

Шишковский И.В.

**Лазерный синтез  
функционально-градиентных  
мезоструктур и  
объемных изделий**



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 621.373.826.004.14:

[621.9.06-52:658.527.011.56]

ББК 34.64

Ш 65



*Издание осуществлено при поддержке  
Российского фонда фундаментальных  
исследований по проекту 08-08-07015*

**Шишковский И. В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 424 с. — ISBN 978-5-9221-1122-5.

В книге представлено систематическое изложение физических основ процессов послойного селективного лазерного спекания и плавления (СЛС/П) порошковых композиций и синтеза функциональных и градиентных мезоструктур (мезоизделий). Рассмотрены перспективы формирования для российской промышленности нового фундаментального направления лазерной технологии, использующего взаимодействие лазерного излучения с многокомпонентными (в том числе и реакционноспособными) порошковыми композициями с целью послойного синтеза из них объемных функциональных изделий. Поиск новых перспективных порошковых композиций и изучение возможностей объединения нескольких подходов (лазерное спекание или наплавка, самораспространяющийся высокотемпературный синтез или пайка) в один технологический процесс для послойного синтеза объемных изделий — эти составляющие успешного развития метода СЛС/П также изложены в книге.

Ученым и специалистам в области порошковой металлургии и материаловедения, студентам металлургических и материаловедческих специальностей.

Табл. 67. Ил. 332. Библиогр. 526 назв.

ISBN 978-5-9221-1122-5

© ФИЗМАТЛИТ, 2009

© И. В. Шишковский, 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	6
<b>Глава 1. Основы послойного синтеза объемных изделий . . . . .</b>	<b>9</b>
1.1. Быстрое прототипирование: основные направления и идеология синтеза объемных изделий . . . . .	9
1.2. Компьютерный дизайн и программное обеспечение станда по БП . . . . .	12
1.2.1. Контроль представления данных в STL-файле и исправление ошибок (15).	
1.2.2. Определение направления наращивания изделия (17). 1.2.3. Поддержки (19). 1.2.4. Расщепление и объединение, стиль и шаг решетки при послойном синтезе (20).	
1.3. Процессы скоростного фрезерования и скоростного копирования . . . . .	24
1.4. Методики быстрого прототипирования . . . . .	25
1.4.1. Лазерная стереолитография (30). 1.4.2. Селективное лазерное спекание (34). 1.4.3. Послойное создание литьевой формы (39). 1.4.4. Послойная заливка экструдруемым расплавом (40). 1.4.5. Послойное формирование объемных моделей из листового материала (41). 1.4.6. Процесс 3-мерной печати (43). 1.4.7. Методики лазерной объемной наплавки (44).	
1.5. Сравнения и выводы. . . . .	47
<b>Глава 2. Оборудование и методика проведения экспериментов по селективному лазерному спеканию и 3-мерной лазерной наплавке . . . . .</b>	<b>53</b>
2.1. Трехмерный синтез функциональных изделий. . . . .	53
2.2. Особенности экспериментальной установки для СЛС. . . . .	56
2.3. Программно-аппаратный комплекс по СЛС. . . . .	57
2.4. Автоматизация процесса спекания порошковых композиций . . . . .	62
2.5. Диагностика процесса СЛС. . . . .	65
2.6. Реализация процесса трехмерной лазерной наплавки . . . . .	68
2.7. Пирометрия процесса лазерного спекания и плавления. . . . .	71
2.8. Перспективы развития установок для СЛС и 3-мерной лазерной наплавки. . . . .	73
<b>Глава 3. Теоретическое моделирование процессов селективного лазерного спекания и плавления . . . . .</b>	<b>75</b>
3.1. Физико-механические свойства порошковых материалов. . . . .	75
3.1.1. Полимерные материалы и порошки (76). 3.1.2. Металлические порошки (78).	
3.2. Реология и макрокинетика спекания . . . . .	80
3.3. Взаимодействие ЛИ с порошковыми материалами (обзор теоретических и экспериментальных работ) . . . . .	84
3.4. Поглощение и рассеяние ЛИ в металлополимерных порошковых композициях . . . . .	88

3.5. Теплофизические свойства металлополимерных порошковых композиций . . . . .	92
3.5.1. Эксперимент (92). 3.5.2. Теоретический анализ (97).	
3.6. Физическая модель СЛС. Квазистационарная реодинамика процесса СЛС порошковых композиций . . . . .	100
3.7. Термовязкоупругость порошковой композиции при СЛС . . . . .	107
3.8. Численный анализ параметров объемной лазерной наплавки ультрадисперсной порошковой смеси в потоке газа . . . . .	111
3.9. Объемная лазерная наплавка и легирование . . . . .	119
3.9.1. Моделирование процесса 3-мерной лазерной наплавки на подложке (119).	
3.9.2. Кинетические и диффузионные процессы скоростной кристаллизации при трехмерной лазерной наплавке и легировании (121).	
3.10. Температурное исследование условий экзотермической реакции горения порошковых композиций, контролируемой в пятне ЛИ . . . . .	125
3.11. Измерения ЭДС, возникающих на фронте волны горения при совмещении процессов СЛС и СВС . . . . .	133
3.12. Численное моделирование контролируемого лазерным излучением нагрева реакционноспособных порошковых композиций. . . . .	138
<b>Глава 4. Жидкофазное селективное лазерное спекание металлополимерных и биметаллических порошковых композиций . . . . .</b>	<b>151</b>
4.1. Постановка задач и цели экспериментальных исследований . . . . .	151
4.2. Условия СЛС монослоев полимерных и металлополимерных порошковых композиций . . . . .	152
4.3. Деструкция поликарбоната при СЛС МПК . . . . .	160
4.4. Условия СЛС монослоев биметаллических порошковых композиций . . . . .	167
4.4.1. Каплеобразование при СЛС (173). 4.4.2. Фрактальный подход к анализу поверхностных макроструктур при лазерном спекании (176).	
4.5. Определение удельного электросопротивления структур, сформированных СЛС порошковых композиций на основе никеля, титана и латуни . . . . .	181
4.6. Создание функционально-градиентных изделий при трехмерной лазерной наплавке	188
4.7. Оптимизация режимов послойного СЛС объемных изделий . . . . .	193
4.8. Оптимизация «тонкой структуры» объемных изделий при их синтезе методами СЛС и СЛП . . . . .	201
4.9. Физико-механические свойства объемных изделий, синтезированных методом СЛС	212
<b>Глава 5. Совмещение селективного лазерного спекания и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. . . . .</b>	<b>221</b>
5.1. Проблематика исследуемых задач совмещения . . . . .	221
5.2. Исследование условий СВС интерметаллидов при СЛС порошковых композиций	223
5.3. Совмещение процессов СЛС и СВС для получения алюминидов никеля и титана	228
5.4. Формирование биосовместимых интерметаллидных фаз при лазерном спекании порошковых СВС-композиций . . . . .	244
5.5. Синтез биокомпозита на основе никелида титана и гидроксиапатита при СЛС . . .	252
5.6. Структура и свойства интерметаллидных фаз системы Ni-Ti, синтезированных при СЛС . . . . .	256
5.6.1. Рентгеновский фазовый анализ (256). 5.6.2. Микроструктура и коррозионные свойства (260). 5.6.3. Механические свойства и эффект памяти формы (265).	
5.7. Исследование условий СЛС керамических порошковых материалов системы цирконат-титанат свинца. . . . .	278

---

5.8. Новые методы создания объемных керамических изделий на основе гексаферрита бария и лития с добавками хрома . . . . .	288
5.8.1. Косвенное лазерное спекание ВТСП оксидных материалов (297).	
5.9. Лазерный контроль СВС как синергетизм двух высокотехнологичных процессов	299
<b>Глава 6. Синтез мезоизделий с градиентом физических свойств методом СЛС/П</b>	<b>308</b>
6.1. Идеология синтеза функционально-градиентных изделий методом СЛС . . . . .	308
6.2. Синтез градиентных изделий из МПК методом СЛС . . . . .	314
6.3. Лазерный синтез металлополимерных фильтрующих элементов с заданными свойствами . . . . .	318
6.3.1. Старение и стойкость изделий, синтезируемых методом СЛС из МПК (322).	
6.3.2. Численное моделирование изотропных и анизотропных фильтрующих элементов, синтезируемых методом СЛС (328).	
6.3.3. Послойный лазерный синтез фильтрующих элементов с каталитическими вставками (ФГ мезо- и нано-смарт-структуры) (332).	
6.4. Синтез конструкционной керамики с функциональными включениями методом СЛС . . . . .	335
6.5. Послойный синтез нитридов титана и алюминия методом СЛС и объемных изделий на их основе . . . . .	342
6.6. Синтез методом СЛС керамик с градиентом электрофизических свойств . . . . .	351
6.7. Биосовместимые имплантаты на основе титана и никелида титана, синтезируемые методом СЛС . . . . .	359
6.7.1. Сравнительное исследование биосовместимости и биоинтергации титановых и нитиноловых имплантатов, синтезированных методом СЛС (363).	
6.7.2. СЛС титановых и нитиноловых имплантатов как репозитория для стволовых клеток (370).	
6.7.3. Конечно-элементная оптимизация пористой структуры имплантатов, синтезируемых методом СЛС (376).	
6.8. Заключение. Послойный лазерный синтез функционально-градиентных мезо- и наноструктур (MEMS/NEMS) — магистральное направление технологии БП . . . . .	385
Список литературы . . . . .	392

## ВВЕДЕНИЕ

На рубеже XXI столетия человечество освоило практически безотходную хайтек-технологию быстрого прототипирования (БП) (англ. термины — Rapid Prototyping & Manufacturing или Solid Free Form Fabrication), физические основы которой и составляют содержание данной монографии. Эта технология и методики ее реализации позволяют резко ускорить и удешевить процесс внедрения новой техники на всех этапах, от конструирования и проектирования изделия до создания его первоначального макета в натуральную величину. Практически стали реальными футуристические прогнозы фантастов прошлых веков, предполагавших, что в межзвездных одиссеях и дальних походах у человечества не будет необходимости брать с собой все современные машины и орудия труда, их можно будет создать на месте. В результате происшедшего в последние годы проникновения в наномир такие интеллектуальные изделия теперь могут иметь субмикронные (нано-) размеры.

В настоящее время во всем мире проводятся интенсивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы не только по созданию новых, но и по совершенствованию развитых ранее технологических методик и систем послойного лазерного синтеза объемных изделий (ЛСОИ) деталей машин. Методы селективного лазерного спекания (СЛС), плавления (СЛП) и трехмерной лазерной наплавки (DMD) являются одними из наиболее перспективных способов реализации технологии БП, поскольку существуют серьезные основания надеяться на возможность создания не только моделей, отличающихся повышенной прочностью, но и функциональных готовых изделий. Фактически речь идет о формировании для российской промышленности *нового фундаментального направления лазерной технологии*, посвященного взаимодействию лазерного излучения (ЛИ) с многокомпонентными (в том числе и реакционноспособными) порошковыми композициями с целью послойного синтеза из них объемных функциональных изделий. Поиск новых перспективных порошковых композиций и изучение возможностей объединения нескольких подходов (лазерное спекание или наплавка, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) или пайка и т. п.) в один технологический процесс для послойного синтеза объемных изделий — это составляющие успешного развития метода СЛС/П в мире.

Теоретические и экспериментальные исследования физико-химических процессов, происходящих в порошковых материалах при интенсивных внешних воздействиях (температура, давление, электромагнитные поля и т. п.), до сих пор остаются привлекающими к себе внимание и всесторонне развиваемыми областями физики твердого тела, порошковой металлургии и химической физики. Скоростной нагрев, присущий лазерному воздействию в процессах СЛС и интегрированных с ним технологий, открывает возможности для изучения особенностей тепловых, диффузионных, кинетических, реологических и механических процессов, в состояниях, далеких от равновесия и потому слабо изученных. Классические подходы (модели) порошковой металлургии перестают адекватно описывать наблюдаемые здесь явления. Поэтому,

при решении научно-практических задач, лежащих в основе технологии СЛС/П и обсуждаемых в монографии, весьма актуальным является разработка и обобщение теоретических моделей, опирающихся на современные представления.

Средства автоматического проектирования и инженерного дизайна (англ. термины — Compute Aid Design/Engineering (CAD/CAE)), которые естественным образом интегрированы в процесс СЛС/П, позволяют выстраивать функционально-градиентные (ФГ) структуры не только поатомно (микроуровень и нанотехнологии), но и отдельными структурными блоками (частицами, зернами, доменами), что соответствует идеологии проектирования на *мезоуровне*. При моделировании укладки (степени связности структуры) порошковой композиции и/или ее концентрационного состава открывается революционная возможность создания интеллектуальных микроустройств (англ. термины — micro/nano-electromechanical systems (MEMS/NEMS)) — сенсоров, имплантатов, фильтров, пьезодетекторов, пьезонасосов и т. д., помогающих человечеству осознанно исследовать и управлять объектами микромира. Некоторые решения и перспективы развития устройств MEMS/NEMS представлены в гл. 6. Наряду с умением создавать собственно MEMS/NEMS, не менее актуальным является определение пространственных зависимостей существенных свойств и прогноз характеристик ФГ-мезоструктур для данного профиля свойств. В большинстве своем методы испытаний и диагностики для функционально-градиентных материалов (ФГМ) и мезоизделий на их основе в фактических приложениях, а также оборудование для управления микрокомпонентами отсутствуют, и эти проблемы также требуют решений.

В целом, задача книги состоит в систематическом изложении физических основ процессов послойного СЛС/П порошковых композиций и синтеза функциональных мезоструктур (мезоизделий). В частности, обсуждаются ответы на такие вопросы: какие отечественные порошковые материалы (или их композиции) пригодны для СЛС/П и почему; какие физические, химические, механические особенности имеются в поведении порошковых (в том числе и реакционноспособных) материалов при скоростном лазерном нагреве (спекании, наплавке); возможно ли совместить процесс СЛС с другими высокотехнологичными процессам и что это даст; какие методики пригодны для исследования и описания свойств синтезируемых пористых трехмерных изделий; где и как можно применять такие изделия; как осознанно управлять структурой и физико-механическими и/или химико-биологическими свойствами, реально синтезируемых ФГМ и объемных изделий MEMS/NEMS на их основе; как синергетизм нескольких технологических отраслей знания (лазерные технологии, порошковая металлургия, компьютерное моделирование) позволяет получать новые функциональные материалы (изделия), которые невозможно синтезировать другими способами.

В Самарском филиале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН при непосредственном участии автора впервые в России был спроектирован и создан экспериментальный стенд для исследования физико-химических процессов при СЛС/П и синтеза объемных изделий; разработан и успешно применяется программно-аппаратный комплекс по управлению процессами графического представления данных по геометрии объемного изделия, самого послойного СЛС и его интерактивной диагностики. Используемые в работе стенда научно-технические решения являются оригинальными и составляют ноу-хау его разработчиков.

В процессе исследовательской работы были разработаны и апробированы теоретико-экспериментальные методики определения оптических, теплофизических свойств порошковых композиций, применяемых в СЛС/П; методики исследования пористой структуры поверхности на основании фрактального подхода, поиска оптимальных режимов послойного СЛС/П; структурно-чувствительная методика измерения удельного электросопротивления и исследования эффекта памяти формы (ЭПФ) на ее основе.

Впервые были предложены и защищены патентами РФ металлополимерные (МПК), биметаллические (БПК) и реакционноспособные порошковые композиции для технологии СЛС/П. На базе этих порошковых композиций предложены и также защищены патентами РФ способы послойного синтеза мезоструктурных изделий, находящихся применение на практике: ФГ-материалов и изделий на их основе; фильтрующих элементов и катализаторов; пористой керамики на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) с наполнителями; медицинских имплантатов из титана, никелида титана (с добавкой гидроксиапатита (ГА)).

Автор надеется, что оригинальные результаты, полученные им самим и в соавторстве с коллегами и изложенные в данной монографии, будут с интересом встречены научно-технической общественностью, учеными, инженерами и студентами старших курсов соответствующих материаловедческих специальностей.



## Глава 1

# ОСНОВЫ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА ОБЪЕМНЫХ ИЗДЕЛИЙ

### 1.1. Быстрое прототипирование: основные направления и идеология синтеза объемных изделий

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 3-мерного компьютерного моделирования и создания твердых копий деталей машин.

Актуальным является также задача сведения комплекса типовых процессов в единый технологический процесс (установку), позволяющий в сжатые сроки (несколько часов вместо нескольких месяцев) изготовить прототипы инструментов и изделий с любой степенью сложности (внутренней или внешней поверхности) и точности, без предварительных затрат на подготовку оснастки [1].

Наряду с этим, умение изготавливать единичные копии моделей сложной формы в таких сферах человеческой деятельности, как протезирование, реставрационные работы, является не менее актуальным.

Таким образом, в рыночных условиях конкуренция требует, чтобы новые изделия (продукты) были бы как можно более быстро и дешево разработаны, произведены и представлены на рынок. Стандартные многоступенчатые процедуры конструирования и проектирования не способны отвечать этим требованиям сегодняшней динамики производства. Процессы проектирования и производства должны быть непосредственно интегрированы в процедуру обработки. Сокращение временных циклов изготовления продукции и увеличение номенклатуры изделий, наряду с возрастающими требованиями по качеству, неизбежно должны были бы привести к развитию этих 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 эти проблемы и внедряют эти новшества у себя. Речь идет об объединении развитых уже в достаточной мере систем автоматического проектирования — САПР (англ. термин — Computer Aid Design (CAD), профессиональные пакеты программ — AUTOCAD, Solid Work, 3D-Компас, CATIA, Pro-Engineer, 3D Studio и т. д.) с новой высокой технологией послойного синтеза объемных изделий деталей машин (англ. термины — Rapid Prototyping & Manufacturing, Solid Free Form Fabrication и т. п.) [1–3].

В основе своей процессы быстрого прототипирования (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, этим процессам требуются данные лишь о поперечных сечениях; кроме того, исчезают следующие проблемы, часто возникающие в связи с другими производственными процессами [409].

— 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 <sup>1)</sup>.

— 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) [410], где отме-

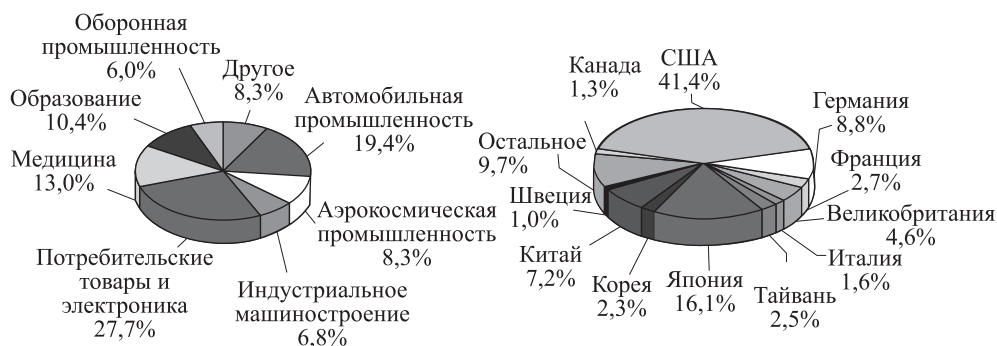


Рис. 1.1. Распределение технологий БП по отраслям и по странам

чены основные направления применений технологий БП в промышленности и на потребительском рынке. Данные этих схем не нуждаются в комментариях и лишней 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.

<sup>1)</sup> Некоторые процессы могут требовать создания вместе с деталью поддерживающих структур (см. разд. 1.2.3).

Таким образом, технология БП нужна для:

- проверки на выполнимость новых понятий (концепций) проекта;
- оценки пригодности/работоспособности разрабатываемых новых 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 технологий CAD и RP&M предлагает превосходные инструментальные средства и процедуры, которые позволяют быстро и эффективно (в стоимостном плане) преобразовать виртуальные (компьютерные) образы (изделий) в рыночные продукты (см. рис. 1.2 из отчета [410]).

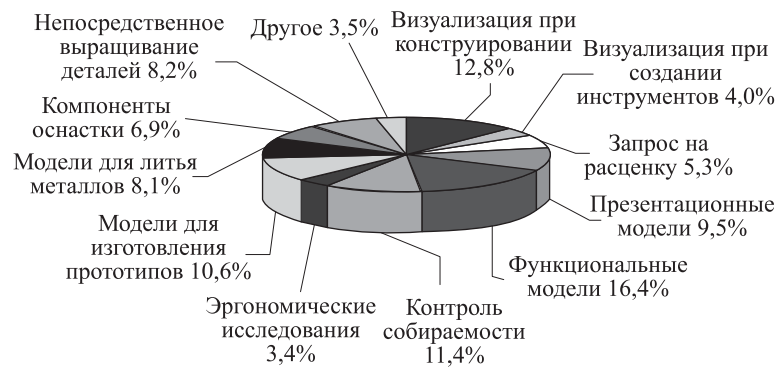


Рис. 1.2. Задачи, решаемые в технологии БП

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

- уменьшение time-to-market (времени до поступления продукта на рынок);
- сокращение ошибок и проблем уже на стадии проектирования;
- высокую конкурентоспособность;
- улучшенное качественное управление производством;
- авторскую защиту понятий (концепций) проекта.

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 лежат вне сферы научных интересов настоящей монографии. Ниже в данной главе будут названы и кратко описаны основные методики, с помощью которых удастся реализовать технологию БП. В сжатой схематичной форме изложены основные шаги по синтезу 3-мерных изделий деталей машин — от 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 применений.

## 1.2. Компьютерный дизайн и программное обеспечение станда по 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 выше графических САПР. Не следует забывать и о более простом, но и дорогом с практической точки зрения способе — трехмерном сканировании поверхности (см. разд. 1.3 и рисунки 1.23, 1.24). В обоих случаях результатом работы оказывается файл, содержащий всю информацию об объекте в цифровом формате. Поскольку каждому графическому пакету присущ свой формат представления данных (например, \*.3DS, \*.IGS, \*.DXF, \*.WRL, \*.SAT), российскому потребителю RP&M-технологий приходится использовать условно-бесплатное программное обеспечение (freeware, shareware), позволяющее преобразовать информации из одного графического формата в другой.

Для того чтобы облегчить работу конструкторов-проектировщиков, в самой технологии БП был создан и свой специальный стандарт представления данных об объекте. Формат STL (от слова Stereo Lithography) файла был первоначально разработан для процесса лазерной стереолитографии, но в последующем взят за основу для других процессов послойного синтеза [4]. В настоящее время он является общепринятым графическим стандартом представления данных о модели для всех систем БП. Широкие возможности по его сжатию (архивации) и передаче в сети Интернет позволяют организовать процесс создания изделия оптимально и мобильно [1, 2, 5].

В основе компьютерного описания формата STL, как впрочем, и некоторых других, лежит метод 3-мерной триангуляции поверхности модели. Простейшая 3-мерная триангуляция поверхности изделия осуществляется треугольниками и может быть сглажена геометрическими фигурами более высокого порядка (рис. 1.3), за счет

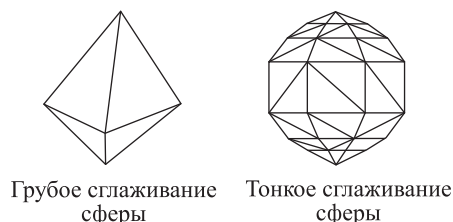


Рис. 1.3. Триангуляция сферы

чего достигается высокая точность и воспроизводимость синтезируемой поверхности. «Поверхностные» треугольники определяются (нумеруются) с учетом направления узлов (вершины треугольников) по часовой стрелке (рис. 1.4), 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 направлен кнаружи (рис. 1.4 справа).

STL-файл может быть представлен в ASCII-формате или в бинарном формате, при этом текстовая и бинарная версия STL-файла совместимы не полностью. Бинарная версия содержит дополнительную информацию об атрибутах, которая может

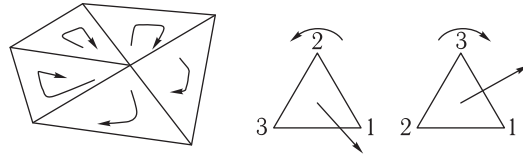


Рис. 1.4. Правила обхода вершин треугольников на поверхности 3D-объектов и направление нормали ячейки в формате STL

использоваться. Формат ASCII предназначен для целей отладки и тестирования. Перечислим, для начала, основные преимущества формата STL.

- 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 имеющихся алгоритмов поверхностной триангуляции.

- Если рабочее пространство машины для БП мало по сравнению с размером модели, STL-файл модели необходимо 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.

Охарактеризуем теперь недостатки указанного формата.

- 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. С другой стороны, 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.

Следующим важным шагом является разбиение виртуального (компьютерного) изображения объекта на сечения, по которым в последующем и будет осуществляться процесс послойного синтеза вещественной копии.

Общий метод определения промежутка (т.е. пустоты) в модели при ее сечении плоскостями может быть следующим. При испускании геометрического луча из одного угла (т.е. вершины поверхностного треугольника) он должен, пройдя через объемную фигуру, попасть в другой угол (т.е. другую вершину поверхностного треугольника), что означает — объект целый (рис. 1.5, 1.6). Если это не так — в объекте существует пустота.

Кратко описанный выше метод графического представления данных и соответствующий ему стандарт были использованы нами при создании программ, управляю-

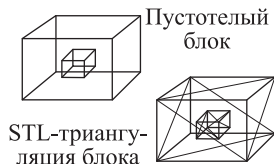


Рис. 1.5. Метод поиска пустоты в объекте

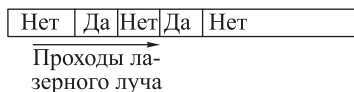


Рис. 1.6. Развертка лазерного луча при одиночном проходе

щих процессом лазерного спекания (гл. 2). Имея файл с координатами сечений 3-мерного объекта, нужно было разработать также и программу «развертки», т. е. описать путь, по которому будет осуществляться сканирование лазерного луча по каждому слою сечения. При лазерном проходе (рис. 1.6) излучение от лазера может достигать поверхности порошкового материала (и тогда в данном месте будет происходить спекание/сплавление) при открытой лазерной заслонке — «ДА». Или, наоборот, при закрытой заслонке поверхность не будет подвергнута лазерному воздействию (ЛВ) — «НЕТ».

Если грани поверхностных треугольников заранее при графической обработке сечений не сведены, то в промежутках спекания не будет, что может привести к неожиданным результатам при синтезе (рис. 1.7). Другая проблема может возникнуть при графическом представлении полосы Мёбиуса (рис. 1.8). Поскольку внут-

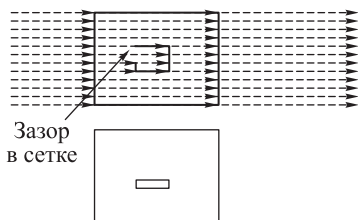


Рис. 1.7. Развертка лазерного луча при заштриховке сечения детали. Модель с внутренней «пустотой» будет иметь проблему, так как тестовый луч проходит через зазор в триангуляционной сетке

Рисунок ленты Мёбиуса

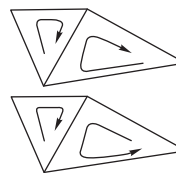


Рис. 1.8. Правила обхода для «сложной» поверхности. Программные утилиты 3D systems Co. для проверки геометрии STL-файлов

ренняя 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 приводит 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.

Таким образом (рис. 1.9), управляющая программа с STL-файлом содержит сведения о всех сечениях данной модели, всех составных частях модели (здесь

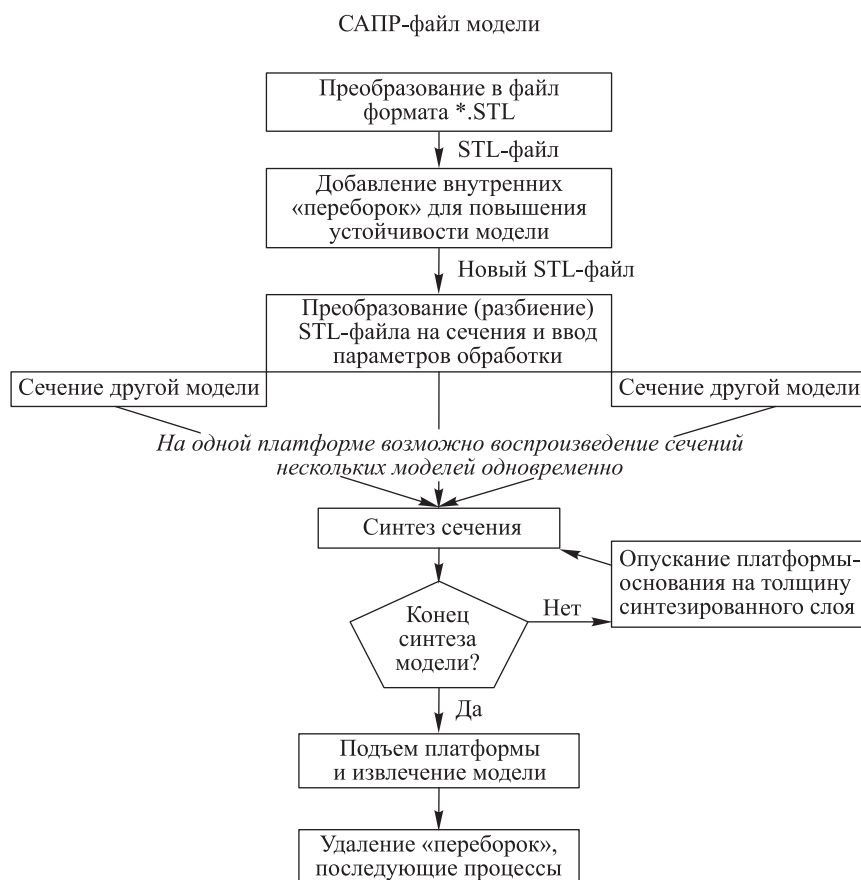


Рис. 1.9. Блок-схема управляющей программы обработки с STL-файлом

несколько файлов может быть использовано), величинах допустимых отклонений по уровню на один слой порошковой композиции при опускании платформы. В более продвинутых версиях управляющих программ учитываются допуски, сводящие к минимуму деформацию (усадку) отдельных слоев, ступенчатость боковых граней изделия и т. д.

Ниже будут описаны 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., применимые в том числе и для методики селективного лазерного спекания (СЛС) [2, 5, 6, 409].

### 1.2.1. Контроль представления данных в STL-файле и исправление ошибок.

Как отмечалось, STL-файл, созданный программой твердотельного моделирования, может содержать в себе ошибки, даже если исходная трехмерная модель не имела

дефектов. Вслед за авторами [1–4, 409] попробуем систематизировать виды ошибок, возникающих 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. 1.10). Как

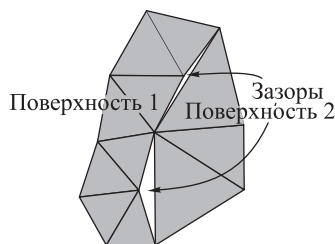


Рис. 1.10. Зазоры в STL-файле

следствие, отсутствует четкое различие между внутренней и внешней областью. 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. 1.11), в результате чего они окажутся несогласованными с направлением наружу, которое имела исходная поверхность.

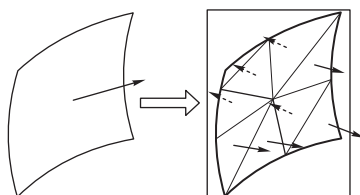


Рис. 1.11. Обращенные нормали в ячейке

3. Нормали ячеек, хранимые в STL-файле, могут не совпадать с нормальными, рассчитанными по вершинам соответствующих ячеек. Ячейки могут пересекаться неправильно, т. е. в каких-либо местах, кроме своих сторон; могут быть и перекрывающиеся ячейки (рис. 1.12).

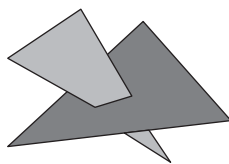


Рис. 1.12. Пересечение двух треугольников не по сторонам

4. Неверные геометрические алгоритмы, закрывая зазоры в STL, могут по ошибке создавать внутренние стенки и структуры, что может приводить к неоднородному



затвердеванию материала. Ошибку с появлением внутренней стенки иллюстрирует рис. 1.13.

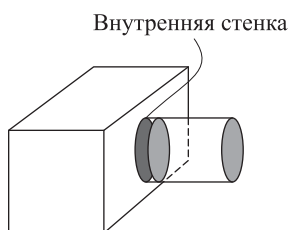


Рис. 1.13. Ошибка STL-модели с появлением внутренней стенки

5. STL-файл может иметь несогласованные значения допусков, если он создан путем объединения двух различных файлов. Кроме того, могут существовать 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 вершины 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, т.е. как сопрягаются две поверхности. Оба типа вырожденных ячеек демонстрирует рис. 1.14.



Рис. 1.14. Вырождение ячеек в STL-файле: *a* — геометрическое вырождение — вырожденный треугольник с тремя различными вершинами; *б* — топологическое вырождение — вырожденный треугольник с тремя совпадающими вершинами — *точка*; *в* — топологическое вырождение — вырожденный треугольник с двумя совпадающими вершинами — *линия*

Если в STL-файле обнаружены ошибки, то прежде чем производить расщепление, необходимо предпринять некоторые дополнительные действия в отношении файла. 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 [412].

**1.2.2. Определение направления наращивания изделия.** Поскольку все объекты изготавливаются послойно, определяющим фактором является выбор направления наращивания слоев [2]. Он влияет на многие ключевые аспекты процесса БП, включая качество отделки поверхности, длительность изготовления, требуемое

количество поддерживающих структур и «запертые объемы». Следует признать, что выбор направления наращивания осуществляется, в основном, методом проб и ошибок, а может и вовсе не рассматриваться. Несколько направлений наращивания, соответствующих принципиальным аспектам процесса, показаны на рис. 1.15. 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.

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. 1.16). Высота каждой ступеньки — это толщина слоя в дан-



Рис. 1.15. Оптимальные направления наращивания

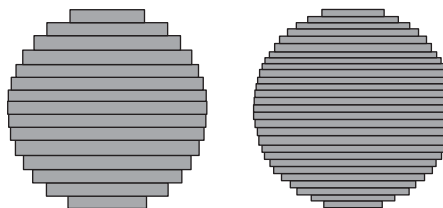


Рис. 1.16. Ступенчатый вид кривой поверхности

ном месте детали. Для некоторых случаев ориентации детали может потребоваться поддерживающая структура.

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 порошок заперт, если его невозможно удалить из контейнера. Соответственно, в зависимости от ориентации одна и та же вогнутая область может запереть необработанный порошок, а может и не запереть его. Если образуется запертый объем, иногда бывает необходимо изготовить деталь со спускным отверстием, а после затвердевания заполнить это отверстие. В таком процессе, как ламинирование, запертые объемы не допускаются, поскольку удаление лишнего материала, находящегося в запертом объеме, 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, требуемое 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, 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 [410].

**1.2.3. Поддержки.** Поддержки, т.е. внутренние или внешние «переборки» (рис. 1.17), создаются на стадии компьютерной разработки 3-мерного вида модели

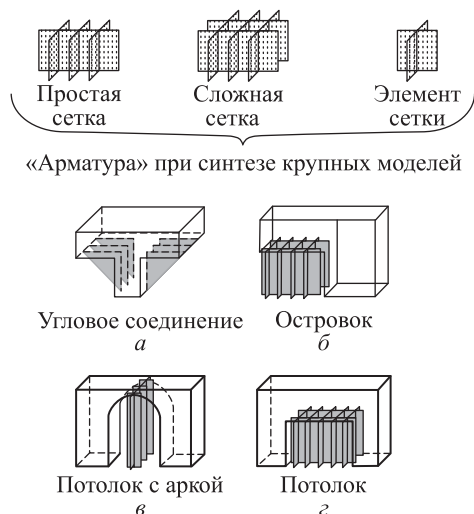


Рис. 1.17. Примеры «поддержек»

при помощи различных программ (например, Solid Concepts, Лос-Анжелес, Калифорния). Они позволяют: стабилизировать выступы, консоли на краях модели; предотвращать расслаивание в сложных участках модели; корректировать возможное искривление слоев на платформе; легко отделять синтезированную модель от основания-платформы; облегчать синтез сложных моделей, создавая их из нескольких частей.

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

Они необходимы по следующим причинам. Во-первых, они гарантируют, что формователь 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) спекания у основания платформы (где имеется высокий теплоотвод) существенно отличаются от режимов спекания в объеме — сгладить эти отличия позволяет продуманное построение системы поддержек. Обычно поддерживающие структуры имеют неплотный контакт с платформой для облегчения последующего извлечения детали. Поддерживающая структура должна также следовать периферийной части нижнего слоя детали, включая углы. 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. 1.18), что позволяет легко удалять поддерживающую структуру и минимизировать влияние высокого теплоотвода в платформу.

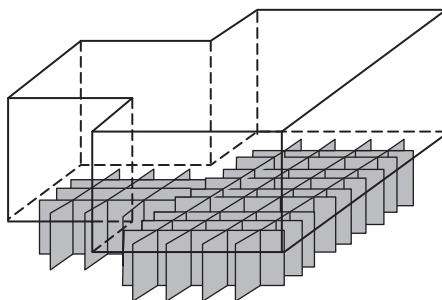


Рис. 1.18. Генерация ячеистого шаблона для пьедестала

Поддерживающие структуры требуются также [409], когда деталь имеет «островки» (island) или нависающие части. «Островком» называется часть детали, не связанная с какой-либо другой частью данного слоя (см. рис. 1.17, 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 быть предпочтительно, если островок располагается высоко над платформой, поскольку это сокращает длительность изготовления. Нависшие части также следует поддерживать с помощью треугольных подпорок, называемых клиньями (gussets) (см. рис. 1.17, 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. 1.17, в и г) тоже.

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

**1.2.4. Расщепление и объединение, стиль и шаг решетки при послойном синтезе.** Как отмечалось в разд. 1.2 (рис. 1.9) [2, 409] на стадии расщепления и слияния деталь и поддерживающие структуры рассекаются компьютером 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. Толщина слоя выбирается исходя из упомянутого выше эффекта «ступенек». Нижний предел толщины слоя определяется разрешающей способностью управления подъемным механизмом платформы, а верхний — мощностью лазера и скоростью сканирования. 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.

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, т. е. заполнить точками какую-либо плоскость сечения. Однако выборочное сканирование может обеспечить структурную жесткость, а необработанные области оставляются до процедуры пост-обработки. Таким образом, сначала очерчиваются границы, а затем сканируется внутренность, для чего используется тот или иной стиль [409], причем почти все передовые процессы изготовления деталей, стремящиеся повысить точность изготовления, сосредотачиваются на минимизации эффектов внутреннего напряжения.

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

2. Метод *WEAVE* (3D Systems) использует решетку из линий, параллельных осям  $X$  и  $Y$ . Например, на рис. 1.18 ячеистый шаблон для подпорки-основания можно создать с помощью метода *WEAVE* с большим шагом решетки. Для более тонких слоев необходимо уменьшать шаг решетки.

3. Стиль *STAR-WEAVE*, являющийся производным от *WEAVE*, вводит три новых понятия: шахматная решетка (*staggered hatch*), 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 решеткой иллюстрирует рис. 1.19. 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 (рис. 1.19) такова: на первом этапе сканируется каждый четный проход (из пары проходов, общим числом проходов  $n$ ); на втором этапе сканируется каждый нечетный проход (из пары проходов, общим числом проходов  $n$ ). Различные способы реализации проходов с номерами  $(n + 1, \dots, n + i)$  также показаны на рис. 1.19 [524].

Термин чередование последовательности означает, что последовательность рисования линий чередуется от слоя к слою. В этом случае векторы  $X$  и  $Y$  бу-

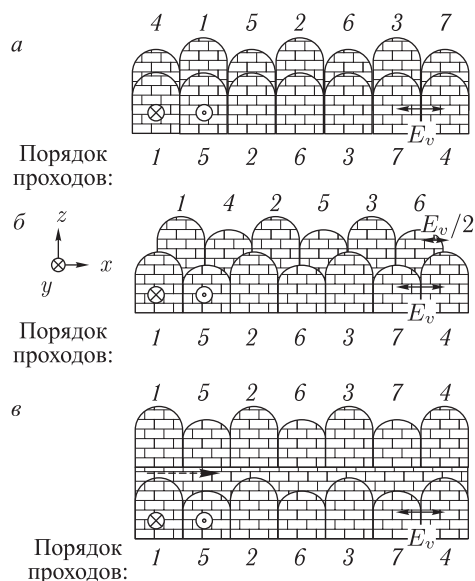


Рис. 1.19. Сравнение стилей решеток (цифрами пронумерована последовательность проходов): *а* — обычное наложение проходов; *б* — шахматная решетка; *в* — крестообразный порядок

дуг чередоваться в порядке, определенном последовательностью рисования. Так, например, в четных слоях первыми могут рисоваться векторы  $\mathbf{X}$ , а в нечетных — векторы  $\mathbf{Y}$ . Более того, направление рисования векторов также чередуется. Соответственно, например, в  $n$ -м слое векторы  $\mathbf{X}$  рисуются первыми в направлении от передней стенки платформы к задней стенке. В  $(n + 1)$ -м слое векторы  $\mathbf{X}$  рисуются вторыми (после векторов  $\mathbf{Y}$ ), причем в направлении от задней стенки платформы к передней. В сокращенной решетке каждый вектор,  $\mathbf{X}$  либо  $\mathbf{Y}$ , 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 ENISE (Франция) схематически изображен на рис. 1.20 [524].

4. 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.

Чтобы создать квазиполую структуру по методу QuickCast, необходимо изготовить объект с большим шагом решетки. Говоря математическим языком, объект

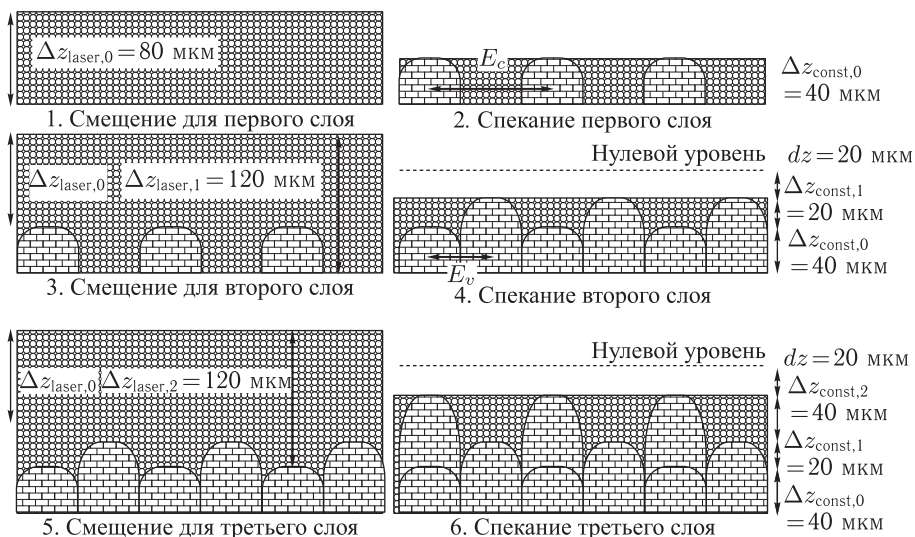


Рис. 1.20. Оптимальное спекание второго и последующих слоев от основания платформы. Смещения ( $\Delta z_i$ ) указаны для металлического порошка

должен быть односвязным. Если в произвольном месте топологически односвязного шаблона умышленно создать спускное отверстие, а еще в одном его месте создать относительно небольшое вентиляционное отверстие, устраняющее частичный вакуум, который в противном случае неминуемо образовался бы, то исходный материал сможет покинуть шаблон. Шаблоны решетки для метода QuickCast показаны на рис. 1.21.

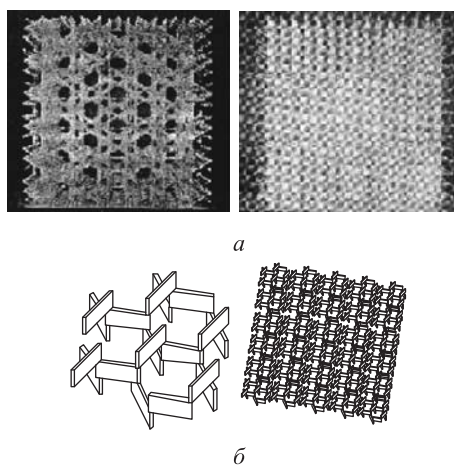


Рис. 1.21. Шаблоны решетки QuickCast: *a* — в QuickCast версии 1.1 используется решетка из равносторонних треугольников и смещенных квадратов; *б* — в QuickCast версии 2.0 используется шестиугольная решетка для построения более слабых шаблонов, которые легко выжигаются при литье по выплавляемым моделям



### 1.3. Процессы скоростного фрезерования и скоростного копирования

Быстрая инструментовка или скоростное фрезерование (Rapid Tooling; рис. 1.22) — новый термин, появившийся на рубеже XXI столетия, с несколько размытым определением. Первоначально он использовался лишь применительно к БП, но потом

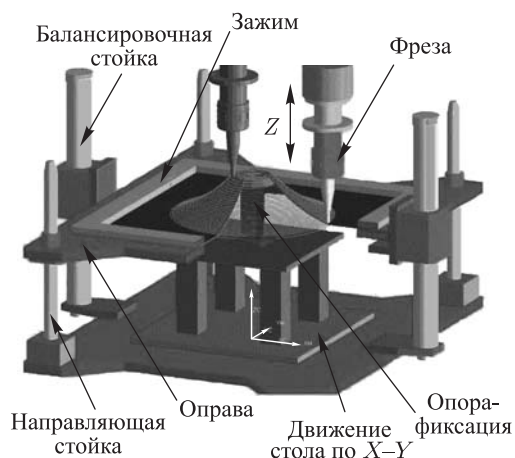


Рис. 1.22. Создание изделия при обработке фрезой

стал применяться для описания всех процессов, позволяющих быстро изготавливать инструменты. Сюда относятся процессы обработки (например, высокоскоростная резка, технология лазерного формования) и процессы БП. Если говорить о БП, то быстрая инструментовка включает в себя несколько подходов, различающихся числом инверсий шаблона. Увеличивая число инверсий, можно повысить надежность продукта, но стоимость его при этом будет расти, а точность изготовления — уменьшаться.

1. Прямая обработка — ACES-литье под давлением (Direct AIM) фирмы 3D Systems, RapidTool фирмы DTM, Soliforg и литье с прямым изготовлением оболочковых форм (DSPC) являются методами прямой инструментовки.

2. Одноинверсные методы (single-reverse methods) предназначены для непосредственного преобразования различных шаблонов БП в литые детали из других материалов. Литье по выплавляемым моделям, аэрозольное металлическое литье и вулканизационное литье из силиконовой резины являются одноинверсными методами.

3. Двухинверсная обработка и трехинверсная обработка может быть реализована широко разрекламированным методом 3D Keltool (3D Systems) [410].

Быстрое копирование или обратное проектирование (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 вкупе с другими технологиями экономии времени, такими как БП и тиражирование. Процесс реинжиниринга состоит из



двух фаз: оцифровка, или измерение детали, и трехмерное моделирование детали на основе данных оцифровки рис. 1.23.



Рис. 1.23. Ручной 3-мерный 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 (рис. 1.24). Перенеся STL-файл на машину для БП, можно изготавливать копии



Рис. 1.24. HandyScan 3D — портативная измерительная система для БП, применяемая в автомобилестроении, авиации, медицине, археологии. На выходе формат СММ-файла, совместимый с STL

отсканированной модели. Трехмерные сканеры являются основным инструментом для автоматизированного процесса оцифровки. Ряд графических пакетов (Magics) включают в себя опцию — интерфейс оцифровки полученных данных с 3-мерных сканеров и поддерживаемых сканерами форматов представления данных.

#### 1.4. Методики быстрого прототипирования

Как уже отмечалось выше, в настоящее время известно более нескольких десятков методик БП, от экзотичных (например, freeze water method (FWM) — метод послойного замораживания воды для выращивания изделий из льда), до коммерчески успешных (SLA, SLS, LOM, FDM и т. д.). В табл. 1.1 представлены основные

Таблица 1.1

Основные патенты технологии быстрого прототипирования (информация взята с любезного разрешения владельца веб-сайта по быстрому прототипированию Эдварда Дженда CASTLE ISLAND Co. (США), <http://home.att.net/~rppat/museum/mp.htm>)

Год	№ патента США	Название изобретения	Изобретатель	Правообладатель	Область технологического применения
1	2	3	4	5	6
1. Исторические предшественники					
1976	3 932 923	Method of generating and constructing three-dimensional bodies	DiMatteo P. L.	Dynell Electronics Co.	Реинжиниринг (обратное проектирование или копирование) и числовое программное управление быстрого прототипирования (ЧПУ БП)
1977	4 041 476	Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product	Swainson W. K.	Formigraphic Engine Co.	Однослойная стереолитография и ее предшественники
1981	4 247 508	Molding process	Housholder R. F.	Hico Western Products Co.	Предшественники селективного лазерного спекания (СЛС) в общем
1982	4 323 756	Method for fabricating articles by sequential layer deposition	Brown C. O., Breinan E. M., Kear B. H.	United Technologies Co.	Наплавка
2. Основные патенты технологий быстрого прототипирования					
1986	4 575 330	Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography	Hull C. W.	UVP, Inc., патент приобретен 3D Systems, Inc.	Стереолитография
1987	4 665 492	Computer automated manufacturing process and system	Masters W. E., Easley	BPM, Inc.	Распыление термопластов (подобно струйной печати)

Таблица 1.1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6
1988	4 752 352	Apparatus and method for forming an integral object from laminations	Feygin M.	Helisys, Inc., в дальнейшем Cubic Technologies, Inc.	Ламинирование листовым материалом
1988	4 752 498	Method and apparatus for production of three-dimensional objects by photo solidification	Fudim E. V.	Light Sculpting, Inc.	Автоматически контролируемый дизайн (экспозиция фотополимера через маску)
1988	4 775 092	Method and apparatus for building a workpiece by deposit welding	Edmonds D. P, McAninch M. D.	Babcock & Wilcox Company	Объемная наплавка (объемная (3D) сварка)
1989	4 863 538	Method and apparatus for producing parts by selective sintering	Deckard C. R.	Попечительский совет Техасского университета, патент приобретен DTM, Inc., позднее приобретен 3D Systems	Селективное лазерное спекание (СЛС)
1990	4 961 154	Three dimensional modeling apparatus	Pomerantz I., Cohen-Sabban J., Bieber A., Kamir J., Katz M., Nagler M.	Scitex Co. Ltd., патент приобретен Cubital Inc.	Отверждение на твердом основании (УФ облучение через фотомаску)
1991	5 059 266	Apparatus and method for forming three-dimensional article	Yamane M., Kawaguchi T., Kagayama S., Higashiyama S., Suzuki K., Sakai J., Imaeda M., Inaishi K., Okaza	Brother Kogyo Kabushiki Kaisha	Струйный фотополимер
1992	5 088 047	Automated manufacturing system using thin sections	Bynum D. K.	—	Электрофотографическое нанесение

Таблица 1.1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6
1992	5 121 329	Apparatus and method for creating three-dimensional objects	Crump S. S.	Stratasys, Inc.	Послойная заливка экструдированным расплавом (нити из термопластов, полимер + керамика)
1992	5 126 529	Method and apparatus for fabrication of three-dimensional articles by thermal spray deposition	Weiss L. E., Prinz F. R., Gursoz L. E.	Университет Карнеги-Мелон	Нанесение через маску
1992	5 136 515	Method and means for constructing three-dimensional articles by particle deposition	Helinski R.	—	Струйная печать с добавлением поддерживающего материала
1992	5 141 680	Thermal stereolithography	Almquist T. A., Smalley D. R.	3D Systems, Inc.	Многоструйная печать
1993	5 182 170	Method of producing parts by selective beam interaction of powder with gas phase reactant	Marcus H. L., Lakshminarayan U., Bourell D. L.	Попечительский совет Техасского университета	Селективная лазерная наплавка
1993	5 203 944	Method for fabrication of three-dimensional articles by thermal spray deposition using masks as support structures	Prinz F. B., Weiss L. R., Adams D. A.	—	Послойное создание литьевой формы
1993	5 204 055	Three-dimensional printing techniques	Sachs E. M., Haggerty J. S., Cima M. J., Williams P. A.	Массачусетский технологический институт, патент приобретен Z Corp., Soligen, ProMetal и другими компаниями	Трехмерная печать (струей клейкого материала)

Таблица 1.1 (окончание)

1	2	3	4	5	6
1993	5 257 657	Method for producing a free-form solid-phase object from a material in the liquid phase	Gore D. W.	Incre, Inc.	Струйная печать расплавленным металлом
1996	5 506 607	3-D model maker	Sanders Jr., Royden C., Forsyth J. L., Philbrook K. F.	Sanders Prototypes Inc., переименован в Solidscape, Inc., патент приобретен Sanders Design International	Струйная печать с добавлением поддерживающего материала
1996	5 529 471	Additive fabrication apparatus and method	Khoshevis B.	Университет Южной Калифорнии	Контурное ремесло
1997	5 640 667	Laser-directed fabrication of full-density metal articles using hot isostatic processing	Freitag D. W., Beaman J. J., Bourell D. L.	Попечительский совет Техасского университета	Селективное лазерное спекание (СЛС) + горячее изостатическое прессование (ГИП)
1998	5 786 562	Method and device for producing three-dimensional bodies	Larson R.	Arcam Limited	Плавление электронным пучком
1998	5 837 960	Laser production of articles from powders	Lewis G. K., Milewski J. O., Cremers D. A., Nemes R. B., Barbe M. R.	Попечительский совет Калифорнийского университета	Лазерное порошковое формование
1998	5 847 958	Rapidly making a contoured part	Shaikh F. Z., Brogley M. A., Burch C. E., Grab G. A., Grenkowitz R. W., Novak R. F., Rigley M. R.	Ford Global Technologies, Inc.	Метод ламинирования листовым материалом на ЧПУ
2000	6 027 630	Method for electrochemical fabrication	Cohen A. L.	Университет Южной Калифорнии, патент приобретен Microfabrica	Электрохимическое изготовление
2001	6 253 116	Method and apparatus for rapid freezing prototyping	Zhang, Wei, Leu, Ming C., Ji, Zhiming, Yan, Yongnian	Технологический институт Нью-Джерси	Метод быстрой заморозки

патенты технологии БП. На данный момент общее число патентов, касающееся как самой технологии БП, так и ее ответвлений (Rapid Tooling — быстрое прототипирование оснастки, Rapid Reverse Engineering — быстрое копирование, Medical RP — медицинские приложения, наконец, архитектура и искусство), превышает несколько сотен.

Далее в разд. 1.4.1–1.4.7 представлено схематичное описание наиболее известных методик БП. Это сделано не столько с целью показать некоторые преимущества или недостатки самих методик, но, в большей мере, чтобы отметить их взаимосвязь и подчеркнуть, как физические и технологические идеи, реализованные в одной методике, «перетекали» в другие методики. Особое внимание будет уделено работе с порошковыми материалами, а именно методам SLS и DMD, как главному направлению изложения в данной книге.

**1.4.1. Лазерная стереолитография.** Лазерная стереолитография (англ. термин — Stereo Lithography Apparatus (SLA)) является одним из первых и наиболее развитым в технологическом плане способом синтеза объемных изделий. Впервые предложена Чарлзом Хеллом (Charles Hall) в 1986 г. В настоящее время известны установки по стереолитографии SLA-250, SLA-500, SLA-700 и т. д. (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 литров. Установки производятся компанией 3D Systems Inc. (90% всего рынка уже в 1991 г., технологические установки производятся с 1988 г.). Существуют подобные установки у других производителей: SOMOS (Dupont), Teijin Seiki (Токио, Япония), SOUP (СМЕТ, Токио, Япония), JCS (Sony, Токио, Япония). Несколько установок произведено в России (ИПЛИТ РАН, Шатура).

Блок-схема на рис. 1.25 описывает процесс стереолитографии.

Физика процесса (рис. 1.26) основана на поглощении фоточувствительным полимером ЛИ конкретной длины волны, в результате чего в месте поглощения наблюдается процесс радикальной полимеризации, т. е. отверждения полимера.

Процесс синтеза модели осуществляется на платформе, которая расположена в ванне с полимером (рис. 1.27). После отверждения текущего слоя основание-платформа вместе с моделью опускается вниз (~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 на поверхности полимера и по заранее подготовленному САД-программой контуру обрабатывает (полимеризует) следующий слой.

При отверждении происходит усадка полимера. Эта усадка может привести к изменению объема жидкости в ванне и должна все время контролироваться. В случае отклонения уровень восстанавливается (рис. 1.28). Минимальные толщины слоев составляют от 50 до 500 мкм, в зависимости от типа полимера. Чем тоньше отвержденные слои, тем точнее, «глаже» боковая поверхность модели (см. рис. 1.16), но, с другой стороны, процесс идет дольше. Когда модель готова, платформа поднимается над уровнем жидкости, излишки олигомера стекают. После выемки модели из ванны она помещается в печь для дополнительного отверждения полимера (пост-обработка).



Рис. 1.25. Блок-схема процесса лазерной стереолитографии

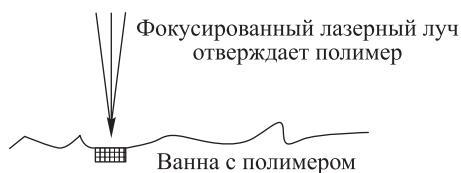


Рис. 1.26. Физика процесса

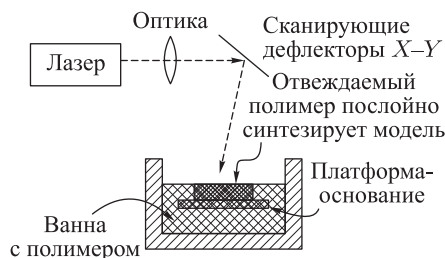


Рис. 1.27. Процесс синтеза слоя

Лазерная мощность составляет 10–200 мВ (чем она больше, тем быстрее идет процесс полимеризации). В стереолитографии используются, в основном, He–Cd или Ag-ионный лазеры, работающие в области УФ-излучения (длина волны 320–370 нм). Возможно использование самоподстраивающейся оптики для верификации фокусного расстояния до места обработки (рис. 1.29).



Рис. 1.28. Шаги платформы за цикл синтеза

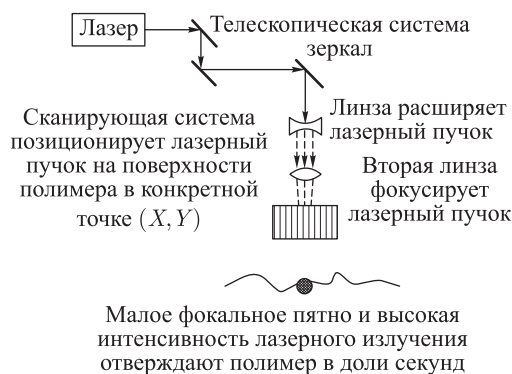


Рис. 1.29. Адаптивная система фокусировки

X-Y-дефлекторы представляют собой два управляемых компьютером зеркала и изображены на рис. 1.30. Выбор типа полимера также влияет на скорость синтеза.

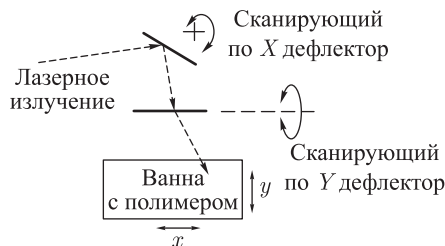


Рис. 1.30. Устройство сканирования ЛИ

Фотополимер светочувствителен и токсичен. Поэтому ванна должна быть защищена от света и имеет проточную вентиляцию. В процессе пост-обработки используется ультрафиолетовое излучение мощных ламп, которое окончательно отверждает полимер. Время синтеза составляет час или более, после отверждения полимер теряет свою токсичность.



Данная методика синтеза имеет следующие преимущества:

- установка полностью автоматизирована и работает без вмешательства оператора;
- точность воспроизведения модели высокая;
- острые края моделей заполняются полимером, что уменьшает склонность к расслоению;
- получил широкое распространение.

Его недостатки:

- длительное время на пост-обработку (16 и более часов);
- усадка полимера при отверждении, приводящая к деформациям формы поверхности, а следовательно, уменьшающая точность воспроизведения;
- химическая токсичность полимера и чистящих ванну средств;
- ограниченное количество возможных для использования типов полимеров и их высокая цена  $\sim \$100-200$  за литр;
- необходима высокая техническая подготовка персонала и затраты на обслуживание оборудования;
- при синтезе необходимы «переборки»;
- требуются работы по удалению этих переборок после синтеза;
- если деталь имеет вырезы внизу, то верхнее поперечное сечение детали имеет большую площадь, чем нижнее.

Изготовленная методом стереолитографии фигурка герба РФ (ИПЛИТ, Шатура) изображена на рис. 1.31. Однако не все проблемы метода лазерной стереолитографии решены полностью:

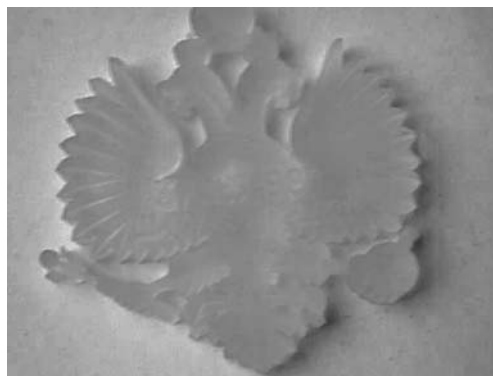


Рис. 1.31. Фигурка герба РФ

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

Приложения, где может быть использована методика связаны с ее особенностями:

— отвержденный полимер хрупок, поэтому, в основном, ее используют при концептуальном проектировании;

— она хорошо подходит для сборочного конструирования более сложных композиционных моделей, возможно нанесение слоя резины или металла (становится менее хрупким);

— она используется в технологии литья по выплавляемым формам в качестве мастер-форм, эталон-моделей, для изготовления опоки, из которой в последующем сама 3-мерная модель выпаривается, а в пустоты заливается расплав металла.

Традиционные производители смол (олигомеров) — фирмы SOMOS и 3D Systems. Протекционистскими мерами они контролируют рынок исходных материалов для SLA, держат их стоимость на высоком уровне и фактически имеют с этого дополнительную и немалую статью дохода. Фирма Дюпон (Dupont) также создает материалы для стереолитографии, которые обладают более высокой прочностью и менее хрупки. В 2004 г. 3D Systems предложила новый фотополимер — Accura SI 50 SL, с характеристиками АБС-пластика, а также Bluestone нано-композитную резину. Стоимость SLA 7000 сейчас составляет ~\$800 000. В этом же году 3D Systems анонсировала машину Viper HA для стереолитографии, как замену серии SLA. Особенностью новой машины является возможность синтеза в двух ваннах из разных материалов. Методом стереолитографии получены волокна высокой прочности. Удешевить процесс возможно, используя в установке управление УФ-излучением из оптоволокон. Модели больших размеров синтезируются по частям, а затем склеиваются по блокам. В качестве клея может быть тот же полимер, который отверждается под УФ-лампой. Возможна добавка в полимер порошков металлов или керамики, что изменяет (порой даже и ухудшает) свойства полимера, да и усложняет процесс синтеза [7]. Широкая гамма отливок может быть создана по литьевым формам из полимерных эталон-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 [8, 9]. Медицинские приложения также впервые были реализованы именно с использованием стереолитографических моделей [10, 11]. Поскольку количество проданных в мире установок по стереолитографии на начало XXI века превышало все установки, основанные на других методиках БП, на примере лазерной стереолитографии как «локомотиве» технологий БП отрабатывались физические и технологические основы послойного ЛСОИ (воспроизводимость формы, оптимизация исходных материалов, позиционирование лазерного луча, методы сканирования обрабатываемой поверхности, варьирование энергии ЛИ за счет мощности, скорости сканирования и диаметра пятна лазерного источника и т. д.). С учетом специфики полученные знания были перенесены на другие, в том числе и нелазерные способы синтеза объемных изделий.

**1.4.2. Селективное лазерное спекание.** Метод селективного лазерного спекания (СЛС) является альтернативным способом создания объемных моделей по отношению к методу стереолитографии, поскольку реализуется практически аналогично. Проблемы и положительные стороны объемной стереолитографии имеют место и здесь. Однако существуют серьезные основания надеяться на большую экономичность метода СЛС за счет дешевизны отечественных порошковых материалов,

а также на возможность создания моделей, отличающихся повышенной прочностью и большими функциональными возможностями.

Порошковый материал послойно спекается ЛИ. Для этой методики нужны мелкодисперсные термопластичные порошки, с хорошей вязкостью и быстро затвердевающие, например полимеры, воск, нейлон, керамика или металлические порошки с добавкой легкоплавкого связующего. Методика предложена впервые Карлом Деккардом (Carl Deckard) в 1989 установки начали производиться фирмой DTM Corp. (Sinterstation 2000, 2500 и т.п., фирма теперь принадлежит 3D Systems) в США и EOS GmbH в Германии. В рабочей камере порошок предварительно подогревается до температуры, несколько меньшей, чем температура плавления легкоплавкой фазы.

Синтезируемая модель расщепляется в компьютере на сечения по информации из файла \*.STL и после разравнивания валиком порошка по поверхности зоны обработки, ЛИ CO<sub>2</sub>-лазера (длина волны излучения 10,6 мкм) спекает требуемый контур, затем новый слой порошка насыпается, разравнивается (рис. 1.32), и процесс

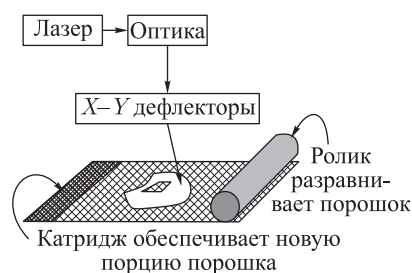


Рис. 1.32. Устройство разравнивания порошковой смеси

повторяется. Когда модель готова, она извлекается из камеры, а излишки порошка удаляются встряхиванием или зачисткой специальным шпателем.

В данной методике «подпорки» не нужны, так как сам порошок поддерживает спекаемую модель, а удаляемый порошок можно использовать повторно, как и полимер в стереолитографическом методе. Медленное остывание порошкового объема предотвращает от значительных деформаций формы изделия.

Мощность лазеров в СЛС-установках составляет не более 50–100 Вт в ИК-диапазоне (длина волны обычно 10,6 мкм, теперь есть установки с длиной волны 1,06 мкм). Контроль уровня порошка в камере осуществляется аналогично процессу стереолитографии. Сканирование ЛИ по направлениям X–Y также подобно описанному ранее. В камеру возможна подача азота, аргона, чтобы избежать окисления при нагреве порошков. Производительность процесса была около ~ 1,5–2,5 см по высоте за час.

Таким образом, преимущества метода СЛС:

- нетоксичные, недорогие материалы;
- использование широкого спектра порошков: от литейного воска до полимеров для соединения сложных и/или крупный деталей;
- отсутствие поддержки;
- малые деформации и напряжения.

К недостаткам можно отнести:

- высокую шероховатость;

- пористость моделей (хотя это может найти применения);
  - необходимость формирования первого слоя из подобного материала для снижения термических эффектов;
  - изменяемая плотность моделей (это и плюс, и минус);
  - необходимость чистки всей камеры при изменении порошкового материала.
- Развитие технологии идет по пути внедрения:
- новых порошковых материалов (в том числе субмикронных размеров);
  - повышения мощности ЛИ (для металлических порошков) и получения более прочных изделий.

На практике для металлических порошков, когда частицы покрыты термопластическим связующим материалом или добавлено легкоплавкое связующее, используется процесс косвенного жидкофазного спекания (ЖФС) (см. гл. 3, 4). Под лучом лазера связующий материал расплавляется и свободно связывает («склеивает») частицы металлического порошка, образуя 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 носит название brown part. Без дальнейшей обработки деталь будет довольно пористой из-за наличия пустот, которые ранее занимали частицы связующего материала. Чтобы снизить пористость, в печь помещается еще один материал — инфильтрант. Этот металл 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 от 2500 до 10 000 деталей-прототипов. Таким образом, такой процесс СЛС требует, так же как и SLA-метод, ряда дополнительных операций (пост-процессы), что отразилось в его названии — Non Direct SLS. Однако последние годы активно внедряется метод Direct SLS (DSLS), предполагающий изготовление функциональных изделий непосредственно на установке (см. разд. 2.1).

К настоящему времени известно большое количество опробованных материалов для СЛС:

1) однокомпонентные — поликарбонат [12, 28, 41, 63, 182, 204, 206, 208], нейлон [25, 52, 53], железо [15, 191, 218, 223], титан [18, 42, 47, 86, 231, 304, 304], медь [30];

2) 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<sub>3</sub>P, WC-Co, TiC-Ni/Co/Mo, TiCN-Ni, TiB<sub>2</sub>-Ni, ZrB<sub>2</sub>-Cu, Fe<sub>3</sub>C-Fe) [13, 14, 30, 33, 40, 50, 51, 67, 75, 76, 81, 82, 192, 254, 263, 267, 268, 270, 280, 281, 291, 293, 298, 301, 309];

3) низко- и высоколегированные стали [16, 17, 23, 24, 54, 72, 74, 191, 223];

4) конструкционная (ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>4</sub>B<sub>2</sub>O<sub>9</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti-Zr-Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti+ZrO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al, ZrO<sub>2</sub>-Al-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [19-21, 27, 32, 42, 46, 85, 361] и сегнетоэлектрическая (Pb(Zr<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>)O<sub>3</sub>, Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub>, Li<sub>0,5</sub>Fe<sub>2,5-x</sub>Cr<sub>x</sub>O<sub>4</sub>, BaFe<sub>12x</sub>Cr<sub>x</sub>O<sub>19</sub>) [22, 73, 315-318, 327-329] керамики; керамо-(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + полиметилметаакрилат) [26] и пьезопласты (ЦТС + PVDF) [375].

Реализовано совмещение процесса СЛС с процессами горячего изостатического прессования (на базе сплавов INCONEL 625, Ti-6Al-4V) [31, 40, 51, 84] и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) (смеси на основе  $\text{TiO}_2+\text{C}+\text{Al}$ ,  $\text{Ni}+\text{Ti}$ ,  $\text{Ni}+\text{Al}$ ,  $\text{Ti}+\text{Al}$ ,  $\text{PbO}+\text{ZrO}_2+\text{TiO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Cr}_2\text{O}_3+\text{FeBaO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Cr}_2\text{O}_3+\text{Fe}$ ) [29, 192, 254, 263, 267, 268, 270, 280, 281, 291, 293, 298, 301, 309, 315–318, 327–329]; с химическими реакциями с участием газовых добавок (получение  $\text{SiN}$  из  $\text{Si}+\text{N}_2$ ,  $\text{SiC}/\text{Si}_3\text{N}_4$  из  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{Si}(\text{CH}_3)_4$  и  $\text{NH}_3$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{TiN}$  из  $\text{N}_2$ ) [34–37, 44, 91]; с процессом гелевого литья (ЦТС-керамика + полимер) [77]; с послойным нанесением покрытий ( $\text{Al}/\text{Cu}$  на стекло) [83]. Наконец, как альтернатива СЛС в [217] 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 разд. 1.4.6).

Изучены оптические [18, 82, 174], термические [47–49, 60, 63, 88, 179] свойства, микроструктура и механика [26, 28, 53, 54, 58, 63, 64, 67, 70, 88, 242, 250, 304, 305] синтезируемых изделий и порошков на их основе. Развита одно-, дву- и трехмерные модели для расчетов тепловых полей методами конечных элементов [41, 43, 48, 49, 68, 92], модели клеточных автоматов [201] и конечных разностей [44, 61, 71, 88, 90, 91, 93, 179, 174, 186, 187, 200, 214, 399, 406], а также напряжений и деформаций в спекаемых изделиях [48, 49, 57, 186, 187, 201]. Изделия, синтезируемые методом СЛС, находят применение в качестве фильтров [38, 52, 62, 80, 343, 345, 351]; медицинских имплантатов (на базе  $\text{Ti}$ , гидроксиапатита,  $\text{NiTi}$ ,  $\text{NiTi}+\text{HA}$ ) [39, 55, 56, 59, 62, 80, 86, 89, 280, 281, 286, 291, 293, 320]; электродов для электроразрядных машин [45, 65, 78, 79, 407]; деталей машин-роботов [66]; функциональных градиентных изделий и интеллектуальных микроустройств (MEMS) [69, 87, 130, 215, 320, 341, 375, 399].

В апреле 2005 г. 3D Systems анонсировала машину — Sinterstation Pro (рис. 1.33), которая включает кроме модуля БП станцию для очистки изделия от излишков



Рис. 1.33. Машина Sinterstation Pro с дополнительными модулями

порошка, модуль для восстановления свойств порошка после его многократного использования, замкнутую систему контроля за процессом синтеза, возможность предварительного подогрева рабочей камеры, генератор азота, камеру охлаждения [410]. Pro 230 имеет рабочий объем  $550 \times 550 \times 750$  мм и стоит  $\sim \$750\,000$ . Другой продукт фирмы — Sinterstation HiQ (апгрейд известной серии машин Vanguard). Тогда же

3D Systems было предложено два новых порошковых материала: DuraForm Flex — пластик с резиноподобными свойствами, DuraForm AF — полиамид, наполненный алюминием.

Европейский производитель EOS GmbH сейчас производит серии машин EOSINT P (для работы с термопластичными порошками), EOSINT S (печной песок), EOSINT M (металлические порошки; рис. 1.34). Индексы 250, 385, 750 характеризуют размеры зоны построения. В машинах серии 700 используются два лазера, что позволяет существенно увеличить скорость построения модели. Из порошковых материалов фирмой EOS в последние годы были предложены металлополимерный порошок (30% Al + нейлон), смесь для тонких стенок (~2 мм) — UL94, в работе кобальт-хромовые, титановые, железо-никелевые сплавы и даже золото.

Фирма Phenix Inc. разработала машину для СЛС (PM100 см. на рис. 1.35, PM250 — цифрой обозначен рабочий объем), отличительной особенностью, которой



Рис. 1.34. DSLS(M)-процесс — установка EOS M250Xtended (спекаемый объем  $250 \times 250 \times 180$  мм,  $\text{CO}_2$ -лазер мощностью 240–180 Вт, толщина слоя 0,02 мм, точность  $\pm 0,05$  мм)



Рис. 1.35. Внешний вид установки для СЛС фирмы Phenix

является интегрированная в технологический процесс печь (до  $900\text{ }^\circ\text{C}$ ) для синтеза керамических изделий (порошки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  их смеси). Машина оснащена волоконным лазером (50 и 100 Вт) с диаметром пятна ЛИ  $\sim 60$  мкм, она может работать с микронными порошками ( $\sim 10$  мкм) и создавать слои  $\sim 20$  мкм.

Реализация метода СЛС, особенности программно-аппаратного комплекса по СЛС объемных изделий деталей машин, разработанного и действующего в Самарском филиале Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, будут описаны в гл. 2.

**Селективное спекание электронным пучком, ультразвуком.** Аналитики БП считают очень перспективными разработку шведской фирмы ARCAM AB (Gothenburg, Sweden), в которой процесс спекания (сплавления) порошков осуществляется

в вакууме при воздействии на него электронного пучка (рис. 1.36). Машина EBM — Electron Beam Melting S12 (~ \$499 000) может работать с порошками нержавеющей



Рис. 1.36. Машина фирмы ARCAM AB

стали, смеси Inconel, титановыми и кобальт-хромовыми сплавами. Работа в вакууме позволяет избежать нежелательного окисления, азотирования и прочих процессов, 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.

Еще один флагман порошковой технологии БП Concept Laser GmbH (машина M3 Linea стоимостью \$550 000) создал установку, объединяющую в едином подходе процессы лазерной маркировки, наплавки порошка и лазерной обработки. 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 с диаметром лазерного луча 0,15–0,2 мм (Nd-YAG-лазер) удается получать практически литые изделия. Титановые и алюминиевые порошки находятся в стадии разработки.

Порошки металлов, керамику можно спекать (сплавлять) под воздействием ультразвука (метод Ultrasonic Consolidation (UC), Solidica Inc) [410]. УЗ-концентратор и 2D-координатный стол позволяют восстанавливать лопатки турбин с точностью  $\pm 0,075$  мм. Отсутствие значительного нагрева порошка полезно при работе с электронными компонентами.

**1.4.3. Послойное создание литевой формы.** Метод послойного создания литевой формы (англ. термин — 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 [94]. Впервые предложен Мерцем и Принцем (Merz & Prinz) в 1994 г. в Карнеги-Меллон и Стенфордском университетах.

Процесс вытачивания формы для отливки может быть осуществлен посредством 3/5-позиционного координатного стола, оснащенного: 1) механическими фрезами различного типа; 2) электро-разрядным аппаратом; 3) лазерной режущей головкой и т. п. Внутренность формы заполняется поддерживающим материалом (рис. 1.37), что важно для сложно-контурных деталей. Перед стадией литья поддерживающий материал удаляется (выжигается). Принципиальная особенность SDM-методики в том, что удается полностью решить проблему деляминации (расслоения) объемного



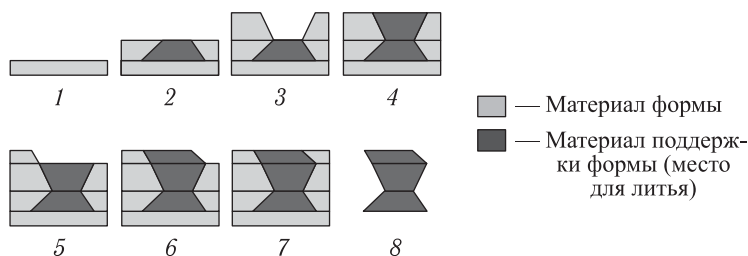


Рис. 1.37. Основы методики послойного создания литевой формы

изделия, характерную для других методик. Сами отливки выполняются из различных материалов — воска, полиуретана, керамики, металлов.

Более того, в процессе отливки можно чередовать материалы, создавая функционально-градиентное (ФГ) изделие. Эта плодотворная идея впервые была реализована именно SDM-методом (инвар (Fe-Ni-сплав) + TiC) [95, 101, 127]. Внутри изделия могут быть внедрены (сформированы из разнородных материалов) термодпары [97], решетка Брэгга [96, 98] и т. п. Это позволяет создавать микросенсоры (MEMS-устройства (гл. 6) для контроля температуры, напряжений) и внедрять их в готовые детали машин (лопатки турбин [99], микроторы электродвигателя [100], микродозаторы и т. п.). Такие мезоподходы (под мезоструктурами (3D-объектами) мы далее будем понимать структуры с размерами от 10–100 мкм до 1–10 мм) также были впервые опробованы на базе SDM-методики.

**1.4.4. Послойная заливка экструдруемым расплавом.** Процесс послойной заливки экструдруемым расплавом полимера (англ. термин — Fused Deposition Modeling (FDM)) был предложен Скоттом Крапом (Scott Crump), а компания Stratasys Co., США выпускает установки с 1992 г.

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

Основной частью установки является экструдруемая головка (рис. 1.38), через которую дозированно подается материал, предварительно подогретый до температуры плавления. Он скрепляется с предыдущим слоем. Головка перемещается в направле-

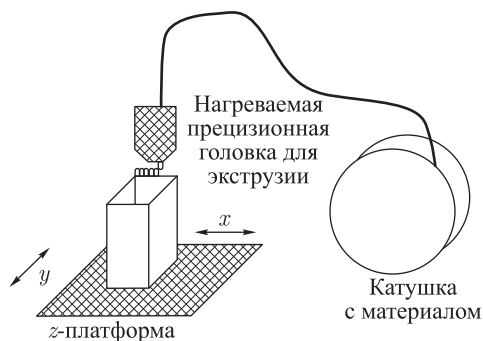


Рис. 1.38. FDM-процесс