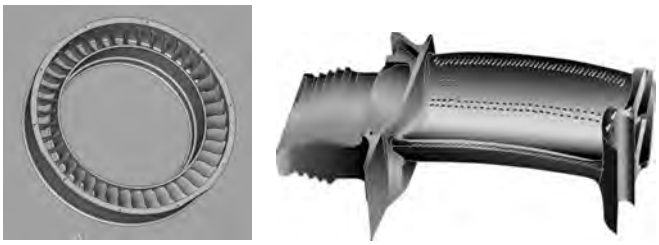
В производстве форсунок для впрыска топлива (рис. 9.11, *а*) и турбинных лопаток за рубежом также используются методы селективного лазерного плавления (СЛП) и лазерной 3D-порошковой наплавки (рис. 9.11, *б*) для упрочнения контактных поверхностей.

Современное авиастроение выдвигает новые требования к деталям аэро- и космических силовых установок (рис. 9.11, *в*). Жаропрочные материалы — литые и спеченные сплавы на основе Ti, Ni, Co, и Fe — используют в производстве силовых установок турбинного типа, применяемых в авиационном и морском двигателестроении, производстве электроэнергии (ядерная энергетика), магистральном



а *б* *в*

Рис. 9.11. Примеры изделий: *а* — EOS кобальт-хром-форсунка впрыска топлива; *б* — лазерная наплавка лопаток моноколеса компрессора; *в* — испытание NASA инжектора энергетической космической установки Aerojet Rocketdyne



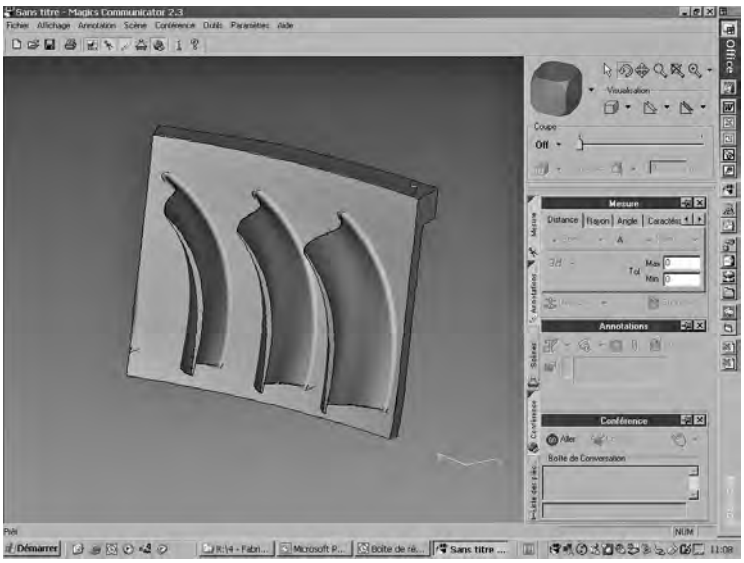


Рис. 9.12. Проектирование лопатки турбины

транспорте нефти и газа, железнодорожном транспорте и др. Современные силовые установки работают на пределе своих ресурсов. Во многом это лимитирует дальнейшее развитие таких отраслей промышленности, как авиастроение, ракетостроение, космическая индустрия и др. Известно, что при подъеме температуры на каждые 100° на входе турбины рост КПД составляет 3–4%.

Перспективной технологией для изготовления заготовок, чья форма приближена к форме конечной детали, являются АТ электронно-лучевого плавления (ЭЛП), объемной лазерной наплавки (DMD) и/или СЛП. Поиск новых жаропрочных и теплостойких материалов (никелевые и кобальтовые суперсплавы [5], интерметаллиды системы Ni-Al, Ti-Al и т. д. [4]) идет параллельно с изучением возможностей их применения в АП. При этом важно умение не только спроектировать правильную с точки зрения аэродинамики конфигурацию лопатки турбины, но и наделить эту лопатку рядом интеллектуальных возможностей. Например, полезно знать, какова температура на поверхности лопатки, есть ли предпосылки к разрушению вследствие чрезмерных нагрузок и т. д.

Проектирование новой техники, например угла наклона лопатки турбины и способов ее охлаждения (рис. 9.12 и 9.13), может быть с успехом осуществлено на CAD-моделях. САПР и современные методики АП позволяют решать такие задачи.

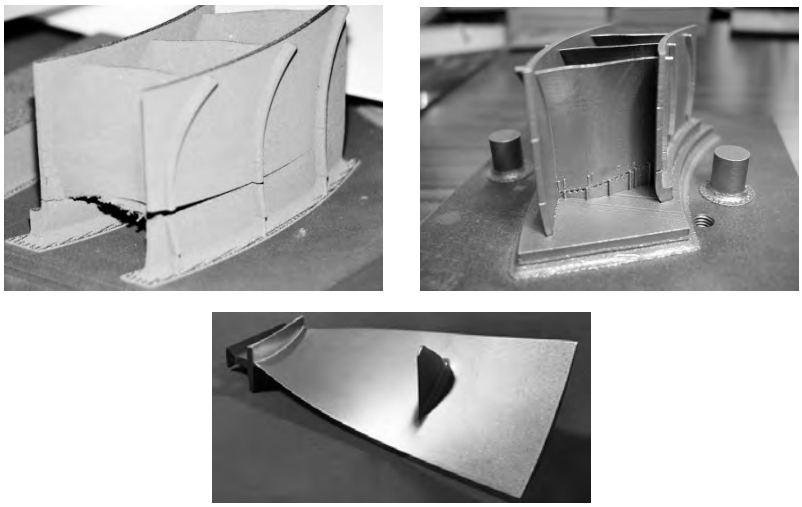


Рис. 9.13. Лопатки турбины с изменяемым контуром поверхности, созданные методом СЛП

Например, известны технические решения, позволяющие во время послойного синтеза лопатки турбины методом СЛП внедрить в объем изделия термопару. Тогда данные о температурном режиме работы лопатки будут автоматически поступать на системы контроля корабля.

9.7. Моделирование и создание беспилотных летательных аппаратов

Хорошим примером безальтернативного использования компьютерных методов моделирования (CAD/CAE) и АТ является моделирование и создание беспилотных аппаратов как воздушного, так и безвоздушного (то есть космического) и даже

подводного базирования. Основными мировыми производителями беспилотных летательных аппаратов (БЛА) по разнообразию номенклатуры, объемам выпуска и распространению на общемировом рынке сейчас являются США и Израиль. Проблемами сочетания вертикального взлета, больших скоростей и дальности полетов БЛА вплотную занимаются многие фирмы. В международной практике аппараты с такими свойствами называют VTOL (Vertical Take Off and Landing) и UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

Вертикальный взлет и посадка обычно занимают несколько секунд, все остальное время БЛА совершает стандартный аэродинамический полет с минимальным расходом энергии на поддержание собственного веса в воздухе за счет подъемной силы оперения. При необходимости эти аппараты имеют возможность зависать в определенном месте для точной фиксации изображения или позиционирования.

Не менее важны эти свойства при использовании БЛА на военно-морском флоте, так как площадь обычного боевого корабля не имеет специальных посадочных полос, а запуск катапультой и последующая ловля в сеть или на натянутый канат повышает вероятность повреждения аппарата. Использование парашюта также не гарантирует приземления БЛА на палубу.

Примеры успешного применения АТ для проектирования и создания БЛА. Беспилотная масштабная модель (Prototype Technology Evaluation Research Aircraft) PTERA наиболее распространенного самолета Boeing 737 была создана инжиниринговой компанией Area-I (США) для малозатратных исследований летных характеристик по программам NASA (рис. 9.14).

Рис. 9.14. Внешний вид БЛА, созданного инжиниринговой компанией Area-I

Фирма Solid Concepts изготовила большинство деталей этой модели, используя преимущества послойного лазерного синтеза методом СЛС. Был применен материал NyTek 1200 CF (нейлон Nylon 12 с углеродными нитями), что позволило совместить в БЛА PTERA крайне малый вес с максимальной жесткостью конструкции. Такого сочетания сложной и легкой структуры с повышенной прочностью и жесткостью изделия невозможно было бы достичь никаким другим методом, кроме АТ.

Руководители проекта PTERA отмечают, что АТ полностью изменили принципы проектирования БЛА, позволили оптимизировать структуру изделия, не имея тех ограничений, которые неизбежно накладывают стандартные технологии изготовления. Так появилась возможность создавать сложные подвижные неразъемные соединения в виде одной детали, все части которой изготавливаются одновременно. Методы послойного лазерного синтеза позволили создавать такие сложные

изделия, как крылья БЛА, в виде одной детали, при этом внутри крыла предусматриваются все необходимые ребра жесткости, а лонжероны и стрингеры считать единой деталью с основными аэродинамическими поверхностями крыла, которые могут располагаться под произвольными углами (рис. 9.15). Элероны и закрылки также являются частью этой единой детали и изготавливаются одновременно с ней, при этом выдерживаются необходимые зазоры между опорными поверхностями, обеспечивающие их подвижность, и форма сопряжений этих поверхностей, обеспечивающая их неразъемность. Эти же возможности были использованы при проектировании фюзеляжа и других элементов БЛА, причем форма топливного бака и отсеков электроники была заранее оптимизирована под имеющееся свободное пространство, механизмы и коммуникации.

Рис. 9.15. Компоненты фюзеляжа проекта PTERA

Проект SULSA (Southampton University Laser Sintered Aircraft). Научно-исследовательская группа инженеров и ученых факультета компьютерной инженерии и дизайна (Southampton University) с помощью специального 3D-принтера из нейлонового исходного материала создала полномасштабную действующую модель БЛА, проект которой полностью компьютеризирован. Исключая промежуточные операции, проект самолета сразу был реализован на 3D-принтере. Некоторые части самолета были отпечатаны отдельно и по технологии snap fit (полное совпадение) соединяются с основным корпусом без применения инструментов и обработки в течение нескольких минут. При сборке самолета крепеж не был использован совсем.

Команда проектировщиков SULSA использовала все преимущества АТ-пластиков и прочностные качества нейлона и с помощью производственных мощностей фирмы 3T создала четыре основные детали БЛА. Соединенные вместе с помощью байонетных и клиновых поверхностей, эти детали в считанные минуты превращаются в БЛА с размахом крыльев 1,2 м. Спроектированные в пакете Solidworks модели де-

талей, разработанные командой SULSA (рис. 9.16), были переданы команде CAD-инженеров фирмы 3T и за несколько дней реализованы в нейлоновом исполнении.

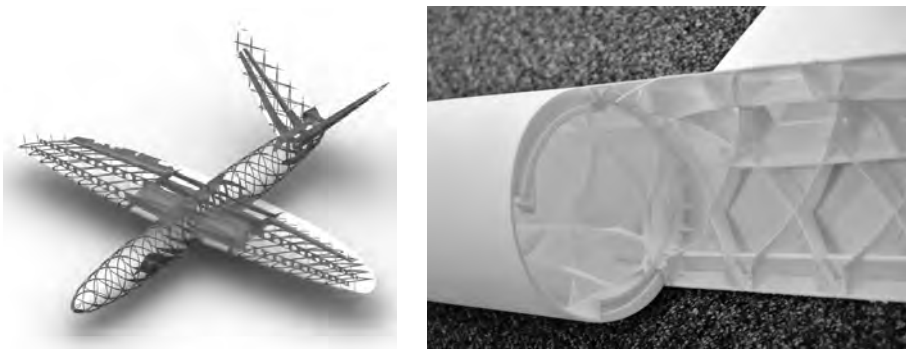


Рис. 9.16. Проектирование SULSA

Возможности АТ позволили проектировщикам SULSA воплотить в БЛА не реализованные ранее свои технические идеи геодезической структуры фюзеляжа и крыла с диагонально пересекающимися спиральными ребрами жесткости. Такие структуры имеют максимальную жесткость при минимальном весе, но их очень сложно и дорого реализовывать стандартными методами, так как возникает необходимость соединения огромного количества отдельно изготовленных деталей.

Послойный лазерный синтез порошка из нейлонового материала позволил реализовать конструкцию БЛА в виде нескольких соединенных структурно-аэродинамических компонентов. Кроме геодезической структуры ребер в этих компонентах сразу предусмотрены полости для размещения авионики, телекамер и другой полезной нагрузки, а также все элементы приводов управления и двигателя.

Элероны являются частью крыла и изготавливаются одновременно с основной структурой. Зазоры в сопрягаемых поверхностях, предусмотренные при проектировании, очищаются от остатков неоплавленного порошка и позволяют обеспечить взаимный поворот составных частей на функционально определенный угол. При этом само соединение благодаря форме сопрягаемых поверхностей является неразъемным. Сборку БЛА можно выполнить в полевых условиях за 10 мин, так как для фиксации составных частей не требуются инструменты, а все внутренние составляющие: панель с авионикой, двигатель с пропеллером, два аккумулятора, четыре сервопривода с их трансмиссиями, приемник и видеокамера — надежно закрепляются в элементах фюзеляжа, в которых для них предусмотрена возможность плотной фиксации (рис. 9.17). Эта реализованная модель БЛА способна летать около 30 мин со скоростью 160 км/ч.

Инженеры из The University of Sheffield Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC) совместно с Boeing's new Design & Prototyping Group разработали и создали прототип инновационного легкого БЛА, используя современные инструменты и технологию 3D-печати. Все части корпуса были напечатаны с использованием FDM-технологии (рис. 9.18). Для снижения затрат на материалы и времени на производство команда из AMRC спроектировала каждую часть структуры специально для АП, поэтому части могут печататься без затрат на поддерживающие материалы. Был использован 3D-принтер Stratasys Fortus 900mc. Полумонококовая внутренняя структура, по мнению конструкторов, помогает предотвратить возник-

Рис. 9.17. Внешний вид БЛА проекта SULSA

новение деформации во время производства, обеспечивает более легкую сборку самолета, а также помогает ему выдержать аэродинамические нагрузки в полете. Использован материал ABS-M30. Процесс послойного синтеза составил менее 24 ч.

БЛА вертолетного типа также уже существуют. Например, FLYING-CAM разработан совместно фирмами Light Unmanned Aircraft Systems, Modena (Италия), входящей в состав CRP Group, Windform — лидером в технологии послойного синтеза и конструкционных материалов для АТ, а также концерном SARAH (Special Aerial Response Automatic Helicopter).

Следует сказать, что АТ и средства САПР открывают очень широкий простор для творчества создателей БЛА. Так, уже есть идеи по созданию трансформируемой формы крыла (рис. 9.19, *а*), использованию правильных геометрических (*сотового и сандвичного типа*) и/или *бионических* (то есть взятых из природы) конструкций (см. рис. 9.16, 9.19, *б*) для внутренней структуры крыла или фюзеляжа БЛА.

Интересным решением представляется использование АТ для создания метаматериалов и структур со специальными свойствами на их основе на поверхности БЛА. На рис. 9.19, *в* (публикуется с разрешения MIT, USA) показан результат 3D-печати изделия — вогнутая линза, состоящая из S-образных ячеек и показывающая отрицательную рефракцию (лучепреломление). Использование гибридной технологии LDS (см. раздел 6.2.6) прямого лазерного формирования рисунка топологии микросхем с АТ послойного синтеза позволит проектировать и далее встраивать электронику БЛА в материал корпуса изделия.

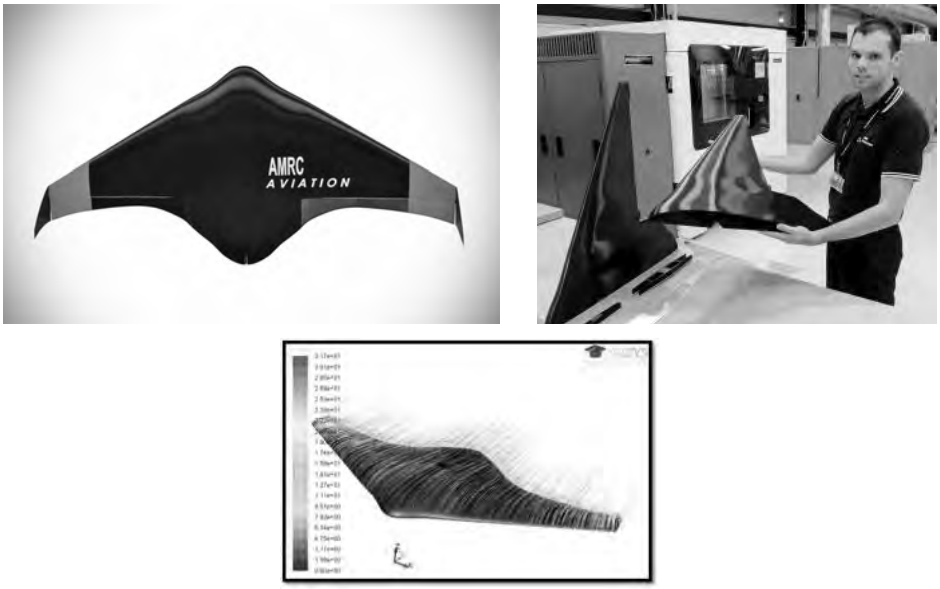
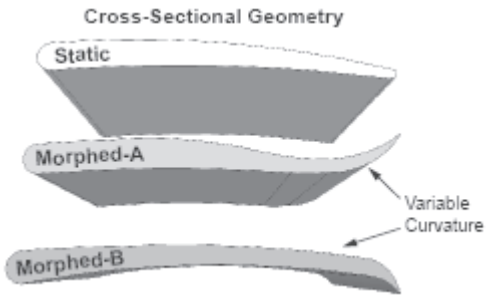
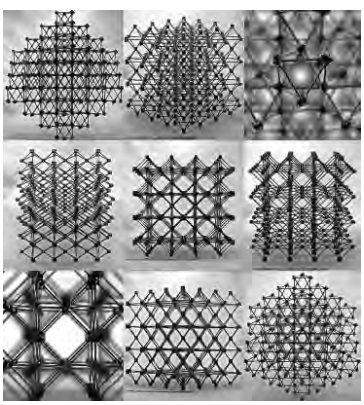


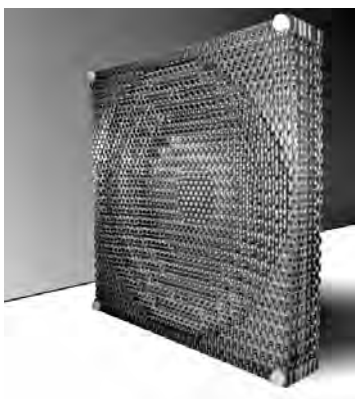
Рис. 9.18. Проект AMRC из ABC-пластика



а



б



в

Рис. 9.19. Новые технические решения для перспективных БЛА

9.8. Автомобильная индустрия

Автомобильная индустрия давно (с середины 1990-х годов) использует подходы АП для разработки новых модельных рядов автомобилей, совершенствования их конструкции и отработки взаимосвязей и взаимозаменяемости при работе отдельных узлов. На рис. 9.20, *а* показан прототип тормозного диска вместе с элементами готовой сборки.

а

б

в

Рис. 9.20. Элементы автомобильного дизайна: *а* — тормозной диск; *б* — облицовка передней панели; *в* — крышка

а

б

Рис. 9.21. Примеры изделий: *а* — FDM-модель двигателя Duccati; *б* — блок цилиндров Mersedes-Bens (установка Concept X line 1000 R)

На рис. 9.20, *б* показан прототип тонкостенной конструкции детали облицовки передней панели. Из соображений прочности минимальная толщина стенки может быть не менее 0,5 мм.

Конструкторы автомобильной техники не только уже давно создают модели перспективных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) (рис. 9.21, *а*), но и пытаются методами АТ синтезировать функциональные изделия. На рис. 9.21, *б* показан блок цилиндров ДВС из сплава алюминия в натуральную величину.

В то же время для автомобилей, снятых с производства, средствами реинжиниринга может быть сделана компьютерная модель детали, которую необходимо восстановить (рис. 9.22).

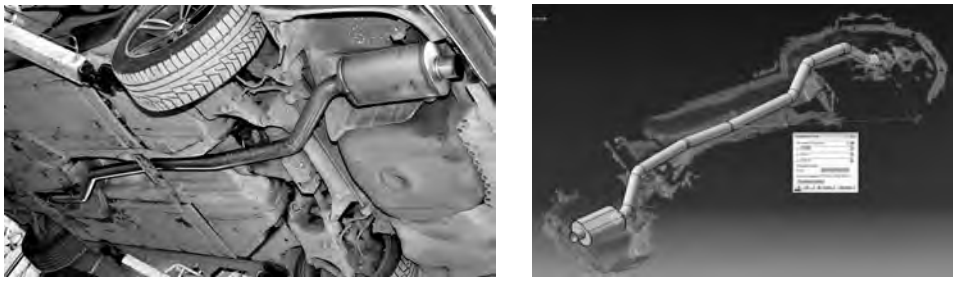


Рис. 9.22. Моделирование и восстановление участка выхлопной трубы

9.8. Товары народного потребления

Нет необходимости описывать, насколько методы АП могут оказаться полезными для разработки и совершенствования товаров народного потребления. Сначала дизайнеры передовых фирм моделируют в 3D-пакетах внешний вид сотового телефона, телевизора, стиральной машины, фена и т. п. (рис. 9.23 и 9.24), а затем изделие воспроизводится в натуральную величину.

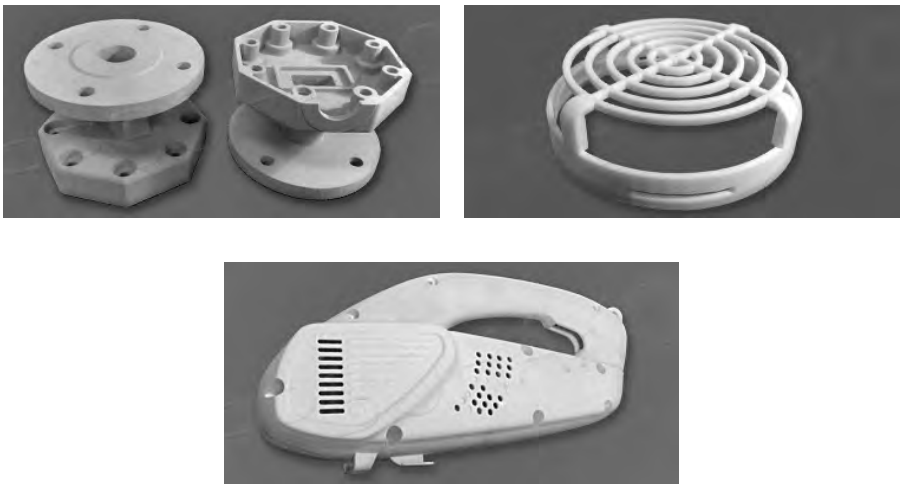


Рис. 9.23. Моделирование отдельных частей фена (см. общий вид на рис. 9.24)

Рис. 9.24. Результаты моделирования фена и АП после сборки

9.9. Модельное дело в искусстве и дизайне

С внедрением БП в профессиональный дизайн, а затем и в искусство эти направления человеческой деятельности получали второе дыхание (рис. 9.25).

Рис. 9.25. Моделирование современных очертаний предметов повседневного пользования: *а* — шлема мотоциклиста; *б* — новой мебели; *в* — архитектурных решений

Любые фантазии дизайнеров могут быть воплощены в жизнь (рис. 9.26).

9.10. Компьютерное моделирование и АП в искусстве

Современные художники и скульпторы не считают противоестественным создать новый шедевр или реанимировать старый, используя подходы БП (рис. 9.27–9.29).

9.11. Археологические решения методами АП

Лазерный сканер — незаменимый инструмент для промышленной археологии. Цветная 3D-съемка с высоким разрешением в формате облака точек существенно дополняет имеющиеся методы. На рис. 9.30 показана расположенная в английском городке Аппер-Тин фабрика, которая была в свое время крупнейшей в Европе по производству ленточной продукции — от солдатских ремней во времена Первой мировой войны и парашютных строп во Вторую мировую войну до автомобильных ремней безопасности в 1970-х годах. Однако в середине 1980-х производство пришло в упадок, и с тех пор фабрика пребывала в заброшенном состоянии.

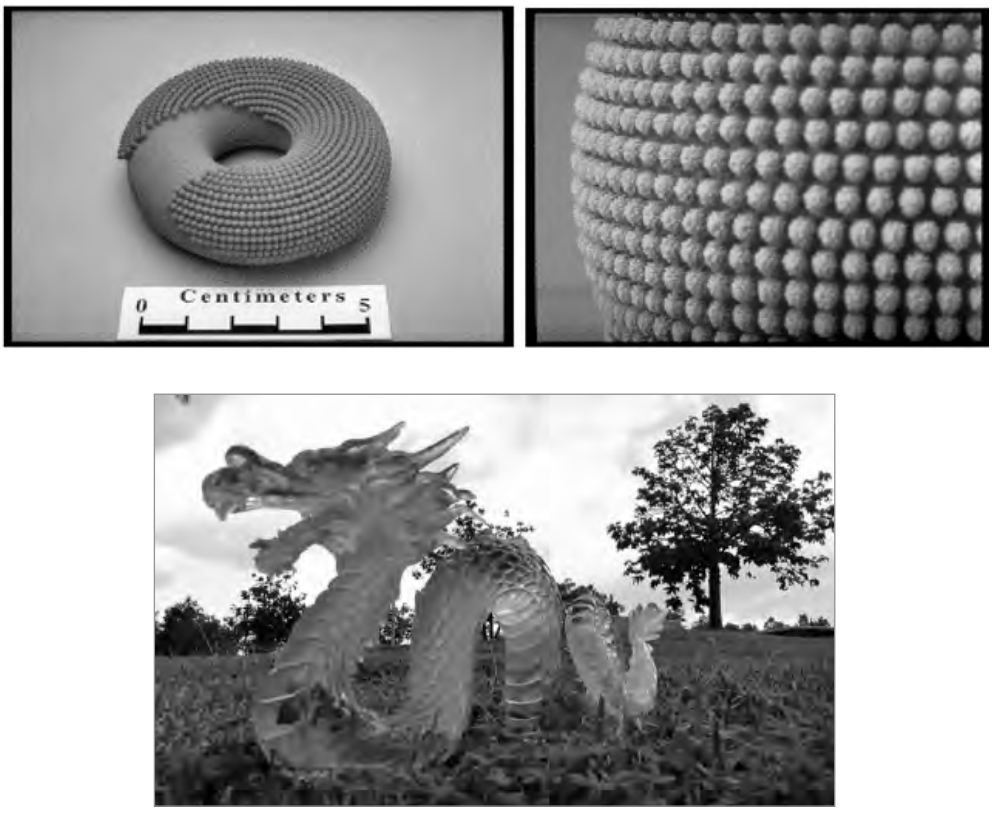


Рис. 9.26. Дизайн поверхности (фото взяты с сайта University of Loughborough)

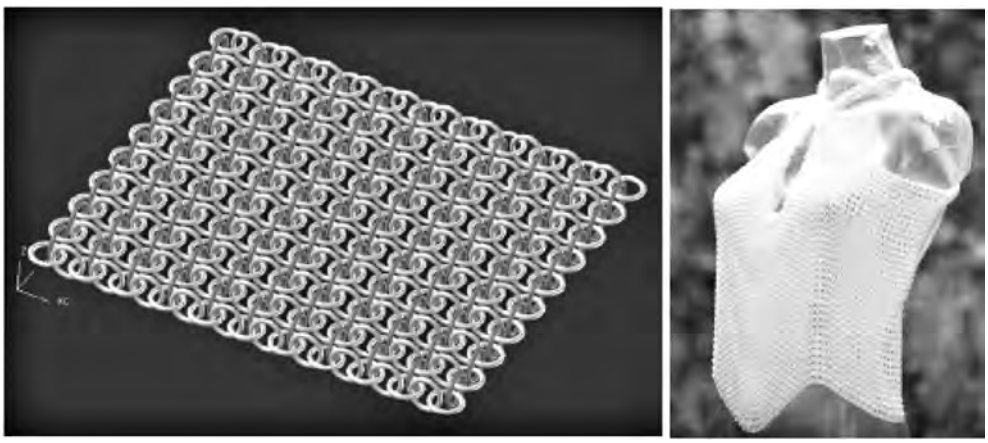


Рис. 9.27. Моделирование и СЛС ткани из полиамидной структуры

а *б*

Рис. 9.28. Результаты использования АТ: *а* — деталь интерьера; *б* — реставрация скульптуры

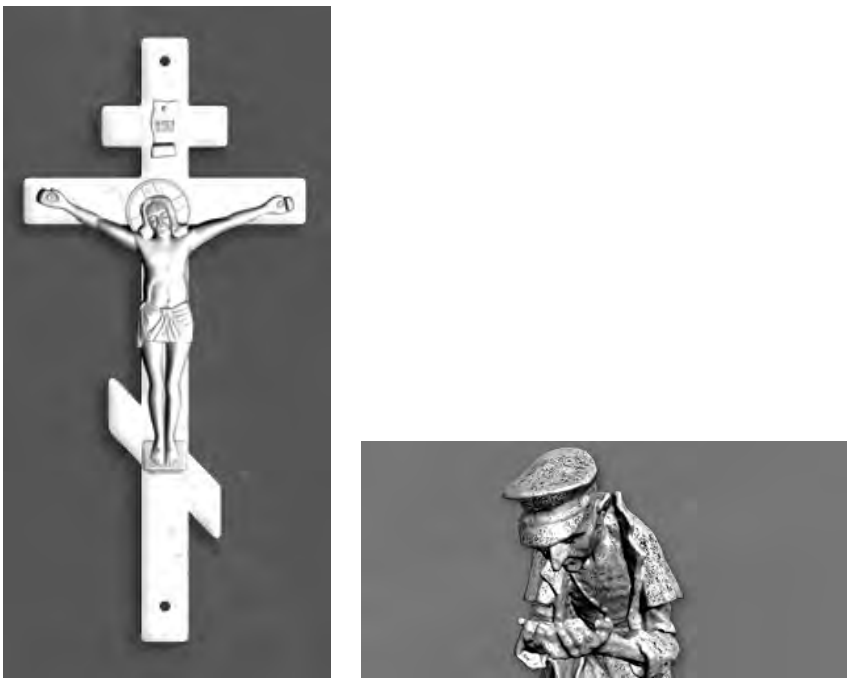


Рис. 9.29. Примеры скульптурного дизайна

Фабричный комплекс состоит из нескольких строений, которые возводились и перестраивались на протяжении 500 лет. По ним можно отследить практически все этапы промышленной революции. В настоящее время одно из зданий бывшей фабрики переоборудуется под жилой комплекс. Чтобы сохранить колорит времени, было решено выполнить лазерное сканирование здания и создать виртуальную версию интерьера. Результаты в сочетании с 3D-моделями виртуальной реальности будут использованы для создания различных вариантов реконструкции.

Каждый этаж был обследован с помощью лазерного сканера FARO Photon 120. За два дня было получено более 3 Гбайт данных, включая сделанные сканером

Рис. 9.30. Реконструкция старого здания

фотоснимки и видео. По этим материалам созданы виртуальные панорамные модели интерьера.

Также были разработаны большая виртуальная модель внешнего вида и подробные интерактивные модели будущих квартир жилого комплекса, по которым жильцы смогут оценить планировку и понять, что осталось от изначальной конструкции здания, а что предлагается изменить. Полученные в результате сканирования данные можно использовать и для других целей:

- выполнения точных сечений здания;
- определения потерянных элементов. За свою долгую жизнь здание претерпело множество перестроек, в ходе которых многие помещения, дверные проемы и камины были заложены кирпичом. Просмотр в 3D дает возможность обнаружить такие элементы и увязать их со структурой будущих помещений;
- анализа данных инфракрасного сканирования. Благодаря использованию волн разной длины получается подобие видеозаписи. Это позволяет обнаруживать скрытые детали — изображения, нанесенные на штукатурку над дверными проемами, фасонную кирпичную кладку и т. п.

На рис. 9.31 показан пример работы реставраторов, позволяющих сохранять прошлое.

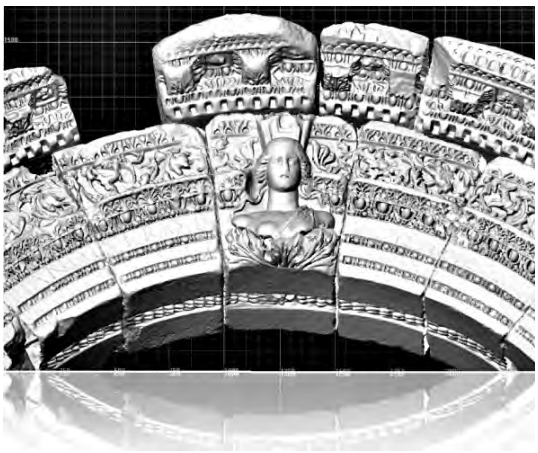


Рис. 9.31. Элемент утраченного орнамента здания

9.12. Компьютерное моделирование и АП в криминалистике

Рис. 9.32. Восстановление черепа

В криминалистике и судебной медицине также обнаруживается много того, что может быть выполнено средствами АП. Имея останки неизвестного происхождения (рис. 9.32), можно попытаться восстановить весь череп, определить, как произошла смерть, выяснить пол, возраст останков и т. д.

Так, останки царской семьи, найденные в окрестностях Екатеринбурга, были восстановлены по фрагментам именно средствами обратного инжиниринга и воспроизведены методом лазерной стереолитографии в ИПЛИТ (РАН).

9.13. Ювелирные приложения АП

В главе 4 мы уже говорили о существовании специализированного оборудования и программного обеспечения для ювелирной промышленности, например у фирм Meiko's Rapid Prototyping System, Solidscape и пр. На рис. 9.33 показано окно программы для моделирования ювелирных украшений, а на рис. 9.34 — схема работы ювелира.

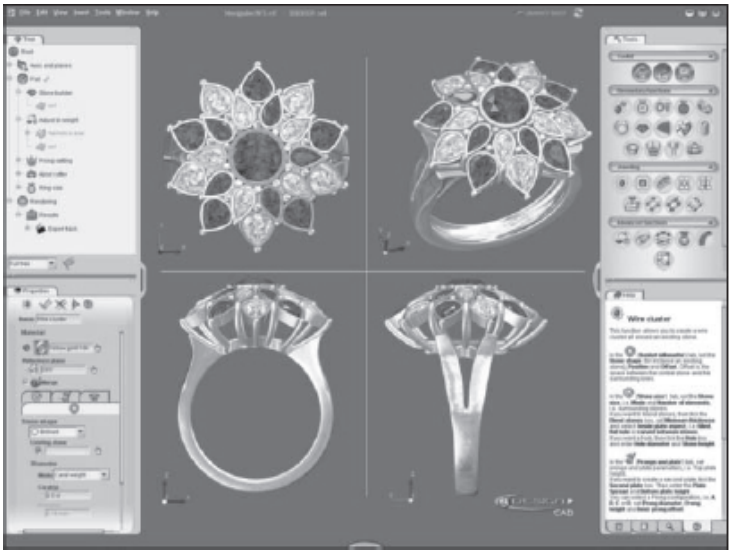
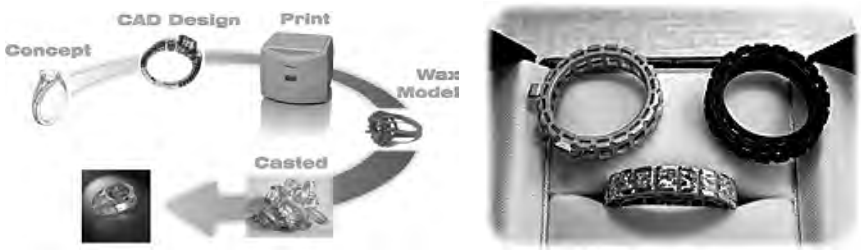


Рис. 9.33. Программное обеспечение для ювелира



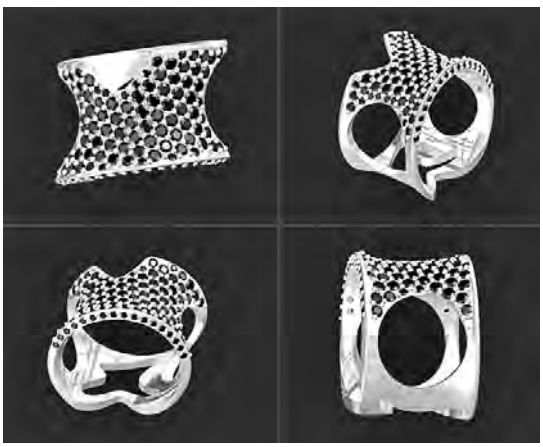


Рис. 9.34. Схема процесса моделирования и БП ювелирных изделий

Глава 10
Биопрототипирование и медицинские приложения

10.1. Трехмерное медицинское сканирование

Существует значительный интерес к производству черепных имплантатов для восстановления индивидуальных дефектов, которые могут быть оцифрованы методами компьютерной краниопластики и воспроизведены средствами АП. Обработка данных компьютерной томографии программными средствами компьютерного конструирования и прототипирования позволяют решать такие задачи. В отличие от традиционных подходов ручного восстановления дефектов, компьютерные методы дают лучший косметический эффект, значительно сокращают время при производстве имплантата и планировании операции, увеличивают конфиденциальность и расширяют спектр материалов для краниопластики. Однако к настоящему времени недостаточно информации о скорости отторжения новых материалов после операции.

Дальнейший материал (см. также главу 1 для сравнения) демонстрирует общие принципы работы АТ для медицинских приложений, изложенные по шагам.

Шаг 1: получение трехмерных томографических данных изображения участка, требующего восстановления. Такие томограммы должны иметь четко выраженный контраст костей и мягких тканей. Это позволит при компьютерной обработке легко сегментировать данные по кости от данных по мягким тканям.

Шаг 2: обработка изображения. Перед тем как сгенерировать файл для послойного синтеза имплантата, возможно, потребуется провести ряд подготовительных процедур — операций обработки изображения. Например, данные нужно будет проверить на изотропность (непрерывность их представления), связность триангуляционных точек, описывающих форму поверхности имплантата, симметричность (зеркальность правой и левой частей изображения, например лица) и пр. Следует также проверить, удалены ли металлические артефакты или прежние имплантаты.

Шаг 3: генерация STL-файла. После сегментации контуров поверхности кости и их математического моделирования (треугольниками, многоугольниками) будет создана сетка и выполнено конвертирование этих данных в формат STL-файла (см. раздел 2.2).

Шаг 4: создание физической модели. STL-данные используются машиной для АТ при создании физической (реальной) модели. Такая модель в дальнейшем может быть использована в качестве мастер-формы для отливки имплантата из более прочного материала или непосредственно для пред- и послеоперационного планирования хода хирургического вмешательства. Будучи анатомически идентичной и строго индивидуальной для пациента, она облегчает процедуру.

Шаг 5: производство имплантата. Модель имплантата может быть использована в качестве темплата и отливки, например, методом выплавляемых моделей самого изделия. Если необходимо, можно дополнительно отшлифовать и отполировать отлитый имплантат, напылить на него гидроксиапатит, придать ему какие-то особенности формы методами традиционной механической обработки, например фрезерованием.

Трехмерное изображение пациента создается из двумерных сечений. Путем интерполяции между этими сечениями получается трехмерная модель по результатам компьютерной томографии (КТ) и магниторезонансной томографии (МРТ). Вообще, послойное разделение в медицинских сканирующих устройствах довольно грубое для качественного АП и для повышения точности воспроизведения надо значительно увеличивать чувствительность сенсоров. Таким образом, КТ и МРТ используют программное обеспечение для создания из сечений трехмерной модели, а при АП, наоборот, трехмерная модель раскладывается на слои перед процессом синтеза. Поэтому синергетика этих двух подходов позволяет создавать медицинские модели хорошего качества. Существует большое количество методик АП, которые применимы в медицине, они описаны в разделе II. Однако у биопрототипирования есть и ограничения.

- Толщина слоя ~0,1 мм неприемлема для многих медицинских приложений, где нужно разрешение ~0,02 мм. Но уменьшение толщины слоя замедляет и удорожает процесс. При этом расстояние между слоями в МРТ ~0,05 мм.
- Поскольку расстояние между слоями в МРТ ~0,05 мм, то 3D-методики обработки биоизображений должны уметь выполнять сглаживание поверхности объекта — объемный рендеринг, обеспечивая его максимальную близость к реальному имплантируемому объекту;
- 3D-методики на стадии планирования должны позволять преобразовать информацию о 3D-объекте в информацию о его сечениях в заданном направлении и обратно, а также оценивать затраты имплантационного материала на операцию.

Компьютерная томография и ее приложения. Перечислим некоторые преимущества КТ по сравнению с другими методами рентгенодиагностики.

- При стандартной рентгенографии или, например, ортопантомографии получается единое плоскостное суммационное изображение объекта, а при КТ-исследовании полностью сканируется трехмерный объект.
- Обычный снимок делается в реальном режиме времени и остается статичным плоским изображением. Его можно рассматривать на негатоскопе или в программе визиографа, но посмотреть объект под другим углом или в другой проекции невозможно — для этого надо делать новый снимок. В противовес этому восстановленный в памяти компьютера трехмерный реформат объекта представляет собой точную копию всей сканированной области. В отсутствие пациента специалист может изучить любой интересующий его участок объекта под любым углом, с любой стороны, во всех плоскостях и на любой глубине.
- Если обычная рентгенограмма представляет собой суммационное изображение, при котором все расположенные последовательно детали накладываются друг на друга, то компьютерная томограмма — это срез тканей объекта толщиной от долей миллиметра до нескольких миллиметров, прочерченный произвольно в заданном месте.
- При рентгенологическом обследовании с использованием любого метода съемки неизбежно возникает определенное проекционное искажение объекта по

величине или конфигурации, что может вызвать ошибки при интерпретации изображения. При компьютерной томографии объект сканируется в размере практически 1:1, что исключает данный вид искажения в процессе реконструкции трехмерного изображения и получения среза.

Технически каждый *компьютерный томограф* состоит из трехмерного сканера, аналого-цифрового преобразователя и компьютера. Стандартный общемедицинский сканер, который, собственно, обычно и называют КТ, состоит из стола, на котором лежит пациент, а также центрирующего и сканирующего устройства в виде кольца, через которое движется стол с пациентом. На внутренней поверхности центрирующего устройства находится вращающаяся апертура, несущая детекторы и излучатель. Чем меньше площадь одного точечного детектора и чем больше их в апертуре, тем выше качество томограммы. Количество детекторов у аппаратов разных поколений и конструкций заметно различается. Если последовательные томографы третьего поколения имели не более 500 детекторов, то машины четвертого поколения несут в апертуре уже до 1500 детекторов, а самые современные спиральные — 5000 и более. При спиральной томографии выполняется уже не серия сканов на разных уровнях, а один прогон среза по спирали с определенным шагом подачи стола в апертуру. Вершиной развития спиральной томографии стало появление мультиспиральных КТ. На них производится не один спиральный срез, а сразу 4, 16 или больше при размере детектора 0,5 мм (соответственно разрешение 2 пары линий на 1 мм).

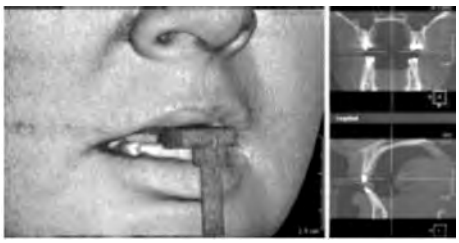
Несмотря на широчайшие диагностические возможности, до недавнего времени КТ как метод обследования крайне редко применялась даже в стоматологии. Во многом это было связано с общими не слишком высокими диагностическими запросами стоматологов, довольно высокой лучевой нагрузкой рентгеновского излучения и качеством изображения, недостаточным для нужд терапевтической стоматологии. Однако развитие КТ-технологий шло не только по пути усовершенствования спиральных томографов. В начале XXI века на рынке диагностического оборудования появился принципиально новый компьютерный томограф, предназначенный непосредственно для обследования челюстно-лицевой области.

Принципиальное отличие специализированных *стоматологических томографов* от последовательных и спиральных КТ заключается, в том, что, во-первых, для сканирования вместо тысяч точечных детекторов используется один плоскостной сенсор, похожий на сенсор ортопантомографа, а во-вторых, генерируемый луч коллимируется в виде конуса. Аппарат конструктивно тоже напоминает ортопантомограф — вокруг головы пациента вращается консоль с сенсором и излучателем. Во время съемки излучатель работает непрерывно, а с сенсора несколько раз в секунду считывается информация, то есть делается несколько кадров в секунду. Затем информация обрабатывается в компьютере и восстанавливается виртуальная трехмерная модель сканированной области (рис. 10.1, *б*). После этого трехмерный реформат нарезается слоями в виде аксиальных срезов определенной толщины (рис. 10.1, *в*) и каждый слой сохраняется в памяти компьютера в виде файла в формате DICOM. Известен конусно-лучевой рентгеновский компьютерный томограф (Cone Beam Computed Tomography (CBCT)) (рис. 10.1, *а*), позволяющий значительно расширить возможности дифференциальной диагностики не только в стоматологии, но и в оториноларингологии и челюстно-лицевой хирургии.

а

б

в



г

Рис. 10.1. Компьютерная томография: *а* — CBCT — Planmeca ProMax Digital 3D; *б* — трехмерный реформат сканированной области; *в* — исходные фронтальный и профильный срезы; *г* — процедура съемки (рисунки с сайта ООО «3ДентЛаб» http://www.3dentlab.ru)

Использование в CBCT датчиков на аморфном силиконе позволяет существенно уменьшить дозу рентгеновского облучения и подсвечивать затемненные области снимаемого изображения. Его программное обеспечение позволяет обрабатывать большие объемы данных и реконструировать тончайшие детали утраченного скелета и/или виртуальной модели имплантируемого участка. Наконец, что важно, CBCT-софт полностью совместим с форматом представления данных DICOM в трехмерных САПР-пакетах.

Специализированные челюстно-лицевые томографы рассчитаны на детальное исследование костной ткани и твердых тканей зубов (рис. 10.2) и обработку данных о них. Мягкие ткани дифференцируются лишь конфигуративно. Благодаря использованию новых технологий лучевая нагрузка при данном исследовании по сравнению с другими видами КТ снижена в десятки раз. В процессе исследования черепа на последовательном конвенционном томографе пациент получает 1000...1500 мкЗв, а на спиральном — не менее 400 мкЗв. При сканировании челюстно-лицевой области с помощью томографа с плоскостным сенсором лучевая нагрузка в зависимости от экспозиции составляет всего 45...60 мкЗв. Нижняя граница соответствует пленочной панорамной томограмме зубных рядов (ортопантомограмме), а верхняя — цифровой флюорограмме.

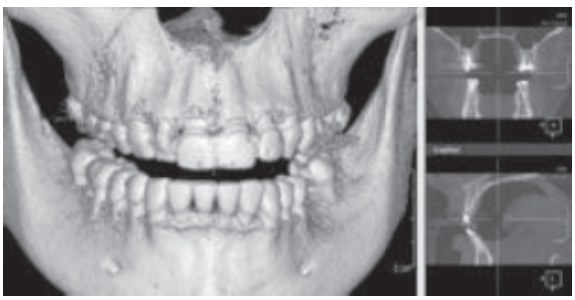


Рис. 10.2. Реформат, изображенный на рис.10.1, но с фильтрацией мягких тканей

Техническими характеристиками, определяющими качество томограммы, для стоматологических томографов являются:

- разрешающая способность сенсора (чем больше пар линий на 1 мм, тем выше качество исходного изображения);
- количество считываний информации за общее время сканирования, или, при одинаковой траектории движения, количество «кадров в секунду» (чем выше плотность считывания, тем достовернее виртуальная реконструкция);
- толщина слоя при сохранении файлов в формат DICOM (чем тоньше слой, тем мельче воксел — визуализируемый элемент объема, являющийся структурной единицей изображения).

Данные опции обеспечивают качество исходного материала, но для получения максимума необходимой информации кроме них необходим определенный набор функций и инструментов, предусмотренных программным обеспечением. Чем больше адаптированных к стоматологии опций имеет программа и чем легче к ним доступ, тем удобнее работать с изображением и тем больше необходимой информации получит специалист любого профиля.

Таким образом, полноценным рабочим названием аппаратуры данного типа является следующее: *челюстно-лицевой* или *максиллофациальный компьютерный то-*

мограф. В зарубежной литературе также встречается сокращенное обозначение — *3D-томограф*. С технической точки зрения это плоскосенсорный компьютерный томограф с конусно-лучевым генератором.

В настоящее время компьютерные томографы для стоматологии выпускают многие зарубежные фирмы. На отечественном рынке диагностической аппаратуры чаще всего позиционируются три аппарата: ACCUITOMO (фирма Morita, Япония); PICASSO (Vatech, Южная Корея) и GALILEOS (Sirona, Германия). Конструктивно все три аппарата похожи друг на друга, но имеют целый ряд различий в технических характеристиках и возможностях программного обеспечения.

С точки зрения технических параметров, о которых уже упоминалось, бесспорным лидером является ACCUITOMO, однако данный томограф имеет довольно примитивное программное обеспечение, слабо адаптированное к стоматологии, — практически стандартный общемедицинский DICOM-просмотрщик.

Томографы PICASSO и GALILEOS оснащены специализированными стоматологическими программами, однако они не идентичны. Конструктивно они различаются тем, что у PICASSO, как и у ACCUITOMO, приемником изображения служит сенсор на основе CMOS-матрицы со специальным слоем, который напрямую воспринимает информацию, а у GALILEOS информация считывается с помощью CCD-матрицы и сигнал воспринимается опосредованно после прохождения через усилитель рентгеновского изображения. По техническим характеристикам PICASSO превосходит GALILEOS:

- разрешение сенсора GALILEOS — 2 пары линий/мм, PICASSO — 2,5 пары линий/мм;
- размер воксела сохраненного изображения у GALILEOS — 0,3 мм, у PICASSO регулируемый размер 0,125...0,3 мм, по умолчанию 0,2 мм;
- количество «кадров в секунду» у обоих аппаратов одинаково, однако у GALILEOS траектория движения вокруг объекта 204° и время сканирования 14 с, а у PICASSO — 360° и 24 с, следовательно, объем первично считанной информации превосходит аналог более чем в 1,5 раза.

Кроме этого, томограф PICASSO выпускается в трех модификациях (PICASSO-Trio, PICASSO-Pro, PICASSO-Master), отличающихся друг от друга габаритами, конфигурацией и набором функций. Более того, каждая модель по желанию может быть оснащена сенсором с различным размером матрицы: 8×7, 12×7, 15×13 и 20×15 см. По сути, сенсор — самая дорогая деталь в томографе, и разница между моделями с разным размером матрицы может быть очень существенной. В то же время специалисты, занимающиеся диагностикой на амбулаторном приеме, могут не переплачивать за излишнюю площадь матрицы. Оптимальным для них является сенсор 12×7 см. Такой размер позволяет сканировать нижнюю челюсть (без височно-нижнечелюстного сустава), альвеолярную часть верхней челюсти и нижние отделы гайморовых пазух одномоментно либо все придаточные синусы носа в полном объеме независимо от индивидуальных анатомических особенностей человека.

Каждая модель томографов PICASSO способна работать в режиме быстрой съемки. В этом случае время сканирования сокращается до 15 с, количество считанной информации несколько уменьшается, снижается детализация особо мелких структур рисунка, но заметно уменьшается и лучевая нагрузка. Быстрая съемка удобна для обследования в детской стоматологии и контроля после операции имплантации.

Особого внимания заслуживает аппарат PICASSO-Trio, с помощью которого можно выполнять все виды рентгенографии, используемой в стоматологии: ком-

пьютерную томографию, телерентгенографию и панорамную томографию зубных рядов (ортпантомография). Один аппарат — три функции. Что же касается внутриротовых рентгенограмм зубов, то диагностический снимок любого зуба может быть выделен из компьютерной томограммы путем обработки соответствующего фрагмента.

Магниторезонансная томография и ее приложения. Основная цель МРТ — дать геометрически точную информацию о месте реконструкции черепа пациента. Принцип работы МРТ основан на измерении электромагнитного отклика ядер атомов водорода на возбуждение их определенной комбинацией электромагнитных волн в постоянном магнитном поле высокой напряженности. В отличие от метода КТ, она позволяет более точно исследовать как внутренние органы, так и мягкие ткани. Совокупность томографических данных — это последовательно записанная информация о трехмерных координатах каждой точки поверхности. Важными параметрами являются также проекция, в которой осуществлялось сканирование, и расстояние между проходами (слоями) изображения. Как отмечалось ранее, важно, чтобы полученные оператором томографической установки данные были изотропны. МРТ обычно характеризуется *полем зрения* (параметр field of view (FOV)), которое измеряется в сантиметрах и для головы составляет ~220 мм. Матрица изображения включает обычно 512 × 512 пикселов. В МРТ значение пикселов измеряется в единицах шкалы Хоунсфильда (Houndsfield unit), где минимальное значение –1024 соответствует воздуху, 0 — воде, а максимальное значение +3072. Кость в зависимости от плотности имеет МРТ-числа в интервале +100...+2000, где более высокие значения свидетельствуют о большей плотности кости. В этом диапазоне нет других живых тканей, похожих по плотности, за исключением металлических имплантатов, которые мог иметь пациент до операции, — их пиксельное значение выше этого диапазона. Цифровой контраст изображения МРТ обычно характеризуется в киловольтах и миллиамперах, поэтому, чтобы отличить мягкие ткани от кости, эти значения должны быть 140 кВ и 250...300 мА. Наклон платформы обычно 0° без каких-либо сдвигов или припусков.

Краниопластический дефект обычно сканируется полностью, от нижней границы до верхней, включая нормальную костную ткань выше и ниже дефекта, что позволит при компьютерной обработке точнее адаптировать модель к местам ее закрепления. После оцифровки данных МРТ делается несколько аксиальных сечений, обычно в продольной и перпендикулярной проекциях. Каждое из таких сечений имеет форму конечного (замкнутого) контура на плоскости, так что в сборе они дают весь объем дефекта. Расстояние между сечениями при сканировании головы обычно от 1 до 3 мм, что нам представляется довольно грубым приближением. Обычно 150 × 1 мм аксиальных сечений требуется для описания кости, если речь идет не о глазницах или нижней челюсти. Физический размер будущего имплантата определяют по полю зрения (FOV), расстоянию между сечениями и числу сечений. Эти данные можно рассматривать как прямоугольный параллелепипед, состоящий из вокселов. Поле зрение 200 мм дает размер пиксела порядка 0,4 мм. Следует заметить, что размер пиксела должен быть довольно малым, чтобы пространственное разрешение в плоскости было меньше, чем у обычных рентгеновских снимков, и чтобы разрешать объекты меньше 1 мм. Также расстояние между сечениями влияет на качество изображения МРТ-снимка.

Ультразвуковое сканирование. В научной визуализации часто приходится иметь дело со скалярными полями данных, заданными в трехмерном пространстве. Данные могут быть получены различными способами: в ходе численного экс-

перимента, сканированием с помощью МРТ, КТ, ультразвука. Например, результатом КТ является множество слоев, то есть двумерных массивов данных, которые вместе образуют трехмерное скалярное поле. Объем данных эксперимента значителен. Например, объем одного исследования в медицинской томографии, обычно равен ~0,1...1 Гбайт. Обеспечение реального времени визуализации означает вывод на экран порядка 25 и более кадров в секунду.

Метод прямого объемного рендеринга путем обратной трассировки лучей с 90-х годов прошлого века позиционируется как эффективный инструмент для визуального анализа объемных данных. Разработаны и доведены до широкой научной общественности подходы, позволяющие решать задачи объемного рендеринга в реальном времени на основе параллельных вычислений с помощью высокопроизводительной вычислительной техники. Эффективно решаются в интерактивном режиме задачи сегментации объема. Развитие графических процессоров — GPU как вычислительных устройств в последние годы дало этому направлению новый значительный импульс и позволило говорить о многообъемном рендеринге в реальном времени. Стереовизуализация научных данных довольно давно культивируется в Бостонском университете (http://scv.bu.edu), но пока она не вошла в широкую практику в медицине.

10.2. Программное обеспечение для обработки медицинских данных

DICOM-формат представления медицинских данных. Современные сканеры КТ и МРТ в хирургических отделениях оборудованы возможностью экспорта изображений томографии через госпитальную компьютерную сеть на главный компьютер. Каждый снимок томографа записывается в индивидуальный файл в отдельную директорию. Формат изображения в соответствии с медицинским стандартом представления данных назван DICOM v.3.0 (Digital Imaging and Communications in Medicine, см., например, www.ntma.org). Использование этого стандарта гарантирует, что вся информация о процессе съемки, расстоянии между сечениями, правая/левая ориентация и пр. будут поняты другими программами без потери данных. Простой способ протестировать данные томографа — проверить размерные характеристики изображения и идентифицировать правую/левую ориентацию.

В медицинской практике томограммы хранятся в специальном формате данных DICOM, а для визуализации томограмм используют так называемые DICOM-визуализаторы. Довольно большая часть их общедоступна, в том числе eFilm, MicroDicom, OsiriX, Onis-Viewer, 3DimViewer, RadiAnt и отечественный MultiVox DICOM Viewer (www.multivox.ru). Все эти просмотрщики обеспечивают визуализацию томограммы в виде классических полутоновых изображений 2D-проекций и сечений объемного скалярного поля. Большинство просмотрщиков обеспечивают также возможность визуализации 3D-моделей томограммы, используя чаще всего простые модификации прямого объемного рендеринга (рис. 10.3).

Основные возможности программ Mimic®. Наилучшего качества и информативности объемного рендеринга позволяет достичь метод обратной трассировки лучей. С помощью этого метода можно визуализировать данные как набор изоповерхностей, или в виде тумана, или обоими способами одновременно. У изоповерхностей и тумана можно варьировать прозрачность и цвет. В научном эксперименте и дорогих профессиональных системах можно встретить примеры мультиобъемного рендеринга (рис. 10.4), от которого пока не требуют работы в реальном времени.

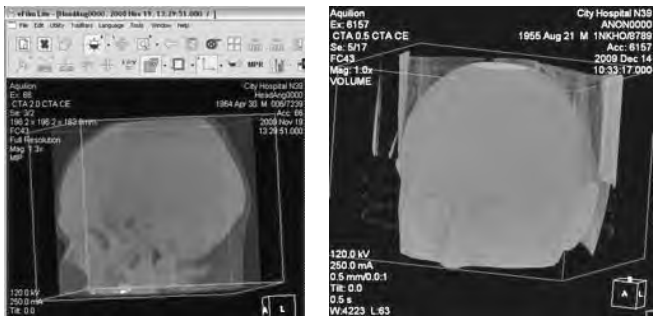


Рис. 10.3. Пример 3D-визуализации в программе eFilm

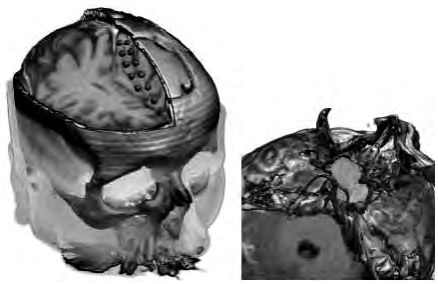


Рис. 10.4. Пример мультиобъемного рендеринга

Однако наличие данной опции крайне востребовано, так как всегда до проведения операции важно знать не только 3D-форму, но и объем (массу, когда известна плотность материала) планируемого имплантата.

Высокое качество изображения формирует интерес к использованию стереоизображений, в которых, как и в прямом рендеринге, используются цвет и прозрачность вокселов (рис. 10.5).

Наиболее удобной структурой хранения пространственных массивов данных считается программа Mimic (www.materialise.com), в которой 3D-текстура аналогична 3D-массиву действительных чисел. Для Mimic более удобной может оказаться иерархическая структура, например октодерево. Для доступа к элементам дерева процессору необходимо пройти множество ветвлений, что приемлемо для Mimic, но резко снижает производительность, к тому же в программах для GPU нет рекурсии. Программа SMV, реализующая трассировку, выполнена в среде MS Visual Studio 2008 как программа ретуши (шейдинг — shading) для Mimic, в среде OpenGL и GLSL (шейдерный язык для OpenGL).

Предложен метод ускорения вычислений, заключающийся в использовании иерархии текстур: помимо основного массива $512 \times 512 \times 512$ в Mimic загружается меньший массив — двухканальная текстура $16 \times 16 \times 16$. В пространстве каждому элементу этой текстуры соответствует свой блок $32 \times 32 \times 32$ исходных данных. Текстура хранит минимальное и максимальное значения данных соответствующего блока. Обращаясь к маленькой текстуре, луч может пропускать «неинтересные» области пространства, двигаясь с большим шагом. Такое решение повышает скорость (FPS) в среднем в три раза.

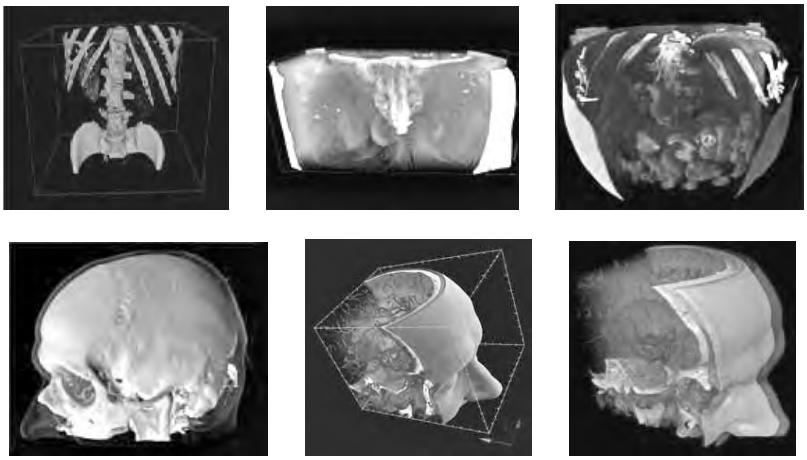


Рис. 10.5. 3D- и стереовизуализация в программе SMV

Виртуальное трехмерное планирование с программой SimPlant®. SimPlant — это программное обеспечение точного дооперационного планирования, которое обеспечивает повышенный уровень конфиденциальности и дополнительную безопасность для пациентов. План создается для идеального расположения имплантата в 2D- и 3D-изображениях с учетом клинических и эстетических соображений.

Программа SimPlant как учебное пособие может продемонстрировать пациентам предоперационный план, что поможет им понять, как будет проводиться операция. SimPlant также удовлетворяет постоянно увеличивающиеся медицинские и юридические требования, предоставляя точную деловую документацию. Кроме того, предварительное планирование с SimPlant экономит время и деньги, эффективно уменьшает время операции и улучшает управление списками, содержащими спецификации специальных имплантатов для использования. Основные функциональные возможности просмотра следующие.

- В программе SimPlant доступны традиционные аксиальные, сагиттальные и корональные изображения.
- Программа предлагает трехмерную визуализацию имплантата вместе с костью, сканируемого протеза или шаблона сканирования, нижнечелюстного нерва.
- Программное обеспечение является инструментом, позволяющим быстро добиться взаимопонимания хирург, стоматолог, зуботехнической лаборатории и пациент.
- Печать отчетов с данными пациента, спецификаций имплантатов, 2D- и 3D-изображений в черно-белом или цветном варианте.
- Измерение плотности и размеров кости, увеличение контраста, масштабирование окна, панорамирование.
- Просмотр поперечных срезов и панорамных изображений.

SimPlant CMF имеет две основные особенности. Во-первых, это расширенная 3D-цефалометрия, а во-вторых, удобное в использовании 3D-планирование черепно-челюстно-лицевой остеотомии и хирургической дистракции (рис. 10.6).

Открытие цефалометрического окна дает возможность выполнить несколько стандартных анализов (шаблонов). Каждое исследование помечается знаками, которые

Рис. 10.6. 3D-цефалометрия

необходимо определить. Проекции и измерения обозначаются автоматически, если вы определили все направления.

Пометки могут быть помещены как в 2D, так и в 3D. Новые индивидуальные исследования могут быть созданы и сохранены, и вы сможете импортировать точки и проекции из других существующих цефалометрических исследований.

SimPlant CMF (рис. 10.7) позволяет докторам планировать черепно-челюстно-лицевые операции. Эта версия обеспечивает выполнение остеотомии и дистракции. В дизайне SimPlant CMF значительное внимание уделялось эргономике программного обеспечения. SimPlant CMF очень удобен: мастер проводит с вами пять действий, после которых выполняет репозицию кости.

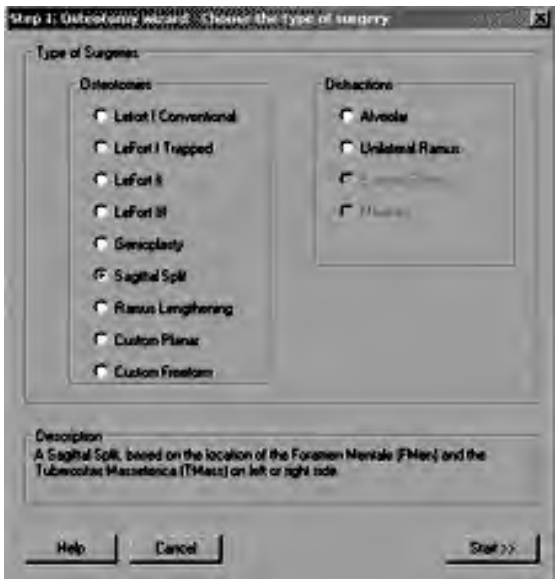


Рис. 10.7. Виртуальная CMF-хирургия

После открытия проекта и ввода хирургического метода моделирования мастер сначала просит выбрать требуемый тип остеотомии или хирургической дистракции из операционного списка. Традиционные остеотомические операции, перечисленные в проекте: LeFort1, LeFort1 ущемленный, LeFort2, LeFort3, Genioplasty, Двустороннее саггитальное Разделение, Удлинение ветви, а также две заказные остеотомии — Заказная плоская остеотомия и Заказная бесформенная остеотомия. Перечисленные в проекте

операции дистракции: Альвеолярная, Односторонняя ветвь, Двусторонняя ветвь и Верхнечелюстная дистракция.

Сходство действий (шагов) мастера в планировании остеотомии и дистракции:

- **Шаг 1** (см. нумерацию шагов на рис. 10.8):
  - выбрать остеотомическую операцию;
  - выбрать операцию дистракции.

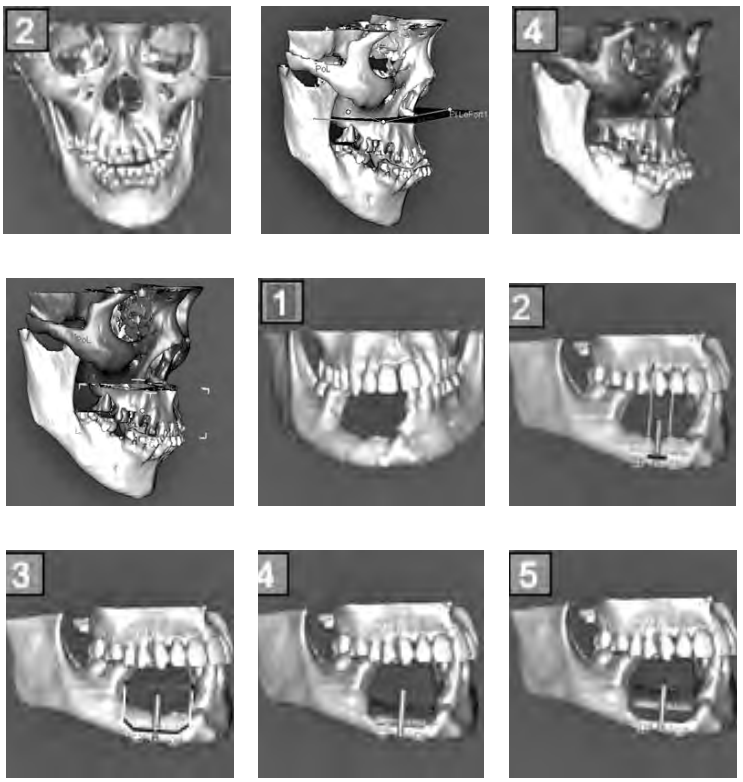


Рис. 10.8. Последовательность шагов

- **Шаг 2:**
  - определить необходимые ориентиры. Согласно типу остеотомии, которую вы выбрали, обозначаются перечисленные ориентиры и проекции;
  - выбрать и разместить дистрактор. Выбрать объект, к которому вы хотите прикрепить дистрактор. Дистрактор может быть выбран из библиотеки. Возможен предварительный просмотр линии вырезания.
- **Шаг 3:**
  - расположение линии вырезания Предварительный просмотр линии вырезания в 3D- и 2D-проекциях. Размеры этой линии могут быть изменены и позиция откорректирована;
  - позиция и линия вырезания для дистрактора могут быть откорректированы в различных измерениях.

- **Шаг 4.** Вырезание объекта и разбиение его на части. Перед разбиением объекта можно проверить линию резания в 3D-виде. Будет представлен перечень конечных результатов.
- **Шаг 5:**
  - репозиция созданной части (частей). Можно выбрать для репозиции необходимую часть и перемещать и/ или вращать вырезанную костную часть;
  - выбор части для репозиции и ее перемещение/вращение.

В течение процесса моделирования результаты можно увидеть как в 3D-, так и в 2D-проекциях. Все позиции перемещаемых частей могут быть сохранены, и есть возможность на каждом этапе возвратиться к первоначальной позиции. Это позволяет сравнивать и анализировать виртуальные пред- и постоперационные позиции, используя функции цефалометрии.

Перед передачей разработанного плана в операционную Materialise может изготовить для пациента специальную и анатомическую корректирующую пластиковую модель БП (рис. 10.9), чтобы он мог оценить план лечения. Использование модели БП позволяет также сформировать дистрактор, который будет использоваться. На физических моделях обозначаются остеотомическая линия и/или направляющие отверстия для дистрактора.

Разновидности SimPlant. Программное обеспечение SimPlant бывает трех разновидностей: SimPlant Planner, SimPlant Pro и SimPlant Master. SimPlant Planner — стандартное полное лицензированное программное обеспечение планирования имплантации. Пользователи SimPlant Planner зависят от преобразования из КТ формата DICOM в формат SimPlant Planner сотрудниками Materialise или с помощью программы SimPlant Master.

SimPlant Master считывает данные КТ и подготавливает дентальный проект (сегментация челюсти, панорамные кривые, поперечные срезы, трехмерные объекты). Результат записывают на CD для использования данных в программном обеспечении SimPlant Planner. Владельцы SimPlant Pro имеют расширенное программное обеспечение, чтобы импортировать данные КТ-исследований независимо от поставщика услуг и обрабатывать эти данные в среде планирования SimPlant.

SimPlant Master — это пакет обработки для обслуживания пользователей. С SimPlant Master данные просмотра могут быть импортированы и отредактированы. Поддерживается широкий диапазон КТ-сканеров и форматов изображения. Проект планирования можно создать или преобразовать, данные можно отослать пользователю (их можно сохранить во всех форматах SimPlant).

Рис. 10.9. Стереолитографическая модель с отверстиями для дистрактора

Точность подготовки имплантата с помощью программы SurgiGuide®. Программа SurgiGuides (план операции) обеспечивает связь между запланированной и фактической операциями, точно передавая смоделированный план операции. Направляющие втулки для сверл располагаются в определенных положении и ориентации, которые были намечены в процессе моделирования. Из-за того что формы костей и зубов сложны,

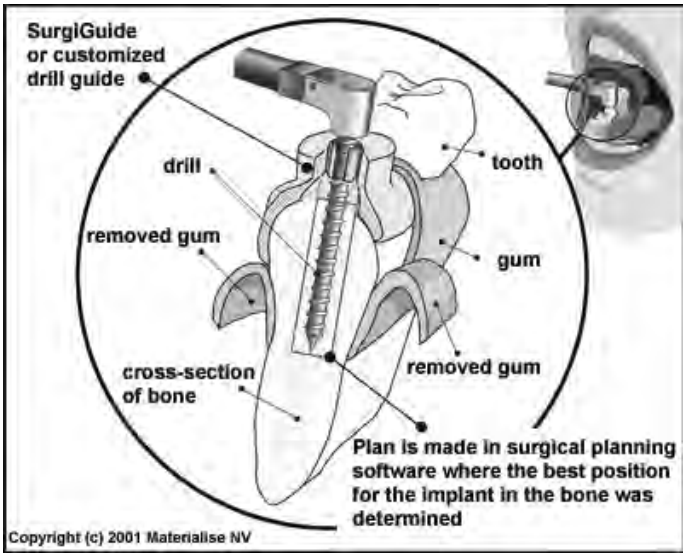


Рис. 10.10. Концепция SurgiGuide с опорой на кость

SurgiGuide or customized drill guide — SurgiGuide, или изготовленная на заказ направляющая для сверла; tooth — зуб; drill — сверло; gum — десна; removed gum — удаленная десна; cross-section of bone — поперечное сечение кости; plan is made in surgical planning software where the best position for the implant in the bone was determined — план выполнен с использованием софта для хирургического планирования, в котором наилучшее положение имплантата в кости было установлено

план уникален для каждого пациента и очень стабилен. Существует несколько концептуальных подходов при работе с SurgiGuide (рис. 10.10–10.17).

Концепции совмещения SimPlant — SurgiGuide заключаются в преобразовании точных размеров моделируемого имплантата, включая ширину, угол наклона и глубину сверления, в хирургическую направляющую для сверления и установки имплантата. SurgiGuide направляет хирургическое сверло к запланированному местоположению имплантата. Хирург устанавливает имплантат в просверленные отверстия. По плану операции (SurgiGuide) сам имплантат изготавливается стереолитографическим способом индивидуально для каждого пациента.

Во время операции SurgiGuide помещается на челюстную кость (SurgiGuide с опорой на кость (см. рис. 10.10)), слизистую оболочку (SurgiGuide с опорой на слизистую оболочку) или зубы (SurgiGuide с опорой на зубы (рис. 10.11)). Существуют также особые случаи.

SurgiGuide с опорой на зубы (рис. 10.11) — это изготовленная на заказ направляющая для сверления, созданная для единственной и прочной посадки на оставшиеся зубы, которая направляет сверло в точно запланированное положение даже при от-

Рис. 10.11. Концепция SurgiGuide с опорой на зубы

сутствии одного зуба. SurgiGuide с опорой на зубы предназначен для операции на частично беззубых челюстях. SurgiGuide с опорой на зубы идеален для выполнения минимально инвазивной операции. Поскольку заранее тщательно исследовано качество кости и составлен план, то нет необходимости отделять костный лоскут для введения сверла и имплантата. Маленького отверстия, просверленного через слизистую оболочку, достаточно, чтобы точно установить имплантат. Пользователь перед зубной операцией должен послать гипсовый слепок вместе с планом SimPlant в фирму Materialise (рис. 10.12). В Materialise эта информация используется для того, чтобы изготовить точный SurgiGuide, который прочно садится на зубы, и это превращает запланированную имплантацию в реальную операцию. Этот процесс позволяет немного ограничить искажение КТ-изображений, которое дают зубные пломбы или брекеты.

SurgiGuide с опорой на кость (см. рис. 10.10) — это изготовленная на заказ направляющая для сверления, созданная для единственной и прочной посадки на челюстную кость пациента. Этот тип SurgiGuide может использоваться для пациентов с беззубыми и частично беззубыми челюстями.

Рис. 10.12. План по SimPlant для концепции SurgiGuide с опорой на зубы

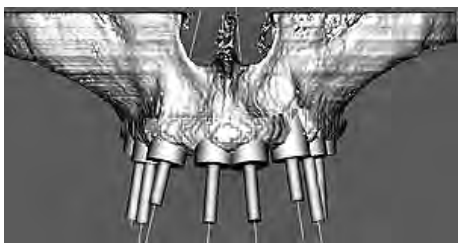


Рис. 10.13. План по SimPlant для концепции SurgiGuide с опорой на кость

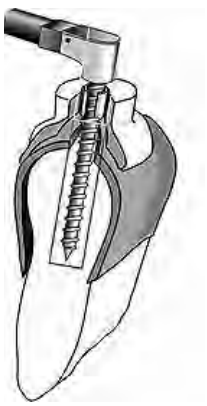


Рис. 10.14. Концепция SurgiGuide с опорой на слизистую оболочку

В ходе операции производят разрез гребня и поднимают слизисто-надкостничный лоскут, чтобы освободить поверхность кости. SurgiGuide помещают на поверхность кости в единственном устойчивом положении, для которого он и был создан, и направляют сверло в запланированное положение. Подъем слизисто-надкостничного лоскута дает хороший обзор в течение операции (рис. 10.13).

SurgiGuide с опорой на слизистую оболочку (рис. 10.14) — это изготовленная на заказ направляющая для сверления, созданная для единственной и прочной посадки на мягкую ткань челюсти пациентов. Данный тип SurgiGuide может использоваться для пациентов с беззубыми челюстями. Исследование пациента вместе с протезом для сканирования является обязательным. Это дает на КТ-изображении точное представление о желаемой установке зубов для улучшенного планирования имплантации.

В течение операции SurgiGuide помещается на мягкую ткань в единственном прочном положении, для которого он и был создан, и направляет сверло в запланированное положение (рис. 10.15). Эта методика ведет к минимально инвазивной операции.

SurgiGuide этого типа (рис. 10.16 и 10.17) — это изготовленная на заказ направляющая для сверления, используемая для размещения специальных имплантатов, таких как зигоматические (скуловые) имплантаты. Этот SurgiGuide изготавливается так же, как и направляющие, изготовленные с опорой на кость и слизистую оболочку. Хорошее позиционирование и малое осевое отклонение этих типов имплантатов чрезвычайно важно. Дооперационное планирование позволяет в ходе операции с использованием SurgiGuide установить имплантат наилучшим образом.

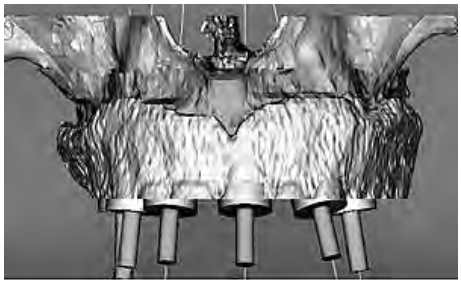


Рис. 10.15. План по SimPlant для концепции SurgiGuide с опорой на слизистую оболочку

Модель с цветными спроектированными имплантатами выпускается вместе с SurgiGuide. Таким образом, хирург может проверить годность SurgiGuide.

Рис. 10.16. Концепция SurgiGuide — специальные имплантаты

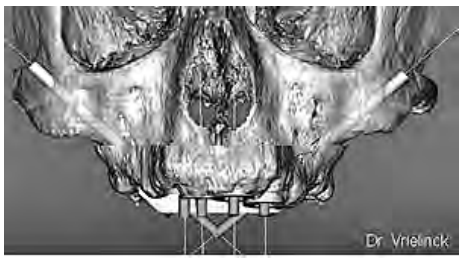


Рис. 10.17. План по SimPlant для концепции SurgiGuide со специальными имплантатами

Существуют и другие программные решения: SICAT Surgical Guide — система планирования имплантации отдельных зубов; coDiagnostiX Implant Guide Technology — трехмерный интерфейс между различными форматами данных компьютерной томографии; EasyGuide 3-D Treatment Planning Software — ориентированная на обработку данных 3D CBCT. На рис. 10.18 показаны фрагменты программы Implant — Assistant с российского сайта фирмы CDI Soft (http://implant-assistant.ru).

Рис. 10.18. Программа Implant — Assistant® для компьютерного дизайна положения зубов

Методика 3D-трехмерного рендеринга, реализованная в названных программных продуктах, представляет собой совокупность математических формул, позволяющих свести всю информацию о геометрии объекта (имплантата) к совокупности точек (пикселов) при ее изображении на мониторе компьютера или составлении управляющих команд для последующей операции послойного синтеза изделия.

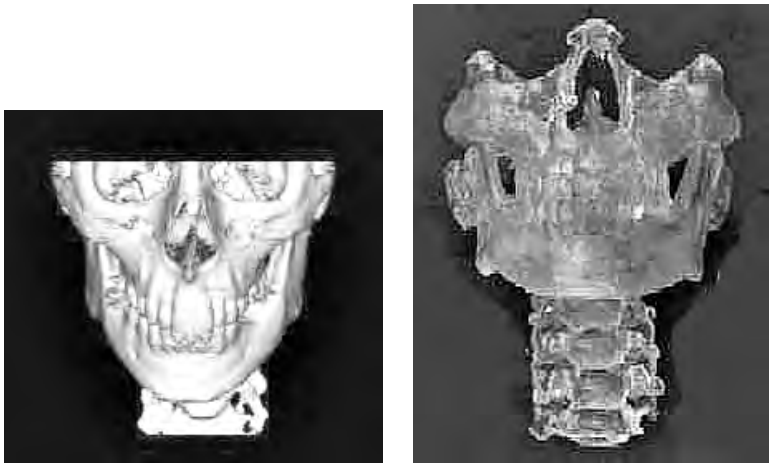
Проверка анатомической ориентации. При моделировании имплантатов как в стоматологии, так и в восстановительной хирургии всегда необходимо иметь возможность проверки анатомической ориентации восстанавливаемого участка и его взаимного соприкосновения с окружающими тканями. На рис. 10.19 показаны примеры анатомического моделирования фаланги пальца и нижней скулы.

Рис. 10.19. Планирование и проверка анатомической конфигурации

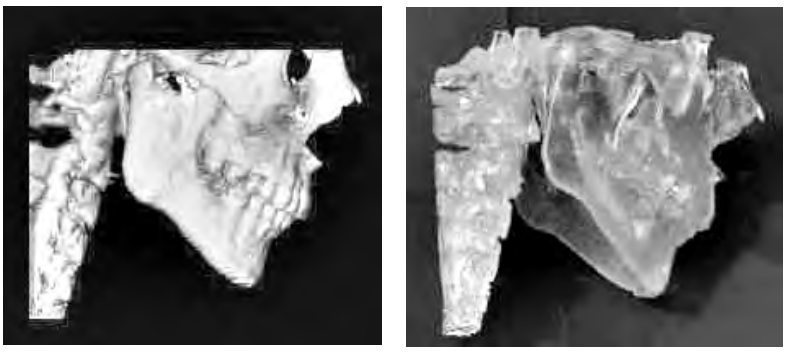
Контроль и морфология объема имплантата и интенсивности изображения. На рис. 10.20 показаны несколько типичных случаев, объясняющих необходимость тщательного контроля симметричности (правое — левое) в восстановительной челюстно-лицевой хирургии. Не менее важно знать и объем участка восстановления для оценки затрат на изготовление имплантата, изменения нагрузки на соответствующие мышцы и т. д.

10.3. Виртуальная костная хирургия и компьютерная краниопластика

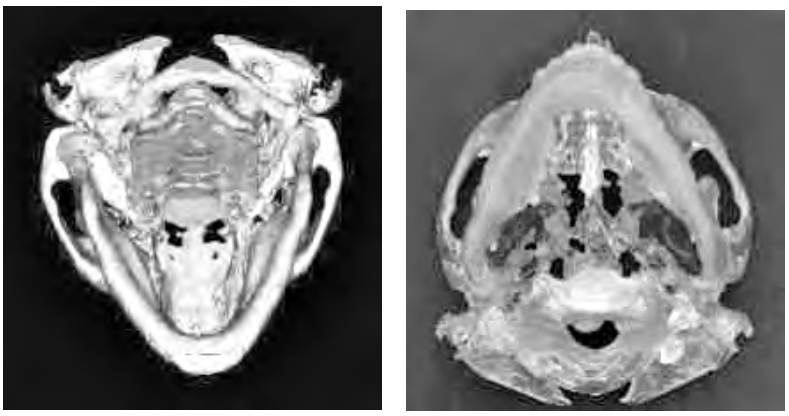
Новые подходы к моделированию и послойному синтезу тканево-клеточных каркасов напоминают работу с конструктором Lego при сборке воедино из отдельных элементов утраченных деталей скелета (рис. 10.21).



а



б



в

Рис. 10.20. Контроль симметричности и объема восстанавливаемых участков с: *а*) аксиальным; *б*) сагиттальным и *в*) корональным изображением

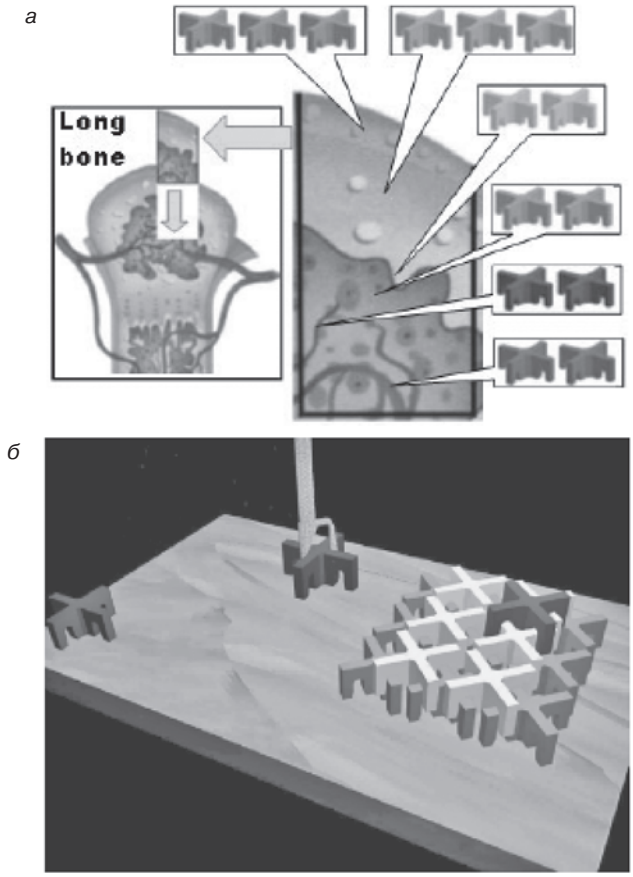


Рис. 10.21. Парадигма восстановительной хирургии

10.3.1. Анатомически точные модели

Важность проектирования анатомически точных моделей показана на рис. 10.22.

Рис. 10.22. Моделирование анатомически точных моделей

10.3.2. Сосудистое биомоделирование

Долгие годы ученые работали над выращиванием органических тканей в лабораторных условиях. Сегодня тканевая инженерия позволяет выращивать человеческие ткани, хотя до сих пор крупные сложные органы так создавать невозможно. Исследователи одного из институтов Фраунгофера работают над проектом, который позволит выращивать целые органы, пригодные для пересадки человеку. Новый проект BioRap (см. разделы 4.11 и 5.15.2) предполагает создание новых технологий и материалов, с помощью которых можно выращивать полноценные искусственные кровеносные сосуды, ткани и сложные органы.

Основные проблемы при создании полноценного органа — это его биосовместимость и последующее бесперебойное снабжение питательными веществами. До сих пор выращивание полноценной капиллярной системы было невозможно — она чрезвычайно разветвлена, имеет комплексный характер и содержит миниатюрные элементы. Пять институтов Фраунгофера с 2009 года объединили усилия для разработки биосовместимых искусственных кровеносных сосудов (рис. 10.23).

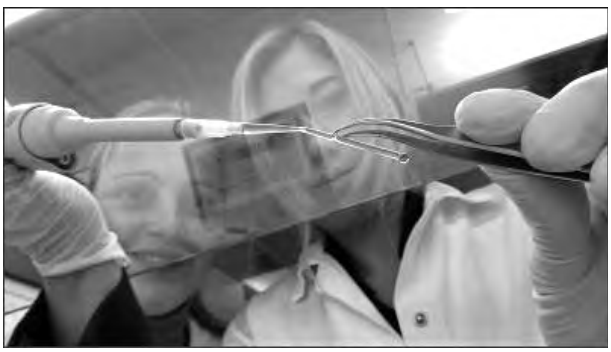


Рис. 10.23. Биополимерный капилляр

Теперь ученые работают над адаптацией технологий АП для моделирования крошечных биоструктур и изготовления сложных органических тканей в основном с помощью комбинации двух различных методов — 3D-печати и многофотонной полимеризации (см. раздел 3.9). В 3D-печати различных органических тканей есть определенные успехи. Однако эта технология пока недостаточно точна для микроструктур капиллярных сосудов. Поэтому немецкие исследователи совместили ее с двухфотонной полимеризацией. Таким образом можно создавать упругие высокоточные конструкции, полностью соответствующие трехмерной модели. Отдельные процессы этой технологии уже работают, и в настоящее время строится прототип комбинированной высокоточной системы 3D-печати с двухфотонной полимеризацией.

Для создания капилляров и более крупных сосудов разрабатываются новые материалы, обеспечивающие бесперебойный ток крови. Прежде всего искусственные кровеносные сосуды должны быть гибкими и упругими и без проблем взаимодействовать с естественной тканью. Для этого необходимо научиться закреплять живые клетки на поверхности полимера с помощью биомолекул, таких как гепарин и якорь-пептиды. В настоящее время разрабатываются и специальные «биочернила» для 3D-принтера, которые будут содержать смесь синтетических полимеров и биомолекул. Следующим шагом станет покрытие внутренних стенок таких ис-

кусственных сосудов эндотелиальными клетками, которые обеспечат беспрепятственный ток крови точно так же, как в естественных сосудах человека.

Пока органы, созданные на основе биополимеров, непригодны для трансплантации, но уже могут служить образцами для медицинских опытов. В случае успешной реализации технологии комбинированной печати в будущем появится возможность создания полноценных человеческих органов (рис. 10.24).

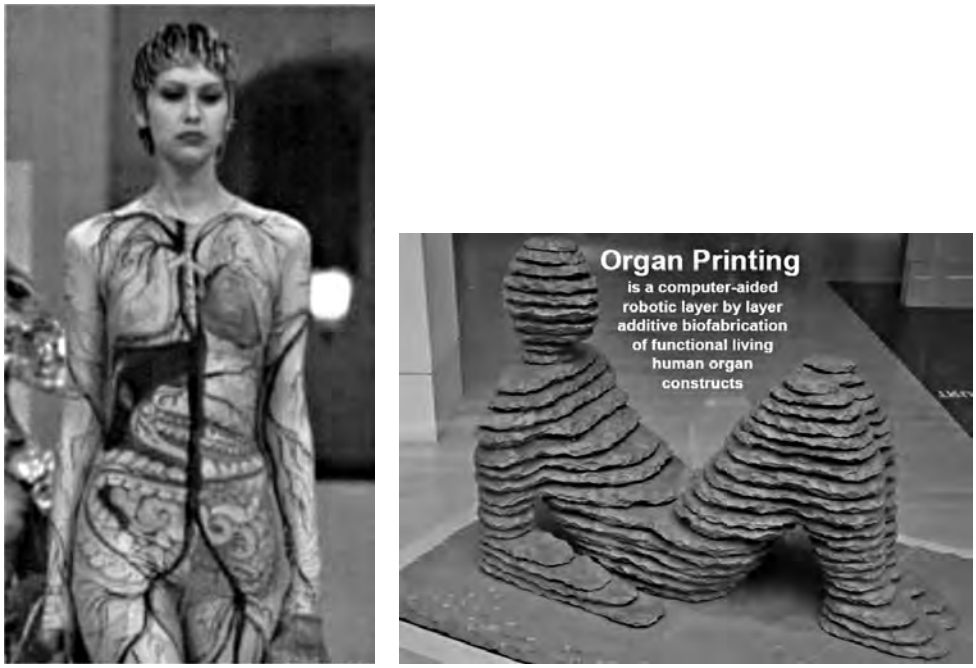


Рис. 10.24. Реклама с сайта Института Фраунгофера

10.4. Компьютерное моделирование, конечно-элементный анализ, дизайн имплантатов и тканево-инженерных конструкций

Внутрикостные стоматологические имплантаты являются эффективным средством устранения дефектов зубных рядов. Развитие зубной имплантации связано с проблемой достижения надежной остеоинтеграции путем совершенствования внутрикостной части имплантатов. Имплантаты со сквозной пористостью лучше выдерживают нагрузку при замещении включенных дефектов однокорневых зубов и не выдерживают нагрузку на первые моляры, что приводит к их перелому.

Важной проблемой является изучение напряженно-деформированного состояния пористых имплантатов при воздействии на них жевательных нагрузок. Также представляет интерес оптимизация прочностных характеристик имплантата и его пористости. Для моделирования подобных по сложности задач используются численные методы конечных элементов, хорошо развитые и активно используемые в последнее время.

Одним из направлений изготовления нагружных имплантатов является метод СЛС/П, посредством которого получают зубной протез со сквозной пористостью. Ранее была показана возможность изготовления послойных СЛС/П тканево-соединительных каркасов из титана и/или никелида титана (нитинола) со сложной архитектурой пор, контролируемыми проницаемостью и размером зерен.

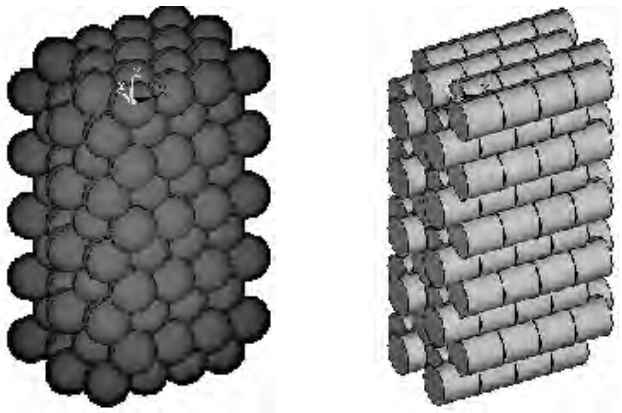
В данном разделе для изучения напряженно-деформированного состояния пористых имплантатов, синтезируемых при СЛС, используется программный комплекс ANSYS. Широкая распространенность ANSYS в среде инженеров-разработчиков, обусловленная широкими возможностями программы в области решения сложных проблем механики деформируемого тела, теплообмена, гидродинамики и электромагнитных полей, а также адаптированностью программы к конечному пользователю, не могла не вызвать потребности в использовании ее в конструкционной стоматологии.

Известны работы с подобными целями и методами в стоматологии, такие как численное моделирование «съемный протез — имплантат — кость» с переменными параметрами размеров и плотности костной ткани, позволяющие изучить биомеханические основы взаимодействия структур костной ткани нижней челюсти с полными съемными протезами различной конструкции и фиксирующими их дентальными внутрикостными имплантатами; исследования, посвященные выявлению особенностей напряженно-деформированного состояния зуба и околозубных тканей при динамической нагрузке и защитной роли капы с использованием конечно-элементной модели зубочелюстного сегмента в области центрального резца верхней челюсти; исследования распределения напряжений в твердых тканях коронки зуба при различных объемах дефектов, а также во вкладках под воздействием физиологических нагрузок; сравнительный анализ результатов математического моделирования напряженно-деформированного состояния различных конструкций штифтовых зубных протезов; конечно-элементный трехмерный анализ напряженно-деформированного состояния при замещении полостей медиально-окклюзионно-дистальной вкладкой из керамомера или пломбой из светоотверждаемого композита. Однако взаимодействие пористой структуры имплантата с костной тканью является не до конца изученным.

Важно знать, как влияет величина пористости протеза на взаимодействие его с костной тканью. Форма зерен (частиц), из которых изготовлен имплантат, при СЛС и их ориентация в пространственной структуре также вносят вклад в напряженно-деформированное состояние системы. Расчет, позволяющий оптимизировать структуру такого имплантата, и являлся задачей настоящего анализа. Решение этой проблемы позволяет подобрать режим формирования протеза, который, с одной стороны, будет иметь достаточную пористость, а с другой — удовлетворять жевательным нагрузкам. Для проведения расчетов необходимо было создать модель взаимодействия «кость — имплантат». Предполагалось, изменяя величину пористости, наблюдать за изменением напряжения в зоне контакта. Также вызывает интерес влияние внутренней структуры модели (а именно формы частиц, из которых образуется модель) и формы протеза на возникающие напряжения, суммарные смещения и относительные деформации.

Для расчетов использовали упрощенную модель имплантата в виде цилиндра, диаметр которого 8 мм и высота 14 мм. Эту конструкцию располагали в полости предполагаемой губчатой ткани. Для уменьшения затрат ресурсов расчета на рис. 10.27, *в* представлена только четверть модели в силу ее симметрии, но при этом также вводились граничные условия симметричности на срезах модели.

Поскольку имплантаты, сформированные при СЛС, обладают пористой структурой, графическое представление модели подвергалось изменению. Для описания пористости модели изначально создавался материал из упорядоченных объектов (при заполнении имплантата порошком) правильной формы. В качестве таковых использовались шары и цилиндры (рис. 10.25, *а* и *б*).



а *б*

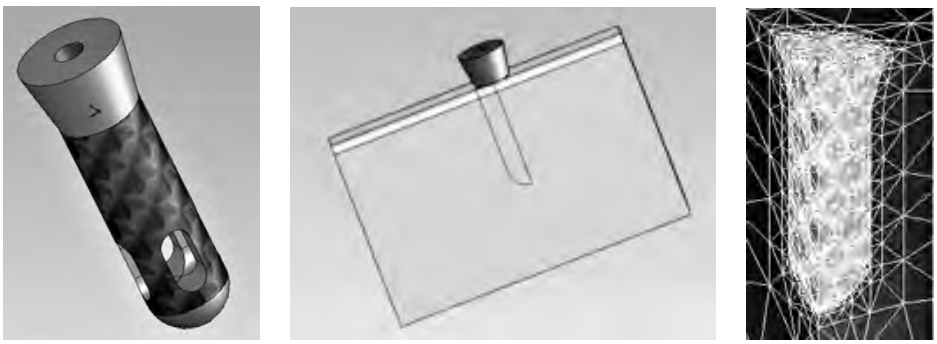
Рис. 10.25. Схема заполнения объема имплантата порошковым материалом: *а* — частицы порошка сферической формы; *б* — частицы порошка цилиндрической формы

Величина пористости регулировалась изменением диаметра шаров (рис. 10.26, *а*–*в*), а также величины перекрытия шаров по диаметру, выраженной в процентах. Расположение объектов друг относительно друга в данной работе не менялось, так как в случае с шарами имеет смысл лишь плотная упаковка, когда последующий слой располагается в луне предыдущего. Материал получается следующим образом: создается один объект, затем копируется несколько раз (в данном расчете 4 раза) вдоль оси *X* на расстояние, характеризующее пористость (это может быть 98 или 95% и т. д. от диаметра, например, шара, чтобы образовывалось перекрытие 2 и 5% от диаметра соответственно). Полученные объемы объединяли и снова копировали, но уже как вдоль оси *X*, так и вдоль оси *Y* (в данном расчете 4 раза). После объединения повторяли размножение вдоль оси *Z* (в данном расчете 10 раз). При этом рассчитывали, чтобы объекты попадали в луну плотной упаковки.

а *б* *в*

Рис. 10.26. Изменение пористости в расчетной модели: *а* — шар, *d* = 2 мм, перекрытие 2% от *d*; *б* — шар, *d* = 1 мм, перекрытие 2% от *d*; *в* — шар, *d* = 2 мм, перекрытие 9% от *d*

Далее посредством встроенных функций ANSYS (VINV) производилось обрезание модели либо объемным цилиндром, построенным в данном программном продукте, либо объемом, построенным в других CAD-системах. Модель штифта строилась в SolidWorks и импортировалась в ANSYS в виде *.SAT-файла (рис. 10.27). Здесь наблюдается проблема появления вырожденных поверхностей, объемов и малых линий, так как строится пересечение объемов сложной формы. Это вызывает трудности построения. Не всегда удается в обычном режиме произвести обрезание объема, поэтому в процессе построения изменяли величину объема функцией SCAL. Естественно, что после обрезания полученный объем необходимо вернуть к исходной величине. Часто после проведения таких операций не удается произвести разбиение конструкции крупной сеткой конечных элементов, чтобы время вычисления было разумным. Более мелкая сетка дает более точный результат, но затраты времени на расчет становятся неприемлемыми. Поэтому приходится отказываться от некоторых промежуточных построений (например, для диаметра шаров 2 мм перекрытие 7% и более).



а *б* *в*

Рис. 10.27. Стадии построения модели: *а* — создание модели имплантата в SolidWorks; *б* — внедрение в костную ткань; *в* — импорт модели и разбиение сеткой конечных элементов

Губчатую кость (рис. 10.27, *б*), в которую внедряется протез, представляли в виде окружающего объема, закрепленного на расстоянии более 6 мм. Размеры этого цилиндрического объема 1,5 × 2 см. Предполагалось, что на таком расстоянии от имплантата кость неподвижна.

В качестве конечных элементов для контакта титана и губчатой кости выбирали SOLID 95 — объемный элемент с 20 узлами. Он соответствует решению статических задач и расчету напряженно-деформированного состояния, которые производились в данной работе.

Но этот элемент не может применяться для материалов, обладающих свойством памяти формы, так как в его специальных возможностях авторы ANSYS не указывают гиперупругость.

Нитинол NiTi является сверхупругим материалом, так как в нем существует упругая потенциальная энергия (или функция плотности энергии деформации), являющаяся скалярной функцией одной деформации или тензора деформаций, для которой производная относительно компонента деформации определяет существующий компонент напряжения. Такой материал подвергается большим деформациям и перемещениям с малым изменением объема. При этом необходимо

применять теорию больших деформаций. Для NiTi выбирали элемент SOLID 187 — трехмерный элемент с 10 узлами, в описании которого есть свойство памяти формы.

В зоне взаимодействия «имплантат — кость» для более точного вычисления рекомендуется сгущать сетку объемных конечных элементов. На самих же взаимодействующих поверхностях вводили контактные элементы TARGE 170 и CONTA 174.

Элемент TARGE 170 генерировали на поверхности имплантата, так как ее условно принимали за целевую поверхность, а CONTA 174 на внутренней поверхности полости — за поверхность контакта. Рассматривали податливо-податливый контакт, что подразумевает деформацию обоих тел.

На моделируемую конструкцию накладывались граничные условия (рис. 10.28). Известно, что жевательная нагрузка на зуб составляет 240 Н. Учитывая заданные размеры имплантата, на внешнюю поверхность приходилось давление ~1,19 МПа. Как отмечалось ранее, на срезах конструкции вводилось условие симметрии. Нижнюю поверхность модели кости закрепляли, то есть запрещали перемещение относительно оси *Z*, а торцевую часть — относительно осей *X* и *Y*.

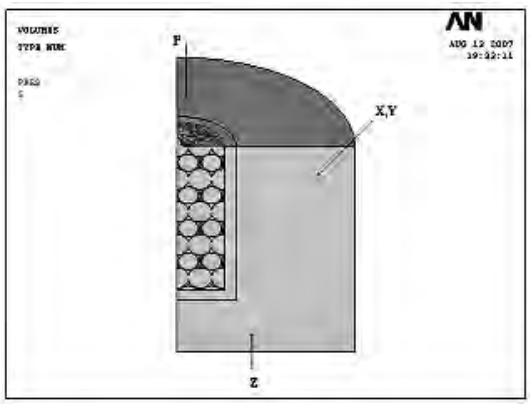


Рис. 10.28. Граничные условия конструкции

Процесс решения выполнялся за два шага решателя. На первом шаге осуществляется проникновение имплантата в зону контакта губчатой кости. Это обусловлено перемещением вдоль оси *Z* на первом шаге верхней поверхности модели. Затем, не выходя из решателя, снималось нагружение первого шага и прикладывалась нужная нагрузка. Для модели NiTi в силу свойства памяти формы на первом шаге нагружения использовался решатель типа Large Displacement Static (расчет статических задач с большими перемещениями, команда NLGEOM, ON).

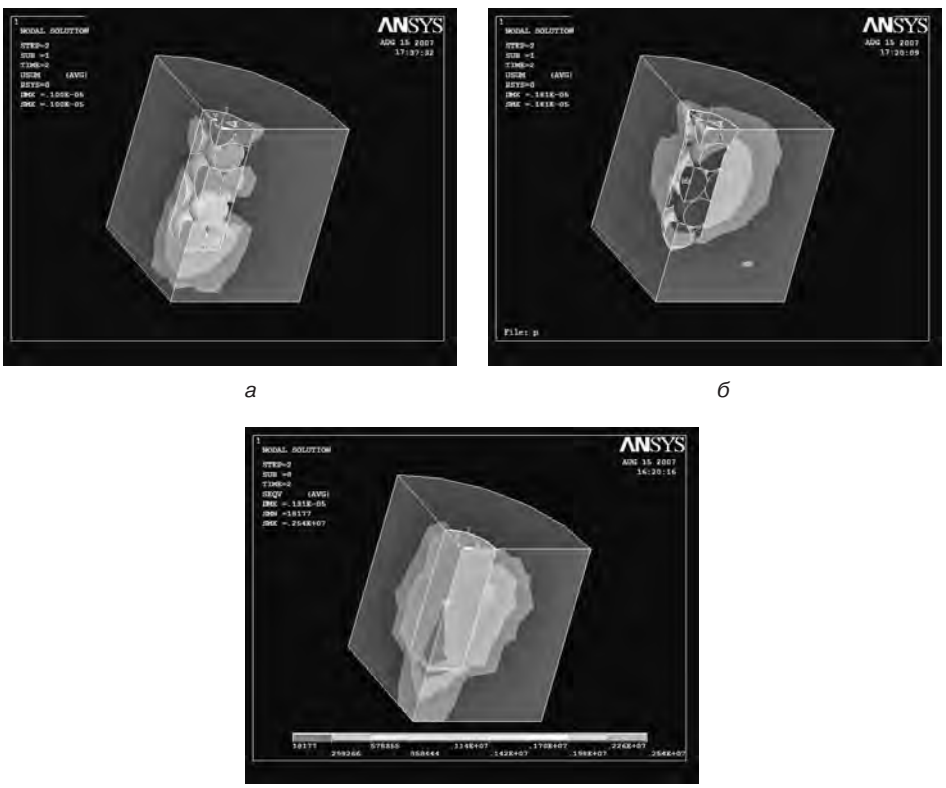
Первоначально для отработки расчетной модели имплантата использовался цилиндр тех же размеров. Для первого этапа расчетов выбирали диаметр формирующих шаров (частиц исходного порошка) 2...4 мм (см. рис. 10.26, *а*) — это позволяло сократить расчетное время. Варьировали величину перекрытия диаметра от 2 до 9%. Для сопоставления рассматривались конструкции из сплавов Ti и NiTi.

На втором этапе структура модели представлялась в виде цилиндрических составляющих (см. рис. 10.25, *б*). Также изменялась величина пористости как процент перекрытия цилиндров в интервале от 2 до 4% от их размеров.

На третьем этапе расчетов изучалось влияние общей формы внедренной в губчатую кость конструкции на напряженно-деформированное состояние в комплексе

«кость — имплантат». В этой ситуации моделировались форма протеза (см. рис. 10.27) и ее пористая структура, внедренная в кость. Также изучалось, как изменяются результаты расчетов в случае приложения к верхней поверхности имплантата не нормальных, а тангенциальных нагрузок, по величине сопоставимых с нормальными.

Если наблюдать в графическом режиме эпюры напряжения, то видно, что напряжение от внешней нагрузки в системе «кость — пористый имплантат» сосредоточивается не только в зоне их контакта, но и в области соединения образующих модель объектов. На рис. 10.29 приведены иллюстрации эпюр для сравнения. Видно, что литой имплантат (рис. 10.29, *в*) обеспечивает нормальные и тангенциальные нагрузки. Цилиндрической формы имплантат (рис. 10.29, *а*) имеет большие нагрузки на поверхность и как следствие — склонность к разрушению поверхности. Пористый штифт сложного контура (рис. 10.29, *б*) передает основную часть нагрузок в окружающее пространство, снимая их со дна зубной лунки. Тем самым снимается часть нагрузки с области «кость — имплантат» и увеличиваются внутренние напряжения протеза, что может привести к быстрому износу конструкции. Однако можно надеяться, что в силу пористости имплантата произойдет прорастание костной ткани внутрь и тем самым увеличится надежность остеоинтеграции. Последнее не учитывалось в данных расчетах, но могло бы стать их продолжением.



а *б*

в

Рис. 10.29. Расчетные диаграммы напряжения — деформации: *а* — для штифта в форме цилиндра; *б* — сложного контура наподобие изображенного на рис. 10.25, *а*; *в* — литого имплантата в костной ткани

Исследования показали, что грубая или пористая поверхность имплантационной конструкции делает контакт между тканью кости и протезом существенно лучшим. Это приводит к более эффективной, более сильной биомеханической связи между внедрением и костью, о чем говорилось ранее. Топография поверхности контакта должна соответствовать структуре кости.

Техника СЛС позволяет подобрать режим формирования протеза с определенной внутренней архитектурой, регулируя при этом величину пористости и шероховатости поверхности. Контроль над этими характеристиками может увеличить проникающую способность соединительных тканей в материал имплантата.

Таким образом, в данном разделе построена расчетная конечно-элементная модель, позволяющая проанализировать влияние пористости, размеров и формы спекаемых при ЛВ порошковых частиц, а также внешней формы имплантата на результаты перераспределения напряжений, деформаций и перемещений в комплексе «кость — имплантат» при внешних жевательных нагрузках. Было выявлено, что с увеличением степени перекрытия частиц напряжение, суммарные смещения и относительные деформации уменьшаются, увеличивая тем самым прочность имплантата. Сравнительными расчетами показано, что максимальные значения всех исследуемых величин для сплава Ti отличны от значений для сплава NiTi, причем наблюдаются большие деформации и перемещения и малое изменение объема.

10.5. Лазерная и электронно-лучевая технологии прямого синтеза титановых ортопедических имплантатов

Ежегодно в мире проводится несколько миллионов восстановительных операций с замещением костной ткани металлическими имплантатами и эндопротезами. Такие операции характерны для челюстно-лицевой и нейрохирургии, травматологии, ортопедии, стоматологии. Главное требование, предъявляемое к любому имплантату, — это надежность — способность выполнять функции замещения костной ткани в течение длительного времени. Надежность в первую очередь обусловлена возможностью остеоинтеграции, то есть прочного врастания имплантата в кость без воспалительных реакций, способствующих отторжению имплантата. Имплантат должен быть изготовлен из биосовместимого материала, обладать достаточной прочностью и иметь большую площадь поверхности, контактирующей с костью. Имплантат должен быть не слишком дорогим для пациента, а значит, конструкция его должна быть технологичной.

Среди металлов, которые используются для имплантации, доля титана и его сплавов, наилучших для имплантологии в смысле биосовместимости и удельной прочности, составляет примерно 50%. Это объясняется низкой технологичностью титана, а следовательно, дороговизной имплантатов, которые изготавливают в основном механической обработкой. Кроме того, довольно сложна финишная обработка контактирующих с костью поверхностей. Практически нет литых имплантатов, хотя литье титановых сплавов широко применяется в аэрокосмической промышленности. Дело в том, что чистый титан обладает низкими литейными свойствами, а его литейные сплавы содержат компоненты (никель, ванадий и т. д.), оказывающие вредное воздействие на окружающие имплантат ткани. Для расширения сферы применения титана в медицине необходимы прочные специальные сплавы, новые конструкции имплантатов и современные технологии их производства.

Разработкой и производством имплантатов и эндопротезов в мире занимаются десятки фирм. В большинстве известных конструкций фиксация имплантата в кости происходит по его наружной поверхности. Для увеличения площади контакта на поверхность наносят элементы макроретенции — насечки и углубления или напыляют специальные покрытия. В стоматологии применяются винтовые имплантаты, поверхности которых обрабатывается так, чтобы получить специальный микрорельеф, увеличивающий площадь контакта. В последние годы появились пористые имплантаты, получаемые литьем из кобальто-хромового сплава или спеканием титановых гранул. Наиболее совершенными (и дорогими) являются эндопротезы с пористой поверхностью, состоящей из слоя пространственных многолучевых звездочек. Фиксация пористого имплантата происходит не только по наружной поверхности, но и за счет прорастания ткани внутрь пор. Однако пористые поверхности упомянутых имплантатов нерегулярны, то есть ячейки имеют разные размеры, встречаются и полностью монолитные зоны. Прорастающая в поры костная ткань не всегда обеспечивается достаточным питанием, что может привести к остеопорозу и другим осложнениям. Все имплантационные системы являются унифицированными, то есть выпускаются имплантаты разных размеров, но одинаковой формы. Это накладывает серьезные ограничения на применение имплантации в сложных случаях.

В челюстно-лицевой и нейрохирургии применяются титановые имплантаты в виде перфорированных пластин, которые подгоняют по месту во время операции. Это увеличивает время операции (нахождения пациента под общим наркозом), приводит к деформации крепежных отверстий, а главное, к возникновению зон концентрации напряжений, снижающих прочность имплантата.

Известны результаты многочисленных работ, в которых раскрываются широкие перспективы использования в качестве биосовместимого материала для медицинских имплантатов интерметаллида никелида титана (NiTi), обладающего даже в пористом состоянии крайне полезным для медицины свойством памяти формы. Использование традиционных методик получения этого материала для нужд медицины имеет существенный недостаток — трудоемкость процесса создания функциональных медицинских имплантатов с заранее заданными индивидуальными формой и размерами.

Идея использования технологии АП и метода ЕВМ в медицине возникла давно. Однако речь идет в основном о синтезе моделей форм для имплантатов или производстве самих имплантатов из таких порошковых материалов, как титан, титановые сплавы (Ti-Al-V) и нержавеющая сталь.

В обзорах называют ряд факторов, которые надо учитывать для успешного использования имплантатов:

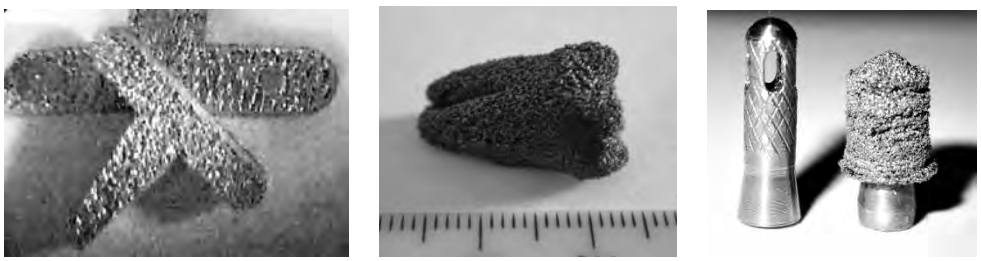
- качество кости у пациентов ухудшается после 60 лет;
- большинство высокопрочных материалов протезов имеют высокие модули упругости по сравнению с костью (то есть возникают поля напряжений в исходной кости);
- микроподвижность на границе между имплантатом и костью ведет к нестабильности этой границы, износу имплантата и порче кости. Другими словами, важную роль играет переходная зона между костью и имплантатом, которая наряду с прочной химической связью должна иметь оптимальную макро-, микро-, а возможно, и наноструктуру.

Во многих исследованиях было продемонстрировано, что межфазная прочность между костью и имплантатом существенно повышается в результате использования

грубой (шероховатой) поверхности в месте контакта. Это обеспечивает надежное прорастание ткани в кость и прочную биомеханическую связь между имплантатом и костью. Топография поверхности присоединения также должна согласовываться с реальной структурой кости. В человеческом теле типы костей различаются по структуре, и обеспечить прочность фиксации, надеясь только на биологическое прорастание, довольно трудно. Следовательно, необходимо искать методы, которые допускают альтернативные типы фиксации на поверхности кости, принимая во внимание индивидуальные структурные особенности организма разных людей. Градиентная структура пористости с добавкой гидроксиапатита по толщине переходной зоны легко может быть реализована методом СЛС/П. Биосовместимость никелида титана и проявление им даже в пористом состоянии эффекта памяти формы позволяет надеяться на существенный прогресс в ортопедии и создании самосрабатывающих, самофиксирующихся, саморазворачивающихся при температуре живого организма протезных элементов.

Защитная среда при процедуре синтеза позволяла избежать окисления частиц нитинола. Между тем справедливости ради следует отметить, что в работах оксид титана считается благоприятной фазой. Предварительное просеивание смешиваемых порошков необходимо для усреднения гранулометрического состава, что улучшает однородность материала изготавливаемого имплантата. При этом важно выбирать размер фракции (дисперсность) обрабатываемого порошка так, чтобы она была соизмерима с диаметром пятна ЛИ или меньше него. Этим достигается одновременное воздействие ЛИ на несколько частиц порошковой смеси, что обеспечивает их надежное сцепление в процессе реакции контролируемого горения. В то же время соотношение размеров каждой фракции в смеси предпочтительно подбирать так, чтобы частицы титана несколько превосходили по размеру частицы никеля.

На рис. 10.30 представлены образцы синтезированных объемных изделий: пластины для челюстно-лицевой хирургии из чистого титана, корневой зуб из никелида титана и послойная 3D-наплавка порошка титана на титановый стоматологический штифт.



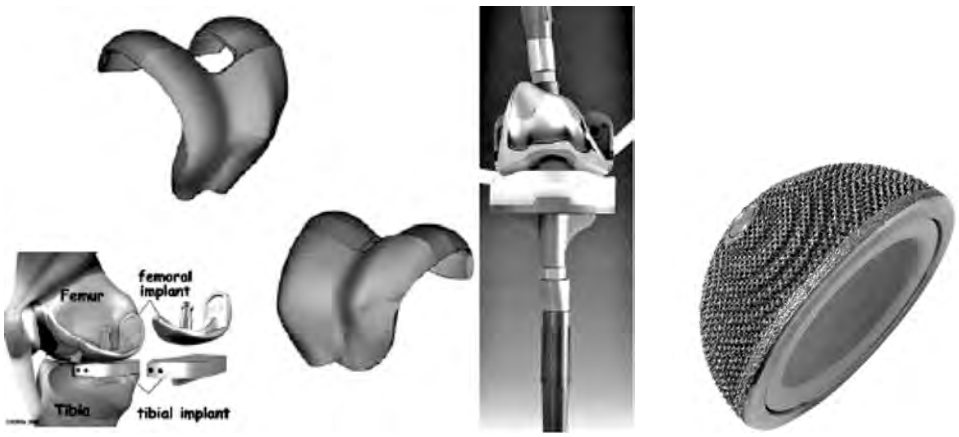
а *б* *в*

Рис. 10.30. Функциональные изделия для стоматологии: *а* — пластины для челюстно-лицевой хирургии из чистого титана; *б* — корневой зуб из никелида титана; *в* — послойная 3D-наплавка порошка титана на титановый стоматологический штифт

Следует отметить, что изменение марок исходных порошковых компонентов смеси отражается на полноте протекания реакции синтеза основного продукта — никелида титана.

Сокращение сроков изготовления протезных деталей за счет ускорения их конструирования, моделирования, подгонки по месту назначения и прочих операций

при использовании метода СЛС/П, безусловно, скажется на себестоимости предлагаемой технологии по сравнению с традиционной в лучшую сторону. Налицо также экономия материальных ресурсов за счет использования более дешевых отечественных порошковых материалов. Новые же свойства и функциональные характеристики биосовместимых протезов из титана или никелида титана с учетом наличия в нем эффекта памяти формы и их влияние на себестоимость протезных работ в тех отраслях медицины, где они найдут применение (стоматология, ортопедия, спортивная медицина), еще предстоит оценить.



а *б*

Рис. 10.31. Примеры имплантатов, созданных методом электронно-лучевого спекания и сплавления из титанового сплава типа ВТ6: *а* — протез коленного сустава; *б* — вертлужная часть тазобедренного сустава с трабекулярной структурой

На рис. 10.31 показаны примеры титановых имплантатов, созданные на установке электронно-лучевого спекания Arcam (см. раздел 5.8.3): протез коленного сустава и вертлужная часть тазобедренного сустава с трабекулярной структурой. Отсутствие примесей (оксиды, нитриды титана) и высокий КПД являются важными достоинствами данной методики.

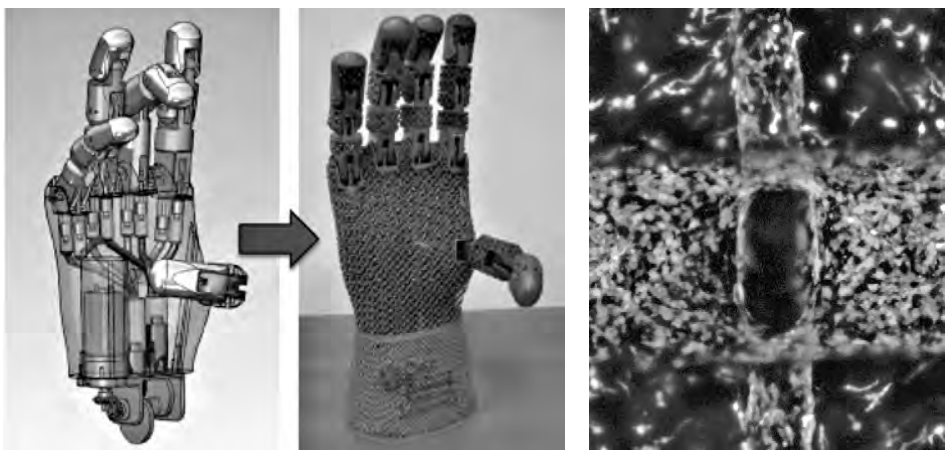
10.6. Лазерная печать клеток

Изучение механизмов регенерации тканей и органов, поиск новых технологий, которые могли бы восстановить утраченную функцию органа или системы, привели к появлению новых направлений, возникших на стыке технологии АП, биотехнологии и медицины, — тканевой инженерии, регенеративной медицины и органогенеза. В их основе лежит принцип трансплантации стволовых клеток на матрицах-носителях.

Матрица-носитель представляет собой синтетический или биологический комплекс с требуемой механической прочностью конструкции, послойно синтезированный методом СЛС/П по заранее спроектированному CAD-файлу для каждого конкретного индивидуума по данным 3D-томографии (рис. 10.32, *а*). Далее происходит внедрение клеточной культуры в матрицу-имплантат. Основными критериями биологически совместимой матрицы для создания тканеинженерной конструк-

ции должны быть отсутствие цитотоксичности, поддержание адгезии, фиксации, пролиферации и дифференцировки помещенных на ее поверхность клеток, отсутствие воспалительной реакции на материал и иммунного ответа, достаточная механическая прочность в соответствии с назначением, биорезорбируемость обычными метаболическими путями.

Известны результаты совместной работы ученых из Университета Пенсильвании и МТИ, в ходе которой биоинженеры занимаются созданием новой печени из собственных клеток пациента (рис. 10.32, *б*). Была создана трехмерная матрица, по которой выращиваются кровеносные сосуды. Она состоит из сахара, растворяющегося после того, как вокруг него нарастет сосудистая архитектура. Получающиеся в результате полые трубки пригодны для того, чтобы по ним вместе с кровью доставлялись питательные вещества и кислород для нового органа. Питание искусственно выращиваемых органов является в настоящее время одной из главных проблем тканевой инженерии. Основным требованием к материалу разрабатываемой матрицы является твердость, чтобы создавать прочные филаменты сети (например, выходящие из 3D-принтера), и одновременно легкая растворимость в воде, как у целлюлозы, чтобы они не могли причинить вред клеткам.



а *б*

Рис. 10.32. Примеры каркасного моделирования матрицы-носителя: *а* — CAD-модель и сеточный каркас руки; *б* — «скелет» будущей печени из сахарных трубок и гель из живых клеток печени (© Jordan S. Miller)

Внесением клеток стенок кровеносных сосудов человека в полости сахарной сетчатой матрицы было показано спонтанное прорастание капилляров, что повысило проникающую способность создаваемой сети. Капилляры прорастали так, как это обычно происходит естественным путем в организме. При продолжении тестирования возможностей искусственной кровеносной сети были созданы гели, содержащие печеночные клетки. Когда в эти гели по полым сосудам, выращенным на сахарной матрице, поступала питательная жидкость, клетки печени производили больше альбумина и мочевины, что свидетельствовало об их нормальной функции. При этом увеличивалась клеточная плотность в гелях, а это является важным фактором для выращивания органов вне организма.

Взрослая ткань зуба практически не способна к самостоятельной регенерации, и дефект эмали в результате действия повреждающих факторов постепенно приводит к потере зуба. Без сомнения, современные технологии протезирования позволяют произвести реконструкцию даже при полном отсутствии зубов. Однако прогресс современной органотипической регенеративной медицины подвигает исследователей к поиску технологий замещения зубов естественными трансплантатами.

В настоящее время технологии создания артифициального зуба методами тканевой инженерии (см. рис. 10.30, *б*) развиваются несколькими путями. Один из них называется дентогенезом. Клеточная масса, состоящая из энамелобластов, одонтобластов и низкодифференцированых эпителиальных и стромальных мезенхимальных клеток, суспензируется и совместно культивируется. В качестве матрицы используют биодеградируемые полимеры на основе органических кислот (PGA, PGLA), которым придают трехмерную форму зуба. Культура клеток наносится на матрицу, и препарат пересаживается в зубную альвеолу, где под воздействием факторов клеточного и тканевого микроокружения происходит дентогенез.

Далее будут представлены полученные нами результаты послойного синтеза методом СЛС имплантатов из титана или нитинола титана для создания тканеспецифических конструкций (матриц), а также морфологический анализ развития в них колоний стволовых клеток. Исследования на биосовместимость и биоинтерграцию стволовых клеток проводились в государственном учреждении здравоохранения Самарской области (ГБУ СО) «Клинический центр клеточных технологий» (канд. мед. наук О. В. Тюмина и канд. мед. наук С. Е. Волчков).

В современной хирургии, травматологии, челюстно-лицевой хирургии и стоматологии большое значение имеет использование имплантатов при различных патологиях. Качество и биологическая совместимость таких имплантатов будут влиять на успешность их применения. В настоящий момент большинство производителей имплантатов тестируют свои материалы в экспериментах на животных, однако переносить результаты таких исследований в полном объеме на человека некорректно. Стоит также заметить, что использование животных в качестве испытуемых при наличии альтернативных методик неэтично. Тестирование имплантатов на клеточных культурах имеет распространение как первый этап биологического тестирования биосовместимости и токсичности имплантатов.

Одним из вариантов клеточной культуры для тестирования имплантатов являются мультипотентные мезенхимальные стромальные клетки (ММСК). ММСК можно обнаружить в составе практически любой соединительной ткани. Активное участие этих клеток в процессах регенерации доказана работами различных авторов. Использование ММСК позволяет на клеточном уровне показать влияние имплантата на клетки соединительной ткани. Появляется возможность изучать такие биологические явления, сопровождающие установку имплантатов, как индукция дифференцировки, стимуляция или угнетение пролиферации, способность к миграции, а также мутагенный и токсический эффекты. При отсутствии токсических эффектов воздействия имплантата можно оценить его адгезивные качества. Также возможно исследование скорости и глубины прорастания клеток в имплантат, что позволяет оценить степень интеграции материала. Важно, что результаты исследования материалов на культуре ММСК позволяют получать данные о биологических свойствах имплантатов в организме еще до исследования на животных, тем самым дорабатывая и изменяя материал для получения необходимых свойств.

Инженерия тканей и пористых биомембран является в настоящее время широко развиваемым направлением регенеративной медицины, которое включает культивирование клеток *in vitro*, формирование и восстановление поврежденных или утраченных тканей, системы контроля и тестирования, исследования биологии клетки, а также синтез новых фармацевтических продуктов. В рамках данной концепции наиболее интересной является стимуляция синтеза тканей или органов *in vivo* путем клеточной имплантации на внеклеточном матриксе.

По сравнению с обычным выращиванием клеток *in vitro*, тканево-клеточным конструкциям можно задать строго индивидуальную для каждого пациента форму, которая не только выполняет функцию поддержки, но и определяет направление развития клеток во внеклеточном матриксе, а структура и состав матрикса способствуют их искусственной дифференциации и образованию ткани. Такой революционный инженерный подход к синтезу тканей *in vivo* соответствует их естественному развитию *in situ*.

Насущной потребностью в репаративной хирургии является стремление к замене литых имплантационных материалов пористыми трехмерными каркасами (матриксами, в англ. терминологии *scaffolds*) для восстановления дефектов тканей. Известно также, что топография пористой поверхности в сравнении с гладкой влияет на морфологические особенности поведения клеток, а на пролиферацию клеток синергетическое влияние оказывают топографии микронного и субмикронного масштабов. В качестве материала матриксов могут быть использованы различные вещества. Изначально предпочтение отдавалось биологически инертным, то есть нетоксичным и некоррозирующим, а потому устойчивым к биохимическим воздействиям организма материалам (титан, коррозионно-стойкая сталь, циркониевая керамика, гидроксиапатит и др.), однако в последнее время появились работы, предлагающие использовать нитерметаллидную фазу NiTi. Интерес к этому материалу связан с тем, что в нем возможна реализация эффекта памяти формы. Контролирование дизайна внутренней структуры поровых каналов еще на стадии компьютерного моделирования позволяет интенсифицировать прорастание соединительных тканей в пористый матрикс, увеличить площадь соприкосновения между имплантатом и костью, а следовательно, механическую прочность соединения. Пористые каналы могут быть насыщены лекарственными препаратами для активации вживления и предотвращения некроза клеток. Поэтому наряду с исследованиями клеточной морфологии методами динамической оптической и сканирующей электронной микроскопии изучались клеточная адгезия, пролиферация, дифференциация вблизи пористых 3D-тканево-клеточных матриксов из нитинола (рис. 10.33).

Порошки нитинола (NiTi-фаза составляла свыше 99,7% от общей массы) марки Р55Н45 для данного исследования приобретали в фирме «Полема» (Тула, РФ). Перед лазерным спеканием порошки в течение 2 ч просушивали в вакуумном шкафу при 300 °С. Исходная дисперсность всех порошков составляла ~100 мкм, чтобы быть соизмеримой с диаметром пятна ЛИ. Этот параметр контролировался ситовым анализом. В результате лазерного спекания для биологических испытаний формировались трехмерные плоские пористые образцы матрикса размером $\sim 10 \times 10 \times d$ [мм], где d — толщина монослоя (~0,5...1 мм в зависимости от режима лазерного спекания (рис. 10.34, *б* и *в*)). В соответствии с разработанной ранее методологией внешний вид пористых матриксов из нитинола моделировался средствами CAD-CAE, и осуществлялся процесс послойного лазерного синтеза. Схема проведения медицинских экспериментов показана на рис. 10.34, *а*, а внешний вид пористых 3D-матриксов для клеточных культур — на рис. 10.34, *б*.

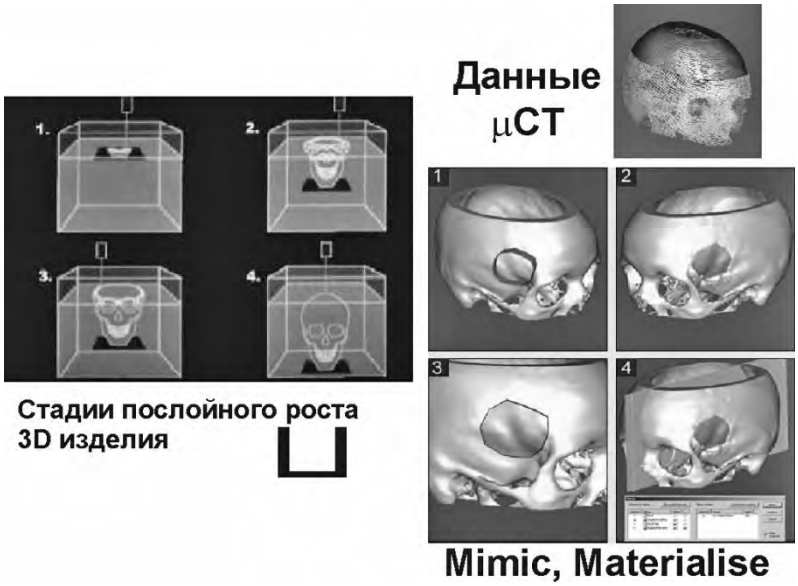
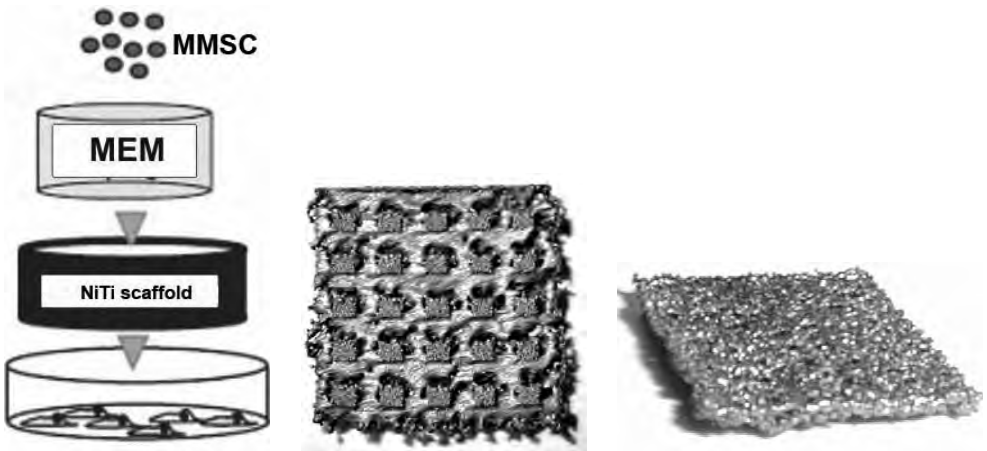


Рис. 10.33. Схема СЛС/П по данным 3D-томографии



а *б* *в*

Рис. 10.34. Медицинский эксперимент: *а* — схема; пористые 3D-матриксы: *б* — с регулярной пористостью; *в* — со случайной пористостью

Исследуемые материалы отмывали стерильным фосфатно-солевым буфером (PBS), затем в течение 20 мин стерилизовали в автоклаве при 121 °С и давлении 120 кПа. В исследование были включены две группы:

- контроль, только ММСК;
- NiTi + ММСК (было взято 10 имплантатов для получение статистики наподобие приведенной на рис. 10.34, *в*).

ММСК получали из вартонова студня пуповины новорожденных детей после подписания информированного согласия матери ребенка. Клетки выделяли методом эксплантов. Культивирование в исследуемых и контрольной группах продолжалось в течение 26 суток в стандартных условиях: 37 °C, 5% CO_2 в инкубаторе MCO-20AIC (Sanyo, Япония). Питательную среду aMEM (Sigma) с добавками 10% FBS (Gibco), 2 мМ l-alanyl-gluthamine (Invitrogen) меняли каждые 5 дней или по мере изменения индикатора среды. Для определения принадлежности полученных клеток к группе ММСК выполняли исследования согласно рекомендациям международного сообщества клеточной терапии. Иммунофенотипирование проводили по следующим антигенам: CD90, 44, 106, 45, HLA-ABC, HLA-DR, 73, 34, 144, 105, 117, 62L, 133, 14 на проточном цитофлюориметре FACS Canto (Becton Dickinson, США). Индукция дифференцировки в остеогенном, хондрогенном и адипогенном направлениях проводилась коммерческими средами NH Osteodiff, NH Chondrodiff, NH Adipodiff (Miltenyi Biotec, Германия) по инструкции производителя. Оценка дифференцировочного потенциала проводилась по изменению морфологии клеток и была показана путем оценки реакции на специфические красители: OilRed O (Sigma, США) для оценки адипогенеза, реакция на щелочную фосфатазу FAST BCIP/NBT (Sigma, США) для оценки остеогенеза, антитела против аггрекана (Abcam, Англия) для оценки хондрогенной дифференцировки. Оценка пролиферативной активности проводилась на клеточном анализаторе концентрации и жизнеспособности ViCell XR (Beckman Coulter, США). Скорость пролиферации определяли по формуле: $x = [\log 10(NH1) - \log 10(NH)]/\log 10(2)$, где NH — количество клеток при посеве культуры, NH1 — количество наращенных клеток.

Для оценки токсичности материала изучали морфологию и морфометрию клеток, выполняли подсчет скорости удвоения, а также оценивали способность клеток к миграции с использованием Time lapse-эксперимента на микроскопе AxioObserver A1 (Carl Zeiss, Германия) с системой инкубации. Этот эксперимент включал в себя культивирование культуры клеток в течение 4 ч, скорость съемки видео — 10 кадров в минуту. Оценка видео, расчет дистанций движения клеток и морфологии проводились на программном обеспечении Image-Pro PLUS (Media Cybernetics, США) и AxioVision (Carl Zeiss, Германия). Кластерный анализ культуры — выделение движущихся объектов (клеток), расчеты траекторий и дистанций перемещения — проводился на программном комплексе ImageJ и Image Pro Plus, деление клеток на группы оценивалось в программе по плотности пикселов на объект.

На рис. 10.35, *а*, *б* показано начало эксперимента. В контрольном образце (рис. 10.35, *а*) стволовые клетки начали активно размножаться, у края NiTi-матрикса (рис. 10.35, *б*) масштаб явления более скромен.

На второй день в контрольной группе уже 90% клеток полностью адгезировались к чашкам Петри. Большинство клеток имели типичную фибробластоподобную (веретенообразную) форму, четко визуализированное ядро с двумя или четырьмя ядрышками (рис. 10.35, *в*). Вблизи NiTi (рис. 10.35, *г*) увеличение их популяции было не таким значительным.

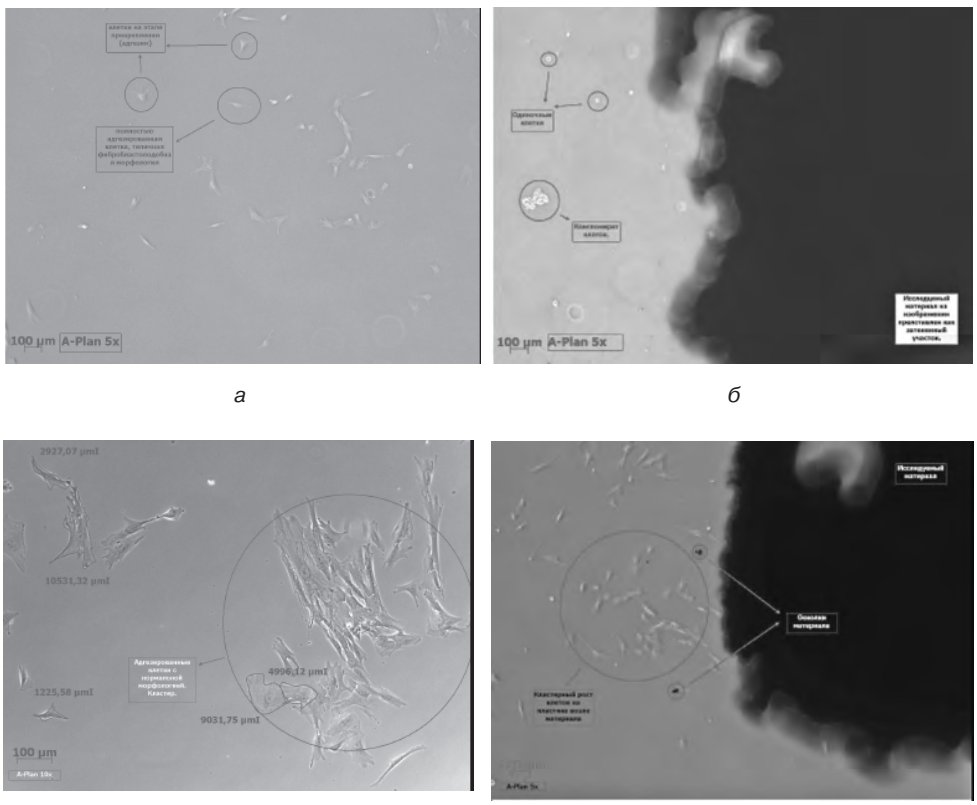
Спустя неделю экспериментов в контрольной группе (рис. 10.36, *а*) в процессе культивирования происходило плавное нарастание клеточной массы. А за 10 дней культивирования плотность культуры увеличилась с 35 до 100%.

В NiTi-группе (рис. 10.36, *б*) в течение 10 дней плотность культуры увеличивалась значительно медленнее по сравнению с контрольной группой и неравномерно

среди экспериментов данной группы (от 60 до 95%). На десятый день максимальной плотности достигли группы 1 (95%), 3 (85%) и 4 (60%). Вдобавок в непосредственной близости от материала наблюдались небольшие колонии с морфологической картиной «старых» клеток. Первые признаки клеток на материале (рис. 10.36, *в*) были обнаружены лишь на 13-е сутки.

Более четко рассмотреть эти колонии можно на рис. 10.37, который был сделан по окончании клеточных экспериментов. Ясно видны тонкие пленки ММСК на пористой структуре 3D-NiTi-матрикса.

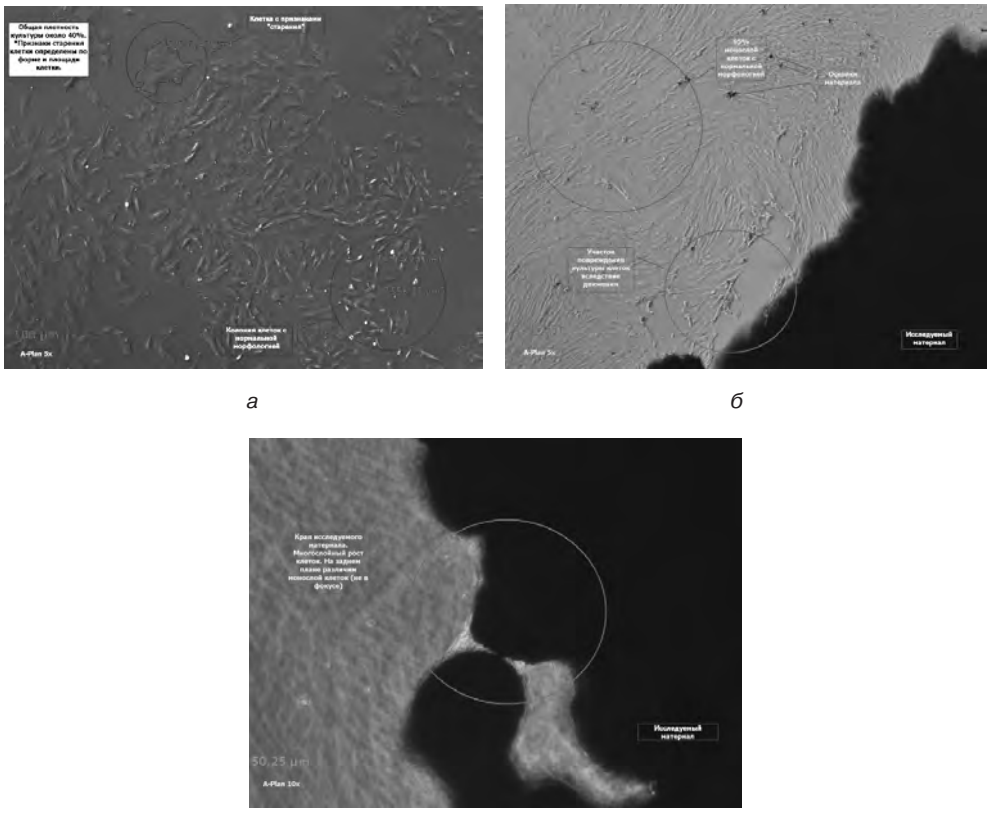
Таким образом, в контрольной группе образование клеточного монослоя произошло за 16 суток, скорость пролиферации составила 0,03 удвоения/ч, или 0,694 удвоения/сут, а общее количество удвоений за период культивирования составило 11,11 (рис. 10.38). Морфология клеток оставалась нормальной на протяжении всего культивирования. Естественное появление «стареющих» клеток в культуре составило не более 20% от всей популяции. Процессы старения характеризовались увеличением объема ядра, цитоплазмы и площади клетки, а также изменением ее формы на кубическую, что свидетельствует о старении клетки, начале клеточного ареста и гибели (см. вверху на рис. 10.36, *а*).



а *б*

в *г*

Рис. 10.35. Эксперимент: *а*, *б* — начало; *в*, *г* — второй день (*а*, *в* — контрольная группа; *б*, *г* — край NiTi-матрикса)



а *б*

в

Рис. 10.36. Эксперимент: *а*, *б* — неделя после начала (*а* — контрольная группа; *б* — край NiTi-матрикса); *в* — колония клеток возле NiTi-матрикса на 13-е сутки

В группе NiTi скорость пролиферации составила 0,02 удвоения/ч, или 0,532 удвоения/сут., а общее количество удвоений за период культивирования составило 10,63 (см. рис. 10.38). В результате исследования в серии «Нитинол» был выявлен незначительный эффект угнетения пролиферативной активности клеточной культуры, что связано, возможно, с повышенной пористостью материала.

В зависимости от интенсивности роста клеточной популяции по морфологическим признакам был проведен анализ и сделана выборка клеток на разных этапах созревания (рис. 10.39), характеризующая процесс старения. На рисунке справа налево и снизу вверх идут клетки, отсортированные по возрасту, начиная с самой молодой.

Морфологическая обработка снимков проводилась в каждой группе и серии экспериментов на 3-и, 15-е (см. рис. 10.39) и 25-е сутки культивирования. В результате обработки мы выделили три группы клеток (рис. 10.39 и 10.40).

- Первая группа клеток (на изображениях красным) — незрелые молодые активно делящиеся клетки, внешний вид — веретенообразный, площадь не более 5000 мкм^2. Активно участвуют в делении и миграции.

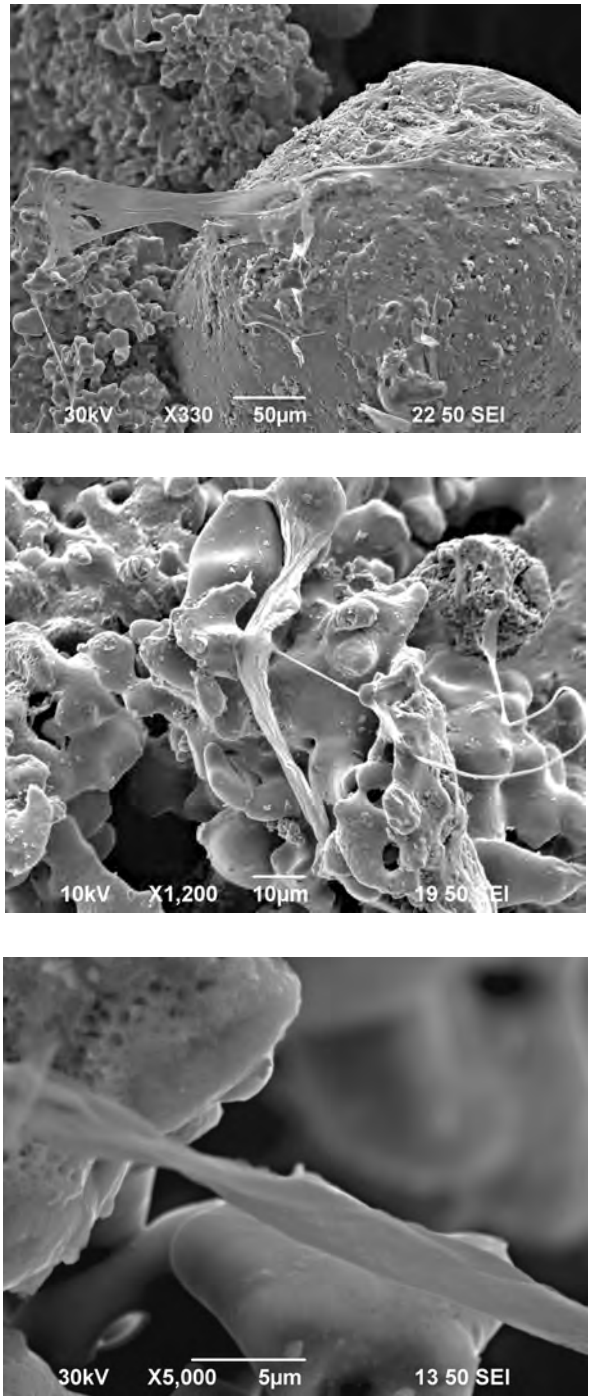


Рис. 10.37. Сканирующая электронная микроскопия NiTi-пористых матриксов

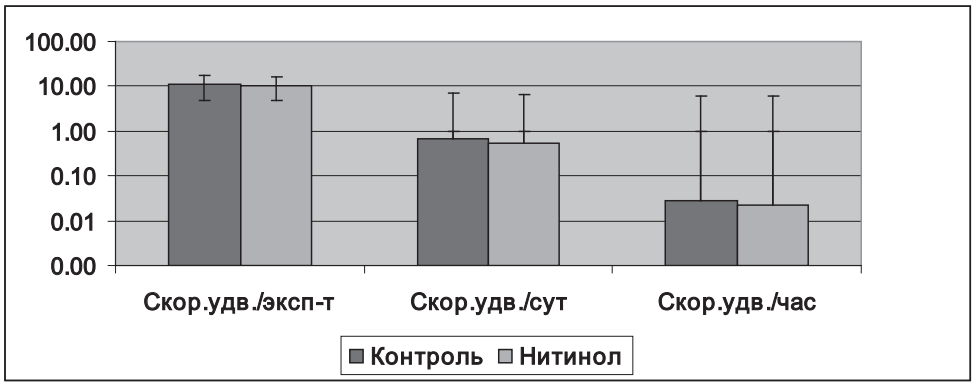
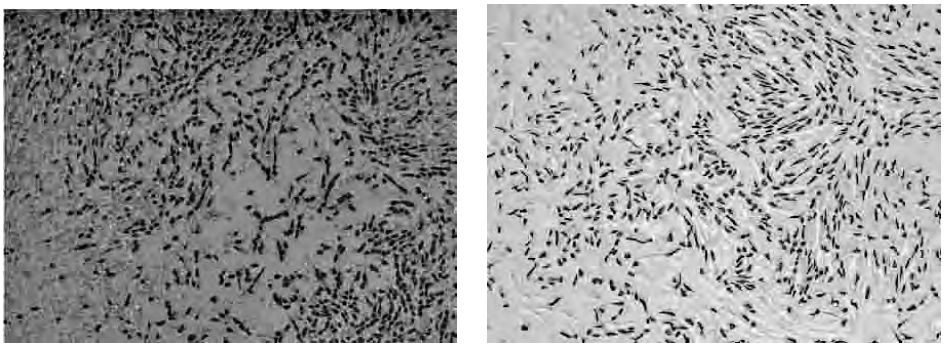


Рис. 10.38. Логарифмическая скорость пролиферативной активности. Вертикальными линиями обозначено расчетное среднее квадратическое отклонение от среднего

Рис. 10.39. Число и внешний вид (форма) колоний из ММСК

- Вторая группа (на изображениях синим) — взрослые клетки, могут иметь треугольную или неправильную форму, площадь клеток свыше 5000, но не более 16 000 мкм^2. Также участвуют в пролиферации и миграции, но значительно медленнее.
- Третья группа (на изображениях желто-зеленым) — гигантские клетки. Имеют неправильную форму, заостренные края, очень большую площадь поверхности — 16 000...40 000 мкм^2, в редких случаях выше. Не участвуют в процессах деления, практически не мигрируют.

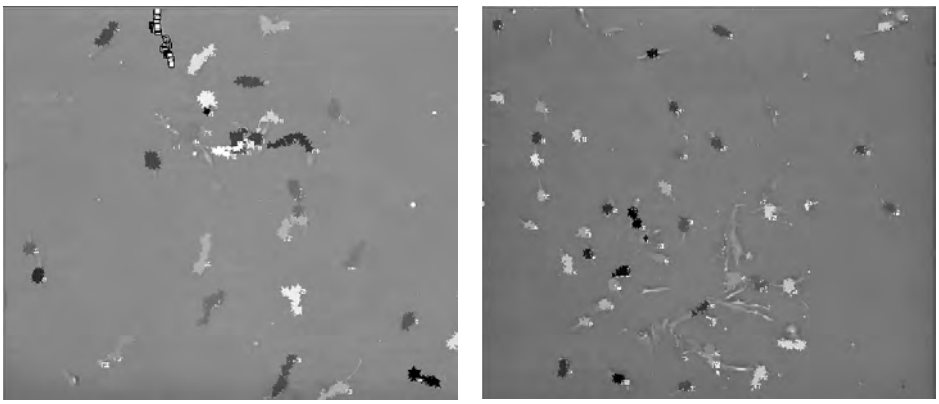


а *б*

Рис. 10.40. Кластерный анализ клеточной популяции: *а* — контрольная группа; *б* — вблизи NiTi-матрикса

На рис. 10.40 видно, что если в контрольной группе преобладают молодые активно размножающиеся клетки, то вблизи 3D-матрикса большое количество старых — гигантских малоподвижных клеток. Поэтому скорость пролиферации при наличии матрикса значительно ниже, чем в контрольной группе.

Оценка способности к миграции (механотаксис) проводилась методом сравнения траекторий движения клеток между сериями «Контроль» и «Нитинол» (рис. 10.41 и табл. 10.1). В контрольной группе за время наблюдения клетки преодолевали дистанцию в среднем ~350 мкм, а клетки из серии NiTi в схожих условиях прошли в среднем ~42 мкм.



а *б*

Рис. 10.41. Траектория движения и расчет дистанции прохождения клеток (длительность 4 ч, увеличение 50×): *а* — контрольная группа; *б* — вблизи матрикса

Таблица 10.1. Миграционная способность клеток

Группа	Клеток на анализ	Дистанция, мкм	Минимум, мкм	Максимум, мкм	Стандартное отклонение, мкм
Контроль	34	350,4238	78,706890	768,655900	187,010400
NiTi	56	42,494089	8,173793	153,891548	29,881101

В результате эксперимента по исследованию способности клеток к миграции было выявлено следующее: в контрольной группе за 4 часа наблюдения клетки преодолевали дистанцию в среднем 350,42 мкм (минимум 78,70 мкм, максимум 768,65 мкм, стандартное отклонение 187,01 мкм). Клетки из серии «Нитинол» в схожих условиях прошли в среднем 42,49 мкм (минимум 8,17 мкм, максимум 153,89 мкм, стандартное отклонение 29,88 мкм).

В ходе эксперимента была проведена также оценка экспрессии поверхностных антигенов, характерных для ММСК в контрольной группе и всех сериях с материалами. Исследуемые клетки экспрессировали следующие антигены: CD 90, 44, HLA-ABC, 73, 105, что является характерным признаком стромальных клеток. Наблюдалось отсутствие экспрессии следующих антигенов: CD 45, 106, 34, 144, 62L, HLA-DR, 133, 14, что также подтверждает принадлежность к стромальным клеткам. Была выявлена слабая положительная экспрессия маркера CD 117 (c-kit), являющегося рецептором для SCF-фактора роста стволовых клеток. Позитивная экс-

прессия этого фактора позволяет предположить незрелость исследуемых клеток. В целом иммунофенотипическое исследование показало стабильную принадлежность исследуемых клеток к группе ММСК, отсутствие гемопоэтической трансформации и изменений линейного происхождения.

Таким образом, было обнаружено, что для прорастания стволовых клеток в поры важна не просто пористость матрикса, но то, что размеры этих пор должны быть соизмеримы с размерами стволовых клеток (сравните рис. 10.35, *г* и 10.36, *б*). Клетки выстраиваются перпендикулярно матриксу, и плотность их наиболее высока лишь у отдельных пор, что отмечалось ранее. Возможно, чрезмерная субмикронная пористость так же вредна, как и ее полное отсутствие для стволовых клеток, имеющих характерные размеры 50...100 мкм. По данным морфометрирования, подтвержденным впоследствии сканирующей электронной микроскопией (СЭМ), уже на 10-е сутки экспериментов в порах NiTi фиксируются первые колонии ММСК. При этом скорость удвоения клеток за сутки составила 0,694 в контрольной группе и 0,532 в группе NiTi.

Другим принципиальным результатом является следующий экспериментальный факт, который еще требуется объяснить. Если в контрольной группе (то есть без матрикса) процент молодых, малых по площади, но активно размножающихся ММСК очень высок (более 50...60), то после внесения внешнего раздражителя (матрикса) стволовые клетки вырастают до огромных размеров, то есть быстро стареют, а активность их деления резко падает.

10.7. СЛС биополимеров и пористых керамополимерных матриксов

В последнее время перспективным является создание имплантатов и тканево-клеточных конструкций из биосовместимых полимеров. Более того, известны биополимеры, которые с течением времени рассасываются, например, плазмой крови или замещаются родной костной тканью. Такой характер имплантации считается сейчас наиболее интересным.

На рис. 10.42 показан пример 3D-моделирования и послойного синтеза пористой структуры из гидроксиапатит керамики, структура которой очень близка к структуре кости. Методом 3D-печати был создан керамический полуфабрикат (green part), который затем при температуре 1250 °С отжигался в печи для удаления связующего. Была показан возможность создания scaffolds — тканевых конструкций с размерами пор 450 мкм и толщиной стенок 330 мкм (рис. 10.43).

Рис. 10.42. СЛС полимера для носовых перегородок

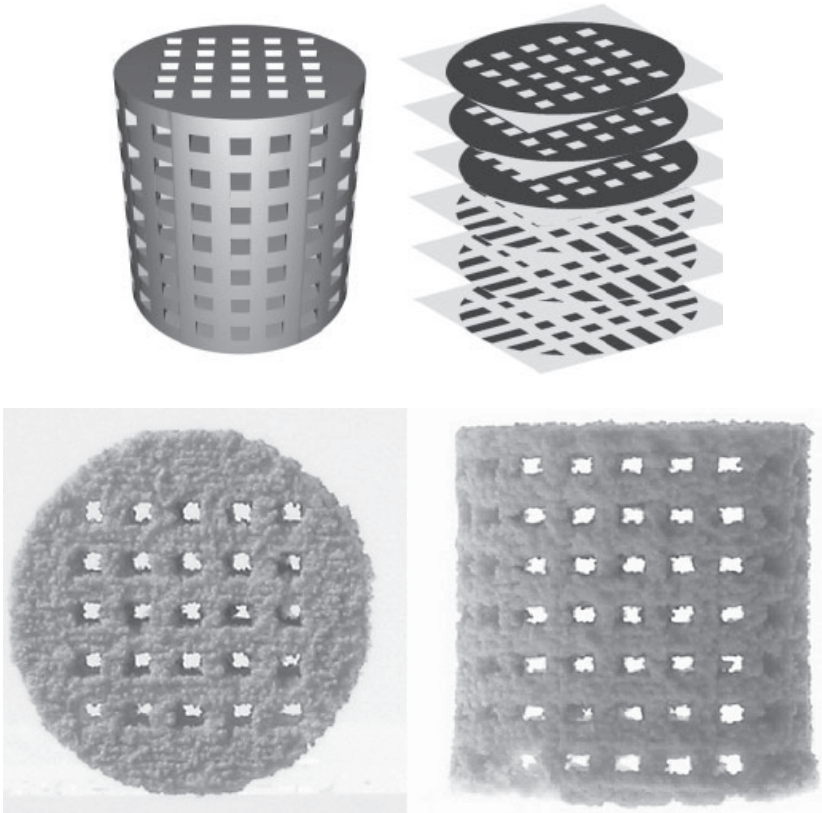


Рис. 10.43. Моделирование и 3D-печать scaffold из гидроксиапатита

В последнее время биосовместимые и особенно биорезорбируемые полимеры привлекают повышенное внимание в качестве основы для создания как заменителей костной ткани, так и систем дозирования лекарственных (СДЛ) препаратов. Основным преимуществом резорбируемых полимерных материалов является их способность постепенно растворяться в физиологических жидкостях организма по мере формирования новой ткани и/или высвобождения содержащихся внутри полимерной матрицы лекарственных препаратов. Наибольший интерес вызывают термопластические алифатические полиэфиры: полилактид (PLA), полигликолид (PGA), а также сополимеры лактида (L,D-3,6-диизопропил-1,4-диоксан-2,5-дион) и гликолида (1,4-диоксан-2,5-дион) (PLGA) с различным соотношением мономеров. Это связано с тем, что данные материалы являются полностью биосовместимыми, не вызывают воспалений, а продукты их разложения выводятся из организма в процессе регулярного обмена веществ. Кроме того, они обладают сравнительно высокими механическими характеристиками и довольно легко обрабатываются. Так, известны примеры использования полилактида и его сополимеров в качестве имплантатов, а композиционного материала, состоящего из полилактида, фосфата и карбоната кальция (составляющие гидроксиапатита (ГАП)), — для восстановления костной ткани черепа. Пористый сополимер полилактида с полигликолидом использовался для регенерации костной ткани, сополимер полилактида с поли-

гликолидом, импрегнированный фактором роста и клетками сосудистого эндотелия, — для регенерации сосудов, а пористый поликарбонат — для восстановления тканей эпителия.

Объектами исследований были термостабилизированный поликарбонат (ПК) марки ЛЭТ-7.0 (Дзержинск, РФ), полиэфиреэфиркетон (ПЕЕК) производства Victrex Co. (Великобритания) и поликапролактон (PCL) производства Polymorph Co. (Великобритания). Размер частиц порошка полимерной фракции 50 мкм, что сравнимо с диаметром пятна ЛИ. Это гарантировало высокую плотность упаковки частиц в исходной керамополимерной композиции и как результат качественное ее спекание. Для упрочнения полимерной матрицы мы использовали наполнители в виде порошков оксидных керамик (TiO_2 ~20 (фаза Rutile, марка YZ5B), Al_2O_3 ~30...80 (фирма Metco Co.), ZrO_2 ~30...40 (фирма Baikowsky Co.), ГАП ~25...40 мкм (фирма Medicoat Co.). Кроме чистых полимеров для спекания были приготовлены керамополимерные композиции в следующих пропорциях по весу (первая в пропорции — оксидная керамика): 1:1, 1:2, 1:3, 2:3, 1:4, 1:10.

В результате лазерного спекания (оборудование и оптимальные режимы послойного СЛС описаны ранее) для биологических испытаний формировались как плоские пористые образцы матриксов размером ~$10 \times 10 \times d$ [мм], где d — толщина монослоя (~0,5...1 мм в зависимости от режима лазерного спекания) (рис. 10.44, *а*, *б*), так и объемные изделия (рис. 10.44, *в*, *г*). В соответствии с разработанной ранее методологией внешний вид пористых матриксов моделировался средствами CAD-CAE до процесса послойного лазерного синтеза.

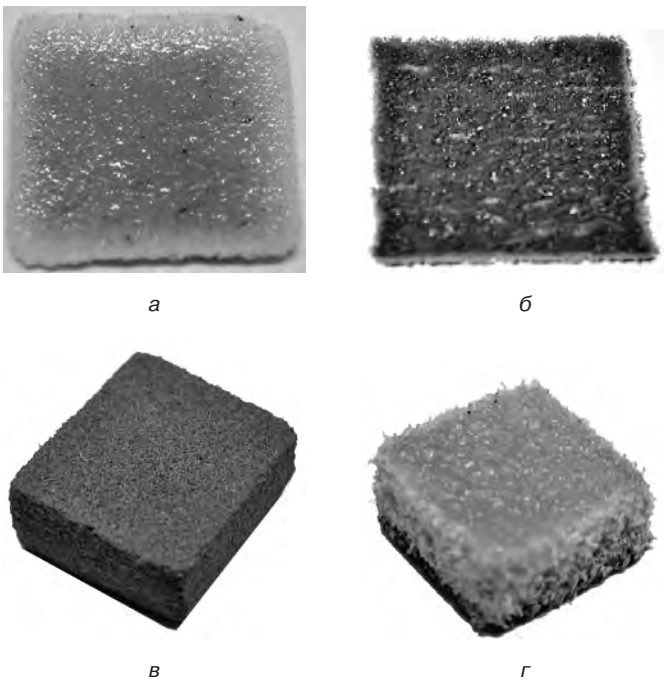


Рис. 10.44. Примеры пористых 3D-матриксов: *а*, *б* — монослои (CO_2-лазер); *в*, *г* — объемные изделия (Nd^{+3}:YAG-лазер); *а* — чистый ПЕЕК, лазерное спекание с подпрессовкой; *б* — (Al_2O_3 + ZrO_2 + ГАП) + ПЕЕК = 1:2; *в* — TiO_2 + ПЕЕК = 2:3; *г* — PCL + TiO_2 (1:1)

В табл. 10.2 представлены все 11 групп, участвовавших в исследовании (для статистики были взяты по пять серий имплантатов каждого вида). В качестве контроля (группа 1) использовалась чистая ростовая среда, а сравнение проводилось с СЛС-имплантатом из чистого титана (группа 11), изученным нами ранее. Материалы отмывали в стерильном фосфатно-солевом буфере (PBS) путем многократного погружения и активного помешивания материала в растворе. Отмытый материал в течение 20 минут стерилизовали в паровом стерилизаторе Steridenf при температуре 121 °С и давлении 120 кПа. Выбирались ММСК третьего пассажа. Клетки были получены из костного мозга взрослого человека (донора) после подписания информированного согласия на получение биологического материала. Исследования на пролиферативную активность и биоинтеграцию ММСК проводились в ГБУ СО «Клинический центр клеточных технологий» (канд. мед. наук О. В. Тюмина и канд. мед. наук С. Е. Волчков). Выделение клеток осуществляли на градиенте плотности Фиколл 1,033. Посев клеток выполняли во всех исследуемых группах в концентрации $37{,}5 \times 10^4$ клеток на 1 см^2 культурального пластика. За 20 минут до посева клеток в рабочих группах 2–10 в культуральную среду вносили стерильные исследуемые материалы для эквилибрации температуры и газовой среды.

Таблица 10.2. Наименование групп и режимы лазерного синтеза

№ п/п	Группа и режим лазерного синтеза
1	Контроль, только ММСК
2	Чистый ПЕЕК (спекание с подпрессовкой на CO_2-лазере)
3	Чистый ПК (спекание на CO_2-лазере)
4	Чистый ПЕЕК (спекание на CO_2-лазере)
5	Смесь Ti + ПЕЕК = 1:2 (спекание на CO_2-лазере на воздухе)
6	Смесь ПЕЕК + (Al_2O_3 + ZrO_2) = 2:1 (спекание на CO_2-лазере)
7	Смесь ПЕЕК + (Al_2O_3 + ZrO_2 + ГАП) = 2:1 (спекание на CO_2-лазере)
8	Смесь ПЕЕК + (Al_2O_3 + ZrO_2 + ГАП) = 3:1 (спекание на CO_2-лазере)
9	Смесь Ti/TiO_2 + ПЕЕК = 1:1 (спекание на Nd^{+3}:YAG-лазере в аргоне)
10	Смесь Ti/TiO_2 + PCL = 1:1 (спекание на Nd^{+3}:YAG-лазере в аргоне)
11	Чистый Ti (спекание на Nd^{+3}:YAG-лазере в аргоне)

Культивирование проводили в течение 17 суток с использованием стандартных питательных сред: aMEM (Sigma), 2mM аланил-глютамина (Invitrogen) и 10% отборной телячьей сыворотки (Gibco). Питательная среда менялась каждые четверо суток или по изменению индикаторов pH среды.

Морфологию и морфометрию проводили ежедневно в каждой группе и серии экспериментов. Оценку площади клеток выполняли на аппаратно-программном комплексе Axio Observer A1 фирмы Carl Zeiss, используя программное обеспечение Axio Vision. Кластерный анализ культуры осуществляли на программном комплексе Image J и Image Pro Plus, клетки делили на группы исходя из плотности пикселов на объект.

Иммунофенотипирование проводили на проточном цитофлюориметре FACSCanto фирмы Becton Dickinson непосредственно перед посевом и после снятия клеток на 17-й день культивирования. Исследовали следующие антигены: CD 44, 73, 90, 105, 14, 34, 45, HLA-DR.

Подсчет клеток и вычисление пролиферативной активности осуществляли в 1-й, 3-й и 4-й сериях всех групп экспериментов на аппаратном комплексе Vi-Cell XR фирмы Becman Coulter перед посевом и по окончании культивирования. Расчет пролиферативной активности проводился по формуле

$$X = [\log 10(NH1) - \log 10(NH)]/\log 10(2),$$

где NH — количество клеток при посеве культуры; NH1 — количество наращенных клеток. На основании этой формулы были получены данные о количестве удвоений культуры за период культивирования. Скорость удвоения культуры [удвоений/ч] в течение рассчитанного количества удвоений рассчитывалась по формуле

$$X = Dt/Ct,$$

где Ct — продолжительность культивирования, ч; Dt — количество удвоений культуры. Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием *t*-критерия Стьюдента, значения $p < 0{,}05$ считались значимыми.

Иммунофенотип клеток был показан на стромальных маркерах (CD73, 44, 90, 105 оказались позитивны) и гемопоэтических маркерах (CD14, 34, 45, HLA-DR, 106 оказались негативны). Дифференцировочный потенциал ММСК изучался путем:

- адипогенной дифференцировки — и был доказан позитивной окраской на масло красное;
- остеогенной дифференцировки — доказан позитивной окраской на щелочную фосфатазу;
- хондрогенной дифференцировки — доказан позитивным окрашиванием на аггрекан.

На рис. 10.45 и 10.46 представлена статистическая обработка данных за первые два дня эксперимента.

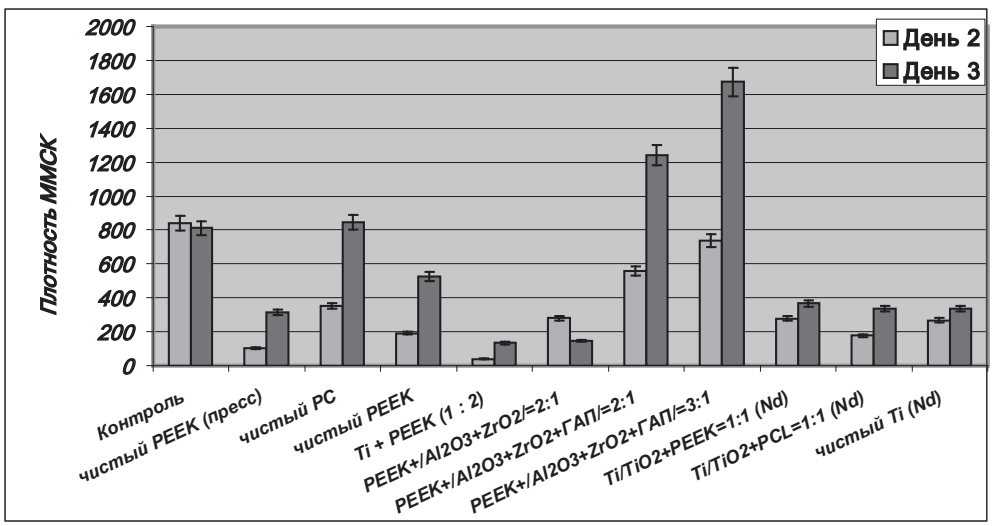


Рис. 10.45. Плотность монослоя вблизи пористых матриксов в сравнении с контрольной группой и образцом из чистого титана (здесь и далее вертикальными линиями отмечена значимость $p < 0{,}05$)

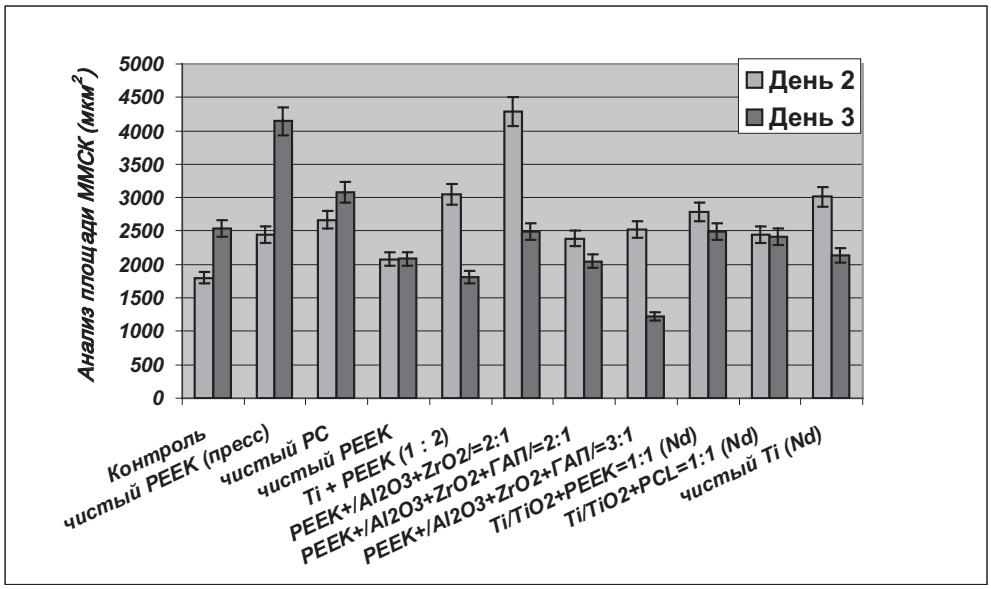


Рис. 10.46. Изменение клеточной площади вблизи имплантатов

На третий день (см. рис. 10.45) увеличение плотности культуры наблюдалось во 2-й, 3-й и 4-й и наиболее значительно в 7-й и 8-й группах, при этом в группе 6 было зафиксировано снижение плотности. Скорость роста площади клеток (см. рис. 10.46) наиболее интенсивна во 2-й и 3-й группах и даже была сравнима со скоростью роста в контрольной.

На рис. 10.47, *а*—*л* показаны характерные данные морфологического анализа ММСК вблизи матриксов в последний день экспериментов. Черные вкрапления на фото — это отколовшиеся фрагменты пористых матриксов. Как видно из сопоставления, наиболее проблематична ситуация на рис. 10.47, *е* в группе 6, где плотность культуры вблизи матрикса минимальна. Группы 2, 9, 10 (рис. 10.47, *б*, *и*, *к*) также показали скромные результаты в сравнении с контрольной (рис.10.47, *а*). Зато перспективны, особенно в сравнении с титаном (рис. 10.47, *л*), морфологические данные в группах 3, 4, 8 (рис. 10.47, *в*, *г*, *з*). Поскольку с четвертых суток численные морфометрические исследования не проводились в связи с техническими ограничениями на математическую обработку изображений с высокой плотностью событий, анализ морфологических изменений выполнялся на основании морфологических карт. На рис. 10.47, *м* приведена такая морфологическая карта для последнего дня экспериментов. Чтобы оценить воздействие материалов на ММСК, мы провели оценку всех культур в динамике и оценивали каждую культуру по балльной шкале в зависимости от таких параметров, как плотность культуры, морфология, жизнеспособность и дополнительные события. Баллы присваивались по следующей схеме.

- Плотность культуры — 3 балла присваивали культурам, в которых описание плотности соответствовало плотности в контрольной группе на день исследования. Соответственно максимальную плотность в контрольной группе делили на пять частей и в зависимости от плотности в исследуемой группе присваивали оценку.

- Морфология культуры — 3 балла присваивали культурам, в которых описание морфологии соответствовало морфологии контрольной группы на день исследования. Каждое изменение в морфологии оценивалось в 1 балл.
- Мертвые клетки и клетки на стадии апоптоза — 3 балла присваивали культурам, в которых количество апоптотических клеток соответствовало их количеству в контрольной группе на день исследования. Каждое изменение оценивалось в 1 балл.

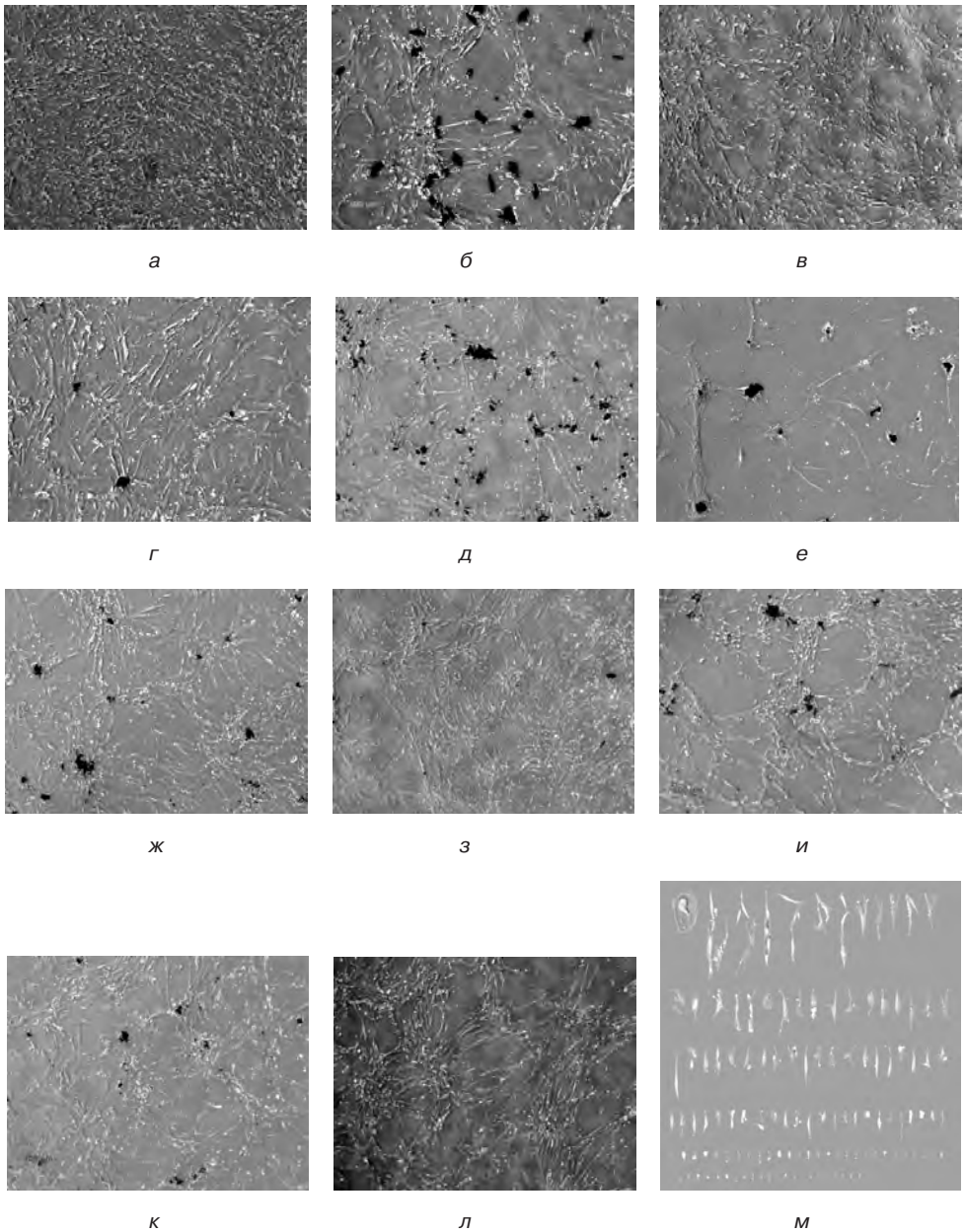


Рис. 10.47. Данные морфологического анализа на 17-й день: *а* — *л* — соответствуют номерам групп из табл. 10.2; *м* — на вставке показана морфологическая карта ММСК

- Дополнительные события — 3 балла присваивали культурам, в которых либо отсутствовали, либо присутствовали события, соответствующие событиям в контрольной группе на день исследования. Каждое дополнительное событие оценивалось в 1 балл.

Далее проводили следующий расчет: сумма баллов по пунктам 1–4/на количество пунктов (4) = средний балл. Визуально динамику состояния культур клеток можно оценить по диаграмме, приведенной на рис. 10.48.

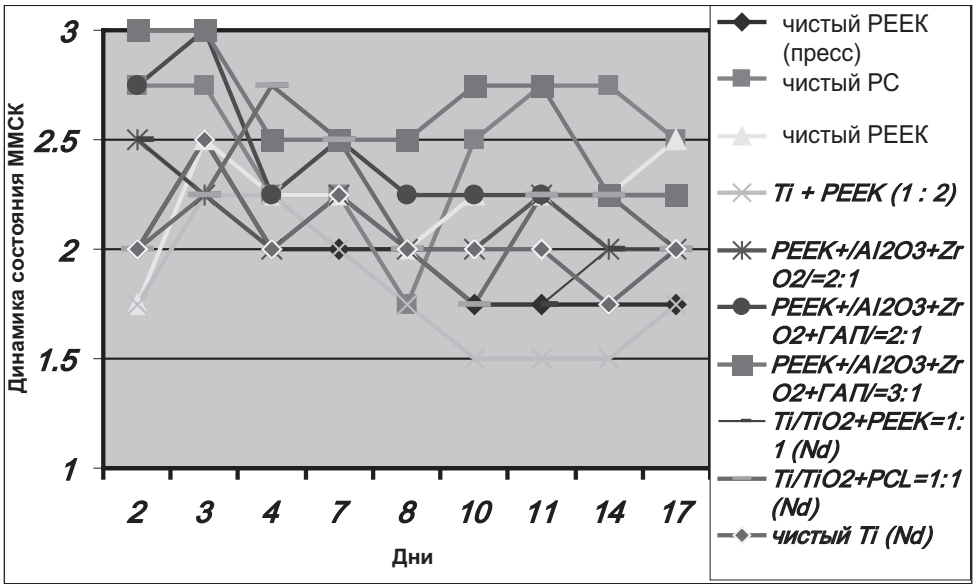


Рис. 10.48. Динамика состояния ММСК

Из диаграммы видно, что ни одна из исследуемых (2–10-й) групп не соответствовала контрольной (3 балла все дни). Однако максимально близкие показатели были в 3-й и 4-й группах исследования. Наиболее стабильные показатели в течение культивирования отмечены в группах 7 и 8.

По окончании эксперимента выполнили подсчет клеток, в результате чего были получены следующие данные о концентрациях клеток с каждой культуральной чашки. Клетки в контрольной группе достигли монослоя на 14-е сутки культивирования. В 3-й и 8-й группах — на 17-е сутки. В остальных группах за время проведения эксперимента клетки не достигли монослоя. Используя приведенные ранее формулы для подсчета пролиферативной активности, получили данные, приведенные в табл. 10.3.

Как видно из таблицы, наибольшей пролиферативной активностью обладали клетки из групп 3 — 0,2787 удвоения/сут (0,012 удвоения/ч) и 8 — 0,3003 удвоения/сут (0,013 удв./ч). Группы 4, 9, 10 обладали меньшей пролиферативной активностью. Однако если сопоставлять их с данными группы 11 (чистый Ti), это сравнение оказывается не пользу последней. Явное угнетение роста наблюдалось в группах 2 (подпрессованный ПЕЕК) и 5 (СЛС титана на воздухе CO_2-лазером), а в группах 6 и 7 угнетение роста было выражено более слабо.

Таблица 10.3. Оценки скорости пролиферации

Параметр	Группа										
	1 — контрольная	**2 — чистый PEEK (press)**	**3 — чистый PC**	**4 — чистый PEEK**	**5 — Ti + PEEK (1:2)**	**6 — PEEK + (Al_2O_3 + ZrO_2) = 2:1**	**7 — PEEK + (Al_2O_3 + ZrO_2 + ГАП) = 2:1**	**8 — PEEK + (Al_2O_3 + ZrO_2 + ГАП) = 3:1**	**9 — Ti/ TiO_2 + PEEK = 1:1 (Nd)**	**10 — Ti/ TiO_2 + PCL = 1:1 (Nd)**	**11 — чистый Ti (Nd)**
Число клеток (Nl), $\cdot 10^4$	1600,00	400,05	1000,10	740,00	340,00	615,00	685,00	1290,00	813,00	900,00	826,00
Удвоений/сут.	0,38680	0,20090	0,27870	0,25309	0,18709	0,23739	0,24654	0,30030	0,26110	0,26600	0,26970
Удвоений/ч	0,016	0,008	0,012	0,011	0,008	0,010	0,010	0,013	0,011	0,011	0,011

Результаты исследования показали влияние тестируемых пористых матриксов всех групп на клеточную культуру, что выражалось изменениями как морфологического, так и функционального характера., Оказали минимальное действие на клеточные культуры, по данным морфометрии и морфологического исследования, материалы групп 3 и 8, где было отмечено незначительное изменение морфологии клеток. Другие материалы (группы 4, 9–11) оказывали существенное влияние на клетки, изменяя их морфологию (наблюдалось увеличение размеров клеток и изменение их формы) и замедляя рост культур.

Результаты оценки пролиферативной активности показали схожие результаты: угнетение роста клеточной культуры выявили во всех исследуемых группах. Наименьшее влияние на пролиферацию клеток было выявлено в 3-й — 0,2787 удвоения/сут (0,012 удв./ч), 8-й — 0,3003 удвоения/сут (0,013 удвоения/ч) и 11-й — 0,2697 удвоения/сут (0,011 удвоения/ч) группах. Умеренное угнетение выявлено в 9-й — 0,2611 удвоения/сут (0,011 удвоения/ч) и 10-й — 0,266 удвоения/сут (0,011 удвоения/ч) группах. Значительное угнетение роста обнаружили в группах 2 и 5.

Результаты иммунофенотипирования не выявили какого-либо различия в группах, все клетки после культивирования экспрессировали стандартный набор стромальных антигенов CD 44, 73, 90, 105 и проявили негативную реакцию на гемопоэтические маркеры CD 14, 34, 45, HLA-DR, показывая отсутствие явного митогенного эффекта.

Таким образом, по данным морфологии клеток и межклеточных контактов, результатам пролиферативной активности и динамической дифференциации ММСК на пористых биополимерных и биорезорбируемых матриксах, в том числе с керамическим наполнителем, синтезированных послойно методом СЛС, можно сделать ряд выводов.

- Пролиферативная активность ММСК в пористых изделиях, полученных методом СЛС, из чистого поликарбоната оказалась в два раза выше, чем в чистом PEEK (оба полимера относятся к классу биорезистивных материалов).
- Предварительное прессование PEEK перед лазерным спеканием (то есть уменьшение пористости будущего изделия) почти в два раза замедляет скорость пролиферации.
- Смеси PEEK с керамикой ($Al_2O_3 + ZrO_2$) обладают худшей пролиферативной активностью, чем смесь PEEK с TiO_2.
- Увеличение количества PEEK в смеси биополимерной керамики PEEK + + ($Al_2O_3 + ZrO_2$) и добавка ГАП существенно повышают скорость пролиферации.
- Ранее в наших работах было показано, что механизм лазерного спекания на длинах волн 10,6 мкм (газовый CO_2-лазер) и 1,06 мкм (твердотельный Nd^{+3}:YAG-лазер) принципиально различен. В этом исследовании было обнаружено, что при СЛС на длине волны 1,06 мкм в системе PEEK + TiO_2 пролиферативная активность почти в два раза выше, чем при СЛС с использованием длины волны 10,6 мкм.
- Биоактивность ММСК в СЛС-изделиях из чистого титана сравнима с биоактивностью ММСК в СЛС-изделиях системы PEEK + TiO_2, она немного выше, чем в СЛС-изделиях из чистого PEEK, и, наконец, в полтора раза выше, чем в СЛС-изделиях из биокерамопластов (PEEK + $Al_2O_3 + ZrO_2$).
- Биоактивность ММСК в биорезорбируемом полимере PCL сопоставима с биоактивностью ММСК в биорезистивном ПЕЕК.

- По абсолютным значениям наиболее высокую пролиферативную активность и скорость удвоения, сравнимую со скоростью в контрольной группе (то есть чисто ростовой среде с ММСК), показали СЛС-изделия из пористого поликарбоната, и особенно PEEK + (Al_2O_3 + ZrO_2 + гидроксиапатит).

10.8. Биопринтинг — мечты и реальности

Медицина очень быстро же оценила перспективы и возможности технологий АП. Изготовители функциональных имплантатов в последние десятилетия активно предлагают свои услуги, однако еще не все проблемы, связанные с изготовлением даже простых имплантатов, разрешены. Медики постоянно находятся перед дилеммой: им хотелось бы иметь, с одной стороны, прочный имплантат (что можно реализовать, используя металлы и/или керамику), а с другой — легкий имплантат (что тоже возможно — есть биосовместимые и даже биорезорбируемые полимеры, однако прочность их далека от потребностей медицинской практики). Первые можно и должно создавать методами СЛС/П, а вторые — методом 3D-печати. Также не окончательно решена проблема биосовместимости для ряда материалов. Необходимые прочность, легкость и структуру имплантатам, устанавливаемым на нагруженных участках скелета, зачастую могут обеспечить только определенные металлические сплавы (на основе титана, кобальт-хром), которые на окружающие ткани иногда влияют пагубно. В зависимости от особенностей иммунной системы пациента они могут вызвать отторжение, воспаление, так как для человеческого организма являются чужеродными. Поэтому:

- до конца не ясно, не препятствует ли применение искусственного имплантата регенерации собственных тканей. Идеальный имплантат должен не угнетать, а стимулировать пролиферацию собственных клеток пациента. Разработка образцов, которые со временем рассасывались бы, позволяя восстанавливающейся ткани прорастать внутрь себя, уже ведется, но из лабораторий метод пока не вышел;
- применение имплантатов из ряда материалов может быть ограничено. Например, невозможно вживлять стальные имплантаты пожилым людям, чьи хрупкие кости не выдерживают прочных креплений.

Не такие серьезные требования к совместимости с живой тканью предъявляются к различным *экзоскелетам* и протезам. Распространение 3D-печати делает такие сложные механизмы более доступными. Например, электронная система e-NABLE предлагает владельцам 3D-принтеров помочь людям, нуждающимся в протезах предплечья и пальцев рук. На портале пользователи обмениваются электронными моделями, советами по сборке и использованию протезов. Авторы утверждают, что 3D-печать обходится гораздо дешевле, чем изготовление протеза на заказ, а для растущих детей, которым приходится менять протезы, это очень важно (рис. 10.49).

Но совершенно особая технология XXI века — это *биопринтинг*, изготовление живых объектов с использованием приемов 3D-печати. Работа с живыми тканями — очень тонкая и сложная, применять технологию можно для ограниченного количества живых объектов, и ее разработка не завершена. Промышленность не производит биопринтеры, а существующие образцы — это адаптированные к нуждам медицинских лабораторий единичные экземпляры 3D-печатных устройств. Фактически каждый университет, занимающийся проблемами биопринтинга, конструирует собственную машину.

Рис. 10.49. 3D-печатный протез (источник http://www.3dindustry.ru/article/2002)

Схема классического биопринтинга такова.

Первый этап — это всегда создание цифровой модели будущего органа, его фрагмента или участка ткани. Для построения объемной модели используются данные о конкретном пациенте, например результаты КТ и МРТ, различных видов микроскопии. Точность исследований высоко ценится, так как схема должна содержать информацию о положении практически каждой клетки в каждом печатаемом слое.

Задача моделирования специфичной и строго индивидуальной структуры 3D-тканеподдерживающего матрикса (tissue engineering scaffolds) должна решаться строго индивидуально.

Второй этап — создание биологического каркаса. Он также может быть создан методами 3D-печати. Разумеется, такой каркас должен быть биосовместимым, поэтому для его изготовления используют органические материалы, часто взятые из живого организма, либо их синтетические заменители.

Например, много надежд возлагается на гидроксиапатит $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, то есть керамику, очень схожую по химическому составу с костной тканью. Есть работы, где предлагают использовать хитозан — полисахарид, получаемый из панцирей ракообразных.

В последнее время биоинертные, биосовместимые и биорезорбируемые полимеры нашли применение в качестве основы для создания изделий для медицинской промышленности, заменителей костной ткани на ненагруженных участках скелета и систем медленного дозирования лекарственных препаратов (drug delivery systems) (рис. 10.50).

Между тем широким фронтом ведутся работы по использованию готовых органических тканей других животных. Например, ученые из Wake Forest Institute for Regenerative Medicine (www.wakehealth.edu/Research/WFIRM/Research/Engineering-A-Heart-Valve.htm) активно развивают свой способ производства каркасов для сердечных клапанов. Они использовали клапаны сердца свиньи, которые удовлетворяют всем требованиям к биосовместимости и поэтому повсеместно используются в кардиохирургии, и удалили все клетки. Таким образом, от клапана остался только эластический каркас, скелет клапана, который можно в дальнейшем покрыть человеческими клетками.

I Hydration
II Hydration and Degradation
III Degradation and Mass Loss
IV Resorption and Metabolisation
V Metabolisation

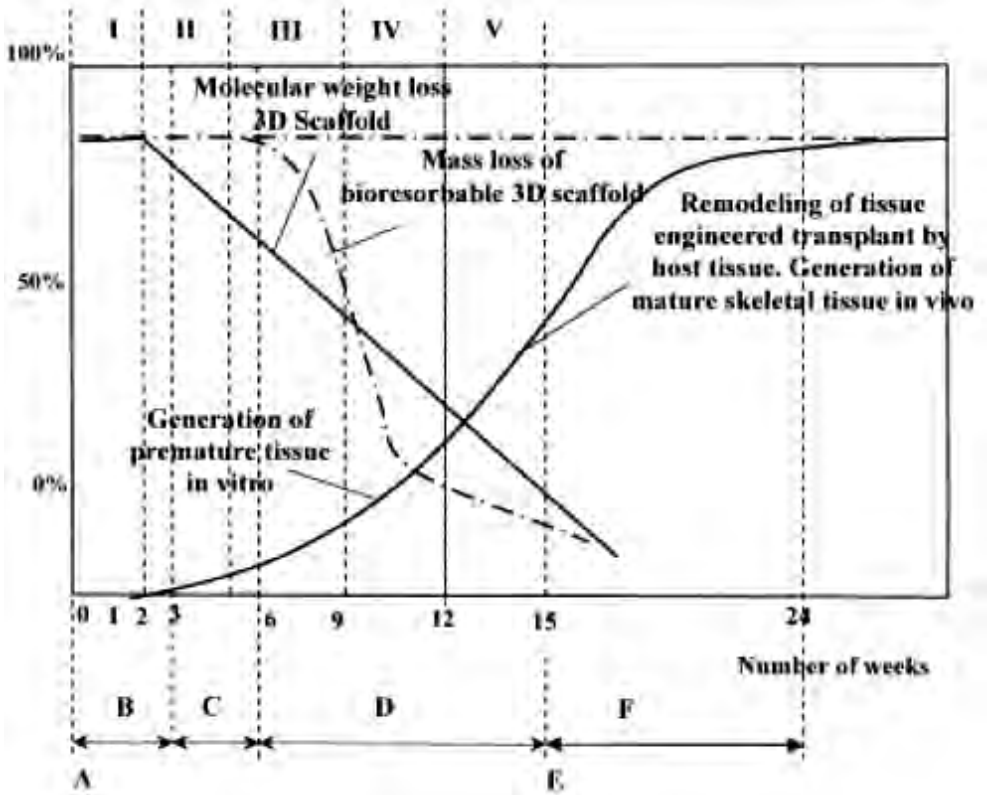


Рис. 10.50. Скорость резорбции полимера в сравнении с естественной скоростью восстановления кости скелета

Третий этап — отбор и культивирование клеток для биопечати. Клетки некоторых тканей, например кожи или хряща, можно получить из их образца. После этого клетки размножают в культуре под действием факторов роста, и таким образом в короткие сроки можно получить достаточное их количество.

Клетки печени, поджелудочной железы, сердечные миоциты этим способом получить невозможно. Для воссоздания таких тканей приходится использовать стволовые клетки. Ученые утверждают, что источником стволовых клеток могут быть не только эмбрионы, но и амниотическая жидкость, а также ткани плаценты (http://www.wakehealth.edu/Research/WFIRM/Our-Story/Inside-the-Lab/Building-an-Organ.htm). Некоторые стволовые клетки, например эндотелиальные, можно выделить из крови пациента.

Четвертый этап — собственно биопритинг: наслоение клеток на каркас согласно заранее подготовленной цифровой модели. То есть чернила для биоприн-

тера — живые клетки; чем разнообразнее клеточный состав ткани, тем «многоцветнее», а значит, сложнее 3D-печать. Существуют разные варианты этой процедуры.

Самый простой — «струйная» печать, послойное нанесение клеток (или при меньшей точности — групп клеток) на участки каркаса, предписываемые моделью каждого слоя.

Институт регенеративной медицины при Wake Forest School of Medcine (Institute for Regenerative Medicine, Wake Forest School of Medicine, Winston-Salem, США) предлагает технологию, позволяющую «распечатать» кожу прямо на теле раненого. В качестве чернил разработанный учеными биопринтер использует состав из клеток кожи и поддерживающих их питательных материалов.

Учеными из Ноттингемского университета (University of Nottingham, Великобритания) создана разработка «лазерный пинцет» (http://www.fastcolabs.com/3013877/how-3-d-printing-bones-is-just-the-start-of-repairing-your-own-body). Он представляет собой два лазерных луча, которые, перекрещиваясь, создают силу для переноса клеток. Инструмент настолько точный и тонкий, что с его помощью исследователи собираются прокладывать в органах кровеносные сосуды и воссоздавать ткани со сложной архитектоникой, точности принтера для которых может быть недостаточно. Изобретатели «лазерного пинцета» утверждают, что это не только инструмент для 3D-печати, но и уникальный исследовательский инструмент, с помощью которого можно изучать, например, процессы направленной миграции клеток в эмбриогенезе.

На пятом этапе каркас с напечатанными на нем клетками помещают в биореактор. Там для органа или участка ткани создаются условия, сходные с теми, в которых ему придется находиться в организме. Таким образом, он как бы готовится к будущей работе, доходит до кондиции и одновременно тестируется. Например, к клеткам сердечной мышечной ткани прикладывают ритмичные растягивающие нагрузки, а через сердечные клапаны пропускают жидкость со скоростью крови, протекающей через сердце, и в соответствующем ритме.

Шестой, последний этап — вживление распечатанного биообъекта в организм, чаще всего хирургическая операция.

Возможности получения той или иной ткани таким способом зависят от ее сложности и многофункциональности, от того, насколько богато она иннервируется и снабжается кровью, и от особенностей ее развития. Уже есть результаты «3D-печати» кожи, пищевода, трахеи, кровеносных сосудов, желчного пузыря, и полученные путем биопринтинга объекты применяются в лечении. Довольно широко известно, что врачи используют биопечатные ушные раковины (https://www.adafruit.com/blog/2013/05/02/fascinating-and-frightening-ways-3d-bioprinting-is-the-next-big-thing-in-medicine-and-science-3dthursday/). А Паоло Маккиарини (Paolo Macchiarini (рис. 10.51)), один из пионеров регенеративной медицины, в том числе в применении технологии биопринтинга, в 2013 году пересадил двухлетней девочке трахею, созданную из ее собственных стволовых клеток на органическом каркасе.

Проблема нехватки органов для трансплантации еще не решена полностью, но ученые работают в следующих направлениях: почки, печень, поджелудочная железа, сердечная мышечная ткань. Исследователи пытаются воссоздать с помощью 3D-биопринтинга и живую кость, которая была бы во всех отношениях лучше искусственного имплантата. Исчезнет проблема биосовместимости (используются органические рассасывающиеся материалы для каркаса и собственные клетки), к тому же кость будет обладать возможностью регенерации (орган практически восстанавливается, но вне организма).

Рис. 10.51. Трахея на органическом каркасе (источник healthland.time.com/2013/04/30/young-girl-undergoes-successful-windpipe-transplant-from-her-stem-cells/#ixzz2S2c2iYw7)

Биопечать может найти применение не только в регенеративной медицине. Компания Organovo, специализирующаяся на биопринтинге, недавно заявила, что собирается поставлять свои образцы ткани печени фармацевтическим компаниям (http://ir.organovo.com/news/press-releases/press-releases-details/2014/Organovo-Announces-Pre-Release-Availability-of-3D-Liver-Contract-Services).

В то же время исследователи уже давно говорят о так называемой ткани на чипе — объемном участке ткани, жизнедеятельность которой поддерживалась бы в искусственной среде, а одновременно множество датчиков снимало бы с нее показатели. На таком образце можно изучить влияние на ткань самых разных факторов, в том числе лекарственных препаратов (рис. 10.52).

Рис. 10.52. Ткань на биочипе
(источник http://www.wakehealth.edu/Research/WFIRM/Projects/Body-on-a-Chip.htm)

Биопринтинг позволяет сравнительно легко получать образцы человеческих тканей для подобных исследований, что раньше было не так просто и не всегда этично. При дальнейшем распространении технологии биологической 3D-печати может появиться возможность исследовать ткани конкретных пациентов, что даст врачу еще больше информации, необходимой для лечения. Сейчас проводить подобные исследования слишком дорого и сложно, какие бы полезные сведения они ни давали.

Есть и другие интересные направления работ по биопринтингу. Например, Габриэль Виллар и Хаган Бейли (Gabriel Villar, Hagan Bayley) с кафедры химии Оксфордского университета (Oxford University's Department of Chemistry, Великобритания) представляют совершенно новый материал, состоящий из большого количества водяных капель, покрытых тонкой липидной пленкой (рис. 10.53).

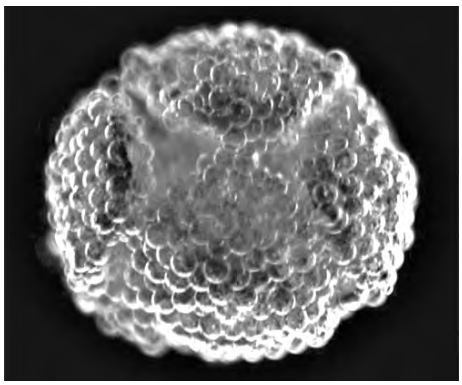


Рис. 10.53. Капельная сеть самоподдерживающей структуры (источник http://phys.org/news/2013-04-d-printer-synthetic-tissues.html)

Сразу после распечатки на 3D-принтере материал имеет форму листа, но благодаря тому, что капли имеют различный состав, заданный при моделировании, между ними создается осмотический градиент и возникают токи жидкости, которые могут заставить лист свернуться в любую задуманную форму. По словам авторов, в капельной сети можно проложить белковые каналы, через которые пройдут сосуды и нервы. Они утверждают, что такие структуры способны выполнять многие функции живой ткани, не создавая проблем, связанных с ее использованием, как, например, стволовые клетки. Капли, в отличие от них, не имеют собственного генома и не способны к пролиферации, таким образом, их поведение гораздо более контролируемо.

По мнению Назима Аннаби (Nasim Annabi) из Brigham and Women's Hospital, стремление как можно точнее воссоздать живую ткань для восстановления пораженных органов, например сердца, нецелесообразно, усилия ученых должны быть направлены на поиски материалов, способных полностью возместить ее функции. Для восстановления функции сердечной ткани профессор Аннаби предлагает новое вещество под названием MeTro gel, по консистенции похожее на резину и изготовленное из белка тропоэластина, который присутствует в человеческих клетках и делает их растяжимыми и упругими. К гелю применяют техники микроструктурирования, что придает ему еще большую эластичность. В такой гель можно «засеять» живые сердечные миоциты.

Профессор утверждает (phys.org/news/2013-04-bioengineers-rubber-like-material-micropatterns-stronger.html), что это вещество обеспечивает все связи между сердечными мышечными клетками, существующие в здоровой сердечной ткани, а также обладает всеми необходимыми механическими характеристиками. MeTro gel можно использовать, во-первых, в исследовательских целях для изучения сердечных миоцитов вне организма, а во-вторых — в лечебных в качестве очередных «чернил» для объемной печати. Из геля можно будет отпечатать нужный пациенту участок сер-

дечной стенки на основе компьютерной модели, которая будет даже предусматривать кровоснабжение находящихся в геле кардиомиоцитов.

Подводя промежуточные итоги перспектив 3D-биопринтинга, можно сделать следующие выводы.

1. 3D-биопринтинг — технология, которая, в отличие от традиционной 3D-печати, еще не вышла из университетских лабораторий и требует огромных денежных вливаний.

   Так, Агентство по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам США (DARPA) объявило о создании нового управления биотехнологий (Biological Technologies Office (BTO)). Как заявлено, BTO будет курировать следующие направления:

   - протезирование и нейрокомпьютерные интерфейсы;
   - синтетическая биология и разработка новых лекарств;
   - изучение динамики экосистем и их влияния на здоровье человека.

   Управление объединит уже существующие программы исследований и откроет новые, охватывающие большой спектр проблем, — от уровня отдельных клеток до целых экосистем. Предполагается, что одним из применений данных разработок будет помощь в реабилитации ветеранов военных действий в Ираке и Афганистане, вернувшихся домой без конечностей или с неврологическими проблемами. Кроме этого, комплекс исследований послужит созданию имитирующих работу мозга устройств, которые смогут применяться в самых различных областях.
2. Технологические процессы биопечати не сертифицированы, а при работе с живой тканью никогда нельзя дать стопроцентной гарантии. Не выяснены все физиологические и биохимические особенности многих тканей, особенно многофункциональных, с разнообразным клеточным составом и сложным строением, что не позволяет их воссоздавать.
3. По мнению экспертов, контроль, осуществляемый даже в сфере обычной 3D-печати, недостаточен для области с такими большими возможностями. Широкое распространение биопринтинга при нынешнем уровне контроля может привести к появлению некачественной продукции, что особенно опасно для медицины.
4. Существуют биоэтические проблемы. Нет не только законодательной базы, которая регулировала бы рынок 3D-печати, в том числе биологической, но и осознания обществом ее возможностей и последствий.

Глава 11

Примеры применения методик БП для создания микро- (нано-) электромеханических систем

На рис. 11.1 схематически изображены этапы развития технологий АП, которые составляют основное содержание настоящей монографии. В главе 1 отмечалось, что АП изначально позиционировалось как технология, облегчающая жизнь конструкторов и модельеров-дизайнеров. Модельное дело и сейчас является основным для таких методик АП, как трехмерная печать, лазерная стереолитография, FDM и пр. Однако мировые тенденции развития технологии АП показали, что СЛС/П-, LENS- и DMD-технологии, 3D-наплавка и сварка, а в последнее время и 3D-печать позволяют создавать не просто модели, но функциональные готовые изделия. Этот качественно новый уровень развития АП отражен на схеме.

Отвечая мировым тенденциям, мы смогли создать ФГ-изделия, материалы и покрытия. Между тем, по нашему убеждению, вектор развития методик СЛС/П и 3D-лазерной наплавки направлен в сторону создания интеллектуальных изделий (smart devices) [1]. В данной главе будут представлены экспериментальные результаты АП функциональных мезоструктур и объемных (в том числе градиентных) изделий на их основе. Миниатюризация и компьютерное моделирование

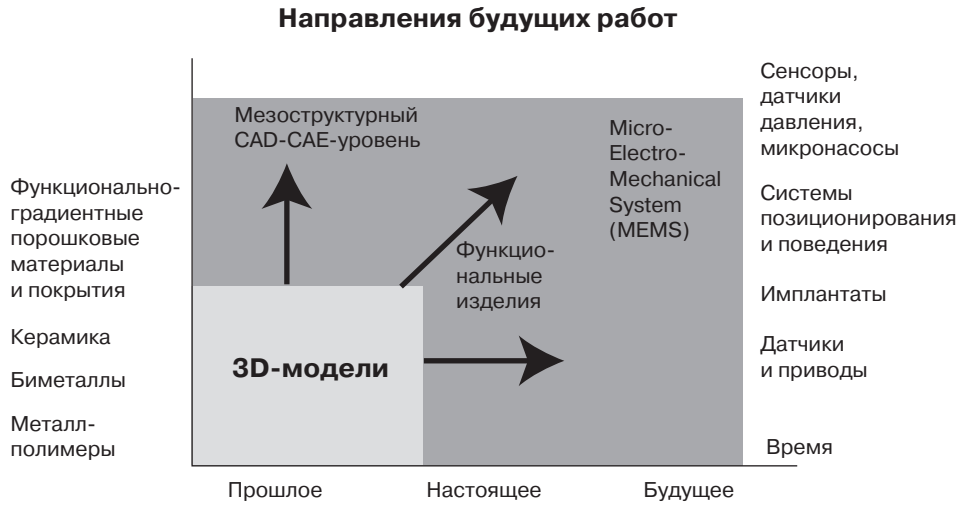


Рис. 11.1. Дорожная карта развития технологий АП

физических, химических, биологических и/или механических свойств реально синтезируемых затем объемных изделий — это магистральные направления технологии БП в XXI веке, к которым относятся методы СЛС/П и 3D-лазерной наплавки порошковых композиций. Методы СЛС/П и 3D-лазерной наплавки и печати позволяют создавать трехмерные объекты, послойно формируя ФГ-свойства будущего изделия. Средства автоматического проектирования и инженерного дизайна CAD/CAE, которые естественным образом интегрированы в процесс СЛС, дают возможность выстраивать ФГ-структуры не только поатомно (микроуровень или нанотехнологии), но и отдельными структурными блоками (частицами, зернами, доменами), что соответствует идеологии проектирования на мезоуровне. Моделирование укладки (степени связности структуры) порошковой композиции и/или ее концентрационного состава открывает возможность создания интеллектуальных микроустройств (англ. Micro-(Nano)-Electro-Mechanical Systems (MEMS-NEMS) devices) — сенсоров, имплантатов, фильтров, пьезодетекторов, пьезонасосов и т. д. Такие устройства — это не просто сумма (набор) нано-, микро- или мезоструктурных компонентов. Каждый отдельный элемент (частица, зерно, домен) связан и взаимодействуют с другими и с окружающей средой. Можно говорить об открытой системе, разделенной на иерархические уровни. Впервые было предложено использовать в едином синергетическом цикле процессы конструирования и моделирования физических свойств пористых мезоструктур методами САПР и послойного синтеза функционально-градиентных объемных изделий [1].

Средством описания характера поведения отдельных компонентов мезоструктуры и их взаимосвязей может быть известный метод конечных элементов, реализованный в настоящее время в широко известных профессиональных программных продуктах ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, STAR и т. п. Однако существуют и специализированные программные продукты для проектирования коммерческих MEMS-устройств. Например, известна разработка фирмы Coventor — пакет CoventorWare, предназначенный для проектирования MEMS-устройств на системном уровне и использующий оригинальную методологию. Данная методология изначально учитывает технологию производства, нацелена на достижение требуемой функциональности и обеспечивает многоуровневый подход. Проектирование начинается на системном уровне с использованием параметрических моделей, что позволяет оценить, как MEMS-компоненты взаимодействуют между собой и с окружающей их системой. Параметрические модели имеют шесть степеней свободы и дают возможность разработчикам использовать обычный редактор схем для построения проекта устройства с учетом связей с управляющей электронной схемой. Библиотеки встроенных моделей электромеханических, оптических, микрожидкостных, СВЧ- и магнитомеханических компонентов, точность которых была проверена с помощью моделирования МКЭ и лабораторных исследований, предлагает пользователям широкий спектр возможностей.

Одно из важнейших направлений современного материаловедения связано с проблемами получения наноструктур с заданными характеристиками и созданием функциональных наноизделий (NEMS). Интерес к наночастицам, наноструктурам и наноизделиям связан с тем, что они обладают характеристиками, которые не присущи мезоструктурным объемным материалам и изделиям, например специфическими оптическими или магнитными свойствами, высокой каталитической активностью.

NEMS могут создаваться (рис. 11.2) различными способами. Можно выстраивать структуру будущего изделия снизу вверх (Bottom-Up-подход). Однако использование напрямую нанопорошков в качестве исходных материалов сильно затруднено ввиду метастабильности вещества в нанокристаллическом состоянии. Поэтому для решения этой проблемы широко применяется подход, связанный с получением композитных наноматериалов, то есть частиц, заключенных в химически инертную матрицу (темплант).

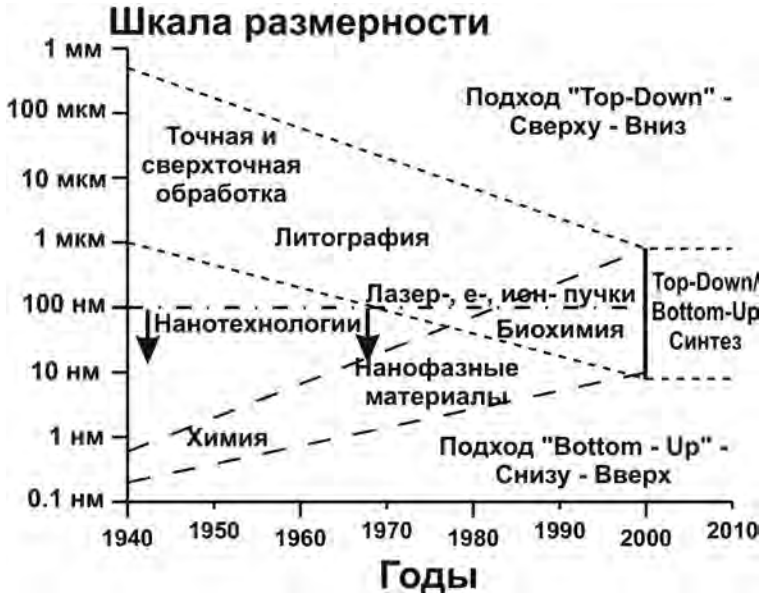


Рис. 11.2. Конвергенция Top-Down- и Bottom-Up-подходов в нанотехнологии

Во многих случаях в качестве таких матриц используют различные пористые материалы, размер полостей (пор) которых лежит в субмикронном и нанометровом диапазонах. В эти поры можно вводить различные соединения, а затем, после химической модификации, получать частицы искомого материала, размер и форма которых повторяют форму полостей матрицы. Стенки матрицы предотвращают их агрегацию и защищают от воздействий внешней среды. Метод СЛС/П позволяет создавать такие ФГ-объемные изделия как с использованием инертной подложки, так и напрямую путем послойного синтеза.

Технология АП также может быть успешно применена для послойного синтеза нано- и мезоизделий из нано- (мезо-) порошков. Следует сказать, что оба подхода не лишены недостатков и нет еще ясности в ряде вопросов.

На рис. 11.3 представлена схема развития нанотехнологий (дорожная карта), как ее представляют вдохновители 7-й рамочной программы ЕС. Сопоставление этой карты с рис. 11.1 и 11.2 позволяет сделать вывод о правильности выбранных нами приоритетов развития СЛС/П и 3D-лазерной наплавки через мезо- и наноструктуры к MEMS-NEMS. Научившись на старте программы делать нанопорошки, европейское научное сообщество ставит задачу создания функциональных нано- и мезоизделий (Micro- and NanoManufacturing Systems), свойства которых будут соответствовать запросам современного производства.

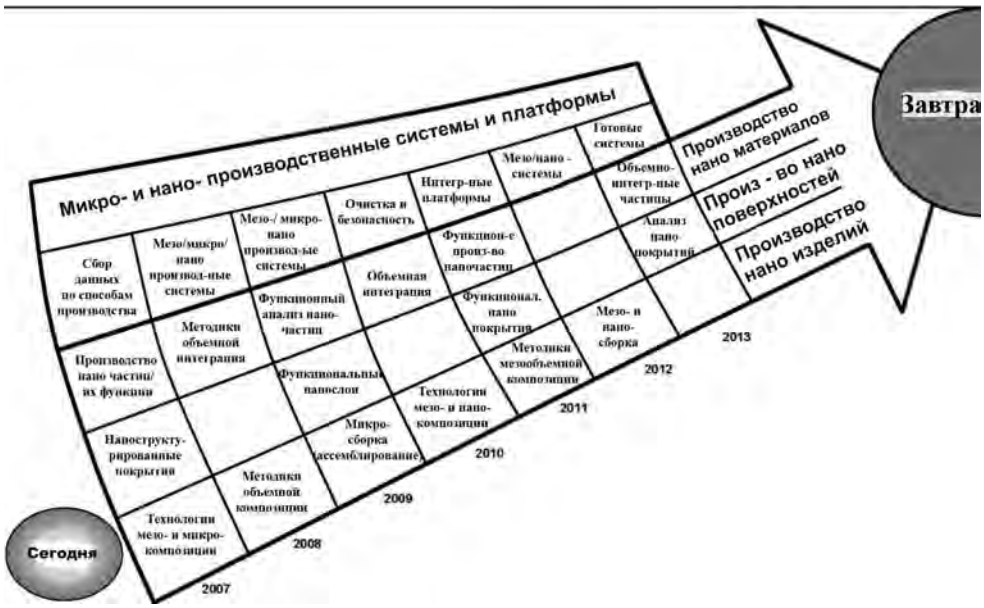


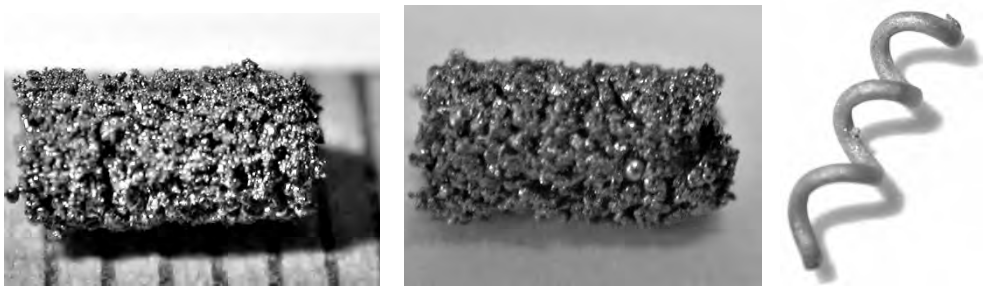
Рис. 11.3. Дорожная карта MEMS-NEMS-перспектив в рамках FP7

11.1. АП и создание пористых имплантатов с контролируемой архитектурой костных тканей

В данном разделе будут представлены результаты наших доклинических исследований на биосовместимость и биоинтеграцию пористого нитинола, синтезированного методом СЛС, в сравнении с пористым и литым титаном. Исследования проводились в сотрудничестве с ЦНИЛ СамГМУ[1] (проф. Л. Т. Волова, аспирант С. В. Фокеев) на группе из 21 лабораторной крысы в течение трех месяцев. Все пористые изделия получали методом СЛС. Животные были разделены на три группы: первой группе имплантировался пористый нитинол, второй — пористый титан, третья группа была контрольной, и ей имплантировали литой титан фирмы «Рема», используемый в стоматологии. Внешний вид пористых конструкций-имплантатов представлен на рис. 11.4.

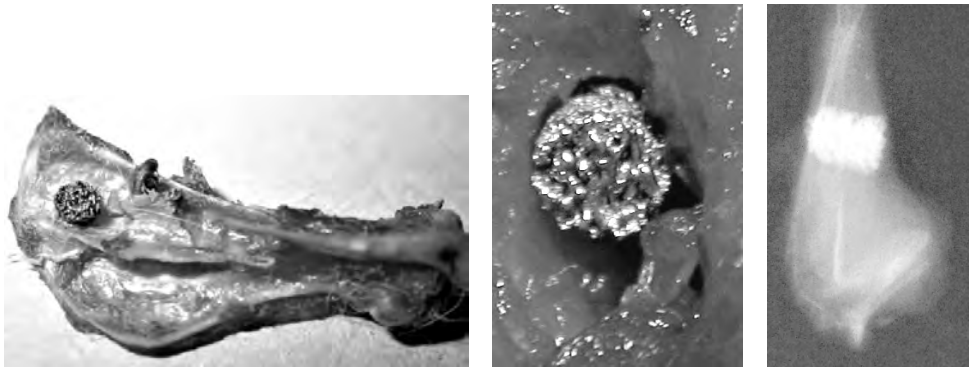
Операционное поле готовилось по общепринятой методике с соблюдением всех правил асептики и антисептики (рис. 11.5). Имплантация осуществлялась в правую лопаточную кость животного. Дефект лопаточной кости формировался с помощью стоматологического бура, в который и вводили исследуемый имплантационный материал. Затем рана послойно ушивалась, обрабатывалась раствором йода. У всех животных заживление ран шло первичным натяжением.

[1] Центральная научно-исследовательская лаборатория Самарского государственного медицинского университета.



а *б* *в*

Рис. 11.4. Внешний вид имплантатов, послойно синтезированных методом СЛС:
а — цилиндрического пористого из нитинола; *б* — из титана;
в — из литого титана марки «Рема»



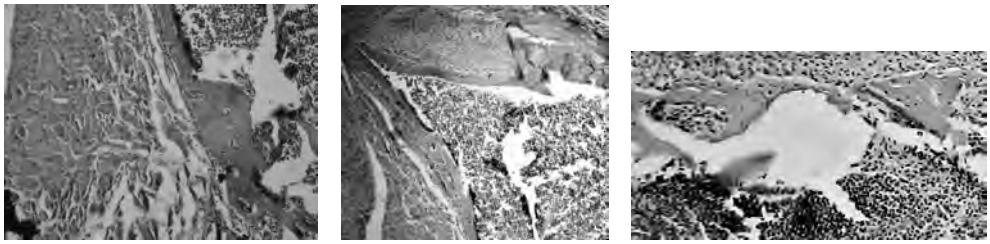
а *б* *в*

Рис. 11.5. *а* — лопатка с пористым имплантатом; *б* — внедрение имплантата в ходе операции;
в — рентгеновский снимок размещения имплантата в живом организме (аксиальный вид)

Забор материала осуществлялся через 1–3 недели, 1–3 месяца. По операционному шву делали разрез и выделяли лопатку с имплантатом. Во всех случаях отмечалось устойчивое положение имплантата в лопатке. Цвет имплантата не изменялся, что свидетельствует об отсутствии коррозии материала. Далее материал на четверо суток помещался в раствор формалина и проводилась его декальцинация в течение трех недель. Затем материал заливался парафином и окрашивался гематоксилином и эозином.

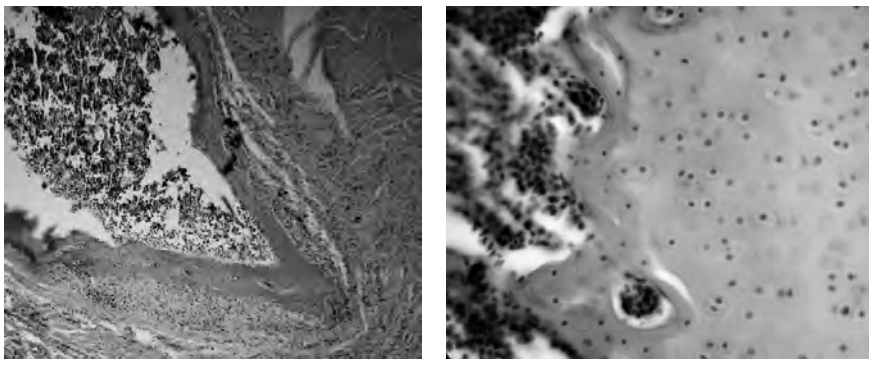
На седьмые сутки с момента операции при макроскопическом исследовании было выявлено, что в зоне операции отек отсутствовал. При изъятии имплантата наблюдался цилиндрический дефект. Микроскопическое исследование гистологических препаратов лопатки показало наличие грубой костной ткани, представленной трабекулами, которые формировали стенки лакун. Между трабекулами находилась ретикулярная ткань с элементами красного костного мозга. Наблюдаются участки интенсивного остеогенеза, представленные молодой костной ретикулофиброзной тканью. Вокруг трабекул обнаружено большое количество остеобластов. Признаки воспаления в зоне операции отсутствовали. Важно подчеркнуть, что существенных различий в гистологической картине для пористого титана и нитино-

ла не наблюдалось (сравните рис. 11.6 и 11.7 после одной недели и двух месяцев). Это говорит о перспективности применения обоих материалов в имплантологии.



а *б* *в*

Рис. 11.6. Костная ткань через 1 неделю после имплантации, увеличение 40 × 10: *а* — пористый титан; *б* — пористый нитинол; *в* — литая титановая спираль

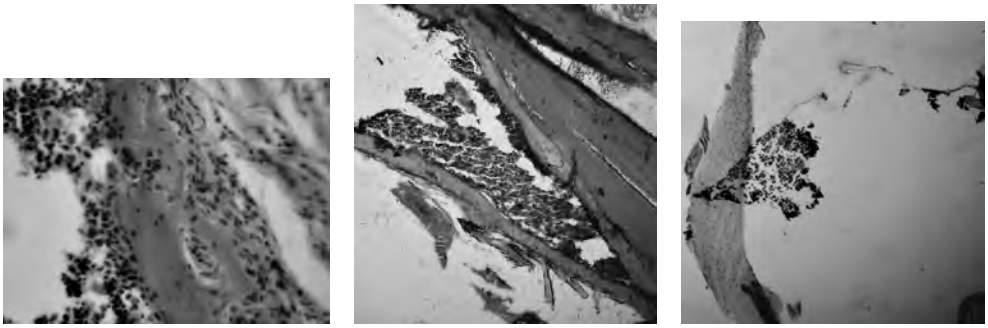


а *б*

Рис. 11.7. Гистологический срез костной ткани через 2 месяца после имплантации, увеличение 40 × 10: *а* — пористый титан; *б* — пористый нитинол

При микроскопическом исследовании костной ткани вокруг литой спирали наблюдались гигантские клетки с 2–3 крупными ядрами. Среди клеток соединительной ткани были различимы гистиоциты, фибробласты, лимфоциты, плазматические клетки. В зоне надкостницы наблюдалось разрастание ретикулофиброзной ткани в сторону мышечной ткани. Гистологическое исследование выявило также на периферии дефекта остеопластический процесс с образованием молодых костных балок (рис. 11.6, *в*).

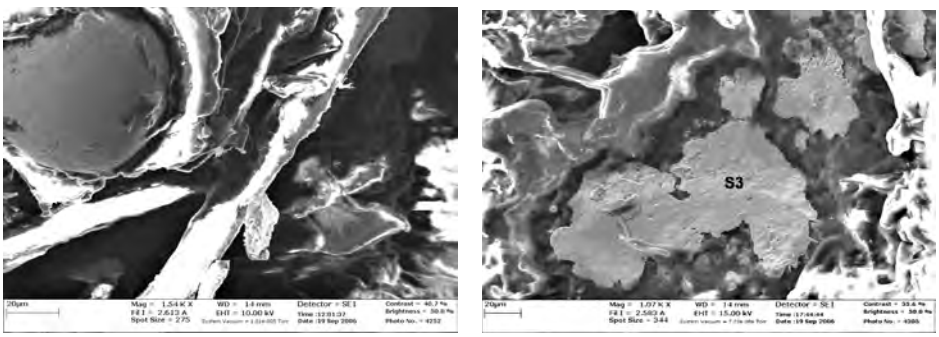
В последующие недели и месяцы (рис. 11.8) наблюдалось активное образование остеобластов и остеоцитов в костных структурах лопатки. Появилась соединительная ткань, в которой видны беспорядочно расположенные пучки коллагеновых волокон, разделяющих клеточные элементы. В соединительной ткани между костными балками обнаруживаются также фибробласты, гистиоциты и лимфоциты. Белый цвет говорит об образовании жировой ткани. Костные балки имеют органотипичную структуру молодой губчатой костной ткани с лакунами. Костные лакуны были заполнены активно пролиферирующими клетками ретикуляционой ткани и красного костного мозга.



а *б* *в*

Рис. 11.8. Костная ткань через 3 месяца после имплантации, увеличение 40 × 10:
а — пористый титан; *б* — пористый нитинол; *в* — литая титановая спираль

Морфологический анализ пористого титана после извлечения его тканей животного и гистологических тестов проводился на СЭМ (LEO EVO-50 XVP + INCA). Видно (рис. 11.9, *а*) активное вторжение связующих тканей в пористую структуру имплантата без каких-либо намеков на некроз.

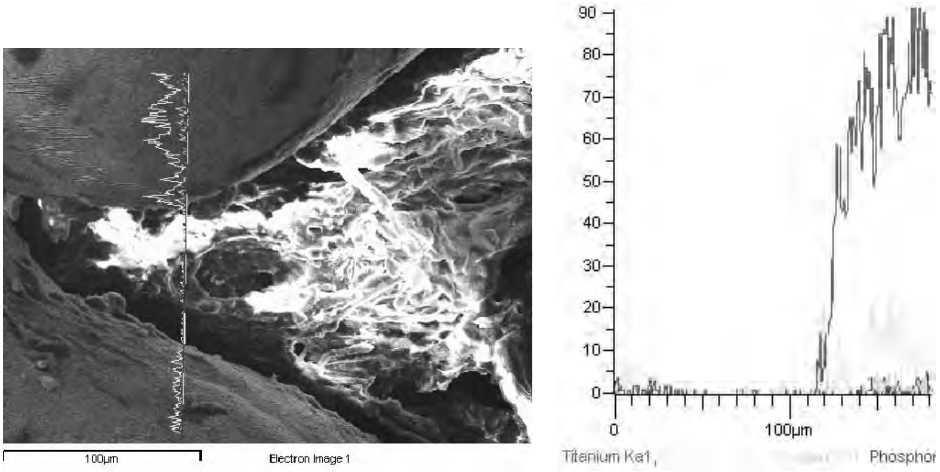


а *б*

Рис. 11.9. Имплантаты через 3 месяца: *а* — титановый, микроструктура, увеличение: 1530x, ускоряющее напряжение 10,00 кВ; *б* — нитиноловый, микроструктура, увеличение: 1070x, ускоряющее напряжение 15,00 кВ

Вокруг глобулы титана (рис. 11.9, *а*) отмечается органотипичная структура молодой ткани с лакунами. Элементный анализ (EDX-S3, рис. 11.9, *б*) показывает наличие 18,35% титана, 21,88% никеля и 59,77% углерода. Соотношение титана с никелем соответствует стехиометрии интерметаллидной фазы NiTi, а большое количество углерода говорит о наличии соединительной хрящевой ткани. На рис. 11.9 и далее белая флуоресценция под действием электронного пучка СЭМ подтверждает наличие органики вокруг исследуемых имплантатов.

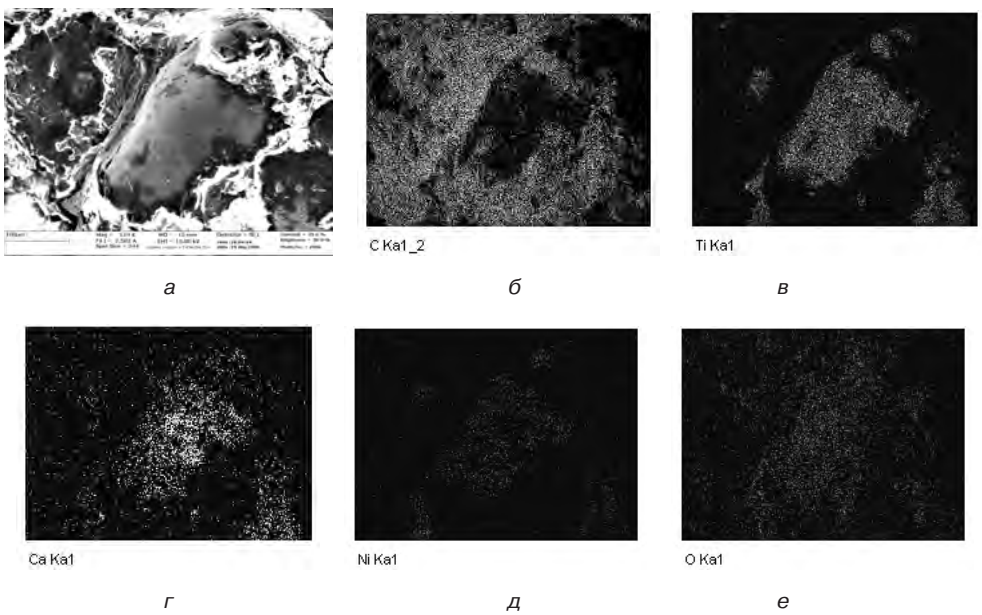
Также на рис. 11.10 хорошо видно, как между двумя большими частицами титана (~150...200 мкм) идет прорастание молодой соединительной ткани. Элементный состав (рис. 11.10, *б*) наряду с ожидаемым титаном показывает наличие не только углерода, но и кислорода и фосфора. Известно, что эти элементы составляют основу хрящевых тканей.



а *б*

Рис. 11.10. Титановый имплантат через 3 месяца: *а* — микроструктура, увеличение 1186х, ускоряющее напряжение 15,00 кВ; *б* — распределение элементов

Нитинол за 3 месяца практически полностью обрастает органотипическими структурами (рис. 11.11, *а*). Места контактов костной ткани и нитинола плотно закрыты, что указывает на высокую толерантность тканей к этому материалу. Сам имплантат при послойном СЛС имел открытую пористость (см. рис. 11.4, *а*), которая



а *б* *в*

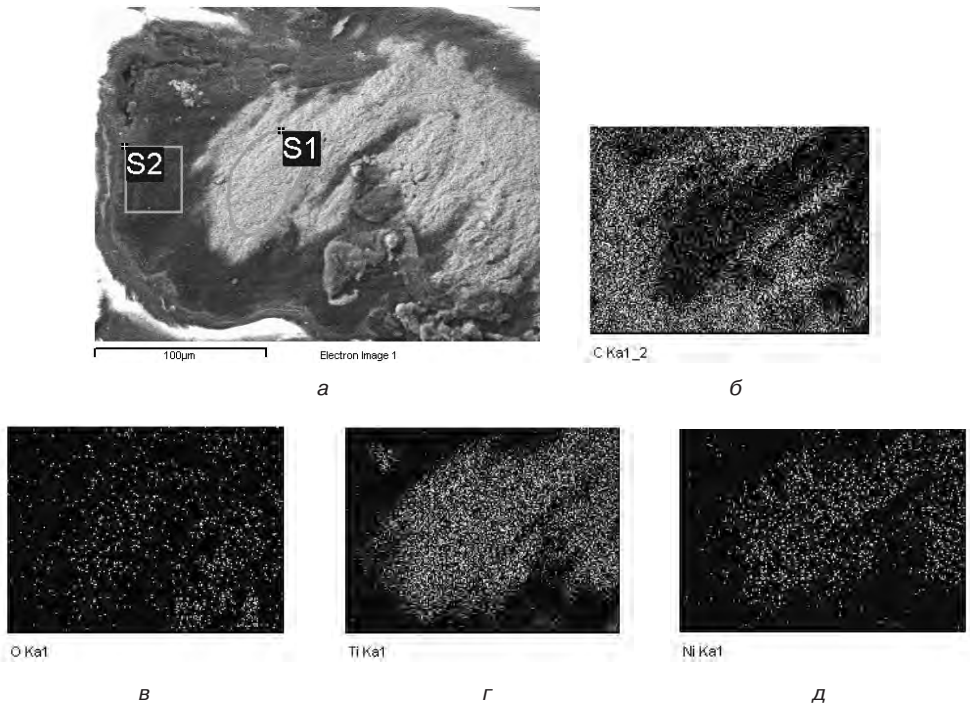
г *д* *е*

Рис. 11.11. Нитиноловый имплантат через 3 месяца: *а* — микроструктура, увеличение 519 ×, ускоряющее напряжение 15,00 кВ; *б–е* — распределение элементов

обеспечивает широкие возможности для прорастания тканей и надежной фиксации их с костью. Свободный никель (рис. 11.11, *д*) отсутствует на поверхности имплантата, что очень важно для уменьшения его потенциальной токсичности. Присутствие кальция в элементном наборе, с одной стороны, объясняется процессом декальцинации, который производился перед гистологическим анализом, а с другой — свидетельствует об активном образовании кости. На рис. 11.10, *а*, 11.11, *а*, 11.12, *а* более темные места (появились, так как съемка шла в обратном излучении, смотри также строку «S2» в табл. 11.1) — это углеродные включения, которыми покрываются титановый или нитиноловый имплантаты.

Таблица 11.1. EDX-анализ места, указанного на рис. 11.12, *а*

Область	C	O	Ti	Ni	Итого
S1	49,44	13,27	26,05	11,23	100,0
S2	98,93	—	1,07	—	100,0
Max	98,93	13,27	26,05	11,23	—
Min	49,44	13,27	1,07	11,23	—



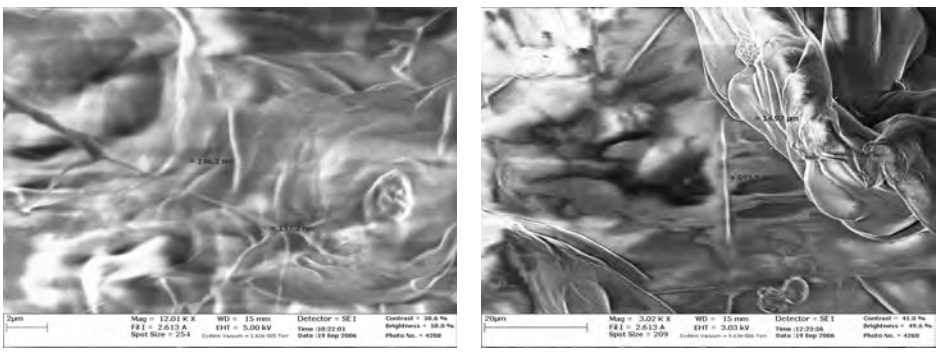
а *б* *в* *г* *д*

Рис. 11.12. Микроструктура «обросшего» нитинола с элементным анализом: *а* — увеличение 1220 ×, ускоряющее напряжение 15,00 кВ; *б–д* — распределение элементов

Оптическая микроскопия показала легкое повреждение кости в области контакта с имплантатом. Это мы связываем с воздействием стоматологического бура при внедрении имплантата в кость. Зона дефекта сохранила органическую струк-

туру. Пространство между трабекулярными структурами занято ретикулярной тканью с кровеносными сосудами. Среди клеток соединительной ткани наблюдаются фибробласты, лимфоциты, макрофаги. Нейтрофильно-экссудативного компонента не обнаруживалось.

Таким образом, пористый нитинол и титан к концу исследований были плотно спаяны с окружающей тканью, трудно отделимой при извлечении. Окружающая зону дефекта костная ткань сохраняет органотипичную структуру. Надкостница не изменена, ее толщина визуально мало отличается от нормы и состоит из двух слоев — клеточного и волокнистого. Губчатая костная ткань, образующая трабекулы и лакуны, заполнена костным мозгом и рыхлой соединительной тканью. Со стороны костномозговых пространств костного ложа можно было видеть трабекулы, состоящие из ретикулофиброзной костной ткани. Костные балки окружены плотными рядами остеобластов. Костные балки были широкими, с большим количеством остеоцитов, располагающихся плотно друг к другу. Вокруг трабекул наблюдалось большое количество остеобластов. Присутствие связующей ткани (рис. 11.13, 11.14) в зоне имплантации позволяет говорить о процессе остеоинтеграции. Структурное состояние соединительной ткани вблизи пористых Ti или NiTi имело наноразмерные параметры. Измерения показали, что около пористого NiTi мускульные перетяжки имели толщину от 700 нм до 15 мкм (рис. 11.13), а вокруг пористого Ti — ~150 нм.



а *б*

Рис. 11.13. Органические структуры: *а* — около пористого титанового имплантата; *б* — около пористого NiTi-имплантата

Низкая прочность пористых имплантатов на основе нитинола позволяет рекомендовать их пока только в качестве имплантационного материала для контурной пластики при дефектах мягких и твердых тканей. Другим интересным аспектом развития этого направления имплантологии может быть создание контролируемой пористости средствами CAD для улучшения согласования упругих параметров (модуля Юнга, коэффициента Пуассона, коэффициента термического расширения и пр.) костной ткани и материала имплантата.

Для того чтобы прояснить причины хорошего сращения соединительных тканей с имплантатами, мы изучали их поверхность при больших увеличениях. На рис. 11.14 показан вид поверхности синтезированного нитинола (см. рис. 11.12 —

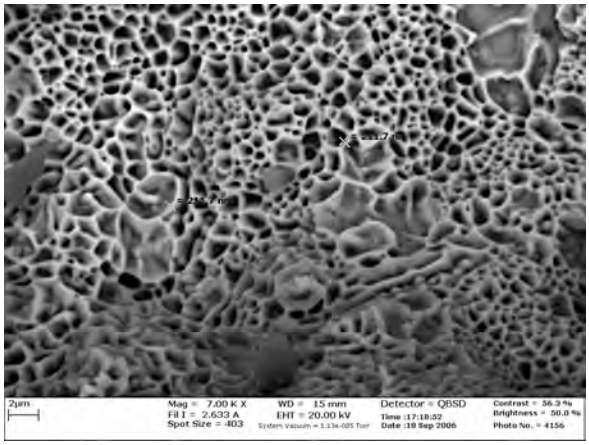


Рис. 11.14. Наноструктуры на поверхности NiTi после синтеза при совмещении СЛС- и СВС-процессов

вид этой поверхности при меньшем увеличении) при увеличении 7000 КХ. Было обнаружено, что эта поверхность имеет развитую фракталоподобную форму. Наноструктуры имеют самоупорядоченную низкоразмерную организацию. Характерные размеры стенок этих наноструктур ~140...460 нм, хотя сами структуры достигают ~2...5 мкм. Можно ожидать, что эти наноструктуры как раз и способствуют процессу биомеханической интеграции имплантата с костной тканью.

Таким образом, гистологические исследования показали, что имеет место высокая биоинтеграция пористых имплантатов с костными тканями исследуемых животных. Отсутствуют любые проявления коррозии имплантируемых материалов, как и реакции отторжения. В целом наблюдались высокая биосовместимость, эффект прорастания тканей в поры и их закрепления там. Гистология и параметры микротвердости показали, что кость в контакте с имплантатами вела себя аналогично костям челюстно-лицевой области. Однако из-за наличия эффекта памяти формы (ЭПФ) пористый нитинол более предпочтителен для лицевой краниопластики.

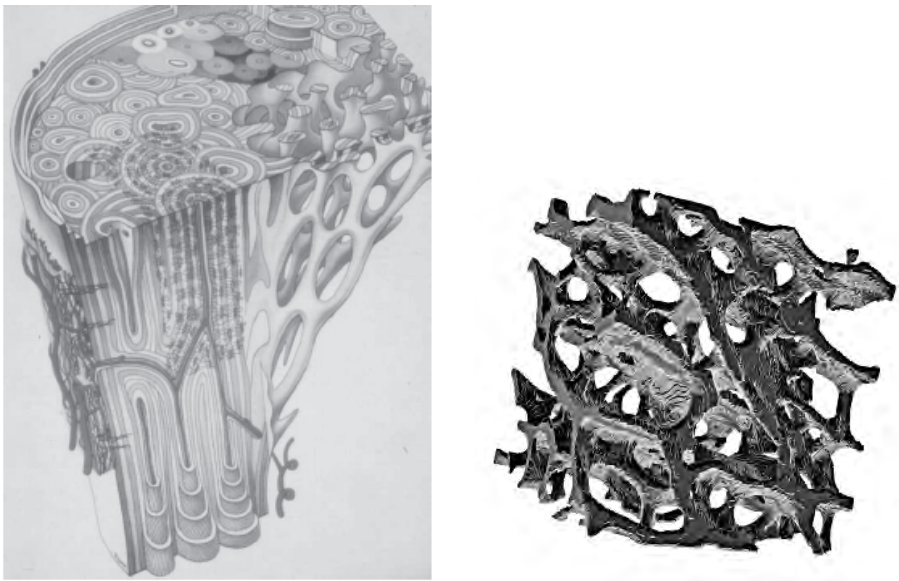
11.2. Проектирование, создание и физические свойства тканево-инженерных конструкций из биодеградируемых синтетических полимеров

Задача моделирования специфичной и строго индивидуальной структуры 3D-тканеподдерживающего матрикса должна решаться при условии выполнения ряда принципиальных требований к этому изделию.

1. Каркас (матрикс) должен восполнять сложные анатомические дефекты пациента.
2. Материал матрикса должен способствовать регенерации тканей в месте дефекта.
3. Дизайн поверхности матрикса должен соответствовать реальной «архитектуре» индивидуума в месте повреждения.

4. 3D-конструкции должны выдерживать нагрузки в месте замещения за счет либо прочной фиксации к кости, либо прорастания соединительных тканей (проблема совместимости).

На рис. 11.15 показаны известные типы кости, каждой из которых присущи свои анатомические особенности.



а *б*

Рис. 11.15. Кость: *а* — трубчатая; *б* — трабекулярная

Морфология трубчатой кости (рис. 11.15, *а*) характеризуется наличием наружного слоя с уплотняемостью (пористость ~10...20%) и присутствием в ней гаверсовых и волькмановых каналов. Ее геометрическое моделирование может быть реализовано построением регулярной структуры пустотелых вертикальных и радиальных каналов. Трабекулярная кость (рис. 11.15, *б*) имеет губчатость (то есть пористость ~70...90%), а при геометрическом моделировании наряду с периодическими участками должна быть использована случайная решетка.

Важно управлять не только геометрическими и механическими параметрами матрикса. Материал пористой внутренней структуры должен способствовать регенерации/пролиферации живых тканей. Поэтому размеры пор, их форма, проницаемость пористого матрикса, смачиваемость поверхности, возможность заполнения пор питательными растворами (медикаментами) для улучшения клеточной адгезии, миграции и прорастания тканей также принципиальны. При геометрическом компьютерном дизайне 3D-матрикса определение границ и структуры поверхности может быть реализовано через неявные математические функции:

- имеющие оптимум и малую кривизну;
- заполняющие пространство, аппроксимирующие минимальную поверхность;
- непрерывные и дифференцируемые пространственно-периодические.

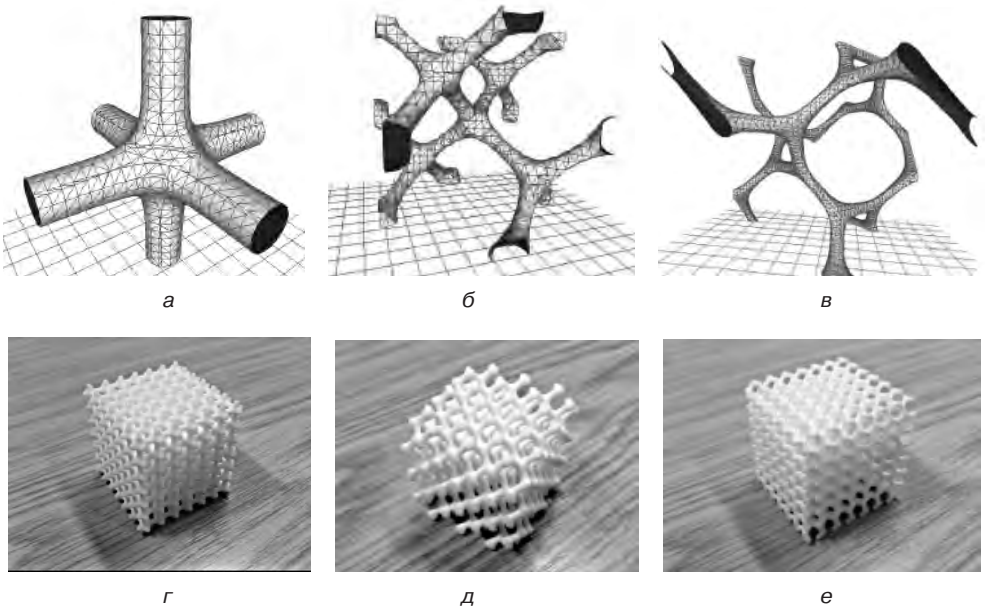
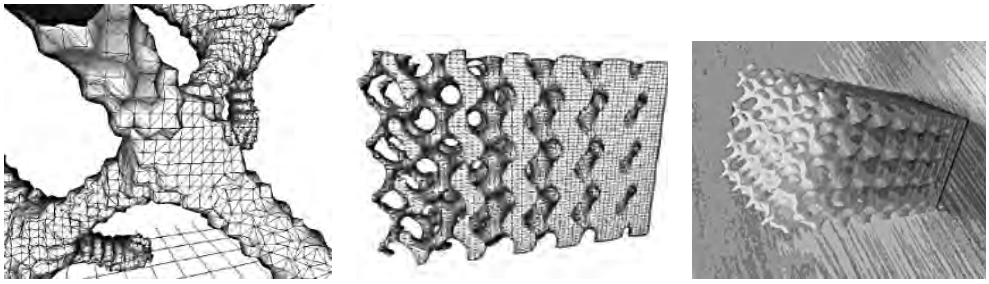


Рис. 11.16. Моделирование внутренней структуры 3D-матрикса: *а*, *г* — кубическая ячейка, 6 опор на узел, угол между двумя опорами 90°; *б*, *д* — тетрагональная ячейка, 4 опоры на узел, угол между двумя опорами ~109,47°; *в*, *е* — гироидальная (винтовая) ячейка, 3 опоры на узел, угол между двумя опорами 120°

На рис. 11.16, *а*—*в* показаны способы реализации таких структур геометрическими примитивами: кубической (рис. 11.16, *а*), тетрагональной (рис. 11.16, *б*), гироидальной (рис. 11.16, *в*) ячейками, каждая из которых имеет определенные количество опор на узел и угол раскрытия между опорами. На рис. 11.16, *г* — *е* (публикуется с разрешения J. Mazumder, College of Engineering, Univ. of Michigan & K. Chopra, School of Materials, Univ. of Manchester) показано, как такие структуры выглядят при синтезе методом СЛС из биосовместимого и биодеградирумого полимера — полилактида.

CAD-CAE функциональных 3D-матриксов могут быть дополнены моделированием специфических особенностей. Так, шероховатость структуры увеличивает клеточную адгезию и моделируется в терминах угловой частоты. Локальное изменение кривизны поверхности (рис. 11.17, *а*) за счет изменения угла между опорами может быть использовано для оптимизации клеточной адгезии и прорастания. Градиент пористости можно смоделировать как изменение параметра укладки в радиальной или цилиндрической симметрии — см. пример на рис. 11.17, *б* и его реализацию (рис. 11.17, *в*, публикуется с разрешения R. Gabbrielli, Centre for Orthopaedic Biomechanics, University Bath, Великобритания).

Таким образом, подводя промежуточные итоги, можно отметить, что методология лазерного дизайна 3D-пористого матрикса (рис. 11.18) включает взаимосвязанный выбор материала, компьютерное моделирование пористой структуры матрикса, сам процесс послойного СЛС/П-матрикса и последующую проверку, переходящую из *in vitro* в *in vivo*. Сформулированные ранее требования к 3D-матриксу для тканево-клеточной инженерии — стойкость, соответствующая прочности окружающих



а *б* *в*

Рис. 11.17. Функционально-градиентная пористая 3D-структура: *а* — CAD шероховатости; *б* — градиент пористости (плотности); *в* — внешний вид

тканей (типов костей), возможность безболезненной фиксации матрикса к живым тканям и последующая регенерация и пролиферация живых тканей в матриксе — должны поверяться на экспериментах *in vivo*. Такие медико-биологические тесты обеспечивают коррекцию или обратную связь в нашей методике (рис. 11.18).

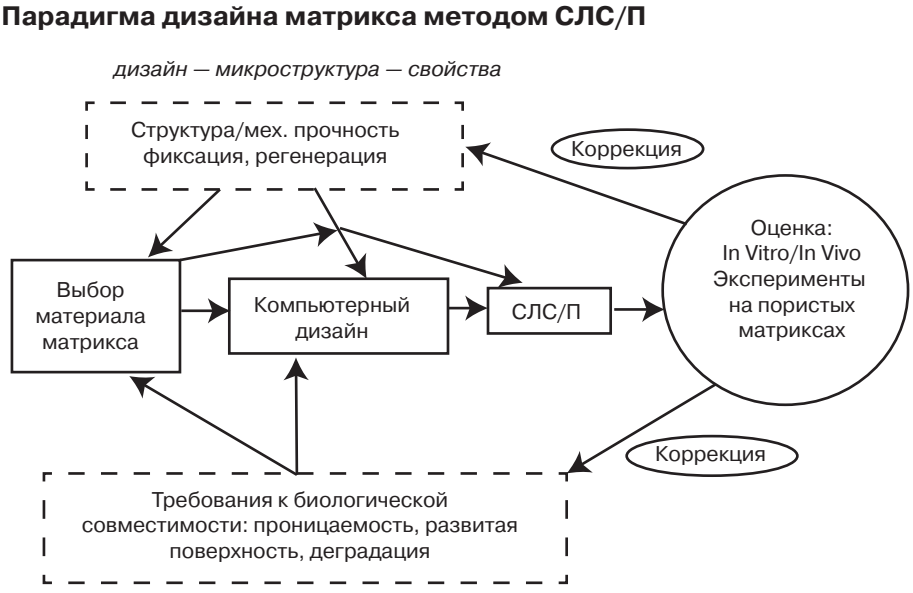


Рис. 11.18. Методология лазерного дизайна 3D-матрикса

11.3. СЛС интеллектуальных пористых систем дозированной доставки лекарств

Ключевым требованием к терапевтическому использованию 3D-пористых матриксов для хранения и дозирования лекарственных препаратов является возможность контроля и управления их высвобождением в пространственном и временном масштабе. Для достижения этих целей предлагается создание пористых матриксов из

биоразлагаемых полимеров с инкапсулированными медикаментами и/или наночастицами. На рис. 11.19 показаны стадии высвобождения пористым 3D-матриксом биологических растворов. Слева проводилась окраска метилен-синим, а справа — выщелачивание раствором соли стволовых клеток в гироидальном типе 3D-матрикса при статичном высевании. Хорошо виден результат проницаемости сверху вниз указанных растворов. В зависимости от типа 3D-матрикса (CAD-структуры (см. рис. 11.16)) скорость проникновения может изменяться, и этот процесс управляем.

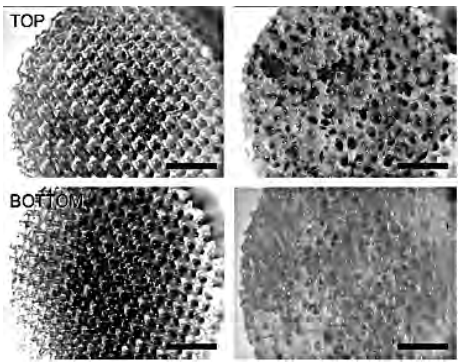


Рис. 11.19. Стереомикроскопическое изображение 3D-матрикса сверху и снизу. Шкала 2 мм

В последнее десятилетие методы микротехнологий привели к развитию микроэлектромеханических систем, биомикросистем анализа (μTAS), лабораторных устройств (Lab on a Chip devices) и других микроустройств. Например, стало возможно создавать методами микропроизводства различные компоненты медицинских микроустройств, которые могут улучшить терапевтический эффект от лекарств: микроиглы, микронасосы, микроклапаны, микростены и имплантируемые СДЛ.

Основы микрофлюидики, реализуемые при проектировании и работе СДЛ, включают модельный дизайн и изготовление изделия, подготовку его к работе; приложение к нему нагрузки, движение жидкости или газа (или других реагентов, например жидкости для промывки или тарирования) сквозь его микрометровых (нанометровых) размеров каналы; работу клапанов; смешивание жидкостей и/или их изоляцию; измерение объема прошедшей жидкости, контроль температуры жидкостей. Микрофлюидные устройства используются в различных приложениях для прецизионного контроля потока жидкостей и/или газов. В литературе был продемонстрирован широкий диапазон технических решений для микрофлюидных изделий — насосов, клапанов, смесителей, датчиков. При этом возможность создавать автоматически управляемые МЭМС, в которых совмещены несколько функций при высоких скоростях протока, является актуальной задачей.

Известно, что прокачка жидкости (газа) может быть реализована механическими, электрическими или термическими методами. Каждый их этих подходов имеет свои преимущества и недостатки. В данном разделе будет рассмотрен один из термических методов прокачки. При фазовом переходе первого рода изменение давления возникает за счет скачкообразного изменения объема во время перехода от одной фазы к другой при изменении температуры. Принимая во внимание высокий теплообмен в малых каналах, такой механизм наилучшим образом масштабируется сверху вниз с переходом к микро- и нанообъемам. Однако термические методы требуют тщательного контроля и управления локальной температурой. Другим необходимым компонентом микрофлюидной системы является способность остановить и начать подачу жидкости (газа) в нужный момент. Здесь могут быть использованы разные подходы (конструкции) — возбуждение магнитным, пневматическим, гидравлическим или термоэлектрическим способом. Доставка точно измеренного

количества жидкости из одного резервуара в другой в строго контролируемой последовательности важна во многих микрофлюидных применениях. Возможно, самым известным коммерческим применением микрофлюидики являются картриджи для струйной печати.

Флюидные технологии движения (прокачки) различаются относительно выбора материала изделия, зрелости технологии и достижимых объемных расходов потока. В многочисленных исследованиях было показано, что нитинол (интерметаллидная фаза — NiTi) является перспективным материалом для имплантации, поскольку обладает уникальной комбинацией свойств (присущих ему даже в пористом состоянии), включающих эффект памяти формы (ЭПФ), высокую прочность, свойство демпфирования и коррозионную стойкость. Биосовместимость нитинола и ЭПФ обусловливают то, что этот материал может существенно расширить спектр самофиксируемых протезных элементов и СДЛ. Способность изменять форму и расстояние между порами при изменении температуры человеческого тела может иметь следующие благотворные последствия:

- улучшать степень фиксации имплантата или тканево-клеточного матрикса (ТКМ, в англ. литературе — scaffolds) к костным и соединительным тканям;
- способствовать продвижению лекарств по порам к местам контакта с окружающими имплантат тканями;
- обеспечивать инвазивность предлагаемого подхода.

В рамках развиваемой нами парадигмы контролируемой доставки лекарств за счет ЭПФ в пористом нитиноле должны найти применение саморегулируемые (в замкнутом цикле) биоМЭМ-устройства в живом организме, которые используют состояние больного (то есть его текущую температуру) для контроля выхода и дозирования лекарства. Терапевтические и диагностические методики на микроуровне могут стать основой для развития саморегулируемых систем доставки лекарств, потому что, будучи имплантированными внутрь тела, они способны контролировать концентрацию специфических лекарств и поставлять терапевтические вещества по необходимости.

Методики быстрого прототипирования обладают большим потенциалом для проектирования и послойного синтеза имплантатов, ТКМ и СДЛ с предварительно заданной и легко воспроизводимой внутренней и внешней структурой поверхности. Селективное лазерное спекание как одна из таких методик позволяет точно и быстро воспроизводить по индивидуальным данным трехмерной компьютерной и магниторезонансной томографии (μКТ или МРТ) для каждого пациента недостающие (разрушенные) костные и тканевые фрагменты. Еще одним направлением использования пористых структур являются фильтрующие мембранные технологии и создание дозирующих устройств для фармацевтической (медицинской) промышленности. Так, в работе предлагается синтезировать методом СЛС пористый полимерный имплантат — СДЛ с биоактивным препаратом. При вживлении его в организм пациента происходит дозированное растворение препарата, а сам имплантат с течением времени рассасывается. В наших ранних исследованиях также было показано, что образцы из нитинола, полученного СЛС-методом, имеют высокие значения коррозионной стойкости, проницаемости, значительную способность к водной абсорбции и хорошо развитую поверхностную структуру. Контролируемая внутренняя структура соединенных пористых каналов позволяет обеспечивать прорастание соединительных тканей в поры имплантата, что увеличивает площадь соприкосновения и фиксации и уменьшает нежелательные сдвиги имплантата в ме-

сте его фиксации с костью. В то же время пористые каналы могут быть заполнены лекарствами для последующего их растворения током крови и предотвращения некроза в месте соединения. В данном разделе предлагается оригинальная модель (схема) функционирования пористых изделий из нитинола, которые могут быть использованы в качестве ТКМ и СДЛ [1].

Для экспериментов по послойному лазерному спеканию использовали порошки нитинола марки ПН55Т45 (производство «Полема», Тула, РФ). Размер частиц порошков (~30...50 мкм) выбирали ситовым анализом так, чтобы он соответствовал диаметру пятна лазерного излучения. Схему экспериментального стенда, методику СЛС и оптимальные режимы спекания никелида титана мы описали в главе 1.

Ключевым требованием к терапевтическому использованию трехмерных пористых матриксов для хранения и дозирования лекарственных препаратов является возможность контроля и управления их высвобождением в пространственном и временно́м масштабе. Для достижения этих целей предлагается создание пористых матриксов из нитинола с последующей инкапсуляцией их медикаментами и/или наночастицами. В зависимости от типа 3D-матрицы (ее CAD-структуры) скорость растворения лекарств в окружающих тканях можно контролировать.

Основными параметрами ТКМ являются тонкость их очистки и проницаемость, которые зависят от материала мембраны, фракционного состава и формы исходного порошка, а также технологии изготовления мембраны — матрикса. Среди факторов, влияющих на свойства СДЛ и ТКМ, следует назвать и температуру спекания, выбор (тип) фильтруемой жидкости (газа), давление фильтрации, геометрические параметры фильтра, возможность его регенерации.

Равномерность распределения проницаемости по площади фильтрации зависит от характера распределения пористости в объеме СДЛ. Сама методология послойного СЛС создает условия и указывает пути для управления этим параметром, формируя градиент свойств (например, пористости) в биоМЭМС. Представляется перспективным еще на уровне компьютерной визуализации в среде CAD-программ (AutoCAD, Solid Work, Pro/ENGENEER, Компас 3D) заранее определять структуру спекаемых объектов и геометрическое расположение материала их компонентов. Это позволит синтезировать объемные изделия, структура и свойства которых изменяются в зависимости не только от направления, но и от координаты в выбранном направлении.

На рис. 11.20, *а—г*, показано как реализуется ЭПФ в нитиноле при аустенит-мартенситном превращении. Здесь и далее $A_н$, $A_к$, $M_н$, $M_к$ — температуры начала и конца аустенитного и мартенситного превращений соответственно. Допустим, пружине (в нашем случае — пористому ТКМ) термомеханической обработкой придается определенная форма (рис. 11.20, *а*). При охлаждении до $T < M_к$ эта пружина (пористый ТКМ) может быть дополнительно пластически деформирована, например, усилием сжатия или растяжения F_0 (рис. 11.20, *в*). Тогда при нагреве до аустенитного состояния форма пружины восстанавливается и в ней развивается усилие F_1, превосходящее исходное усилие F_0.

Поскольку синтезируемые 3D-матриксы из NiTi обладают эффектом памяти формы, было предложено управлять скоростью дозировки лекарственных сред за счет изменения размера пор в нитиноле при аустенит-мартенситном превращении (рис. 11.21 и 11.22). В исходном состоянии (рис. 11.21, *а*) ТКМ термопластически

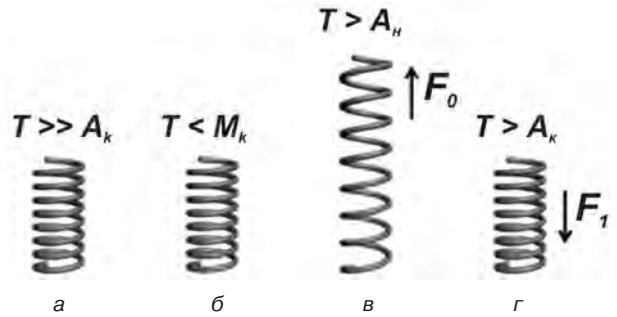


Рис. 11.20. Демонстрация ЭПФ на примере пружины из нитинола. Здесь и далее $A_н$, $A_к$, $M_н$, $Mк$ – температуры начала (*н*) и конца (*к*) аустенитного (*А*) и мартенситного (*М*) превращений, соответственно: *а* — $T \geq A_к$; *б* — $T < M_к$; *в* — $T > A_н$; *г* — $T > A_к$

деформирован и готов к работе (см. аналог его состояния на рис. 11.20, *б*). При нагреве выше $A_н$ (то есть повышении температуры человеческого тела) в материале идет обратное мартенситное превращение (рис. 11.21, *б*), и изделие «вспоминает» свою форму. При этом развивается усилие F_1 (рис. 11.21, *г*), в результате размер пор уменьшается и биологический раствор выдавливается из них, как показано на рис. 11.22, *а*. При охлаждении до температуры $M_н$ (температура тела возвращается в норму, человек выздоравливает) начинается прямое мартенситное превращение (рис. 11.21, *в*), а поступление раствора (лекарства) прекращается (рис. 11.22, *б*). Наконец, на участке (рис. 11.21, *а — в*) аустенитная структура нитинола полностью перейдет в мартенситную при $M_к$, гистерезисный цикл завершится, и изделие вновь готово к работе. Таким образом, при повышении температуры до $A_к$ тепловая энергия больного организма переходит в механическую энергию (совершается полезная работа), а усилие $F_1 \geq F_0$ обеспечивает организм лекарствами.

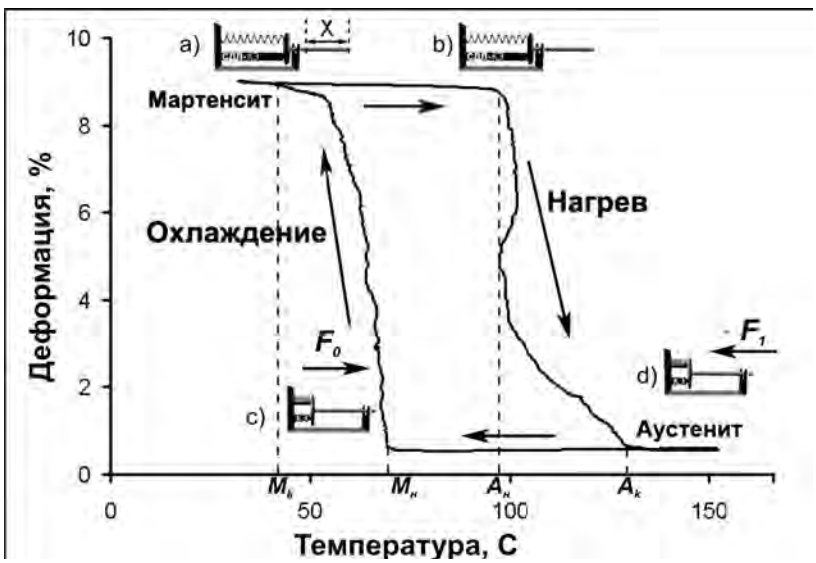


Рис. 11.21. Основные циклически-гистерезисные этапы работы СДЛ, действующей на ЭПФ

а б

Рис. 11.22. Пример поведения пористого 3D-ТКМ из нитинола в токе крови

В наших работах ранее было показано, что наличие пористости в нитиноле, изменение стехиометрии состава интерметаллидной фазы NiTi даже на несколько процентов или добавление нескольких процентов легирующих элементов (Fe, Mo и т. п.) может существенно сместить интервал прямого и обратного аустенит-мартенситного превращений в сторону как более высоких, так и более низких температур по сравнению с литым интреметаллидом NiTi. Более того, ранее методом определения температурной зависимости удельного электросопротивления было выявлено, что изменение режимов СЛС- и СЛ-плавления также влияет на диапазон температур, при которых в пористых изделиях из нитинола должен наблюдаться ЭПФ. Таким образом, целенаправленное управление совокупностью перечисленных параметров позволяет надеяться на терапевтический эффект при доставке лекарства за счет реализации ЭПФ.

Деформации и напряжения, индуцируемые интерметаллидной фазой NiTi при аустенит-мартенситном превращении, достаточны для создания смещений и появления сил, способствующих выходу лекарств из пор. Основные стадии работы СДЛ связаны с циклически-гистерезисными этапами аустенит-мартенситного превращения в нитиноле при изменении температуры человеческого тела. По нашему мнению, подобные биофлюидные МЭМС могут быть использованы многократно.

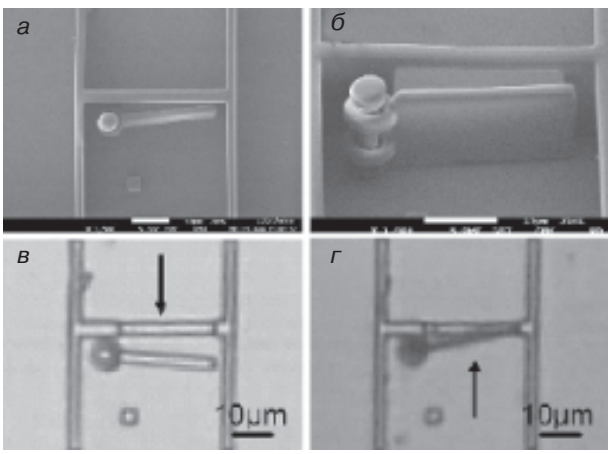


Рис. 11.23. Микронасос, созданный методом двухфотонной стереолитографии

Двухфотонная стереолитография (см. раздел 3.9) может быть использована для различных биологических и медицинских приложений. На рис. 11.23 представлен принцип работы Lab-on-Chip device — устройства микрофлюидики.

11.4. СЛС фильтрующих элементов с контролируемой пористостью и оценка их протоковых характеристик

Область применения пористых мезоструктур, синтезируемых методом СЛС, очень широка:

- элементы газо-гидроразделительных систем;
- дросселирующие элементы;
- гасители колебаний давления и шумоподавляющие устройства;
- пористые топливные элементы и катализаторы;
- системы термостабизизации;
- пористые системы смешения и распыления.

В данном разделе обсудим применимость синтезированных мезоструктур в качестве пористых фильтрующих элементов, которые находят широкое применение в промышленности для тонкой очистки жидкостей и газов. Также они могут быть использованы для фильтрации масел и жидкого топлива, соленых и пресных вод, кислот, щелочей, жидких расплавов металлов от продуктов износа и коррозии оборудования, частиц пыли, продуктов осмоления, песка и окалины. В настоящее время изготавливают многокомпонентные фильтрующие элементы на основе углеродистой или коррозионно-стойкой сталей, металлокерамики, никеля или его сплавов с хромом и молибденом, титана, бронзы, циркония, алюминия, карбидов тугоплавких металлов. Общим недостатком таких фильтров является обусловленное технологией прессования ограничение сравнительно простыми формами (пластинки, трубки, конусы, диски и т. п.).

Еще одним направлением использования пористых структур являются мембранные технологии и создание дозирующих устройств для фармацевтической (медицинской) промышленности. Так, в разделе 11.3 мы предлагаем синтезировать методом СЛС пористый полимерный имплантат (Drug Delivery Device (DDD)) с биоактивным препаратом. При вживлении его в организм пациента осуществляется дозированное растворение препарата. Есть работы, где изучалось влияние условий лазерного синтеза на стойкостные свойства DDD, образование прочной стенки и пористой структуры методом SEM. Метилен синий был использован в качестве насыщаемого реагента, его концентрация по объему фильтра спустя некоторое время (от 1 дня до нескольких недель) определялась с помощью УФ-спектрометра. Проницаемость образцов измеряли методом ртутной порометрии.

Основными параметрами фильтрующих элементов являются тонкость очистки и проницаемость, которые зависят от материала фильтра, фракционного состава и формы исходного порошка, технологии изготовления фильтра. Среди факторов, влияющих на свойства фильтров, следует назвать температуру спекания, выбор (тип) фильтруемой жидкости (газа), давление фильтрации, геометрические параметры фильтра, возможность его регенерации. Для сохранения высокой пористости фильтров при спекании в состав порошковой композиции может добавляться 5...30% наполнителя, который затем можно удалить химически или путем вымывания.

Технология СЛС/П позволяет создавать пористые объемные изделия любой заданной формы, проектируя эту форму и внутреннюю структуру самого объекта на стадии компьютерного моделирования в среде известных графических САПР (AutoCAD, Pro/ENGINEER, Solid Work и т. д.). Технически реализовать синтез пористых функционально-градиентных объемных изделий возможно, проектируя структуру и направление распространения пор на стадии компьютерной обработки. На рис. 11.24 представлены типы связностей и пористые изделия, которые уже удалось реализовать в виде объемных изделий из МПК методом СЛС/П.

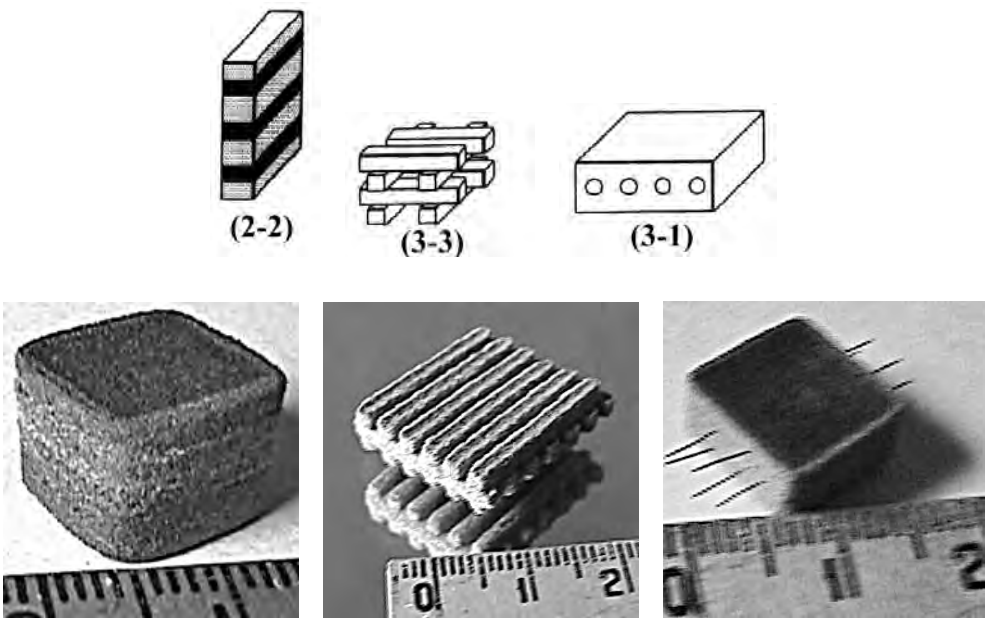


Рис. 11.24. Реализованные типы связности мезоструктуры и внешний вид соответствующих им образцов

Равномерность распределения проницаемости по площади фильтрации зависит от характера распределения пористости в объеме фильтрующего элемента. Сама методология послойного СЛС/П создает условия и указывает пути для управления этим параметром, формируя градиент свойств фильтрующего элемента. Представляется перспективным еще на уровне компьютерной визуализации в среде САПР заранее определять структуру спекаемых объектов и геометрическое расположение материала их компонентов. Это позволит синтезировать объемные изделия, структура и свойства которых изменяются в зависимости не только от направления, но и от координаты в выбранном направлении.

Было предложено применение синтезируемых металлополимерных фильтров вместо металлокерамических фильтров гидрозащиты погруженных электродвигателей установок электроцентробежных насосов (ЭЦН). Основными требованиями, предъявляемыми к фильтрующим элементам, здесь являются низкая проницаемость для жидкости (масло для погружного электрического двигателя, нефть) и хорошая проницаемость для газов.

На рис. 11.25 представлен внешний вид синтезированных методом СЛС фильтрующих элементов, которые были подвергнуты испытаниям на проницаемость П, определяемую по формуле

$$\Pi = \frac{Q}{S\Delta Pt}, \qquad (11.1)$$

где Q — объем жидкости или газа, прошедшего через образец за время t; ΔP — перепад давления на образце; S — площадь поперечного сечения образца.

Рис. 11.25. Фильтрующие элементы, синтезированные методом СЛС/П

Методика испытания состояла в следующем: вначале расчетный объем воздуха пропускали через образец, затем его смачивали исследуемой жидкостью и через столб жидкости вновь пропускали воздух (см. ГОСТ 26450.2–85). Смоченный образец фильтра и вода над фильтром имитировали реальный процесс, происходящий в фильтрах гидрозащиты ЭЦН. В конце опыта измеряли объем масла, пошедшего через фильтр. Перепад давления составлял 700 мм вод. ст. для сухого фильтра и 2...3,5 кгс/см^2 для жидкости и смоченного фильтра. Результаты испытаний представлены в табл. 11.2.

Таблица 11.2. Результаты стендовых испытаний фильтрующих элементов, синтезированных методом СЛС

Образец	Материал	Проницаемость П, м^3/(м^2· мин·атм)	Исследуемая среда	Относительный коэффициент K/H	Коэффициент проницаемости (расчет) K, мм^2	Примечания
1	Латунь + + поликарбонат 6:1	306,46	Воздух	—	16,10	—
		33,25	Воздух*	—	138,20	—
		$0{,}271 \cdot 10^{-3}$	Масло ПЭД	$2{,}17 \cdot 10^{-3}$	1,06	—
2	Латунь + припой + канифоль 60:40:1	375,15	Воздух	—	27,60	—
		36,6	Воздух*	—	99,70	—
		$0{,}99 \cdot 10^{-3}$	Масло ПЭД	$7{,}92 \cdot 10^{-3}$	1,40	—
3**	Никель + полиамид 4:1	—	Воздух	—	—	—
		13,84	Воздух*	—	26,10	—
		$0{,}174 \cdot 10^{-3}$	Масло ПЭД	$1{,}39 \cdot 10^{-3}$	0,72	Пропускал воду
4	Никель + + припой + + канифоль 40:10:1	429,4	Воздух	—	20,90	—
		38,44	Воздух*	—	—	—
		$0{,}15 \cdot 10^{-2}$	Масло ПЭД	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$	1,20	—

* Воздух пропускали через смоченный фильтр.

** У образца № 3 наблюдалось разрушение структуры при давлении 3,5 кгс/см^2.

Наконец, так как метод СЛС/П позволяет смоделировать градиент свойств будущего изделия на стадии компьютерного проектирования, были подготовле-

ны серии образцов (по три на опыт) для измерения проницаемости (пористости) ФГ-фильтров по сравнению с полученными ранее данными проницаемости (пористости) однородных фильтров из МПК. В частности, на рис. 11.26 и 11.27 представлен внешний вид образцов однородных (рис. 11.26) и неоднородных (анизотропных) (рис. 11.27) по высоте фильтрующих элементов.

Рис. 11.26. Общий вид однородных по высоте фильтрующих элементов. *Слева направо*: *1* — размер фракции 63...100 мкм, высота приращения по слоям h = 200 мкм; *2* — 100...160, h = 200 мкм; *3* — 63...100, h = 100 мкм; *4* — <50 мкм, h = 200 мкм

Рис. 11.27. Общий вид неоднородных по высоте фильтрующих элементов. *Слева направо*: *1* — 63...100, h = 200 мкм (9 вертикальных цилиндров-каналов видны как белесые пятна на поверхности); *2* — 63...100 = const, изменялась h = 100, 150, 200, 250, 300, по 3 мм; *3* — изменялся размер <50, 50...63, 63...100, 100...160 мкм по 4 мм, h = 200 мкм = const

Сопоставляя основные показатели композиционного материала (плотность и общую пористость) до и после испытаний на проницаемость, установили, что плотность образцов в процессе испытаний увеличилась на 16,4%, а пористость уменьшилась почти в 2 раза — на 47,6%. Это можно объяснить вероятным образованием трехмерной сетчатой структуры, что подтвердили результаты экстракции на аппаратах Сокслета.

Следует сказать, что традиционным способом континуального аналитического описания пропускной способности пористых сред является закон Дарси (11.1). Так, физический смысл методики ГОСТ 26450.2–85 как раз и сводится к измерению объема (расхода) Q жидкости или газа, прошедших через образец высотой H за единицу времени. Сам закон Дарси является упрощенной формой системы уравнений Навье—Стокса. Заметим, что в рамках континуального подхода практически невозможно аналитически строго описать сложную пористую структуру среды (в данном случае фильтра), а тем более смоделировать градиент свойств (структуры). Зато такой подход позволяет проводить интуитивно прозрачный анализ и получать физически ясные результаты.

Нами был проведен сравнительный численный анализ возможностей «тяжелых» профессиональных пакетов прикладных программ ANSYS и FemLab приме-

нительно к задачам гидродинамики потоков в пористых средах, какими и являются синтезируемые фильтрующие элементы. В указанных профессиональных пакетах пористая среда моделируется с помощью понятия о распределенном дополнительном сопротивлении, создаваемом пористой средой при движении через нее жидкости или газа (рис. 11.28). Это распределенное сопротивление R (или добавочный градиент давления) должен быть задан в каждой точке расчетной среды самим исследователем. Брать его необходимо (и это одна из трудностей) из эксперимента или на основе каких-либо интуитивных соображений. Конечно, ANSYS позволяет смоделировать зерна пористой среды в виде шариков (или других правильных тел) и выполнить расчет обтекания на отдельном шарике произвольной формы. Такой расчет на группе шариков мы планируем сделать в дальнейшем, чтобы выявить основные закономерности течения. Но когда число шариков (зерен) стремится к сотням тысяч, рассчитать течение между всеми шарами становится практически невозможно.

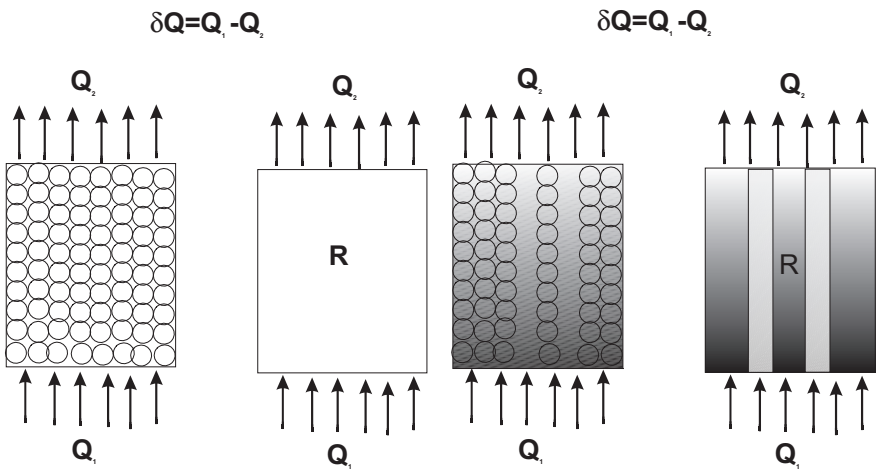


Рис. 11.28. Подходы к моделированию проницаемости пористой среды: а — однородный фильтр (модельная система шариков заменяется распределенным сопротивлением R); *б* — неоднородный фильтр (степень неоднородности обозначена затемнением)

Поэтому система уравнений движения для плоской задачи течения была записана в следующем виде:

$$\frac{\partial P}{\partial x_i} = \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right) - \frac{\partial\left(\rho v_i v_j\right)}{\partial x_j} + R_i, \;\; i, \;\; j = 1, \; 2 \qquad (11.2)$$

и дополнена уравнением неразрывности

$$\frac{\partial\left(\rho v\right)_i}{\partial x_i} = 0, \;\; i = 1, \; 2. \qquad (11.3)$$

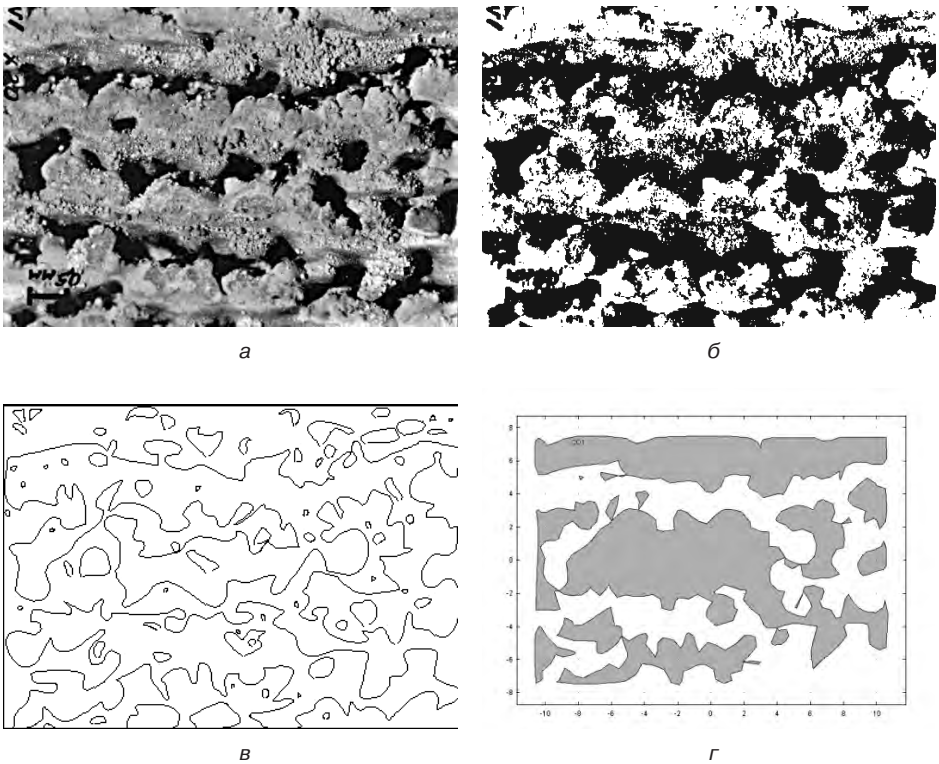
В этой системе уравнений искомыми являются компоненты скоростей потока v_1 и v_2 и давление P. В ANSYS считаются известными размеры расчетной области (геометрические характеристики фильтрующего элемента) и физические свойства

потока: плотность ρ, динамическая вязкость μ и сила тяжести *g*. На границе расчетной области задается известный из экспериментов перепад давления *Q*.

Пакет FemLab v. 3.2 (COMSOL AB) является конечно-элементным расширением пакета MATLAB и отличается рядом уникальных возможностей. Можно самостоятельно аналитически задать вид уравнения или систему уравнений, можно комбинировать уравнения из различных разделов физики (multi physic). Наконец, любые краевые условия и параметры задачи (уравнения) можно задавать функционально или параметрически, используя все возможности пакета MATLAB.

Поэтому, записав уравнения движения (11.2) и (11.3) в системе FemLab, можно пытаться моделировать распределенное сопротивление R_i. Более того, функционально можно задать вязкость μ, привнося тем самым в расчет элементы турбулентности. То есть считать, что эффективная вязкость $\mu_{eff} = \mu + \mu_r$ складывается из кинематической и динамической (турбулентной) составляющих. Этот подход известен как ($k - \varepsilon$)-приближение.

Следующим этапом моделирования была предложенная оригинальная графорасчетная методика. Смысл ее сводится к следующему. Не пытаться моделировать структуру фильтрующего элемента в виде набора простейших частиц (шариков, цилиндров и пр.) или вычленять из опыта параметр, описывающий сопротивление среды течению жидкости или газа. На рис. 11.29 на примере СЛС пористой кера-



а *б*

в *г*

Рис. 11.29. Графо-расчетная методика: *а* — PCX-файл, 256 цветов, пример полутонового изображения сечения керамики после ЛВ; *б* — операция удаления цвета, монохромный режим; *в* — конвертация изображения в векторную графику; *г* — графическое представление расчетной области — среда FemLab

мики рассмотрена предлагаемая процедура. Необходимо взять фото шлифа (поперечное сечение) пористой структуры (рис. 11.29, *а*, увеличение × 20, шкала 0,5 мм), обработать полученное изображение макроструктуры (рис. 11.29, *б*–*г*, операции выполняются средствами графических пакетов), трансформировав данные о микроструктуре сечения в векторный формат. Считать файл векторной графики средствами ANSYS или FemLab. Важно подчеркнуть, что такой подход решает проблемы адекватности графического описания расчетной области и реальной пористой среды (среда берется из эксперимента). Более того, теперь структура пор в принципе может быть любой — однородной или анизотропной, задача введения распределенного сопротивления и его определения полностью отпадает. На базе данной методики была разработана рабочая программа расчетов для определения протоковых характеристик фильтрующих элементов, как однородных (изотропных), так и анизотропных, для фильтров цилиндрической формы. Пример процедуры преобразования в CAD-файл для расчетов в FemLab для реальных фильтров цилиндрической формы, синтезированных методом СЛС, представлен на рис. 11.30. С этого момента проблема практически решена средствами стандартной подпрограммы, имеющейся в пакете FemLab (см. пример файла процедуры pore.fl).

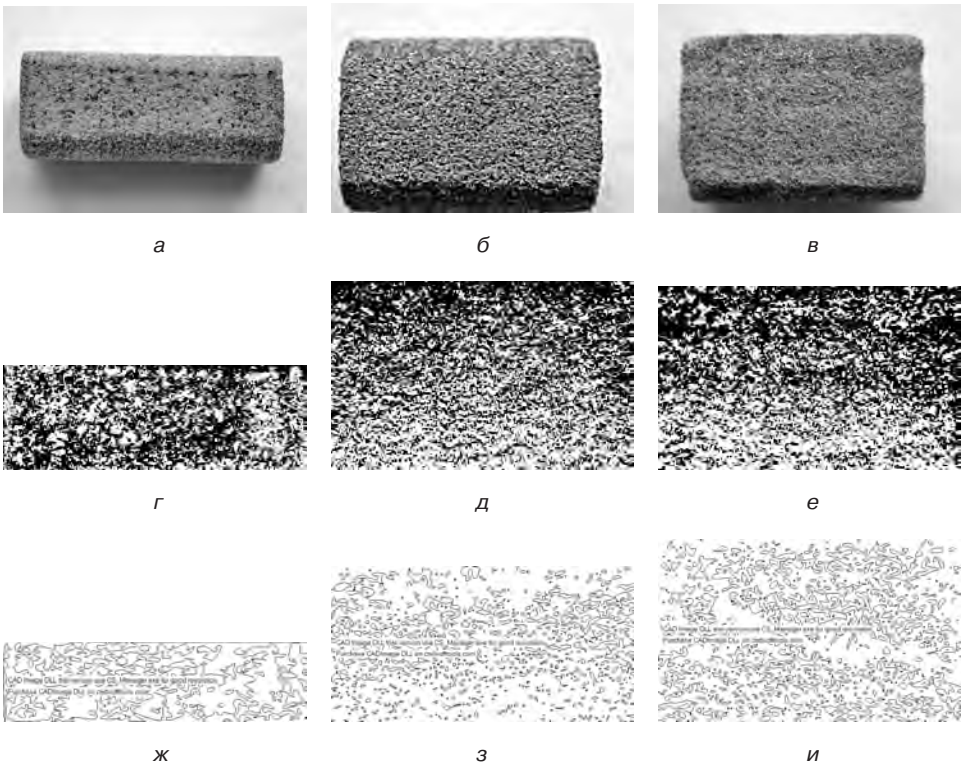
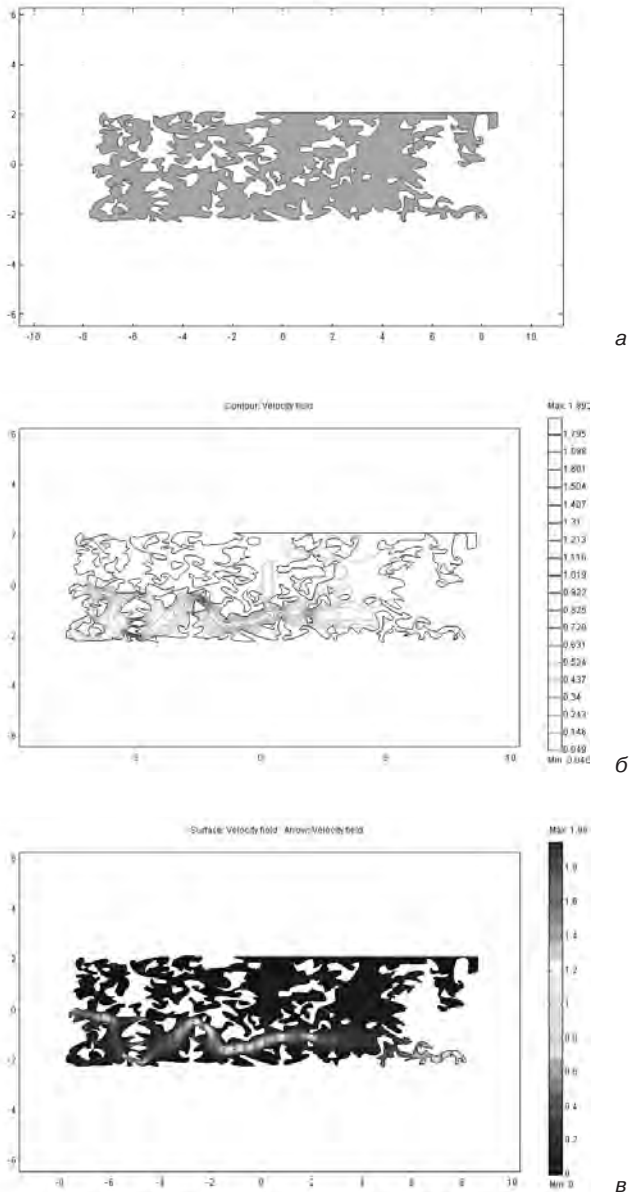


Рис. 11.30. Схема преобразования полутонового рисунка внутреннего сечения фильтра в векторный формат представления данных: *а* — однородный по высоте фильтр из МПК Ni + ПА = 4:1; *б* — анизотропный по высоте фильтр из МПК латунь + ПК = 6:1; *в* — анизотропный по направлениям фильтр из МПК латунь + ПК = 6:1; *а* — *в* — внешний вид пористой поверхности сечения фильтра; *г*—*е* — преобразование в монохромный режим средствами Corel Trace; *ж* — *и* — преобразование в векторный формат средствами Corel Trace



а

б

в

Рис. 11.31. Результаты расчета стандартной подпрограммы в среде FemLab — pore.fl: *а* — графическое представление расчетной области; *б* — схема течений по системе пор в данном сечении; *в* — перепад давлений между входом и выходом фильтра по данному сечению

Фактически на рис. 11.31, *а—в* приведен результат расчета для одного из внутренних сечений фильтра, геометрические параметры которого известны, как и местоположение данного сечения. Здесь было взято сечение фильтра из МПК Ni + ПА = = 4:1, изображенное на рис. 11.30, *а*, *г*, *ж*.

Далее следует суммировать (интегрировать) протоковые характеристики по всем сечениям фильтра, что позволит определить общий расход и выполнить сравнение с имеющимися у нас экспериментальными данными по этим фильтрам (см. табл. 11.2).

В связи с упоминавшимся ранее развитием мембранных технологий в биологии, химии, фармацевтике и других областях синтезируемые методом СЛС фильтрующие элементы могут быть дополнены комплексом каталитических характеристик. Отметим, что в связи с активным развитием нанотехнологий этот вопрос особенно актуален. Мы проводили работы по исследованию действия ЛИ на каталитическую активность ряда катализаторов с целью последующего внедрения их в пористые мезоструктуры, синтезируемые методом СЛС.

11.5. СЛС металлополимерных композиций с функциональными нановключениями для MEMS-приложений

Важно уметь точно моделировать не только структурную геометрию MEMS, но и его основные конститутивные особенности и поведенческие модели. По введенной классификации для MEMS-Nano-EMS как мезоуровня разработки и моделирования (см. раздел 11.1) можно назвать следующие перспективные направления их использования.

- В автомобильной промышленности это сенсоры для срабатывания подушки безопасности, устройства позиционирования систем регистрации, датчики управления, боковые ограничители, которые применяются для автоматизации измерений модуля Юнга, остаточных напряжений, эффектов демпфирования, диагностики двигателей внутреннего сгорания.
- Медицинский рынок является другим большим сегментом, где биосовместимые MEMS-NEMS используются в одноразовых сенсорах кровяного давления, имплантатах, устройствах для хирургического наблюдения за ходом операции, микрокатетерах и устройствах для инвазивной диагностики, системах микродиспергации, устройствах контроля над загрязнением и/или управлением потоками воздуха, воды, крови и т. п.

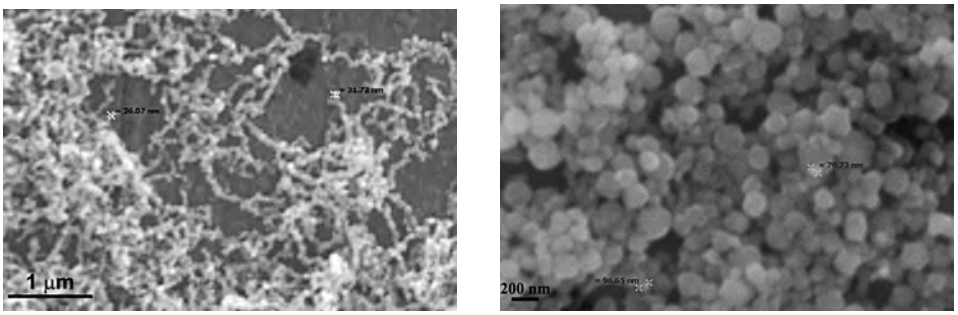
Стабильные наночастицы представляют собой интересный класс неорганических материалов, которые при использовании в MEMS способны произвести революцию в нанокатализе, перспективны в качестве проводящего и магнитного материала, применяются в медицине, водородной энергетике. С уменьшением размеров частиц от микро- до нано- растет удельная площадь поверхности, а следовательно, и химическая активность наночастиц.

Спекание — это термически активируемый процесс, который должен сопровождаться коагуляцией наночастиц в более крупные, микрометровые конгломераты. Поэтому спекание в смеси с полимером представляется более оптимальным, так как температуры для спекания полимеров заведомо ниже температур, при которых наночастицы металлов (Ni, Ti, Al, Cu, Fe) начнут активно объединяться. Это утверждение верно даже с учетом того, что у наночастиц температура плавления (температура спекания) ниже, чем у более крупных образований того же материала. Есть предположения, что концы макромолекул полимера за счет сродства с нанониклем могут образовывать связи, что делает такой полимер еще более привлекатель-

ным для каталитических приложений. Обволакивание наночастиц никеля слоем полимера может изменить гидрофобность пористой структуры фильтра и обеспечить его коллоидную стабильность. Стабилизировать наночастицы в полимерной матрице также представляется интересным, потому что это позволяет определенным образом заранее распределить наночастицы по структуре пор полимера, защитить их от нежелательного окисления и даже пытаться так выстраивать функциональные и градиентные структуры.

Использование СЛС как инструмента для создания функционально-градиентных структур с нановключениями в виде частиц никеля и/или меди представляется вполне закономерным шагом. Фактически так можно реализовать парадигму «снизу вверх» (down-top) синтеза интеллектуальных нанообъектов (NEMS devices). Ранее была показана возможность лазерного спекания функционально-градиентных фильтров из металлополимерных порошковых композиций. Рассматривалась возможность управления каталитической активностью никельсодержащих соединений за счет лазерного воздействия. В данном разделе обсуждаются возможность послойного спекания пористых MEMS (например, фильтрующих элементов) из порошка поликарбоната с добавкой наночастиц никеля и/или меди и их приложения.

Наночастицы никеля и меди (рис. 11.32) были получены в лабораторных условиях в ИСМПМ[1] РАН левитационно-струйным методом. Дисперсность наночастиц Ni была такой: *1* — 27,8 нм; *2* — 32,2 нм; *3* — 119 нм; *4* — 184 нм. Измеренное содержание никеля и удельная поверхность оказались такими: *1* — 86,6%, 25,1 м^2/г; *2* — 11,2%, 26,9 м^2/г; *3* — 94,2%, 5,73 м^2/г; *4* — 98,3%, 3,68 м^2/г. Размер частиц Cu следующий: *1* — 76...100 нм; *2* — 90...120 нм. Измеренное содержание меди и удельная поверхность: *1* — 96,8%, 3,4 м^2/г; *2* — 98,2%, 2,7 м^2/г.



а *б*

Рис. 11.32. СЭМ исходных наночастиц: *а* — никель (средний размер частиц 26...32 нм); *б* — Cu (средний размер частиц 70...96 нм)

В качестве связующего был использован термостабилизированный ПК марки ЛЭТ-7,0 (размер фракции 20...40 мкм). Следующие металлополимерные композиции (МПК) были приготовлены как смесь Ni + ПК в пропорции 1:1 и 1:2, а смесь Cu + ПК — 1:9, 1:4, 3:7. Для меди подобные смеси были приготовлены и с микрочастицами (~50 мкм) для сравнения результатов спекания.

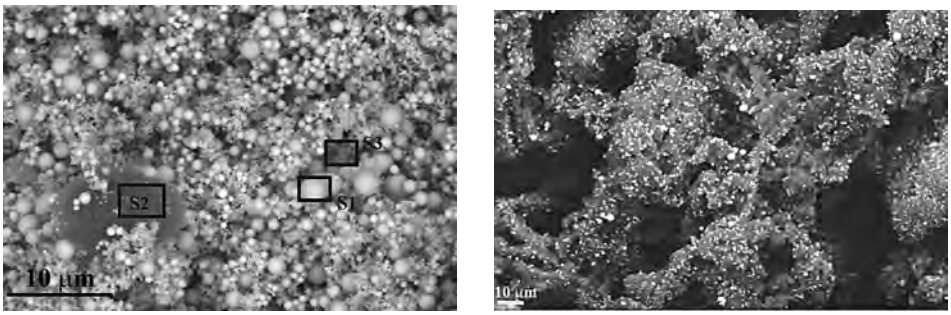
Непрерывный YAG:Nd^{+3}-лазер был использован для СЛС. Мощность P лазерного излучения варьировала в пределах 4...10 Вт. Расфокусированный лазерный луч

[1] Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения.

(уход от фокуса ~25 мм) сканировал поверхность порошковой смеси по меандру, спекание осуществлялось в защитной среде аргона и/или на воздухе.

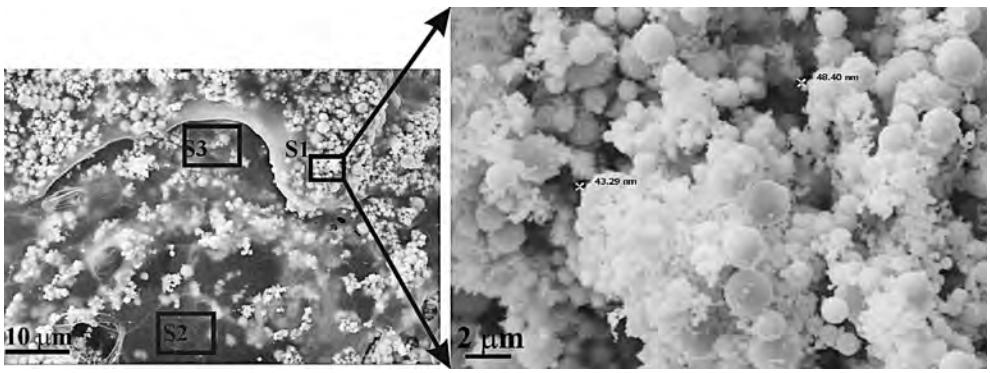
Сначала порошковые смеси спекались в свободно насыпанном объеме, заведомо большем по высоте, чем толщина отдельно спеченного слоя. При лазерном синтезе 3D-фильтров или мембран полимерная матрица играет роль связующего для металлических частиц Ni и/или Cu, гарантируя свободный доступ по оставшимся порам к их реакционной поверхности и, собственно, течение фильтруемой среды. Поэтому принципиальным вопросом исследования было выяснение оптимальных режимов СЛС, при которых достигается максимальная прочность изделия без существенной рекристаллизации и коагуляции наночастиц Ni и Cu.

На рис. 11.33 и 11.34 показана внутренняя микроструктура материала после жидкофазного лазерного спекания в смесях ПК-Ni и ПК-Cu. Область S2 на рис. 11.33, *а* и 11.34, *а* соответствует чистому ПК, а области S1 и S3 — включениям наночастиц Ni в полимерную матрицу. Наноструктура частиц Cu (рис. 11.33, *б*) также ясно видна на фоне более темной полимерной основы. Оценки показывают, что средний размер частиц включений ~43...48 нм (рис. 11.34, *б*), что несколько больше их исходных размеров (27...32 нм).



а *б*

Рис. 11.33. СЭМ спеченных поверхностей для смесей: *а* — ПК-Ni (1:1), *P* = 6 Вт, *v* = 17,4 см/с; *б* — ПК-Cu (9:1), *P* = 6,2 Вт, *v* = 40 см/с

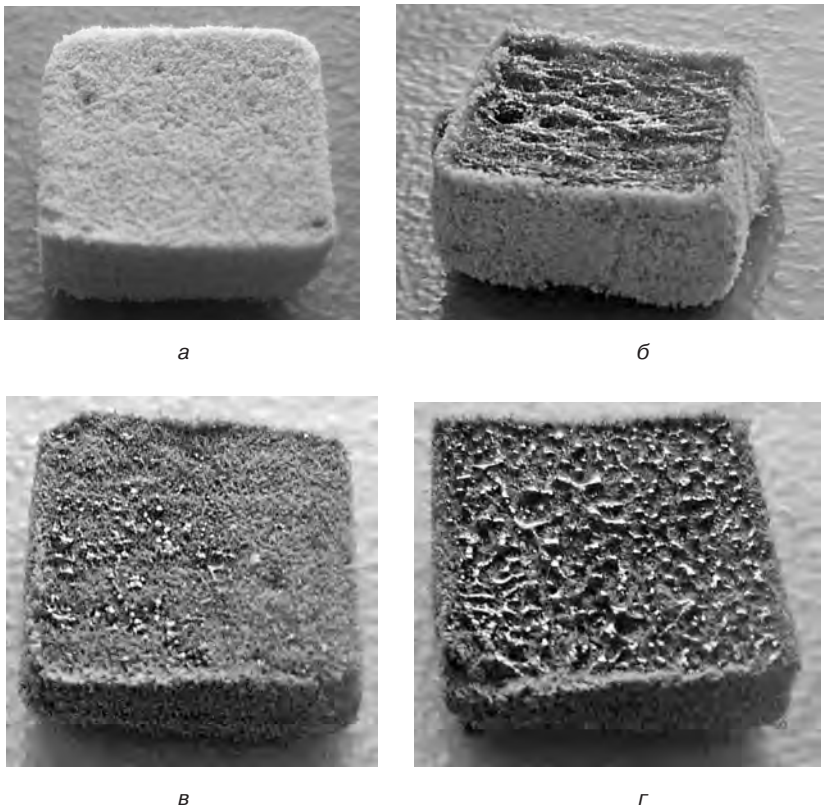


а *б*

Рис. 11.34. СЭМ поверхности смеси ПК-Ni (2:1) после СЛС: *а* — режим *P* = 6 Вт, *v* = 17,4 см/с; *б* — область S1 при большом увеличении

Таким образом, СЭМ подтверждает, что при СЛС имеет место обволакивание наночастиц металла полимером (рис. 11.34, *а*, области S2 и S3). ПК как бы растворяет в себе частицы Ni и/или Cu, которые, возможно, взаимодействуют с выделяемым из ПК углеродом либо остаются на его поверхности.

Рисунок 11.35 показывает результаты объемного СЛС в смеси ПК-Cu. Как видим, при использовании нанодобавок меди (рис. 11.35 *в*, *г*) получаются более прочные образцы без потери формы изделия, чем в смесях с добавками микрометрового размера. Тем не менее в обоих случаях наблюдалась нежелательная коагуляция частиц меди на поверхности, которая более значительна для режимов с большим лазерным энерговкладом.



а *б*

в *г*

Рис. 11.35. СЛС 3D-изделий: *а*, *в* — ПК-Cu (9:1); *б*, *г* — ПК-Cu (4:1). Режимы ЛИ: *а* — P = 6,2 Вт, v = 13,3 мм/с; *б* — P = 8,7 Вт, v = 40 мм/с; *в* — P = 8,7 Вт, v = 80 мм/с; *г* — P = 8,7 Вт, v = 160 мм/с

РСА после СЛС в системе ПК-Ni (рис. 11.36, кривые *1* и *2*) позволяет выявить пики интенсивности (111, 200, 220), типичные для кристаллического Ni с гранецентрированной *Fm*3*m* -решеткой. Некоторые пики (100, 112) соответствуют метастабильному оксиду Ni_2O_3. Не было выявлено пиков другого оксида никеля — NiO, карбидов и нитридов никеля. Изменение параметров ЛИ и состава порошковой композиции не влияет на вид дифракционных максимумов (рис. 11.36, кривые *1* и *2*). Инкапсулированный в ПК никель предохраняет его от нежелательных окисления, цементации и нитридации.

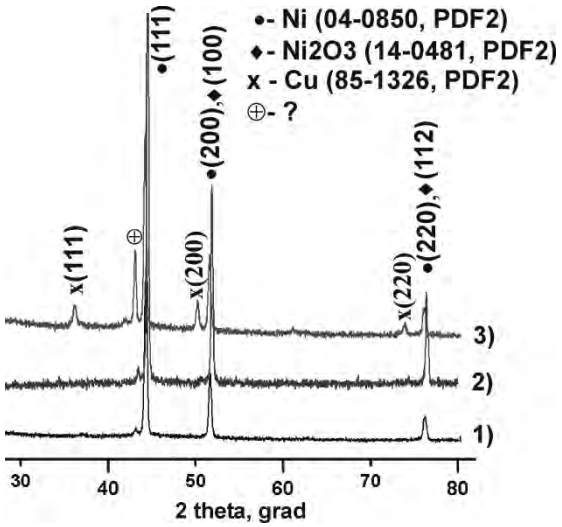


Рис. 11.36. РСА спеченных смесей ПК-Ni: *1* — 1:1; *2* — 2:1: *P* = 6 Вт, *v* = 17,4 см/с. Кривая *3* — ПК с наночастицами Cu и Ni (режим ЛИ см. на рис. 11.40)

Рисунок 11.37, *а—з* представляет результаты РСА в смеси ПК-Cu. Две кривые (рис. 11.37, *а* и *б*) показывают состав смеси до ЛВ. Чистый ПК и исходная смесь ПК + наноCu имеют два ясных пика 2 ~ 25 и 29°, которые мы связываем с кристалличностью полимера (отмечено овалом на рис. 11.37). После СЛС эти пики исчезают. Обе серии — микроCu + ПК (рис. 11.37, *в—д*) и наноCu + ПК (рис. 11.37, *е—з*) — имеют схожие пики Cu и CuO кубической и моноклинной фаз соответственно.

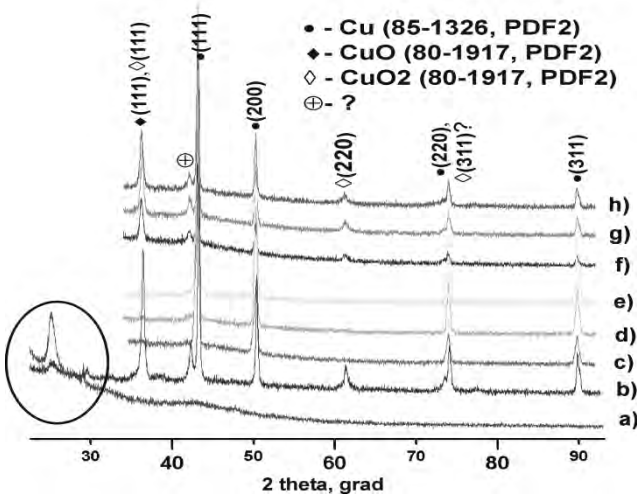


Рис. 11.37. РСА спеченных смесей ПК-Cu: *а* — чистый ПК без ЛИ; *б* — ПК + наноCu (7:3) без ЛИ; *в — д* — ПК + микроCu; *е — з* — ПК + наноCu; *в* — ПК-Cu (9:1), *P* = 6,2 Вт, *v* = 13,3 см/с; *г* — *P* = 11 Вт, *v* = 20 см/с (1:4); *д* — *P* = 6,2 Вт, *v* = 20 см/с (3:7); *е* — *P* = 11 Вт, *v* = 20 см/с (1:4); *ж* — *P* = 8,7 Вт, *v* = 160 см/с (1:4); *з* — *P* = 6,2 Вт, *v* = 80 см/с (3:7)

Смесь ПК + наноCu (1:9): *1* — темные точки — стадия нагрева; *2* — белые точки —стадия охлаждения. Режим ЛВ — $P = 6{,}2$ Вт, $v = 40$ мм/с.

Однако в случае ПК + наноCu образуется оксид CuO_2 — это пики (220, 311?), который отсутствует в смесях с микрометровыми добавками меди. Следует отметить также наличие не разрешенного нами пика (отмечен знаком ⊕), который остается и после ЛВ. Возможно, его наличие обусловлено аморфной фазой наноCu.

Температурная зависимость электрофизических свойств 3D-образцов, синтезированных методом СЛС в смеси ПК + наноCu, показана на рис. 11.38 и 11.39. Видно, что эта зависимость имеет характерный гистерезисный вид. На стадии нагрева диэлектрическая проницаемость растет (рис. 11.38), а на стадии охлаждения она сохраняется в течение некоторого времени и далее падает до исходного уровня. Тангенс угла диэлектрических потерь ведет себя более специфично (рис. 11.39). В обоих случаях на стадии нагрева значения измеряемых величин ниже, чем на стадии охлаждения. Из литературы известно, что такое поведение полимерного композита, содержащего наноCu, связано с термической стимуляцией процесса перераспределения зарядов на границе «полимер — наноCu» и образованием метастабильных состояний.

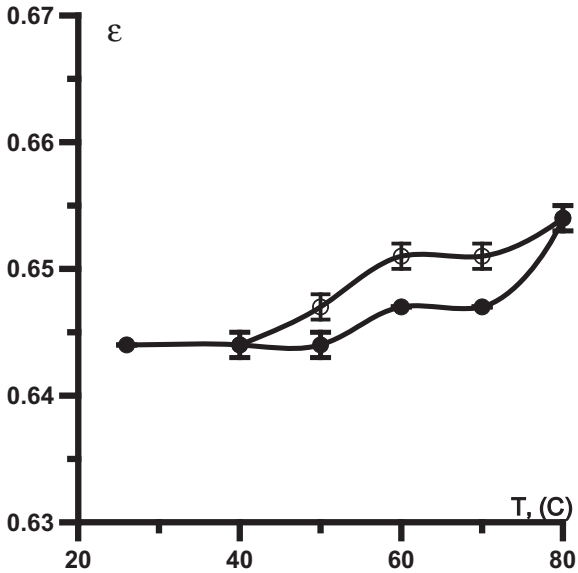


Рис. 11.38. Температурная зависимость реальной части диэлектрической проницаемости

Ранее было показано, что гигантское магнитное сопротивление в чередующихся слоях никеля и кобальта напрямую зависит от их относительного состава. Значение магнитного сопротивления также определяется соотношением и толщиной ферромагнитных и немагнитных слоев и увеличивается с ростом числа слоев. Процесс СЛС позволяет создавать чередующиеся слои ферромагнитных (Ni, Fe) и немагнитных (Cu, ПК) слоев естественным образом (рис. 11.40). На стадии компьютерного моделирования будущие магнитные свойства могут быть численно рассчитаны и оптимизированы, то есть созданы интеллектуальные NEMS-устройства. Нами также была показана возможность использования при СЛС с нановключениями

полиамида. Другой интересной возможностью управления свойствами 3D-изделий является СЛС во внешнем магнитном поле. Это позволяет упорядочить микроструктуру изделия и является дополнительной степенью свободы по управлению магнитными свойствами будущих MEMS.

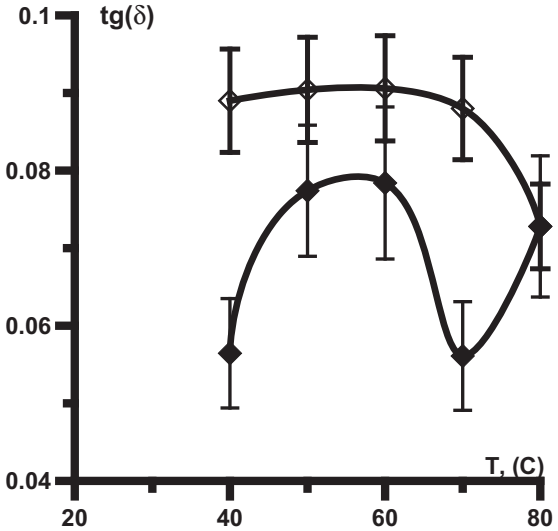


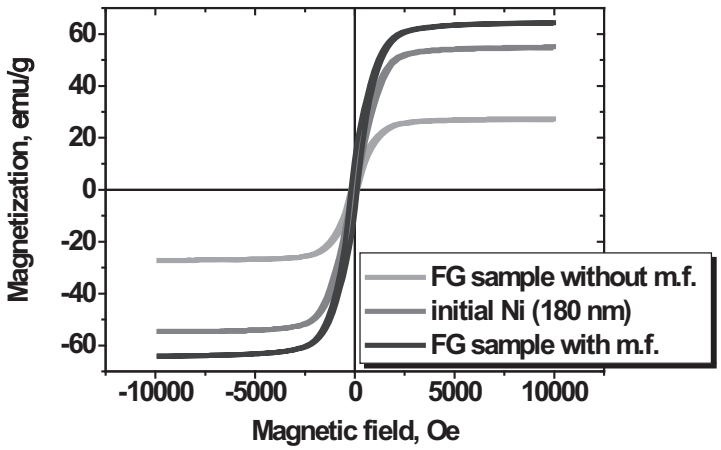
Рис. 11.39. Температурная зависимость тангенса диэлектрических потерь

а *б* *в*

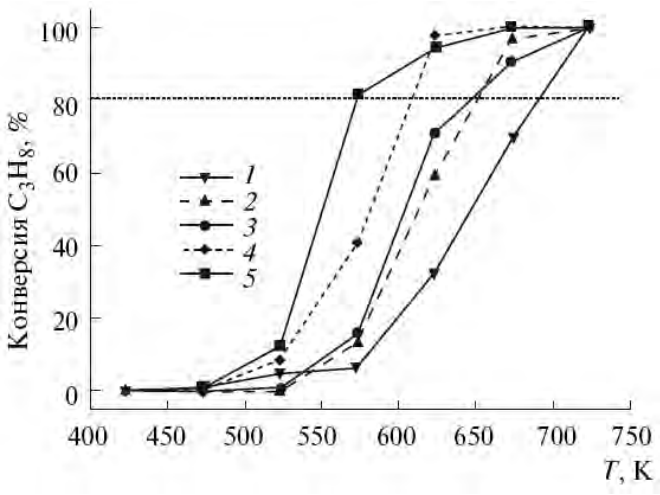
Рис. 11.40. Внешний вид 3D-функционально-градиентных образцов (площадь поверхности 10 × 10 мм, высота 4 мм): а — Ni-ПК (1:2) — 5 слоев сверху, внизу Cu-ПК (1:4) — 5 слоев; *б* — Ni-ПК (1:2) — по 3 слоя, потом Cu-ПК (1:9) — 3 слоя и т. д.; *в* — Cu-ПК (1:4), затем Ni-ПК (1:2) — чередование через слой

Влияние внешнего магнитного поля на структуру спеченных образцов показано на рис. 11.40, *а*. Петля гистерезиса для этого образца (рис. 11.41, *а*), где значения намагничивания нормализованы в соответствии с содержанием Ni в образце. Магнитное насыщение в магнитном поле больше, чем для порошка исходных наночастиц, и это может быть обусловлено эффектом самоочистки металла при СЛС. В отсутствие внешнего магнитного поля наблюдается дополнительное окисление частиц наноNi. Поэтому следует отметить рост намагничивания (σ_s = 21,44 против 9,08 emu/g и σ_r — 4,14 против 1,75 emu/g) в спеченных образцах при нали-

чии внешнего магнитного поля по сравнению с ситуацией, когда его нет (светло-серая кривая). Другими словами, СЛС-процесс позволяет создавать 3D-образцы с контролируемым намагничиванием и разным соотношением Ni/NiO-фаз, что будет определять магнитные и/или каталитические свойства этих МЕМС-изделий. Для образцов с чередованием слоев (рис. 11.41, *б*) значительное изменение намагничивания фиксировалось при комнатной температуре. Кривые черного цвета на рис. 11.41, *б* показывают значение намагничивания при криогенной температуре 87 К. Интересно также дополнительное окисление наночастиц при СЛС на воздухе при различном содержании Ni в составе образцов (16, 13,8 и 8,9% Ni в образцах на рис. 11.40, *б*, *в* и *г* соответственно).



а



б

Рис. 11.41. Петля гистерезиса: *а* — для ФГ СЛС-изделий, спеченных во внешнем магнитном поле (см. рис. 11.40, *а*) и без него, при размере частиц наноNi 180 нм; *б* — для ФГ СЛС-изделий (см. рис. 11.40, *б*–*в* (размер частиц Ni ~27 нм) при криогенных температурах. Значения намагничивания нормализованы в соответствии с процентным содержанием Ni

Оксиды меди обладают каталитическими свойствами во многих химических процессах окисления-восстановления, в том числе в таком важном для практики процессе, как окисление CO до CO_2, но при температурах выше комнатной (примерно с 200 °C). Каталитическая активность CuO в окислении CO является структурночувствительным свойством. Ранее было показано, что полученный осаждением из солей меди (II) наноразмерный CuO проявляет каталитическую активность при окислении CO до CO_2 при температурах, близких к комнатной. В табл. 11.3 представлены данные о константах реакции гидрирования бензола с использованием в качестве катализатора $k_{ср}$. В промышленности гидрирование бензола на металлических катализаторах (палладий, платина, никель) проводят в интервалах температур 200...400 °C.

Таблица 11.3. Результаты скорости гидрирования бензола

Наименование МПК	T, K, °C		
	373 (100)	383 (110)	393 (120)
	$k_{ср}$, мин$^{-1}$		
Хроматон	$0{,}81 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1{,}27 \cdot 10^{-3}$
$Cu_{(<50\ мкм)}$ + ПК (1:4), режим ЛВ: P = 8 Вт, v = 10 см/с	$1{,}16 \cdot 10^{-3}$	$1{,}93 \cdot 10^{-3}$	$2{,}032 \cdot 10^{-3}$
$Cu_{(96\ нм)}$ + ПК (1:9), режим ЛВ: P = 9 Вт, v = 80 см/с	$7{,}45 \cdot 10^{-3}$	$9{,}2 \cdot 10^{-3}$	$11{,}11 \cdot 10^{-3}$
$Cu_{(96\ нм)}$ + ПК (1:9) (без ЛВ)	$14{,}94 \cdot 10^{-3}$	$15{,}64 \cdot 10^{-3}$	$17{,}9 \cdot 10^{-3}$

Основные выводы здесь таковы: микрочастицы меди (<50 мкм) в составе МПК-изделий не проявляют каталитических свойств, наночастицы меди их показывают, причем не обработанный лазером вариант лучше, чем после ЛВ. Наконец, константы скорости реакции гидрирования бензола в присутствии катализатора уже при 90 °C были в 2,5 раза больше, чем в его отсутствие.

Результаты исследований каталитической активности в процессах окисления CO и пропана для катализаторов с различными наночастицами представлены на рис. 11.42. Из полученных данных можно сделать вывод о том, что с увеличением удельной поверхности активность нанокатализаторов возрастает. Температура 80%-ной конверсии CO близка к 470 K для наилучшего образца катализатора, содержащего сильно окисленные частицы диаметром 15 нм, для самых крупных частиц — 510 K (рис. 11.42, *а*). Конверсия пропана, равная 80%, достигается только при 570 K, причем для более крупных частиц (рис. 11.42, *б*). Каталитическая активность в последней реакции сильнее зависит от содержания в частице оксида никеля, чем от размера наночастиц (удельной поверхности) таких образцов.

Однако у ПК (марки ЛЭТ-7,0) температура деструкции ~400...450 °C. Поэтому использование СЛС изделий при температуре выше этой будет проблематично. Для окончательного выяснения роли размерного и фазового факторов действия нанокатализаторов необходимы дальнейшие исследования, в том числе в области каталитического синтеза.

Таким образом, лазерный синтез объемных изделий был реализован методом СЛС металлополимерных порошковых композиций. Инкапсулированные наночастицы меди и/или никеля однородно распределились по объему поликарбонатной матрицы. СЭМ и РСА подтвердили образование покрытых полимером частиц Ni и Cu. Впервые было показано, что при лазерном нагреве не наблюдается коагуляции наночастиц при СЛС.

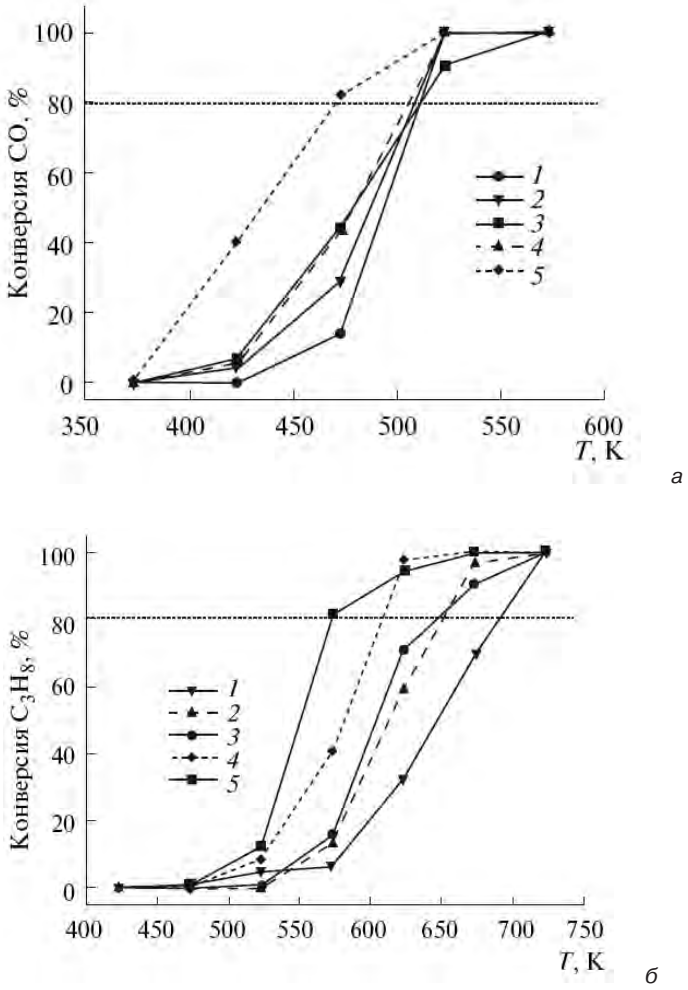


Рис. 11.42. Температурные зависимости окисления: *а* — оксида углерода в присутствии катализатора из различных наночастиц, нм: *1* — 108, *2* — 24, *3* — 120, *4* — 30, *5* — 15; *б* — пропана в присутствии катализатора из различных наночастиц, нм: *1* — 24, *2* — 30, *3* — 108, *4* — 15, *5* — 120

Показана принципиальная возможность СЛС функционально-градиентных структур с чередованием металлополимерных слоев с добавками наноNi и/или наноCu. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь в смеси ПК + наноCu была измерена. Выявлен гистерезисный характер этой зависимости, что полезно для MEMS-NEMS-приложений. Высокая пористость в сочетании с химической активностью делают такие 3D-структуры привлекательными для использования в катализе, системах доставки лекарств, водородной энергетике. Наряду с никелем или медью возможно использование в МПК алюминия, железа, титана или кобальта.

Список литературы

К главе 1

1. Шишковский И. В. Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий. М.: Физматлит, 2009. 424 с.
2. Wohlers T. et al. Wohlers Report 2005. Rapid Prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report, 2005.
3. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб.: Питер, 2004. 560 с.
4. Chua C. K., Leong K. F., Lim C.-S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3nd Edition. World Scientific Pub Co, 2010.
5. Программно-аппаратный комплекс по селективному лазерному спеканию / В. В. Багров, Н. А. Климов, С. В. Нефедов и др. // Изв. Самарского научного центра РАН. 2003. Т. 5, № 1 (9). С. 55–64.
6. Петров А. Л., Шишковский И. В. Лазерный синтез объемных изделий из порошковых композиций // Сборник, посвященный 25-летию Самарского филиала ФИАН / РИИС ФИАН. 2005. С. 148–161.
7. Программно-аппаратная реализация виртуального стенда для диагностики контролируемого лазерным излучением СВС в порошковых композициях / И. В. Шишковский, Ю. Г. Морозов // Изв. Самарского научного центра РАН. 2004. Т. 6, № 1. С. 81–87.
8. Температурное исследование условий инициирования и протекания экзотермической реакции горения порошковых композиций, строго контролируемое в пятне лазерного излучения / И. В. Шишковский, В. И. Щербаков, Ю. Г. Морозов // Изв. Самарского научного центра РАН. 2006. Т. 8, № 2. С. 410–418.
9. Surface laser sintering of exothermal powder compositions: The thermal and SEM/EDX study / I. V. Shishkovsky, V. I. Scherbakov, Yu. G. Morozov, at al. // Journal of thermal analysis and calorimetry. 2008. Vol. 91 (2). P. 427–436.
10. Шишковский И. В. Использование селективного лазерного спекания в технологии литья по выплавляемым формам // Литейное производство. 1999. № 7. С. 19–23.
11. Shishkovsky I. V. Synthesis of functional gradient parts via RP methods // Rapid Prototyping Journal. 2001. Vol. 7, № 4. P. 207–211.
12. Roadmap for Additive Manufacturing. Identifying the Future of Freeform Processing / Published by The University of Texas at Austin. Laboratory for Freeform Fabrication. Advanced Manufacturing Center. 2009.
13. Rapid Prototyping: A Tool for Product Development / Gibson I // Computer-Aided Design & Applications. 2005. Vol. 2, № 6. P. 785–793.

К главе 2

1. Смирнов А. А. Лекции по САПР. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 89 с.
2. Standards for the rapid prototyping industry / K. K. Jurrens // Rapid Prototyping Journal. 1999. Vol. 5. Issue 4. P. 169–178.
3. Шишковский И. В. Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий. М.: Физматлит, 2009. 424 с.
4. К. Ли. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб.: Питер, 2004. 560 с.
5. STL-формат для быстрого прототипирования. Ч. 1 и 2 / A. Dean // CAD/CAM/CAE Observer. 2005. Т. 23–24, № 5–6. P. 64–69.
6. Determination of fabricating orientation and packing in SLS process / S. M. Hur, K. H. Choi, S. H. Lee, P. K. Chang, at al. // Journal of Material Processing Technology. 2001.Vol. 112. P. 236–243.
7. Materialise's Interactive Medical Image Control System (MIMICS). Materialise Software. Leuven, Belgium. 2007 // www.materialise.com.
8. Yadroitsev I. Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. LAP Lambert Academic Publishing AG & Co KG, 2009. 280 p.
9. Dragoi M. V. Advances in CAD/CAM Technologies // New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems. InTech, Published, 2010.

К главе 3

1. Material increase manufacturing by rapid prototyping techniques / J.P. Kruth // Annals of the CIRP 40. 1991. P. 603–614.
2. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справ. / Под ред. Н. Н. Рыкалина и др. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
3. Improvement of the UV curing process for the laser lithography technique / J. Y. Fuh, Y. S. Choo, A. Y. Nee at al. // Materials and Design. 1995. № 16. P. 23–32.
4. Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures / Zhang X., Jiang X. N., Sun C. // Sensors and Actuators Vol. 77. 1999. P. 149–156.
5. Numerical analysis of stereolithography processes using the finite element method / G. B. M. Cervera, G. Lombera, E. Onate // Rapid Prototyping Journal. 1995. Vol. 1, Issue 2. P. 13–23.
6. Investigation into the influence of material and process on part distortion / B. Wiedemann, K. H. Dusel, J. Eschl // Rapid Prototyping Journal. 1995. Vol. 1, Issue 3. P. 17–22.
7. Rapid freeze prototyping technique in bio-plotters for tissue scaffold fabrication / C. B. Pham, K. F. Leong, T. C. Lim, K. S. Chian, at al. // Rapid Prototyping Journal. 2008. Vol. 14, Issue 4. P. 246–253.
8. CAD/CAE/CAM integration for increasing the accuracy of mask rapid prototyping system / Y.-M. Huang, H.-Y. Lan // Computers in Industry. 2005. Vol. 56. P. 442–456.
9. Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic organic hybrid materials for applications in photonics / J. Serbin, A. Egbert, A. Ostendorf, et al. // Opt. Lett. 2003. Vol.28. P. 301.

К главе 4

1. Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing. Springer. 2010. January. 498 p.
2. Шишковский И. В. Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий. М.: Физматлит, 2009. 424 с.
3. Tool profile and tool path calculation for free-form thick-layered fabrication / I. Horvath, J. S. M. Vergeest, J. J. Broek, at al. // Computer-Aided Design. 1998. Vol. 30, № 14. P. 1097–1110.
4. Development of a curved layer LOM process for monolithic ceramics and ceramic matrix composites / D. A. Klosterman, R. P. Chartoff, N. R. Osborne, at al. // Rapid Prototyping Journal. 1999. Vol. 5, Issue 2. P. 61–71.
5. Kai C. C., Fai L. K., Sing. L. C. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 2nd Edition. World Scientific Pub Co. 2003.
6. Piezoelectric ceramics and composites via rapid prototyping techniques / A. Bandyopadhyay, R. K. Panda, T. F. McNulty, at al. // Rapid Prototyping Journal. 1998. Vol. 4, № 1. P. 37–49.
7. Fabrication of Piezoelectric Ceramic/Polymer Composite Transducers Using Fused Deposition of Ceramics / G. M. Lous, I. A. Cornejo, T. F. McNulty, at al. // J. Am. Ceram. Soc. 2000. Vol. 83, № 1. P. 124–128.
8. Novel piezoelectric ceramics and composites for sensor and actuator applications / A. Safari // Mat. Res. Innovat. 1999. Vol. 2. P. 263–269.
9. Modeling of multiple pore ceramic materials fabricated via fused deposition process / A. Hattiangadi, A. Bandyopadhyay // Scripta mater. 2000. Vol. 42. P. 581–588.
10. Automated Fabrication of Complex Molded Parts Using Mold SDM / A. G. Cooper, S. Kang, J. W. Kietzman, at al. // Materials & Design. Vol. 20, N 2/3. 1999. P. 83–89.
11. Mechanical and Thermal Expansion Behavior of Laser Deposited Metal Matrix Composites of Invar and TiC / X. C. Li, J. Stampfl, F. B. Prinz // Materials Science and Engineering A. 2000. Vol. 282, № 1–2. P. 86–90.
12. Thermal behavior of a metal embedded fiber Bragg grating sensor / X. C. Li, F. Prinz, J. Seim // Smart Mater. Struct. 2001. Vol. 10. P. 575–579.
13. Schilp H. Fabrication of turbine compressor shaft assembly for micro gas turbine engine. PhD thesis / The Stanford University. 2000. 151 p.
14. N. Gershenfeld. FAB. The Coming Revolution on Your Desktop — from Personal Computers to Personal Fabrication. Basic Books, 2005.

К главе 5

1. Шишковский И. В. Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий. М.: Физматлит, 2009. 424 с.
2. Кацнельсон М. Ю., Балаев Г. А. Полимерные материалы: Справ. Л.: Химия, 1982.
3. Гегузин Я. Е. Физика спекания. М.: Наука, 1984. 312 с.
4. Скороход В. В., Солонин С. М. Физико-металлургические основы спекания порошков. М.: Металлургия, 1972. 160 с.
5. Исследование условий СВС интерметаллидов при селективном лазерном спекании порошковой композиции / И. В. Шишковский, А. Г. Макаренко, А. Л. Петров // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 2. С. 59–64.

6. Ивенсен В. А. Кинетика уплотнения металлических порошков при спекании. М.: Металлургия, 1971. 265 с.
7. Model of the primary rearrangement processes at liquid phase sintering and selective laser sintering due to biparticle interactions / L. A. Anestiev, L. Froyen // Journal of Applied Physics. 1999. Vol. 86, № 71. P. 4008–4017.
8. Laser-induced SHS reactions and sintering of their products: Computer-aided prototyping / I. V. Shishkovsky, M. V. Kuznetsov, Yu. G. Morozov, I. P. Parkin, at al. // J. Mater. Chem. 2004. Vol. 14. P. 3444–3448.
9. Программно-аппаратная реализация виртуального стенда для диагностики контролируемого лазерным излучением СВС в порошковых композициях / Ю. Г. Морозов, И. В. Шишковский // Изв. Самарского научного центра РАН. 2004. Т. 6, № 1. С. 81–87.
10. Surface laser sintering of exothermal powder compositions: The thermal and SEM/EDX study / I. V. Shishkovsky, V. I. Scherbakov, Yu. G. Morozov, at al. // Journal of thermal analysis and calorimetry. 2008. Vol. 91 (2). P. 427–436.
11. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. Laser Cladding. CRS Press. 267 p.
12. Иванов А. П., Лойко В. А., Дик В. П. Распространение света в плотноупакованных дисперсных средах. Минск: Наука и техника, 1988.
13. Физические основы процесса селективного лазерного спекания металл-полимерных порошковых композиций / А. М. Иванова, С. П. Котова, Н. Л. Куприянов и др. // Квантовая электроника. 1998. Т. 28, № 5. С. 433–438.
14. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справ. / Под ред. Н. Н. Рыкалина и др. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
15. Gladush G. G., Smurov I. Physics of Laser Materials Processing. Theory and Experiment. Springer Series in Materials Science, 2011. 534 p.
16. Yadroitsev I. Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. LAP Lambert Academic Publishing AG & Co KG, 2009. 280 p.
17. Gershenfeld N. FAB; The Coming Revolution on Your Desktop. Personal Computers to Personal Fabrication. Basic Books, 2005.
18. Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing. Springer. 2010. January. 498 p.
19. Ludovico A. D., Angelastro A., Campanelli S. L. Experimental Analysis of the Direct Laser Metal Deposition Process // New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems. InTech Published, 2010. P. 254–272.

К главе 6

1. Dahotre N. B., Harimkar S. P. Laser Fabrication and Machining of Materials. Springer Science, 2008.
2. Shishkovsky I. V. High Speed Laser Assisted Surface Modification // High Performance Coatings for Automotive and Aerospace Industries. Nova Science Publishers, 2010. P. 109–126.
3. Shishkovsky I. V. Chemical and physical vapor deposition methods for nanocoatings // Nanocoatings and Ultra Thin-Films: Technologies and applications. Woodhead Publishing Limited, 2011. P. 57–77.

4. Pique A. Rapid Prototyping of Embedded Microelectronics by Laser Direct-Write // Rapid Prototyping Technology — Principles and Functional Requirements. InTech Published, 2011. P. 247–272.
5. Вейко В. П. Лазерная микрообработка: Учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. 110 с.
6. Barry C. F. Tooling for Injection Molded Micro and Nanoscale Features Micro Features. Center for High-Rate Nanomanufacturing, University of Massachusetts Lowell // http://eprints.internano.org/526/1/Molding_for_NanoSummit3.pdf
7. Rapid Manufacturing for small parts and MEMS, MicroTEC Gesellschaft f r Mikrotechnologie mbH // www.microTEC-D.com.
8. Лазерная обработка материалов в электронике / М. Петров // Компоненты и технологии. 2002. № 8. С. 164–170.

К главам 7 и 8

1. Перспективы быстрого прототипирования для изготовления моделей и литейных форм / И. В. Шишковский // Литейное производство. 2010. № 6.
2. Milovanovic J., Stojkovic M., Trajanovic M. Metal Laser Sintering for Rapid Tooling in Application to Tyre Tread Pattern Mould // Sintering — Methods and Products. InTech Published, 2012. P. 74–90.
3. Технология приборостроения: Учеб. пособие / В. А. Валетов, Ю. П. Кузьмин, А. А. Орлова, С. Д. Третьяков. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. 336 с.
4. Reverse Engineering: An Industrial Perspective. Springer, 2007.

К главе 9

1. Шишковский И. В. Лазерный синтез функциональных мезоструктур и объемных изделий. М.: Физматлит, 2009. 424 с.
2. L pez F. J., Alvarez R. C. Development of Sintered MCrAlY Alloys for Aeronautical Applications // Sintering — Methods and Products. InTech Published, 2012. P. 47–72.
3. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб.: Питер, 2004. 560 с.
4. Shishkovsky I. V. Laser controlled intermetallics synthesis during surface cladding / J. Lawrence et al. (Eds.) Laser Surface Engineering. Processes and applications. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Elsevier Science & Technology, 2015. P. 237-286.
5. Shishkovsky I. V. et al. Comparison of additive technologies for gradient aerospace part fabrication from nickel based superalloys / M. Aliofkhazraei (Ed.) Superalloys, InTech. Publ. 2015.

К главе 10

1. Bio-Materials and Prototyping Applications in Medicine. Springer, 2007.
2. Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications: Reverse Engineering, Software Conversion and Rapid Prototyping. Wiley, 2006.
3. Materialise's Interactive Medical Image Control System (MIMICS). Materialise Software. Leuven, 2007 // www.materialise.com.
4. www.simplant.ru.

5. Laser synthesis and comparative testing of a three-dimensional porous matrix of titanium and titanium nickelide as a repository for stem cells / I. V. Shishkovskii, Yu. G. Morozov, S. V. Fokeev, L. T. Volova // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2012. Vol. 50, № 9/10. P. 606–618.
6. MMSSC chemotaxis near porous surface of biocompatible NiTi scaffolds synthesized by SLS / I. V. Shishkovsky, S. E. Volchkov, O. V. Tumina // MRS Online Proceedings Library. 2012. Vol. 1417 // mrsf11-1417-kk03-15. doi:10.1557/opl.2012.764.
7. Shishkovsky I. V. Laser-assisted fabrication of tissue engineering scaffolds from titanium alloys // J. Lawrence et al. (Eds.) Laser Surface Engineering. Processes and applications. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Elsevier Science & Technology, 2015. P. 603-651.

К главе 11

1. Дизайн системы доставки лекарств из пористого нитинола методом СЛС / И. В. Шишковский // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 9. С. 39–43.
2. Lebel L. L., Therriault D. Multiscale Manufacturing of Three-Dimensional Polymer-Based Nanocomposite Structures, Advances // Diverse Industrial Applications of Nanocomposites. InTech Published, 2011. P. 410–428.
3. Zhou W. Y., Wang M., Cheung W. L. Selective Laser Sintered Poly(L-Lactide)/ Carbonated Hydroxyapatite Nanocomposite Scaffolds: A Bottom-up Approach // Advances in Diverse Industrial Applications of Nanocomposites. InTech Published, 2011. P. 203–230.
4. Взаимосвязь лазерного дизайна — микроструктуры — свойств пористых 3D-матриксов для клеточной инженерии и систем доставки лекарств / И. В. Шишковский // Изв. Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13, № 4. С. 45–53.
5. Основы селективного лазерного спекания металл-полимерных композиций с нановключениями: парадигма создания MEMS / И. В. Шишковский // Перспективные материалы. 2011. Спец. выпуск (11). Апрель. С. 11–18.

Приложение А
Список производителей установок для БП и материалов для систем БП

Axson NA. 1611 Hults Drive, Eaton Rapids, Michigan 48827, USA. URL: www.axson.com.

BJB Enterprises, Inc. 14791 Franklin Avenue, Tustin, California 92780, USA. URL: www.bjbenterprises.com.

Bolson Materials Corporation. 10612-105 Avenue Edmonton, Alberta T5H 0L2, Canada. URL: www.bolsonmaterials.com.

DSM Somos. 2 Penn's Way, Suite 401, New Castle, Delaware 19720, USA. URL: www.dsmsomos.com.

Freeman Manufacturing & Supply Company. 1101 Moore Road, Avon, Ohio 44011, USA. URL: www.freemansupply.com.

Innovative Polymers. 208 Kuntz Street, St. Johns, Michigan 48879, USA. URL: www.thomasregister.com/olc/innovative-polymers/.

Sibco, Inc. 1100 Hilton Street, Ferndale, Michigan 48220, USA. URL: www.sibcoinc.com.

Tuxedo Photopolymers, American Dye Source, Inc. 555 Morgan Boulevard, Baie D'Urfe, Quebec H9X 3T6, Canada. URL: www.tuxedoresin.com.

Huntsman (formerly Vantico Inc., Renshape Solutions). 4917 Dawn Avenue, East Lansing, Michigan 48823, USA. URL: www.huntsman.com/pu/.

3D Systems, Inc. (SLA, MJM and SLS). Самая распространенная технология быстрого прототипирования — стереолитография. Разработка, продажа, распространение стереолитографов и 3D-принтеров. Сеть филиалов во многих странах мира.

26081 Avenue Hall Valencia, CA 91355 USA. US toll free phone: 888-337-9786. Phone: 661-295-5600. Fax: 661-294-8406. E-mail: moreinfo@3dsystems.com. URL: http://www.3dsystems.com.

Contact Person: Lee Dockstader. E-mail: DockstadaL@3DSystems.com.

Helisys, Inc. Производитель систем быстрого прототипирования, основанных на LOM-технологии. Helisys, Inc., Torrance, CA, USA. URL: http://www.helisys.com.

Stratasys, Inc. Технология FDM, системы FDM, 3D-принтеры Genius.

Stratasys, Inc., Minneapolis, MN, USA. 14950 Martin Drive, Eden Prairie MN 55344-2020 USA. Toll Free: 888-480-3548. Phone: 1-952-937-3000. Fax: 1-952-937-0070. E-mail: info@stratasys.com. URL: http://www.stratasys.com.

Z Corporation. Производство и распространение Z402 — 3D-принтеров для построения прототипов деталей для визуализации на стадии концептуального проектирования. Zcorporation, SommerVille, USA. 20 North Avenue Burlington, MA 01803 USA. Phone: 781-852-5005. Fax: 781-852-5100. E-mail: sales@zcorp.com. URL: http://www.zcorp.com.

DTM Corporation. Оборудование (Sinterstation) и технология SLS. DTM Corporation, Austin, Texas, USA. URL: http://www.dtm-corp.com.

Cubital. Оборудование (Solider) и технология SGC. Cubital America, Inc., Troy, MI, USA. 12 Habonim St. Ramat-Gan 52462 Israel Phone: 972-3-751-7945 Fax: 972-3-575-0421. E-mail: cubital@cubital.com. Contact Person: Mr Eitan. URL: http://www.cubital.com.

MultiStation. Компания, проектирующая новые изделия с применением CAD/CAM- и Rapid Prototyping-технологий. Multistation SAS, Франция. URL: http://www.multistation.com.

Objet Geometrics Ltd. Израильская компания, разработавшая новый 3D-принтер Objet Quadra ink-jet printer. Objet Geometrics Ltd., Rehovot, Израиль. Holzman St., Science Park, P.O. Box 2496, Rehovot 76124, Israel. URL: http://www.objet.co.il.

EOS GmbH. Electro Optical Systems — лидирующий европейский производитель систем быстрого прототипирования для технологии SLS: EOSINT P (Plastics), EOSINT M (Metal), EOSINT S. Проектирование новых изделий с применением CAD/CAM-систем. Оптимальное решение для всех стадий проектирования, от концептуального дизайна до готового изделия. EOS GmbH, Munchen, Германия. URL: http://www.eos-gmbh.de. Robert-Striling-Ring 1 D-82152 Krailing Germany Phone: 49-0-89-893-36-0 (with effect from 16.09.2002). E-mail: info@eos-gmbh.de.

Concepts GmbH. CAD/CAM-сервис, проектирование изделий, построение прототипов. Concept Laser GmbH An der Zeil 8, 96215 Lichtenfels, Germany. URL: www.concept-laser.de.

Aeromet Corporation (LasForm). 7623 Anagram Drive Eden Prairie, Minnesota 55344. USA Phone: 952-974-1800. Fax: 952-974-1801. E-mail: info@aerometcorp.com. URL: www.aerometcorp.com.

Arcam AB (EBM). Kroksl tts Fabriker 30 SE-431 37 M lndal Sweden. Phone: 46-31-710-32-00. Fax: 46-31-710-32-01. E-mail: info@arcam.com. URL: www.arcam.com.

Autostrade Co. Ltd. (E-DARTS). 13-54 Ueno-machi Oita-City Oita 087-0832 Japan. Phone: 81-97-543-1491. Fax: 81-97-545-3910. E-mail: rps@autostrade.co.jp. URL: www.autostrade.co.jp.

Contact Person: Toshiyuki Akamine (President of Autostrade Co. Ltd.). E-mail: akamine@autostrade.co.jp.

Beijing Yinhua Rapid Prototypes Making and Mould Technology Co. Ltd. (SSM, MEM and M-RPM). Department of Mechanical Engineering Tsinghua University Beijing 100084 China. Phone: 8610-6278-2988. Fax: 8610-6278-5718. URL: www.geocities.com/CollegePark/Lab/8600/clrfprod.htm.

Contact Person: Professor Yan Xu Tao. E-mail: yanxt@mail.tsinghua.edu.cn.

CAM-LEM Inc. (CL 100). 1768 E. 25th St. Cleveland, OH 44114 USA. Phone: 216-391-7750. Fax: 216-579-9225. E-mail: info@camlem.com. URL: www.camlem.com/.

Contact Person: Brian B. Mathewson (Engineer). E-mail: bbm@camlem.com.

CMET Inc. (SOUP)/Teijin Seiki (Soliform). Kamata Tsukimura Bldg. 5-15-8, Kamata, Ohtaku Tokyo 144-0052 Japan Phone: 81-3-3739-6611. Fax: 81-3-3739-6680. URL: www.cmet.co.jp.

Contact Person: Hagiwara, Tsuneo Ph. D. (Executive Director). E-mail: hagi@cmet.co.jp.

Cubic Technologies Inc. (LOM). 1000E. Domiguez Street Carsion, California 90746-3608 USA. Tel: 310-965-0006. Fax: 310-965-0141. E-mail: info@CubicTechnologies.com. URL: www.cubictechnologies.com.

D-MEC Ltd. (SCS). JSR Building 2-11-24 Tsukiji Chuo-ku, Tokyo 104-0045 Japan. Phone: 81-3-5565-6661. Fax: 81-3-5565-6641. E-mail: tokyo@d-mec.co.jp. URL: www.d-mec.co.jp.

Ennex Corporation (Offset Fabbers). 11465 Washington Place Los Angeles, California 90066 USA. Phone: 310-397-1314. Fax: 310-397-8539. E-mail: fabbers@Ennex.com. URL: www.Ennex.com.

Extrude Hone (ProMetal). 1 Industry Blvd. P.O. Box 1000 Irwin, PA. 15642 USA. Toll Free: 1-800-367-1109. Phone: 724-863-5900. Fax: 724-863-8759. E-mail: exhone@extrudehone.com. URL: www.extrudehone.com/.

Fraunhofer-Gessellschaft (MJS). Leonrodstra e 54 D-80636 M nchen Germany. Phone: 49-0-89/12-05-01. Fax: 49-0-89/12-05-317. E-mail: info@fraunhofer.de. URL: www.fraunhofer.de.

Fraunhofer Representative Office Singapore Dr. Dagmar Martin-Vosshage 15 Beach Rd., #05-08 Beach Centre Singapore 18 96 77. Phone: 65-6338-4355. Fax: 65-6338-9456. E-mail: fhgsin@singnet.com.sg. URL: www.fhg.de/fhgsin-e.html.

Generis GmbH (GS). Am Mittleren Moos 15 D-86167 Augsburg Germany. Phone: 49-0-821/74-83-100. Fax: 49-0-821/74-83-111. E-mail: info@generis.de. URL: www.generis.de or www.generis-systems.com.

Kira Corporation Ltd. (PLT). Tomiyoshishinden, Kira-Cho Hazu-gun, Aichi Japan. Phone: 81-563-32-1161. Fax: 81-563-32-3241. E-mail: info@kiracorp.co.jp. URL: www.kiracorp.co.jp.

Meiko Co. Ltd. 732 Shimoimai, Futaba-cho, Kitakoma-gun Yamanashi-ken, 407-0105 Japan. Phone: 81-551-28-5111. Fax: 81-551-28-5121. E-mail: info@meiko-inc.co.jp. URL: www.meiko-inc.co.jp (only in Japanese).

Contact Person: Takuya Akiyama (System Department). E-mail: t-akiyama@meiko-inc.co.jp.

Optomec Inc. (LENS). 3911 Singer Blvd. NE Albuquerque, NM 87109 USA. Phone: 505-761-8250. Fax: 505-761-6638. E-mail: customerservice@optomec.com. URL: www.optomec.com.

Contact Person: Theresa Chavez-Romero (Customer Service Manager) E-mail: tchavez-romero@optomec.com.

POM Inc. (DMD). 2350 Pontiac Road Auburn Hills, Michigan 48326 USA. Phone: 248-409-7900. Fax: 248-409-7901. E-mail: info@pom.net. URL: www.pom.net/.

Phenix Systems. ZAC du Brezet EST, 29, rue Georges Besse, 63100 Clermont-Ferrand, France. URL: www.phenix-systems.com.

Solidscape Inc. (ModelMaker and PatternMaster). 316 Daniel Webster Highway Merrimack, New Hampshire 03054-4115 USA. Phone: 603-429-9700. Fax: 603-424-1850. E-mail: precision@solid-scape.com. URL: www.solid-scape.com.

Soligen Inc. (DSPC). 19408 Londelius St. Northridge, CA 91324 USA. Phone: 818-718-1221. Fax: 818-718-0760. URL: www.soligen.com.

Contact Person: Gary Kanegis (Vice President, Sales) E-mail: gary@soligen.com.

Teijin Seiki (Soliform). (See CMET).

Therics Inc. (TheriForm). 115 Campus Drive Princeton, NJ 08540 USA. Phone: 609-514-7200. Fax: 609-514-7219. E-mail: info@therics.com. URL: www.therics.com/.

Приложение Б
Список российских сервисных бюро и исследовательских центров по БП

Сведения взяты с сайта автора http://www.fian.smr.ru/rp/link-r.html.

Институт проблем лазерных и информационных технологий (ИПЛИТ) Российской академии наук. ИПЛИТ выпускает отечественный лазерный стереолитограф ЛС-250, работающий по SLA-технологии, который предназначен для автоматизированного проектирования и послойного изготовления моделей, деталей, узлов и конструкций практически любых формы и сложности из жидких композиций, полимеризующихся под действием лазерного излучения. На интернет-странице этого института вы найдете предложения о сотрудничестве и список выполняемых им работ.

ГНЦ РФ «НАМИ». Центр быстрого прототипирования. Технологические процессы — SLS, MJM, SLA. Установки — Vanguard, ThermoJet, Viper si2 фирмы 3D Systems, Inc. Материалы — полистирол, полиамид, металлы, керамика, воск, смола. Услуги:

- Создание компьютерных 3D-моделей на основе 2D-чертежей.
- Изготовление прототипов любой сложности из различных материалов.
- Изготовление опытных партий изделий.
- Создание моделей для ювелирной работы и художественного литья.
- Различные виды литья металлов и полимеров.
- Объемное сканирование и создание точных физических копий.
- Изготовление пресс-форм.

ОАО «НИИТавтопром». Используя RP-технологию, занимаются лазерной стереолитографией, имеют SLA-установку, а также осуществляют:

- экспресс-изготовление конструкторских прототипов и мастер-моделей сложной формы;
- изготовление электрод-инструментов для быстрой гальванопластики;
- изготовление оснастки;
- оказание помощи в приобретении, внедрении и обслуживании систем быстрого прототипирования на основе метода лазерной стереолитографии.

МАТИ — Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского. Лаборатория быстрого прототипирования, промышленного сканирования и моделирования. Технологический процесс — MJM. Установка InVision si2 фирмы 3D Systems, Inc., материал — пластик.

ESPPO, группа компаний. Направления работ: промышленный дизайн, конструирование, изготовление пресс-форм, литье пластмасс. В настоящий момент клиентам предлагают:

- MJM-технологию (Multi-Jet Modeling — многоструйное моделирование). Материал — Acrylic Photopolymer. Точность до 328 × 328 × 606 dpi (по осям *X*, *Y* и *Z*). Примерная стоимость $2,8 за 1 см^3;
- PolyJet-технологию (photopolymer jetting — послойное струйное моделирование). Материал — Photopolymer. Точность до 600 × 300 × 1600 dpi (по осям *X*, *Y* и *Z*). Примерная стоимость: $3 за 1 см^3;
- стереолитографию (SLA — Stereo Lithography Apparatus). Материал — смола. Точность до 0,1 мм (по осям *X* и *Y*), до 0,05 мм (по *Z*). Примерная стоимость $3,3 за 1 см^3;
- технологию SLS (Selective Laser Sintering — лазерное спекание порошковых материалов). Используются порошковый пластик, металл, нейлон и керамика. Точность до 0,1 мм. Примерная стоимость $3,5 за 1 см^3;
- технологию FDM (Fused Deposition Manufacturing — послойное наложение расплавленной полимерной нити). Материал — ABS, поликарбонат, воск. Точность до 0,1 мм. Примерная стоимость $3,0 за 1 см^3.

Уфимское моторостроительное производственное объединение (УМПО). Инженерный центр быстрого прототипирования. Технологии — SLA, SLS.

АО «АвтоВАЗ», Генеральный департамент развития, Исследовательский центр. Комплекс технологического оборудования имеет много позиций и включает установку для послойного лазерного моделирования типа SLA-500, 750; SLS и LOM, комплект оборудования для изготовления эластичных форм и отливки в них деталей.

Техцентр Solidscape. Компания «Ника-Рус» является официальным дистрибьютором в России и странах СНГ программного обеспечения для дизайнеров JewelCad, Rhinoceros, Flamingo, TechGems, 3DESIGN-jewel V3. Обучение персонала. Установки T66 Benchtop, T612 Benchtop фирмы Solidscape, Inc. Технологический процесс — DodJet, материал — воск.

Компания Cybercom Ltd (ООО «НИЦ кибернетики и автоматики»). Официальная продажа и обслуживание 3D-принтеров фирмы ZCorporation. Также предлагают услуги по прототипированию. Установка — цветной 3D-принтер Spectrum Z510 фирмы ZCorporation, материал — крахмал, пропитанный смолой гипс.

S&P International. Установка SnP-XXX фирмы S&P International, материалы — полистирол, полиамид.

АРТИ, завод асбесторезинотехнических изделий. Установка Dimension фирмы Stratasys, Inc. и Solver материал — ABS-пластик.

Инженерный центр ОАО «Красный пролетарий» — «Компактные интеллектуальные технологии». Установка FDM3000 фирмы Stratasys, Inc., материал — ABS-пластик. Возможности инженерного центра довольно широки и включают:

- проектирование 2D- и 3D-моделей изделий различной степени сложности;
- быстрое прототипирование;
- автоматизированную разработку управляющих программ для станков с ЧПУ;
- различные виды механообработки: точение, фрезерование, растачивание, шлифование, протягивание, лазерный раскрой и др.;
- работы в области промышленного дизайна, литья в силиконовые и металлополимерные формы.

Компания «Документ-Бизнес» — Jetcom. Установки Dimension 768 SST и Dimension 1200 SST фирмы Graphtec (Stratasys, Inc.), материал — ABS-пластик. Есть установка Eden 250 фирмы Objet Geometries Ltd.

ЗАО «Промышленные компьютерные технологии» (Industrial Computer Technologies). Быстрое изготовление прототипов (получение прототипов и промышленных образцов, оперативное модифицирование и тиражирование на опытную партию). Изготовление оснастки (штампы и пресс-формы для массового и опытного производства, контрольные измерительные приспособления, технологические модели, элементы горячеканальных систем). Производство деталей (производство стеклопластиковых деталей методом контактного формования и вакуум-формовкой, производство малогабаритных термопласт-деталей методом инжекционного литья).

PUMORI-Engineering. Быстрое прототипирование на оборудовании Helisys и Z Corporation.

ФГУП «Калугаприбор». Предприятие принимает заказы на изготовление оснастки и малых серий пластмассовых деталей методами быстрого моделирования. Изготовление прототипов и образцов любой сложности, включая функциональные, по технологиям SLA, SLS.

ООО «Инженерная фирма АБ Универсал». Струйный 3D-принтер фирмы Objet Geometries Ltd. (Израиль).

SOLVER. Инжиниринговая консалтинговая фирма, 3D-моделирование по технологии FDM.

Центр объемных технологий «ИНВЕНТ». Услуги быстрого прототипирования, мелкосерийное литье в силикон, полноцветной трехмерной печати. Используется оборудование фирм ZCorp, 3D Systems: Viper™ Pro SLA® system и Sinterstation® HiQ™ SLS® System.

Межкафедральная лаборатория быстрого прототипирования СГАУ (Самара). Установка лазерной стереолитографии ЛС-250, производства ИПЛИТ РАН. На кафедре «Производство двигателей летательных аппаратов» СГАУ работает лаборатория аддитивных технологий. Используемое оборудование — 3D-принтер Objet EDEN 350, установка для литья в силиконовые формы МТТ С 5/04 и машина для литья металлов SGA 3500.

ФГБУН «Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН», Самарский филиал. 443011, Самара, ул. Ново-Садовая, 221. Лаборатория технологических лазеров — группа по СЛС/П, 3D-лазерной наплавке, Direct metal Deposition, RepRap. E-mail: shiv@fian.smr.ru.

«Лаборатория инновационных аддитивных технологий» (ЛИАТ) в МГТУ «СТАНКИН».

Приложение В
Список программных пакетов для БП

T-FLEX CAD. Система параметрического проектирования и черчения. Основные возможности: параметрическое проектирование и моделирование; проектирование сборок и выполнение сборочных чертежей; полный набор функций создания и редактирования чертежей; пространственное моделирование, базирующееся на технологии ACIS; параметрическое трехмерное твердотельное моделирование; управление чертежами; подготовка данных для систем с ЧПУ; имитация движения конструкции.

Разработчик — «Топ-Системы», Россия. http://www.tflex.com; http://www.topsystems.ru.

bCAD. Программный проект, направленный на разработку новых технологий 3D-графики и САПР, а также программ для 2D-эскизирования и точного черчения, 3D-моделирования и фотореалистичного тонирования, программная система 3D-моделирования и визуализации для PC. bCAD спроектирован и разработан как универсальное рабочее место проектировщика, позволяющее выполнять широкий спектр работ в сквозном режиме от чертежа к объемной модели и наоборот — от трехмерного представления к плоским проекциям: для исполнения технической документации, соответствующей требованиям стандартов, получения реалистичных изображений, подготовки данных для расчетных систем. Сочетает в себе CAD, 3D-моделирование и фотореалистичную визуализацию.

Разработчик — ProPro Group, Россия. http://www.propro.ru.

КОМПАС. Один из лидирующих российских продуктов. CAD-система, предназначенная для широкого спектра проектно-конструкторских работ, легкая в освоении, удобная в работе и при этом имеющая стоимость, приемлемую для комплексного оснащения российских предприятий, в том числе средних и малых. Позволяет осуществлять двумерное проектирование и конструирование, быструю подготовку и выпуск разнообразной чертежно-конструкторской документации, создание технических текстово-графических документов.

Разработчик — «Аскон», Россия. http://www.ascon.ru/.

CADMECH. Система проектирования деталей и сборочных единиц на базе AutoCAD.

CADMECH Desktop. Трехмерная система проектирования деталей и сборочных единиц на базе Mechanical Desktop.

Разработчик — НПО «Интермех», Беларусь. http://www.intermech.host.ru.

CADRA. Система двумерного проектирования и черчения для машиностроения.

Разработчик — SofTECH, Inc., США. http://www.softech.com.

CADkey. 3D-графический пакет для проектирования, твердотельного, поверхностного и каркасного моделирования, визуализации и документирования простых и сложных деталей и сборочных единиц. 250 000 инсталляций в разных странах.

Разработчик — Baystate Technologies, США. http://www.cadkey.com, http://www.cadkey.de, http://www.cadkey.lv/ http://www.colla.lv.

DesignCAD Pro. Система двумерного и трехмерного проектирования и моделирования для профессиональных конструкторов и проектировщиков.

Разработчик — ViaGrafix, США. http://www.viagrafix.com.

IronCAD. Система автоматизированного проектирования для машиностроения. Обеспечивает двумерное проектирование и трехмерное твердотельное моделирование.

Разработчик — Visionary Design Systems, Inc., США. http://www.ironcad.com.

BlueCAD. 2D/3D CAD-система для работы на персональных компьютерах.

Разработчик — CADWare, Италия. http://www.cadware.it.

Surface Express. Система поверхностного моделирования.

Разработчик — MCS, Inc., США. http://www.mcsaz.com.

RhinoCeros. Распространенная система NURBS-моделирования.

Разработчик — Robert McNeel & Associates, США. http://www.rhino3d.com.

CADdy. По функциональным возможностям система занимает промежуточное положение между системами низкого и высокого уровней. Предназначена для решения комплексных интегрированных технологий от стадии проектирования до стадии производства в таких областях, как архитектура, проектирование промышленных установок, машиностроение, электроника, оборудование зданий (отопление, вентиляция, сантехника, электротехника), инженерные сети и дороги, геодезия, картография.

Разработчик — ZIEGLER-Informatics GmbH, Германия. http://www.caddy.de; http://www.plaza.ch; http://www.caddy.ru.

OmniCAD. Система двумерного проектирования, черчения и трехмерного поверхностного моделирования.

Разработчик — CAMM s.r.l., Италия. http://www.camm.it.

SolidWorks. Мощный машиностроительный CAD-пакет для твердотельного параметрического моделирования сложных деталей и сборок. Система конструирования среднего класса, базирующаяся на параметрическом геометрическом ядре Parasolid. Создана для использования на персональных компьютерах под управлением операционных систем Windows 95 и Windows NT.

Разработчик — SolidWorks Corporation, США. http://www.solidworks.com; http://www.uscad.com; http://www.delcam.ru; http://www.ascon.ru; http://www.intersed.kiev.ua/; www.delcam-ural.ru; http://www.colla.lv; http://www.solidworks.lv/.

SolidEdge. Принципиально новая система автоматизированного конструирования, предназначенная для разработки сборочных узлов и геометрического моделирования отдельных деталей. Solid Edge разработана специально для конструирования изделий машиностроения. Является системой среднего уровня, которая обеспечивает эффективное объектно-ориентированное параметрическое моделирование в среде Windows. Базируется на ядре геометрического моделирования Parasolid.

Разработчик — Unigraphics Solutions, США. http://www.ug.eds.com; http://www.cosmos.rcnet.ru; http://www.ugsolutions.ru; http://www.solid-edge.com.

Think3. Система автоматизированного проектирования для машиностроения среднего уровня. Обеспечивает двумерное проектирование, трехмерное поверхностное и твердотельное моделирование, проектирование изделий из листовых материалов, ассоциативность двумерного чертежа с трехмерной моделью, фотореалистичное представление проекта.

Разработчик — thnk3, Inc., США. http://www.think3.com; http://www.dial-eng.spb.ru.

Cimatron. Интегрированная CAD/CAM-система, предоставляющая полный набор средств для конструирования изделий, разработки чертежно-конструкторской документации, инженерного анализа, создания управляющих программ для станков с ЧПУ. Cimatron удовлетворяет запросам и требованиям самого широкого круга пользователей, работает на различных платформах, в том числе персональных компьютерах. Пользователями системы являются около 6000 компаний.

Разработчик — Cimatron Ltd., Израиль. http://www.cimatron.com; http://www.bee-pitron.com.

TEBIS. Развитая CAD/CAM-система. Двумерное проектирование и черчение, трехмерное моделирование.

Разработчик — Tebis AG, Германия. http://www.tebis.de.

VISI — Series. Развитая CAD/CAM-система. Обеспечивает двумерное проектирование и черчение, трехмерное поверхностное и твердотельное моделирование, генерацию программ для станков с ЧПУ, визуализацию обработки детали.

Разработчик — Vero International, Inc., США. http://www.veroint.com; http://www.verosoftware.com.

HELIX Design System. Развитая САПР для двумерного и трехмерного проектирования в машиностроении, дизайне и других отраслях. Позволяет осуществлять двумерное проектирование, трехмерное каркасное, поверхностное и твердотельное моделирование.

Разработчик — MicroCADAM Ltd., Великобритания. http://www.microcadam.co.uk.

Form-Z. Система двумерного проектирования и черчения, трехмерного поверхностного и твердотельного моделирования, визуализации и анимации для профессионального дизайна, визуализации и проектирования.

Разработчик — Autodessys, Inc., США. http://www.formz.com/.

Alias|Wavefront Распространенные программные продукты двумерного и трехмерного эскизирования и черчения, трехмерного поверхностного и твердотельного моделирования, визуализации и анимации для профессионального дизайна и проектирования.

Разработчик — **Alias Systems Corporation**, Канада. http://aliaswavwfront.com.

CoCreate. Серия продуктов для проектирования и управления данными проекта: ME10 — проектирование и черчение; SolidDesigner — твердотельное моделирование и управление данными проекта.

Разработчик — CoCreate Software, Inc., Германия. http://www.cocreate.com.

VX VISION. CAD/CAM/CAE-система среднего уровня.

Разработчик — Varimetrix Corp., Ltd., США. http://www.vx.com.

CADMAX SolidMaster. Система автоматизированного проектирования, обеспечивающая двумерное проектирование, трехмерное поверхностное и твердотельное моделирование.

Разработчик — CADMAX Corp., США. http://www.cadmax.com.

BRAVO. Семейство продуктов для проектирования, подготовки конструкторской документации, подготовки производства и управления проектом в машиностроении. Продукты: Bravo XL, Bravo Sheet Metal Fabricator, Bravo NCG, Bravo Frame.

Разработчик — Applicon, Inc., США. http://www.applicon.com.

MicroStation. Профессиональная, высокопроизводительная система для 2D/3D-автоматизированного проектирования при выполнении работ, связанных с черчением, конструированием, визуализацией, анализом, управлением базами данных

и моделированием. Обеспечивает практически неограниченные возможности для проектировщиков и конструкторов на платформах DOS, Windows и компьютерах различных типов.

Производитель — Bentley, Unated State. http://www.bentley.com.

Genius.

- **Genius Desktop** — объектно-ориентированная система трехмерного проектирования машиностроительных деталей и сборок на базе Mechanical Desktop. Пакет предлагает дополнительные удобные инструменты для нанесения типовых конструктивных элементов, наполнения конструкции стандартными изделиями в виде твердотельных моделей и значительно облегчает работу конструктора при управлении компонентами сборки. Располагает библиотеками стандартных деталей в виде готовых параметрических деталей по целому ряду стандартов.
- **Genius 14** — продукт, обеспечивающий высокопроизводительное двумерное автоматизированное проектирование и черчение в области машиностроения в среде AutoCAD R14.
- **Genius LT 97** — система двумерного автоматизированного проектирования, предназначенная для создания и оформления машиностроительных чертежей и конструкторской документации на базе AutoCAD LT 97. Включает в себя стандартные компоненты, автоматизированный интерфейс пользователя, а также ряд функциональных возможностей, повышающих производительность работы в среде AutoCAD LT 97.

Разработчик — Genius CAD-Software GmbH, Германия. http://www.csoft.ru; http://www.autodesk.com.

Power Solutions. Семейство продуктов Power Solutions охватывает все этапы производственного цикла.

- **PowerShape** — система трехмерного моделирования.
- **PowerMILL** — мощная и простая в использовании автономная система автоматической подготовки управляющих программ для 3–4-координатной фрезерной обработки на любом станке с ЧПУ изделий, спроектированных в любой CAD-системе.
- **CopyCAD** — система преобразования данных, полученных с помощью координатно-измерительной машины, в компьютерную поверхностную модель.
- **PowerINSERT** — пакет для контроля точности с помощью 3-координатных измерительных машин.
- **ArtCAM Pro** — пакет для создания объемного рельефа на базе плоского рисунка и создания управляющих программ для его механообработки.
- **DUCT 5** — CAD/CAM-система, позволяет выполнять моделирование, черчение и подготовку управляющих программ для станков с ЧПУ.

Разработчик — DELCAM Plc., Великобритания. http://www.ascon.ru; http://www.delcam.ru; http://www.delcam.com; http://www.delcam.spb.ru.

hyperMILL. Пакет, позволяющий реализовать завершающее технологическое звено в сквозной CAD/CAM/CAE-технологии — подготовку управляющих программ для станков с ЧПУ и изготовление изделий.

Разработчик — Open Mind Software Technologies GmbH, Германия. http://www.openmind.de; http://www.acad.co.uk; http://www.autodesk.com.

EdgeCAM. CAM-система. Решения для фрезерной, поверхностной, токарной и электроэрозионной обработки деталей.

Разработчик — Pathtrace, Великобритания. http://www.pathtrace.com.

ESPRIT. CAD/CAM-система на базе ядра Parasolid.

Разработчик — DP Technology, США. http://www.dptechnology.com.

SolidCAM. Пакет генерации управляющих программ для станков с ЧПУ при обработке деталей, содержащих сложную поверхностную или твердотельную геометрию. Обеспечивает 2,5- и 3-осевую фрезерную обработку, токарную обработку, визуализацию процесса обработки.

Разработчик — SolidCAM Inc., Newtown, United States, http://www.solidcam.com.

MasterCAM. CAD/CAM-система, занимающая лидирующее положение в мире по количеству продаж и инсталляций пакета среди CAD/CAM-систем. Обеспечивает каркасное и поверхностное моделирование деталей, визуализацию и документирование простых и сложных деталей и сборочных единиц, разработку управляющих программ для токарной, фрезерной, электроэрозионной обработки на станках с ЧПУ.

Разработчик — CNC Software, США. http://www.mastercam.com; http://www.intersed.kiev.ua/; http://www.colla.lv.

PEPS. CAM-система для автоматизированной подготовки фрезерной, токарной, лазерной, электроэрозионной обработки деталей.

Разработчик — Camtek Ltd., Великобритания. http://www.camtek.co.uk.

СПРУТ. Система технологического проектирования.

Разработчик — АО «Спрут-Технология», г. Набережные Челны, Россия. http://www.sprut.ru.

EUCLID3. Основные продукты фирмы имеют торговые марки EUCLID, PRELUDE, CAS.CADE. Они предназначены для таких областей, как авиация, космос, автомобилестроение, оборона, электромеханика, промышленный дизайн, атомное машиностроение, инжиниринг, производство товаров широкого потребления и др.

Разработчик — MATRA Datavision, Франция. В связи с входом компании MATRA Datavision в консорциум EADS компания стала называться EADS MATRA Datavision. http://www.eads.matradatavision.com; http://www.eads.matradatavision.co.uk; на русском языке — http://www.cad.by.ru/.

Pro/ENGINEER. Система высокого уровня, САПР для единого цикла «проектирование — производство». Программный комплекс Pro/ENGINEER охватывает весь цикл «конструирование — производство» в машиностроении. Во всем мире более 16 000 компаний используют программные продукты фирмы PTC для сокращения длительности сквозных проектно-производственных циклов, оптимизации инженерных процессов и улучшения качества продукции. Ядро Pro/ENGINEER использует уникальную по своим возможностям технологию Proven Technology, основанную на граничных представлениях.

Разработчик — Parametric Technology Corporation, США. http://www.ptc.com; http://proe.ru/; http://pro-technologies.ru/.

CATIA. CATIA/CADAM Solutions — это полностью интегрированная универсальная CAD/CAM/CAE-система высокого уровня, позволяющая обеспечить параллельное проведение конструкторско-производственного цикла. CATIA, являясь универсальной системой автоматизированного проектирования, испытания и изготовления, широко применяется на крупных машиностроительных предприятиях для автоматизированного проектирования, подготовки производства, реинжиниринга. Число фирм — пользователей CATIA превышает 8000.

Компании DASSAULT SYSTEMES (Франция) и IBM (США) являются совместными разработчиками и распространителями системы автоматизированного проектирования. В последние три года параллельно сосуществует две CATIA, версий 4 и 5, причем версия 4 — только на рабочих станциях и на ядре DASSAULT SYSTEMES, а версия 5 — и для PC на ядре CASCADE разработки MATRA (http://www.opencascade.com). http://www.catia.ibm.com; http://www.catia.com; http://www.ibm.ru; http://www.catia.ru; http://www.catia.spb.ru.

Unigraphics. CAD/CAM/CAE-система высокого уровня. Позволяет осуществлять полностью виртуальное проектирование изделий, механообработку деталей сложных форм, имеет ассоциативную базу данных мастер-модели. Серия продуктов Unigraphics Solutions, Inc.: Unigraphics Solutions, Parasolid, Solid Edge, Unigraphics, IMAN, ProductVision, GRIP.

Разработчик — Unigraphics Solutions, Inc., США. http://www.ug.eds.com; http://www.cosmos.rcnet.ru/; http://www.ugsolutions.ru/; http://www.cadpotato.com/ — сайт пользовательской группы Unigraphics.

I-DEAS Master Series. Программный комплекс I-DEAS Master Series дает возможность оптимизировать концепцию изделия на ранней стадии проектирования, позволяя значительно улучшить качество изделия при уменьшении времени разработки и затрат. IDEAS предоставляет изготовителям беспрецедентные возможности, ориентированные на параллельную работу группой для решения многодисциплинарных инженерных задач в процессе разработки механических изделий.

Разработчик — Structural Dynamics Research Corporation (SDRC), США. http://www-win.scan.ru/scan/partners/SDRC; http://www.sdrc.com.

ADAMS. Динамика и кинематика сложных механических схем (механизмов) произвольного вида, в том числе в реальном времени. Двусторонняя связь с большинством конечноэлементных пакетов. Визуализация результатов моделирования (видеореалистическая анимация). Специализированные модули для нужд конкретных отраслей промышленности.

Разработчик — Mechanical Dynamics, Inc., США. http://www.adams.com; http://www.designtechnologies.com; http://www.uscad.com; http://www.adams.ru http://www.cadfem.ru — сайт генерального дистрибьютора ADAMS в СНГ.

DYNAMIC DESIGNER. Интегрированный в среду Machanical Desktop расчетный модуль для проведения динамического и кинематического анализов механизмов.

Разработчик — Mechanical Dynamics, США. www.design-simulation.com

ANSYS. Конечноэлементный пакет. Самое широко используемое средство обеспечения инженерных расчетов в мире. Универсальный расчетный комплекс, применяемый в различных видах анализа. Используется для расчета реакции конструкций различного типа (в авиастроении, судостроении, машиностроении, строительстве, энергетике, электронной промышленности и др.) на воздействия различной природы. С его помощью производятся как линейный, так и нелинейный статический и динамический анализ конструкций, анализ усталостных разрушений, решение линейных и нелинейных задач устойчивости и теплофизики.

Разработчик — ANSYS Inc., США. http://www.ansys.com; http://www.ansys.ru; http://www.cosmos.rcnet.ru; http://www.spark.nstu.nsk.su; http://www.cadfem.ru; http://ansys.net/ansys/ — подборка материалов международных конференций, макросов, полезные советы.

DesignSpace. Программа, специально предназначенная для работы в среде Mechanical Desktop, встраиваемая в меню Mechanical Desktop и использующая те же интерфейс и геометрию. Пакет DesignSpace позволяет проводить проверочные

и проектировочные расчеты элементов только твердотельных конструкций, созданных в среде Autodesk Mechanical Desktop.

Разработчик — ANSYS Inc., США. http://www.designspace.com; http://www.ansys.com; http://www.cosmos.rcnet.ru; http://www.spark.nstu.nsk.su.

MSC/InCheck. Интегрированный в Mechanical Desktop расчетный модуль для проведения прочностного анализа и оптимизации конструкции: статической прочности (напряжения и деформации), вибраций, устойчивости, теплового анализа (теплопроводность и теплообмен).

Разработчик — The MacNeal-Schwendler Corporation, США. http://www.macsch.com/.

DEFCAR. CAD/CAM-система для проектирования и подготовки производства в кораблестроении.

Разработчик — Defcar Ingenieros, S.L., Испания. http://www.defcar.es; http://www.defcar.com.

VUTRAX. Vutrax PCB CAD — система автоматизированного проектирования электронных схем и печатных плат.

Разработчик — Computamation Systems Ltd. Великобритания. http://www.vutrax.co.uk.

Protel. Protel PCB CAD — развитая система автоматизированного проектирования электронных схем и печатных плат.

Разработчик — Protel Technology Inc., США. http://www.protel.com.

UNICAM. Система автоматизированного проектирования и изготовления электронных схем и печатных плат.

Разработчик — Unicam Software, Inc., США. http://www.unicam.com.

CAD STAR. Развитая система автоматизации проектирования и изготовления электронных схем и печатных плат.

Разработчик — Zuken-Redag Group, Ltd., Великобритания. http://www.redac.co.uk.

SoftCAD. САПР для двумерного и трехмерного проектирования в архитектуре и строительстве. Серия продуктов: ArchiTECH.PC, SoftCAD.3D, SoftCAD.2D.

Разработчик — SoftCAD International, США. http://www.softcad.com.

Design WorkShop. Система фотореалистичного трехмерного моделирования и проектирования в архитектуре.

Разработчик — Artifice, Inc., США. http://www.artifice.com.

REBIS. Серия продуктов автоматизированного 2D/3D-проектирования промышленных предприятий.

Разработчик — Rebis, Inc., США. http://www.rebis.com.

CADVANCE. Профессиональная CAD-система для архитекторов, инженеров, проектировщиков в строительстве и архитектуре.

Разработчик — Fit, Inc., США. http://www.cadvance.com.

Planit. Система автоматизированного двумерного и трехмерного проектирования для профессиональных дизайнеров.

Разработчик — Planit Millenium, США. http://www.planit.com.

LS-DYNA.

Разработчик LSTC (Livermore Software Technology Corp.), коммерческого подразделения всемирно известного ядерного центра LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory: http://www.llnl.gov), США. http://www.lsdyna.com; http://www.feainformation.com/.

STAR-CD. Многоцелевой тяжелый пакет для решения задач механики жидкостей и газов (CFD), ориентированный на промышленные задачи любой сложности. Развивается с 1987 года.

Разработчик — CD-adapco group, Великобритания. http://www.cd.co.uk.

AutoSEA. Тяжелый расчетный пакет виброакустического анализа в области средних и высоких частот.

Разработчик — VASCi (Vibro Acoustic Sciences), США. http://www.vasci.com; http://www.cadfem.ru/ — сайт генерального дистрибьютора AutoSEA в СНГ.

LVMFlow. Профессиональная CAM-система компьютерного 3D-моделирования литейных процессов, позволяющая автоматизировать рабочее место технолога-литейщика и снизить затраты времени и средств на подготовку новых изделий.

Разработчик — Воронеж, Россия. http://lvmflow.ru/index.php/lvmflow2.

QFORM3D. Применяется для моделирования процессов горячей, теплой и холодной объемной штамповки. Программа предсказывает возникновение дефектов течения металла, устанавливает распределение температуры, оценивает нагрузку и расход энергии на деформацию.

Разработчик — Москва, Россия. http://www.qform3d.ru/products.

NUPAS-CADMATIC. Трехмерное программное обеспечение для проектирования, конструирования и строительства судов

Разработчик — Numeriek Centrum Groningen B.V., Groningen, Netherlands. www.nupas-cadmatic.com; www.petroned.ru/nupas.html.

Приложение Г
Список аббревиатур (англо-русский глоссарий терминов в области БП)

Большинство терминов, используемых в области БП и CAD/CAM/CAE, имеют устоявшиеся английские аббревиатуры, которые в последнее время широко применяются в русскоязычных технических текстах, посвященных БП и САПР. Данные аббревиатуры перечислены далее. Приведены буквальная расшифровка и описание того, что под ней подразумевается. Глоссарий создан с использованием материалов, размещенных на сайте http://isicad.ru/.

AEC CAD (Architecture Engineering and Construction CAD). САПР для архитектуры и строительства. В контексте цифрового производства и управления производственными процессами (*См. MPM*), которое является важной частью концепции управления жизненным циклом изделия (*См. PLM*), необходимо осуществлять проектирование не самих изделий, а средств их производства, включая целые производственные цеха или промышленные зоны. Помимо этого, приложения архитектурно-строительные САПР используются также для проектирования зданий и дизайна интерьеров.

BOM (Bill of Material). Спецификация (ведомость) материалов. Данные о составе изделия и нормах расхода сырья, материалов и компонентов на единицу измерения. Обычно эти данные организованы в иерархическом виде — в соответствии со структурой изделия. Используется для представления цифрового макета изделия (*См. DMU*), а также планирования потребности в материалах (*См. MRP*).

CAD (Computer-Aided Design). Автоматизированное проектирование. Термин используется для обозначения широкого спектра компьютерных инструментов, которые помогают инженерам, архитекторам и другим профессионалам в проектировании. Являясь ключевым инструментом в рамках концепции управления жизненным циклом изделия, системы автоматизированного проектирования (САПР) включают в себя множество программных и аппаратных средств — от систем двумерного черчения до систем трехмерного параметрического моделирования поверхностей и объемных тел. По областям применения САПР традиционно разделяются:

- на архитектурно-строительные;
- механические (*См. MCAD*);
- электронные (*См. ECAD*);
- технологические (*См. CAPP*).

CAE (Computer-Aided Engineering). Автоматизированное конструирование. Использование специального программного обеспечения для проведения инженерного анализа прочности и других технических характеристик компонентов и сборок, выполненных в системах автоматизированного проектирования (*См. CAD*).

Программы автоматизированного конструирования позволяют осуществлять динамическое моделирование, проверку и оптимизацию изделий и средств их производства. Традиционные области анализа включают в себя:

- анализ напряжений деталей и сборок методом конечных элементов;
- анализ тепловых и жидкостных потоков методами вычислительной гидродинамики;
- анализ кинематики;
- моделирование динамических механических взаимодействий;
- моделирование производственных операций (литье, прессование и пр.).

При проведении любого вида анализа в системах CAE традиционно выделяются три этапа его проведения:

- предварительная обработка данных (построение по геометрической модели изделия — CAD-данным — требуемой модели исследуемого процесса, например сетки конечных элементов, точек приложения сил и их векторов);
- анализ модели с помощью специализированного решателя;
- заключительная обработка результатов (визуализация результатов расчетов математической модели).

CAM (Computer-Aided Manufacturing). Автоматизированное производство. Термин используется для обозначения программного обеспечения, основной целью которого является создание программ для управления станками с ЧПУ (*См. CNC*). Входными данными CAM-системы является геометрическая модель изделия, разработанная в системе автоматизированного проектирования (*См. CAD*). В процессе интерактивной работы с трехмерной моделью в CAM-системе инженер определяет траектории движения режущего инструмента по заготовке изделия (так называемым CL-данным, от cutter location — положение резца), которые затем автоматически верифицируются, визуализируются (для визуальной проверки корректности) и обрабатываются постпроцессором для получения программы управления конкретным станком (называемой также G-кодом).

CAPP (Computer-Aided Process Planning). Автоматизированная технологическая подготовка производства (планирование технологических процессов). Используется для обозначения программных инструментов, применяемых на стыке систем автоматизированного проектирования (*См. CAD*) и производства (*См. CAM*). Задача технологической подготовки — по заданной CAD-модели изделия составить план его производства, называемый операционной или маршрутной картой. Данный план содержит указания о последовательности технологических и сборочных операций, используемых станках и инструментах и пр. Технологическая подготовка производства всегда осуществляется по имеющейся базе данных типовых техпроцессов, применяемых на конкретном предприятии. Различают два подхода к автоматизированной технологической подготовке — модифицированный (вариантный) и генеративный. При модифицированном подходе задача CAPP-системы состоит в поиске наиболее похожего изделия в существующей базе данных и предъявлении его операционной карты для модификации. При модифицированном подходе широко применяется групповая технология, позволяющая классифицировать детали в семейства похожих. Генеративный подход заключается в распознавании у детали типовых конструктивных элементов и применении к ним типовых техпроцессов (токарная обработка, сверление и пр.). При генеративном подходе используются известные методы искусственного интеллекта для распознавания элементов и логического вывода.

CAx (Computer-Aided). Общий термин для обозначения различных технологий автоматизации с помощью компьютера. Примерами CAx могут служить автоматизированное проектирование (*См. CAD*), конструирование (*См. CAE*), технологическая подготовка (*См. CAPP*) и производство (*См. CAM*), являющиеся ключевыми компонентами концепции управления жизненным циклом изделия (*См. PLM*).

CIM (Computer-Integrated Manufacturing). Комплексно-автоматизированное производство. В настоящее время вместо этого термина используется эквивалентное понятие «управление производственными процессами» (*См. MPM*), являющееся ключевой частью концепции управления жизненным циклом изделия (*См. PLM*).

CNC (Computerized Numerical Control). Компьютеризированное числовое программное управление (ЧПУ). Используется для управления современными станками с ЧПУ посредством их программирования с помощью G-кода (стандарт EIA-274-D). Области приложения включают в себя:

- сверление;
- токарную обработку;
- фрезерную обработку;
- шлифование;
- газовую резку;
- операции с листовым металлом.

Подготовка программ для станков с компьютеризированным ЧПУ осуществляется с помощью систем автоматизированного производства (*См. CAM*).

CPD (Collaborative Product Development). Коллективная разработка изделия. Бизнес-стратегия, рабочий процесс и набор программного обеспечения, которые способствуют совместной работе различных организаций над одним изделием. Коллективная разработка изделия является частью общей концепции управления его жизненным циклом (*См. PLM*) и состоит из следующих частей:

- управление данными об изделии (*См. PDM*);
- визуализация изделия;
- средства организации телеконференций;
- средства трансляции CAD-данных.

CRM (Customer Relationship Management). Управление взаимодействием с клиентом. Бизнес-стратегия, ориентированная на нужды заказчика. Состоит в выстраивании отношений с клиентами с помощью специальных систем, процессов и процедур взаимодействия. CRM-система — это корпоративная информационная система, предназначенная для улучшения обслуживания клиентов путем сохранения информации о клиентах и истории взаимоотношений с клиентами, установления и улучшения бизнес-процедур на основе сохраненной информации и последующей оценки их эффективности. Ее основные принципы таковы.

- Наличие единого хранилища информации, откуда в любой момент можно получить все сведения обо всех случаях взаимодействия с клиентами.
- Синхронизированность управления множественными каналами взаимодействия (то есть существование организационных процедур, которые регламентируют использование этой системы и информации в каждом подразделении компании).
- Постоянный анализ собранной информации о клиентах и принятии соответствующих организационных решений, например приоретизации клиентов на основе их значимости для компании.

Таким образом, этот подход подразумевает, что при любом взаимодействии с клиентом по любому каналу сотруднику организации доступна полная информация обо всех взаимоотношениях с клиентами и на ее основе он принимает решение, информация о котором, в свою очередь, тоже сохраняется и доступна при всех последующих взаимодействиях.

Системы управления взаимодействием с клиентами иногда рассматриваются как часть ERP (при широком толковании термина «управление ресурсами предприятия» (*См. ERP*)).

CRP (Capacity Requirements Planning). Планирование потребности в производственных мощностях. Технология планирования загрузки трудовых и технических ресурсов в соответствии с заданным планом потребностей в материалах (*См. MRP*). Загрузка рабочих мест рассчитывается на основе технологического маршрута изготовления изделия — набора шагов (операций), которые необходимо совершить для изготовления изделия или его части. Каждая операция совершается на каком-то рабочем месте, которое может состоять из одного или нескольких человек и/или оборудования. Технология CRP является частью концепции планирования производственных ресурсов (*См. MRP II*).

DMU (Digital Mock-Up). Цифровой макет. Виртуальная технология определения модели реального продукта, состоящая из коллекции трехмерных геометрических моделей (взятых из базы данных), размещенных в пространстве в соответствии с представлением о форме продукта, с каждой из которых связана ведомость материалов (*См. BOM*). Визуализация трехмерного цифрового макета позволяет инженерам анализировать большие сложные изделия на предмет удобства их сборки, их компонентов и последующего технического обслуживания.

DNC (Distributed Numerical Control). Распределенное числовое программное управление. Современная концепция управления станками с компьютеризированным ЧПУ (*См. CNC*), состоящая в том, что все станки управляются с центрального компьютера, который загружает в них программы обработки. Распределенное ЧПУ позволяет управлять всем цехом с одного рабочего места.

ECAD (Electronic CAD). САПР электроники. То же, что автоматизированное проектирование электронных приборов и устройств (*См. EDA*).

EDA (Electronic Design Automation). Автоматизированное проектирование электронных приборов и устройств. Категория программных инструментов для проектирования и производства электронных систем — от печатных плат до интегральных микросхем. Данная категория также часто обозначается как ECAD — САПР электроники, являясь разновидностью автоматизированного проектирования (*См. CAD*). Термин «EDA» зачастую используется также для обозначения систем автоматизированного конструирования (*См. CAE*) и производства (*См. CAM*) в области электроники.

ERP (Enterprise Resource Planning). Планирование (управление) ресурсами предприятия. Данный термин появился в результате развития концепции планирования производственных ресурсов (*См. MRP II*). ERP-системы — это информационные управляющие системы, которые интегрируют и объединяют множество бизнес-процессов, связанных с операционными или производственными аспектами предприятия:

- производство;
- логистику;
- дистрибуцию;

- складирование;
- погрузку;
- выставление счетов;
- бухучет.

ERP-системы зачастую используются совместно с автоматизированными системами управления производственными процессами (*См. MES*).

ERP-системы часто называют системами класса бэк-офис, чтобы отделить их от фронт-офис-систем, таких как системы управления взаимодействиям с клиентами (*См. CRM*) или системы управления цепочками поставок (*См. SCM*). В более широкой трактовке термин ERP включает в себя системы классов MRP II, HRM, SCM и CRM.

HRM (Human Resource Management). Управление персоналом (кадрами) с помощью интеллектуальных технологий. Обычно HRM-системы поддерживают следующий набор функциональных модулей:

- составление платежных ведомостей;
- контроль рабочего времени и вида исполняемых работ;
- управление системой льгот (контроль медицинских страховок, пенсионных отчислений, участия в разделе прибыли компании, опционы на акции компании);
- собственно управление персоналом (информация о возрасте, семейном положении, месте проживания, квалификации, участии в проектах, прохождении тренингов).

Системы управления персоналом часто интегрируются в большие системы управления ресурсами предприятия (*См. ERP*), где они играют взаимодополняющую роль с модулями финансового планирования и планирования потребностей в производственных мощностях (*См. CRP*).

MCAD (Mechanical CAD). Автоматизация механического проектирования. Механические САПР (*См. CAD*) отличаются от прочих своими областями приложения, которые включают в себя:

- автомобильную промышленность;
- авиакосмическую промышленность;
- производство товаров народного потребления;
- машиностроение;
- судостроение.

Типичная функциональность механических САПР включает в себя разработку деталей и сборок (механизмов) с использованием параметрического проектирования на основе конструктивных элементов, технологий поверхностного и объемного моделирования. Трехмерные модели и их двумерные чертежи, разработанные с помощью механических САПР, используются затем в системах технологической подготовки производства (*См. CAPP*), программирования станков с ЧПУ (*См. CAM и CNC*), быстрого прототипирования (*См. Rapid Prototyping*), визуализации.

MES (Manufacturing Execution System). Автоматизированная система управления производственными процессами. MES-система позволяет контролировать процессы, материалы, трудовые ресурсы в реальном времени. Как правило, данная система состоит из большого числа аппаратных и программных устройств. MES-система тесно взаимодействует с ERP-системой, получая из нее производственные

планы, составленные с учетом заказов и поставок сырья, и передавая назад информацию о реальных затратах на всех этапах производства партии.

MPM (Manufacturing Process Management). Управление производственными процессами, цифровое производство (digital manufacturing). Обобщенное название набора технологий, методов и программ, используемых при производстве изделий. MPM является ключевым элементом концепции управления жизненным циклом изделий (*См. PLM*), являясь связующим звеном между системами проектирования (*См. CAD*) и системами планирования ресурсов предприятия (*См. ERP*). Планирование производственных цехов (*См. AEC*), технологических процессов (*См. CAPP*), программирование станков с ЧПУ (*См. CAM и CNC*) являются компонентами MPM. Система MPM тесно взаимодействует с системами управления данными об изделии (*См. PDM*), планирования ресурсов предприятия (*См. ERP*) и автоматизированной системой управления производственными процессами (*См. MES*).

MPS (Master Production Schedule). Основной производственный план. Комбинация всех известных и ожидаемых потребностей в определенном продукте. Производственный план простирается до горизонта планирования — на несколько месяцев или лет в будущее — и содержит в себе только данные о потребности в конечных изделиях во времени. Уровень компонентов (потребностей в компонентах) обрабатывается системами планирования потребности в материалах (*См. MRP*).

MRP (Material Requirement Planning). Планирование потребности в материалах. Производственное планирование и инвентаризация, необходимые для эффективного управления процессами производства изделия. MRP-системы помогают одновременно достичь следующих целей:

- проверить, что материалы и изделия доступны для производства или доставки заказчикам;
- управлять наименьшим возможным уровнем инвентаризации;
- планировать производственные процессы, поставки и закупки.

На входе таких систем задаются основной производственный план (*См. MPS*), данные о запасах (информация о доступности сырья и полуфабрикатов), спецификация материалов (*См. BOM*) и данные о планировании (маршрутные, трудовые и машинные стандарты). На выходе получаются рекомендованный производственный план (с детальной информацией о времени начала и окончания каждой операции в терминах компонентов изделия) и рекомендованный план закупок сырья и полуфабрикатов. Возникшая в конце 1960-х годов технология MRP затем была расширена до более общей технологии планирования производственных ресурсов (*См. MRP II*) и концепции управления ресурсами предприятия (*См. ERP*).

MRP II (Manufacturing Resource Planning). Планирование производственных ресурсов. Метод эффективного планирования всех ресурсов предприятия-производителя. Позволяет осуществлять операционное планирование (в единицах продукции), финансовое планирование (в долларах) и моделировать различные ситуации, отвечая на вопросы «что, если...». Состоит из набора взаимосвязанных функций, основными из которых являются:

- бизнес-планирование;
- планирование производства и продаж;
- планирование выпуска продукции;
- составление основного производственного плана (*См. MPS*);
- планирование потребности в материалах (*См. MRP*);

- планирование потребности в производственных мощностях (*См. CRP*);
- системы поддержки управления производственными мощностями и материалами.

Американское общество по контролю над производством и запасами (American Production and Inventory Control Society (APICS)) разработало стандарт MRP II, который включает в себя детальное описание 16 групп основных функций. Интегрированные финансовые отчеты, получаемые с помощью систем класса MRP II, содержат следующую информацию:

- бизнес-план;
- отчет обязательств по заказам;
- экспедиторский бюджет;
- цена запасов в долларах.

PDM (Product Data Management). Управление данными об изделии. Категория программного обеспечения, позволяющая сохранять данные об изделии в базах данных. К данным об изделии прежде всего относят инженерные данные, такие как CAD-модели и чертежи (*См. CAD*), цифровые макеты (*См. DMU*), спецификации материалов (*См. BOM*). Метаданные содержат информацию о создателе файла и текущем статусе соответствующего компонента. Система PDM позволяет организовать совместный доступ к этим данным, обеспечивает их постоянную целостность и внесение необходимых изменений во все версии изделия, модифицировать спецификацию материалов, помогать конфигурировать варианты изделия. Однако самым важным преимуществом системы PDM является ее использование на протяжении всего жизненного цикла изделия в рамках концепции управления этим циклом (*См. PLM*). Большинство PDM-систем позволяют одновременно работать с инженерными данными, полученными от разных CAD-систем.

PLM (Product Lifecyle Management). Управление жизненным циклом изделия. Данный термин используется для обозначения процесса управления полным циклом изделия — от его концепции, через проектирование и производство до продаж, послепродажного обслуживания и утилизации. PLM — это набор возможностей, которые позволяют предприятию эффективно обновлять свои продукты и релевантные услуги на протяжении полного бизнес-цикла. PLM — это один из четырех краеугольных камней в ИТ-структуре любого производственного предприятия. Всем компаниям необходимо уметь работать с клиентами (*См. CRM*) и поставщиками (*См. SCM*), а также управлять ресурсами предприятия (*См. ERP*). В дополнение к этому машиностроительным компаниям необходимо уметь разрабатывать, описывать, управлять и распространять информацию о своих изделиях, для чего нужно PLM. Ключевые компоненты PLM — это управление данными об изделии (*См. PDM*), совместное проектирование изделия (*См. CPD, CAD, CAE*), управление производственными процессами (*См. MPM, CAPP, CAM*).

Внедрение PLM позволяет:

- сократить время выхода изделия (или его модификации) на рынок;
- улучшить качество изделия;
- уменьшить стоимость прототипирования (*См. Rapid Prototyping*);
- повторно использовать оригинальные данные об изделии;
- проводить оптимизацию изделия;
- уменьшить отходы и ущерб окружающей среде;
- сэкономить благодаря полной интеграции инженерных процессов.

Rapid Prototyping. Быстрое прототипирование. Метод производства физической модели (прототипа) изделия непосредственно по CAD-данным без использования станков с ЧПУ (*См. CNC*). Наиболее распространенными процессами быстрого прототипирования являются стереолитография, трехмерная печать и ламинирование (Laminated Object Manugacturing (LOM)).

SCM (Supply Chain Management). Управление цепочками поставок. Процесс планирования, осуществления и контроля операций в цепи или сети поставок, логистической сети, основная цель которого — удовлетворить требования заказчика максимально эффективно. Данная деятельность состоит в управлении всеми перемещениями и складированием сырья, полуфабрикатов и готовых изделий от пункта отправления до пункта потребления товара. В рамках SCM успешно решаются следующие проблемы:

- конфигурация распределенной сети — количество и местоположение поставщиков, производственных мощностей, оптовых баз, складов и заказчиков;
- стратегия распространения товара — централизованная или децентрализованная, прямые поставки или стыковки, маркетинговая стратегия вытягивания или вталкивания товаров на рынок (pull or push strategy), логистические услуги третьей стороны;
- интеграция систем и процессов во всей цепочке поставок для разделения ценной информации, такой как сигналы о запросах, прогнозы, инвентаризация и транспортировка;
- управление инвентаризацией — количество и местоположение инвентаря, включая сырье, полуфабрикаты и готовые изделия.

Игорь Владимирович Шишковский

Основы аддитивных технологий высокого разрешения

Заведующая редакцией	*Ю. Сергиенко*
Ведущий редактор	*Н. Римицан*
Литературный редактор	*Н. Рощина*
Художник	*С. Заматевская*
Корректоры	*С. Беляева, В. Сайко*
Верстка	*Л. Соловьева*

ООО «Питер Пресс», 192102, Санкт-Петербург, ул. Андреевская (д. Волкова), 3, литер А, пом. 7Н.

Налоговая льгота — общероссийский классификатор продукции ОК 034-2014, 58.11.12 — Книги печатные профессиональные, технические и научные.

Подписано в печать 16.11.15. Формат 70×100/16. Бумага офсетная. Усл. п. л. 32,250. Тираж 150. Заказ 0000.

Отпечатано в цифровой типографии «Галерея печати «ИПК НП-Принт».
190005, Санкт-Петербург, Обводный канал, 199.