

# САПР – СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Преподаватель:

Ассистент каф. ТМС Бабин Дмитрий Михайлович

# Введение

Прогресс науки и техники, потребности в новых промышленных изделиях обуславливают необходимость выполнения проектных работ большого объема.

Проектирование машин и систем машин является многоэтапным динамическим процессом. Это процесс творческий, многоплановый и достаточно трудоемкий. Как правило, проектирование машин, осуществляется большим коллективом различных специалистов с использованием многочисленных расчётных и экспериментальных, методов и приемов.

Требования, предъявляемые к качеству проектов, срокам их выполнения, оказываются все более жесткими по мере увеличения сложности проектируемых объектов и повышения важности выполняемых ими функций. Удовлетворить эти требования с помощью простого возрастания численности проектировщиков нельзя, так как возможность параллельного проведения проектных работ ограничена и численность инженерно-технических работников в проектных организациях страны не может быть заметно увеличена. Решить проблему можно на основе автоматизации проектирования – широкого применения вычислительной техники.

# Содержание 1

## **1. Основные понятия и определения**

**1.1 Проектирование как объект автоматизации**

**1.2 Аспекты и иерархические уровни проектирования**

**1.3 Стадии, этапы и процедуры проектирования**

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.1. Проектирование как объект автоматизации.

Для создания любой системы автоматизации необходимо знать свойства объекта автоматизации. Для САПР таким объектом является процесс проектирования и ниже рассмотрены основные понятия, относящиеся к сфере проектирования.

В настоящее время ГОСТ 22487 – 77 установлены основные термины и определения в области автоматизированного проектирования. Рассмотрим те из них, которые наиболее часто будут использованы в данном курсе.

**Проектирование** - процесс создания описаний нового или модернизируемого технического объекта (изделия, процесса), достаточных для изготовления или реализации этого объекта в заданных условиях. Такие описания, называемые окончательными, представляют собой комплект конструкторской и технологической документации в виде чертежей, пояснительных записок, спецификаций, программ для технологических автоматов и т. п. Процесс заключается в выполнении комплекса работ исследовательского, расчетного, конструкторского характера, имеющих целью преобразование исходного описания в окончательные описания. Исходное описание при этом есть техническое задание, отражающее назначение и основные требования к проектируемому объекту. Процесс проектирования может быть неавтоматизированным и автоматизированным.

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.1. Проектирование как объект автоматизации.

**Неавтоматизированное проектирование** — это проектирование, при котором все преобразования описания объекта и (или) алгоритма его функционирования или алгоритма процесса, а также представление описаний на различных языках осуществляются человеком.

**Автоматизированное проектирование** — это проектирование, при котором отдельные преобразования описаний объекта и (или) алгоритма его функционирования или алгоритма процесса, а также представления описаний на различных языках осуществляются при взаимодействии человека и ЭВМ.

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.1. Проектирование как объект автоматизации.

Степень автоматизации проектирования оценивается долей  $d$  проектных работ, выполняемых на ЭВМ без участия человека, в общем объеме проектных работ. При  $d = 0$  проектирование неавтоматизированное, а при  $d = 1$  — автоматическое. Для автоматизированного проектирования характерны рациональное распределение функций между человеком и ЭВМ и обоснованный выбор моделей и методов для автоматизированных процедур. Рациональность и обоснованность в выборе средств и методов проектирования определяются уровнем развития вычислительной техники, вычислительной математики, теории автоматизированного проектирования и конкретных технических дисциплин.

Под автоматизацией проектирования мы будем понимать широкий круг проблем, решаемых с использованием средств вычислительной техники при выполнении многочисленных этапов и процессов проектирования объекта (машины, комплекса машин, системы и др.).

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.2. Аспекты и иерархические уровни проектирования

В представлениях инженера о сложных технических объектах принято выделять аспекты и иерархические уровни.

Аспекты характеризуют ту или иную группу родственных свойств объекта. Типичные аспекты- функциональный, конструкторский, технологический.

**Функциональный** аспект отражает физические и информационные процессы, протекающие в объекте при его функционировании.

**Конструкторский** - структуру, расположение в пространстве и форму составных частей объекта.

**Технологический** - возможности и способы реализации или изготовления.

В зависимости от разновидностей объектов могут быть и другие аспекты, например, при проектировании электромеханических систем - электрический (электронный) и механический.

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.2. Аспекты и иерархические уровни проектирования

В соответствии с указанными аспектами различают функциональное, конструкторское, технологическое проектирование.

Внутри каждого аспекта представление о сложных объектах разделяют на иерархические уровни (уровни абстрагирования). На верхнем иерархическом уровне рассматривается весь сложный объект как совокупность взаимосвязанных подсистем, описание каждой подсистемы не должно быть слишком подробным.

На следующем иерархическом уровне подсистемы рассматриваются отдельно как системы, состоящие из некоторых составных частей, и получают более подробное описание. Данный иерархический уровень является уровнем подсистем. Такое разделение описания сложного объекта на части и раздельное исследование свойств по выделенным частям и есть декомпозиция.

Процесс декомпозиции описания и поблочного их рассмотрения с возрастающей степенью детализации продолжается вплоть до получения описаний блоков, состоящих из базовых элементов.



# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.2. Аспекты и иерархические уровни проектирования

Разделение описаний проектируемого объекта на иерархические уровни по степени подробности отражения свойств объекта составляет сущность блочно-иерархического подхода к проектированию. Соответственно возможно разделение проектирования как процесса на группы проектных процедур, связанных с получением и преобразованием описаний выделенных уровней. Эти группы процедур называются иерархическими уровнями проектирования.

В машиностроении базовые элементы представлены деталями: винт, шпонка, вал, зубчатое колесо и т.д.

Это нижний уровень, на нем системами являются сборочные единицы: редуктор, двигатель, тормоз, соединительные муфты и т.п. Базовыми элементами могут быть не только детали, но и объекты, состоящие из многих деталей и получаемые как законченные комплектующие изделия (подшипники, реле и т.п.).

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.2. Аспекты и иерархические уровни проектирования

Сборочные единицы являются элементами агрегатов (комплексов) - систем следующего иерархического уровня (механизмы подъема, передвижения, поворота, изменения вылета грузоподъемного крана, его металлоконструкция, системы управления и диагностики и т.п.)

На следующем иерархическом уровне может рассматриваться машина в целом, на более высоких уровнях - комплексы машин, объединяемые в производственные образования.

При рассмотрении технологических процессов в машиностроении наиболее общее, но и наименее детальное описание представляется принципиальной схемой технологического процесса. На следующем, более низком иерархическом уровне описываются маршруты обработки (маршрутная технология) как системы, состоящие из элементов - технологических операций.

Далее выделяются уровни описаний операционной технологии и управляющих программ.

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.3. Стадии, этапы и процедуры

В проектировании ~~принимается~~ **проектирования** научно-исследовательских работ, опытно-конструкторских работ, технического проекта, технического предложения, технического проекта, рабочего проекта, испытаний опытного образца.

На стадии научно-исследовательских работ изучаются потребности в получении новых изделий с заданным целевым назначением, исследуются физические, информационные, конструктивные и технологические принципы построения изделий и возможности реализации этих принципов, прогнозируются значения характеристик и параметров объектов. Результатом является формулировка технического задания на разработку объекта. Оно включает цель создания и назначение объекта, технические требования, режимы и условия работы, области применения, увязку параметров с типажом, информацию об экспериментальных работах, сравнительную оценку технического уровня и др. На основании технического задания разрабатывается техническое предложение - совокупность документов, отражающих технические решения, принятые в проекте. В него включаются результаты функционально-физического и стоимостного исследований, указания и обоснования по выполняемым функциям, физическим принципам действия, целесообразности использования тех или иных решений, сравнительная оценка этих решений по техническим,

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.3. Стадии, этапы и процедуры

### проектирования.

На стадии опытно-конструкторских работ создается эскизный проект изделия, представляющий собой совокупность графической и текстовой документации, на основании которой можно получить общее представление об устройстве, принципе работы, назначении, основных параметрах и габаритных размерах проектируемого изделия, о компоновке как машины в целом, так и ее основных узлов. При разработке эскизного проекта проверяются, конкретизируются и корректируются принципы и положения, установленные на стадии научно - исследовательских работ.

На стадии технического проекта разрабатывается более детализированная графическая и текстовая документация, дающая полное и окончательное представление об устройстве, компоновке машины и всех ее узлов, в технический проект включают все необходимые расчеты (динамические, прочностные и т.д.).

На стадии рабочего проекта создается полный комплект конструкторско-технологической документации, достаточный для изготовления объекта.

На стадии испытаний получают результаты, позволяющие выявить возможные ошибки и недоработки проекта, принимаются меры к их устранению.

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.3. Стадии, этапы и процедуры проектирования.

В ходе проектирования вырабатываются проектные решения - описания объекта или его составной части, достаточные для рассмотрения и принятия заключения об окончании проектирования или путях его продолжения.

Часть проектирования, заканчивающаяся получением проектного решения, называется проектной процедурой. Выполнение одной или нескольких проектных процедур, объединенных по признаку принадлежности получаемых проектных решений к одному иерархическому уровню и (или) аспекту описаний, составляет этап проектирования.

На любой стадии или этапе проектирования может быть выявлена ошибочность или неоптимальность ранее принятых решений и, следовательно, необходимость или целесообразность их пересмотра.

Подобные возвраты типичны для проектирования и обуславливают его итерационный характер.

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.3. Стадии, этапы и процедуры проектирования.

В частности, может быть выявлена необходимость корректировки технического задания. В этом случае чередуются процедуры внешнего и внутреннего проектирования. Под внешним проектированием понимаются процедуры формирования или корректировки технического задания, под внутренним проектированием - процедуры реализации сформированного технического задания.

Различают нисходящее (сверху вниз) и восходящее (снизу вверх) проектирование. В первом задачи высоких иерархических уровней решаются прежде, чем задачи более низких иерархических уровней, во втором последовательность противоположная. Так, функциональное проектирование чаще является нисходящим, конструкторское - восходящим.

На рис.1.1 представлена в качестве примера обобщенная схема процесса автоматизации проектирования.

# 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

## 1.3. Стадии, этапы и процедуры проектирования.

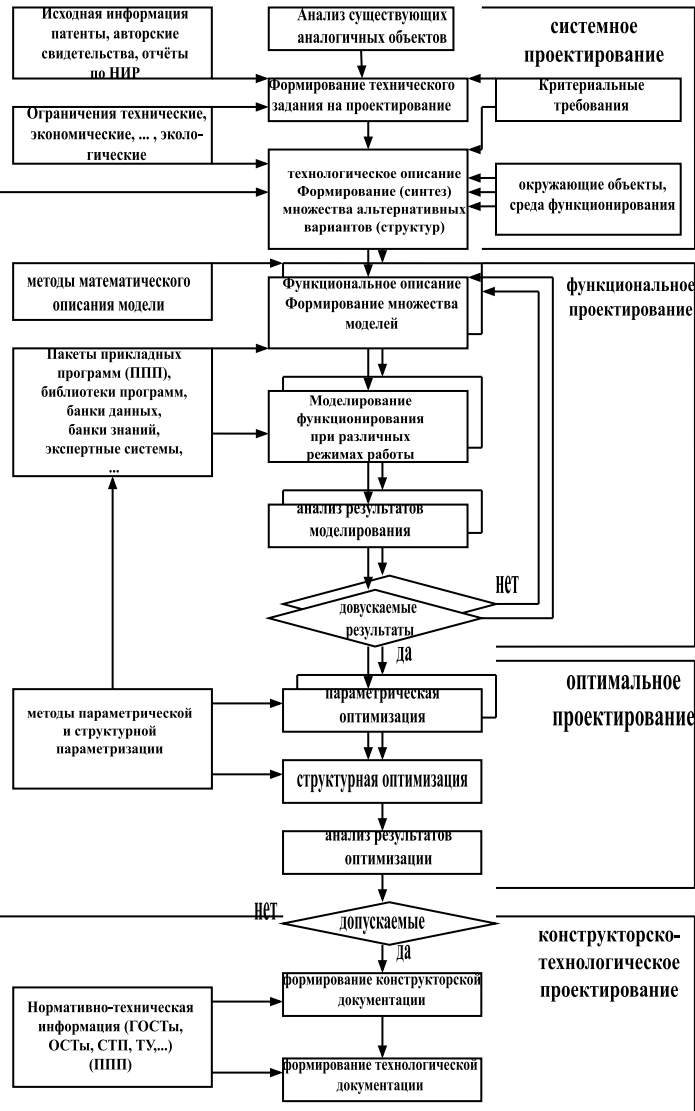


Рис. 1.1. Обобщённая схема процесса автоматизации проектирования

## 2. ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ САПР.

Для создания САПР необходимы (необходимые условия создания):

- совершенствование проектирования на основе применения математических методов и средств вычислительной техники;
- автоматизация процесса поиска, обработки и выдачи информации;
- использование методов оптимизации и многовариантного проектирования;
- применение эффективных математических моделей проектируемых объектов, комплектующих изделий и материалов;
- создание банков данных, содержащих систематизированные сведения справочного характера, необходимые для автоматизированного проектирования объектов;
- повышение качества оформления проектной документации;
- увеличение творческой доли труда проектировщиков за счет автоматизации нетворческих работ
- унификация и стандартизация методов проектирования;
- подготовка и переподготовка специалистов в области САПР;
- взаимодействие проектных подразделений с автоматизированными системами различного уровня и назначения.



## 2. ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ САПР.

**Принцип системного единства** обеспечивает целостность системы и системную «свежесть» проектирования отдельных элементов и всего объекта проектирования в целом (иерархичность проектирования).

**Принцип совместимости** обеспечивает совместное функционирование составных частей САПР и сохраняет открытую систему в целом.

**Принцип типизации** ориентирует на преимущественное создание и использование типовых и унифицированных элементов САПР. Типизации подлежат элементы, имеющие перспективу многократного применения. Типовые и унифицированные элементы периодически проходят экспертизу на соответствие современным требованиям САПР и модифицируются по мере необходимости.

**Принцип развития** обеспечивает пополнение, совершенствование и обновление составных частей САПР, а также взаимодействие и расширение взаимосвязи с автоматизированными системами различного уровня и функционального назначения.

## 2. ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ САПР.

Накопленный опыт позволяет выделить следующие основные особенности построения САПР.

САПР – человеко-машинная система. Все созданные и создаваемые с помощью ЭВМ системы проектирования являются автоматизированными. Важную роль в них играет человек – инженер, разрабатывающий проект технического средства.

В настоящее время и, по крайней мере, в ближайшие годы создание САПР «не угрожает» монополии человека при принятии узловых решений в процессе проектирования. Человек должен решать в САПР, во-первых, задачи, формализация которых не достигнута, и, во-вторых, задачи, которые решаются человеком на основе эвристических способностей более эффективно, чем на современной ЭВМ. Тесное взаимодействие человека и ЭВМ в процессе проектирования – один из принципов построения и эксплуатации САПР.

САПР – иерархическая система. Она реализует комплексный подход к автоматизации всех уровней проектирования. Блочный-иерархический подход к проектированию должен быть сохранен при применении САПР. Иерархия уровней проектирования отражается в структуре специального ПО САПР в виде иерархии подсистем.

## 2. ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ САПР.

Следует особо подчеркнуть целесообразность обеспечения комплексного характера САПР, так как автоматизация проектирования на одном из уровней при сохранении старых форм проектирования на соседних уровнях оказывается значительно менее эффективной, чем полная автоматизация всех уровней. Иерархическое построение относится не только к специальному программному обеспечению, но и к техническим средствам САПР, разделяемых на центральный вычислительный комплекс и автоматизированные рабочие места проектировщиков.

САПР — совокупность информационно согласованных подсистем. Информационная согласованность означает, что все или большинство последовательностей задач проектирования обслуживаются информационно согласованными программами.

Две программы являются информационно согласованными, если все те данные, которые представляют собой объект переработки в обеих программах, входят в числовые массивы, не требующие изменения при переходе от одной программы к другой.

## 2. ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ САПР.

Так, информационные связи могут проявляться в том, что результаты решения одной задачи будут исходными данными для другой задачи. Если для согласования программ требуется существенная переработка общего массива данных с участием человека, который добавляет недостающие параметры, вручную перекомпоновывает массив или изменяет значения отдельных параметров, то это значит, что программы информационно плохо согласованы. Ручная перекомпоновка массива ведет к существенным временным задержкам, росту числа ошибок и поэтому снижает эффективность работы САПР. Плохая информационная согласованность превращает

САПР в совокупность автономных программ, при этом из-за неучета в подсистемах многих факторов, оцениваемых в других подсистемах, снижается качество проектных решений.

Близким по смыслу, но не полностью совпадающим с рассмотренными является принцип оптимальности связей между САПР и внешней средой. Если каждый раз при проектировании очередного объекта заново вводятся в систему не только действительно специфические новые исходные данные, но и сведения справочного характера (например, параметры унифицированных элементов), то имеет место нерациональная организация связей САПР с окружающей средой.

## 2. ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ САПР.

САПР - *открытая и развивающаяся система*. Существуют по крайней мере две причины, по которым САПР должна быть изменяющейся во времени системой.

Во-первых, разработка столь сложного объекта, как САПР, занимает продолжительное время и экономически выгодно вводить в эксплуатацию части системы по мере их готовности. Введенный в эксплуатацию базовый вариант системы в дальнейшем расширяется.

Во-вторых, постоянный прогресс вычислительной техники и вычислительной математики приводит к появлению новых, более совершенных математических моделей и программ, которые должны заменять старые, менее удачные аналоги. Поэтому САПР должна быть открытой системой, т. е. обладать свойством удобства включения новых методов и средств. САПР - *специализированная система с максимальным использованием унифицированных модулей*. Чтобы снизить расходы на разработку многих специализированных САПР, целесообразно строить их на основе максимального использования унифицированных составных частей. Необходимое условие унификации — поиск общих положений в моделировании, анализе и синтезе разнородных технических объектов.

### 3. СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР.

Составными структурными частями САПР, жестко связанными с организационной структурой проектной организации, являются подсистемы, в которых при помощи специализированных комплексов средств решается функционально законченная последовательность задач САПР.

**По назначению** подсистемы разделяют на проектирующие и обслуживающие.

Проектирующие подсистемы. Они имеют объектную ориентацию и реализуют определенный этап (стадию) проектирования или группу непосредственно связанных проектных задач.

Примеры проектирующих подсистем: эскизное проектирование изделий, проектирование корпусных деталей, проектирование технологических процессов механической обработки.

Обслуживающие подсистемы. Такие подсистемы имеют общесистемное применение и обеспечивают поддержку функционирования проектирующих подсистем, а также оформление, передачу и вывод полученных в них результатов.

Примеры обслуживающих подсистем: автоматизированный банк данных,

### 3. СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР.

Формирование и использование моделей объекта проектирования в прикладных задачах осуществляется комплексом средств автоматизированного проектирования (КСАП) системы (или подсистемы).

Структурными частями КСАП системы являются различные комплексы средств, а также компоненты организационного обеспечения.

Комплексы средств относят к промышленным изделиям, подлежащим изготовлению, тиражированию и применению в составе САПР, и документируют как специфицируемые изделия.

Виды комплексов средств и компонентов САПР представлены на рис.3.1.

Комплексы средств подразделяют на комплексы средств одного вида обеспечения (технического, программного, информационного) и комбинированные.

Комплексы средств одного вида обеспечения содержат компоненты одного вида обеспечения; комплексы средств комбинированные — совокупность компонентов разных видов обеспечения.

# 3. СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР.



Рис. 3.1. Виды комплексов и компонентов САПР



### 3. СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР.

Комбинированные КСАП, относящиеся к продукции производственно-технического назначения, подразделяются на программно-методические (ПМК); программно-технические (ПТК).

Программно-методический комплекс представляет собой взаимосвязанную совокупность компонентов программного, информационного и методического обеспечения (включая компоненты математического и лингвистического обеспечения), необходимую для получения законченного проектного решения по объекту проектирования (одной или нескольким его частям или объекту в целом) или выполнения унифицированных процедур.

В зависимости от назначения ПМК подразделяют на общесистемные и базовые.

Общесистемные ПМК направлены на объекты проектирования и вместе с операционными системами ЭВМ являются операционной средой, в которой функционируют базовые комплексы.

Базовые ПМК могут быть проблемно-ориентированными и объектно-ориентированными, в зависимости от того, реализуют ли они проектные процедуры, унифицированные или специфические для определенного класса объектов.

### 3. СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР.

Проблемно-ориентированные ПМК могут включать программные средства, предназначенные для автоматизированного упорядочения исходных данных, требований и ограничений к объекту проектирования в целом или к сборочным единицам; выбор физического принципа действия объекта проектирования; выбор технических решений и структуры объекта проектирования; оценку показателей качества (технологичности) конструкций, проектирование маршрута обработки деталей.

Объектно-ориентированные ПМК отражают особенности объектов проектирования как совокупной предметной области. К таким ПМК, например, относят ПМК, поддерживающие автоматизированное проектирование сборочных единиц; проектирование деталей на основе стандартных или заимствованных решений; деталей на основе синтеза их из элементов формы; технологических процессов по видам обработки деталей и т. п.

Программно-технический комплекс представляет собой взаимосвязанную совокупность компонентов технического обеспечения.

В зависимости от назначения ПТК различают: автоматизированные рабочие места (АРМ); центральные вычислительные комплексы (ЦВК).

### 3. СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР.

Комплексы средств могут объединять свои вычислительные и информационные ресурсы, образуя локальные вычислительные сети подсистем или систем в целом.

Структурными частями комплексов средств являются компоненты следующих видов обеспечения: программного, информационного, методического, математического, лингвистического и технического.

Компоненты видов обеспечения выполняют заданную функцию и представляют наименьший (неделимый) самостоятельно разрабатываемый (или покупной) элемент САПР (например, программа, инструкция, дисплей и т.п.). Эффективное функционирование КСАП и взаимодействие структурных частей САПР всех уровней должно достигаться за счет ориентации на стандартные интерфейсы и протоколы связи, обеспечивающие взаимодействие комплексов средств.

Эффективное функционирование КСАП должно достигаться за счет взаимосогласованной разработки (согласование с покупными) компонентов, входящих в состав комплексов средств.

КСАП обслуживающих подсистем, а также отдельные ПТК этих подсистем могут использоваться при функционировании всех подсистем.

### 3. СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР.

Общесистемные ПМК включают в себя программное, информационное, методическое и другие виды обеспечения. Они предназначены для выполнения унифицированных процедур по управлению, контролю, планированию вычислительного процесса, распределению ресурсов САПР и реализации других функций, являющихся общими для подсистем или САПР в целом.

Примеры общесистемных ПМК: мониторинговые системы, системы управления БД, информационно-поисковые системы, средства машинной графики, подсистема обеспечения диалогового режима и др.

### 3. СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР.

*Мониторные системы управления функционированием технических средств в САПР. (Монитор - управляющая программа).*

Основными функциями мониторинговых систем являются: формирование заданий с контролем пакета задач, требуемых и наличных ресурсов, права доступа к базе данных с установлением приоритета и номера очереди; обработка директив языков управления заданиями и задачами, а также реакция на прерывания с перехватом управления, анализом причин и их интерпретацией в терминах, понятных проектировщику; обслуживание потоков задач с организацией диалогового и интерактивно-графического сопровождения в условиях параллельной работы подсистем; управление проектированием в автоматических режимах с анализом качества исполнения проектных операций, проверкой критериев повторения этапа или продолжения маршрута, выбором альтернативных вариантов маршрута; ведение и оптимизация статистики эксплуатации системы; распределение ресурсов САПР с учетом приоритетов заданий, задач и подсистем, плановых заданий и текущих указаний и запросов; защита ресурсов и данных от несанкционированного доступа и непредусмотренных воздействий.

### 3. СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР.

*Информационно-поисковые системы (ИПС) в САПР выполняют такие функции, как заполнение информационного фонда (инфотеки) сведениями; арифметическую обработку цифровых данных и лексическую обработку текстов; обработку информационных запросов с целью поиска требуемых сведений; обработку выходных данных и формирование выходных документов. Особенности ИПС заключаются в том, что запросы к ним формируются не программным путем, а непосредственно пользователями, и не на формальном языке, понятном монитору, а на естественном языке в виде последовательности ключевых слов — дескрипторов. Перечень дескрипторов, содержащихся во всех принятых на хранение описаниях, составляет словарь дескрипторов, или тезаурус, и предназначен для формирования поисковых предписаний.*

Существуют и более сложные ИПС по сравнению с дескрипторными. Важную роль в них играет информационно-поисковый язык, в котором учитываются семантические взаимоотношения между информационными объектами. Это позволяет уменьшить число неправильно распознаваемых языковых конструкций, а обработку запросов производить на основе различных критериев смыслового соответствия.

### 3. СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР.

*Система управления базами данных (СУБД) – программно-методический комплекс для обеспечения работы с информационной базой, организованной в виде структуры данных.*

Банки данных являются наиболее высокой формой организации информации в больших САПР. Они представляют собой проблемно-ориентированные информационно-справочные системы, обеспечивающие ввод необходимой информации, не зависящие от конкретных задач ведения и сохранения информационных массивов и выдачи необходимой информации по запросам пользователей или программ. В банках данных используется информация фактографического вида. СУБД выполняет следующие основные функции: определение баз данных, т. е. описание концептуального, внешнего и внутреннего уровней схем; запись данных в базу; организацию хранения, выполняя изменение, дополнение, реорганизацию данных; предоставление доступа к данным (поиск и их выдача).

Для определения данных и доступа к ним в СУБД имеются языковые средства. Так, определение данных, состоящее в описании их структур, обеспечивается с помощью языка определения данных. Функции доступа к данным реализуются с помощью языка манипулирования данными и языка запросов. По типу поддерживаемых структур различают следующие виды

### 3. СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР.

Программно-методические комплексы машинной графики обеспечивают взаимодействие пользователя с компьютером при обмене графической информацией, решение геометрических задач, формирование изображений и автоматическое изготовление графической информации. Графическое взаимодействие пользователя с компьютером (так называемый графический метод доступа) базируется на подпрограммах ввода-вывода, которые обеспечивают прием и обработку команд от устройства ввода-вывода и выдачу управляющих воздействий на эти устройства. Решение геометрических задач (геометрическое моделирование) сводится к преобразованию графической информации, которое представляет собой выполнение в той или иной последовательности элементарных графических операций типа сдвиг, поворот, масштабирование и т. п. Для геометрического моделирования используется ПМК, в котором кроме отдельных элементарных графических операций могут быть реализованы графические преобразования трехмерных изображений, процедуры построения проекций, сечений и т. п. В ПМК графических преобразований обычно предусматриваются средства для формирования некоторых часто используемых изображений, управления графической базой данных, отладки графических подпрограмм.



### 3. СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР.

Диалоговый режим обеспечивается программно-методическими комплексами, осуществляющими ввод, контроль, редактирование, преобразование и вывод графической и/или символьной информации. Диалоговый удаленный ввод заданий обеспечивает ввод и редактирование заданий через каналы связи, выполнение заданий в пакетном режиме и вывод результатов через линии связи на удаленные терминалы. В САПР могут использоваться как диалоговые ПМК общего назначения, так и специализированные. ПМК общего назначения целесообразно применять на начальных стадиях создания и эксплуатации САПР для отработки и проверки методологии проектирования, технологии обработки данных и прикладных программ. В дальнейшем возможна модификация ПМК с учетом специфических требований по организации диалога в САПР. При этом необходимо учитывать наличие диалогового или пакетного режима обработки запросов; ориентацию системы на пользователя непрограммиста; возможность расширения системы путем включения диалоговых прикладных программ на языках высокого уровня; возможность управления диалогом с помощью «меню» и директив, желательность общения на родном языке и т. п.

Примеры ПМК обеспечения диалоговых режимов: система диалогового управления вводом заданий, система режима разделения времени и др. Рекомендуемый набор общесистемных ПМК для семейства АРМ приведен в

### 3. СОСТАВ И СТРУКТУРА САПР.

Наименование Программно-методического комплекса (ПМК)	АРМ высокой производительности	АРМ средней производительности
Мониторная диалоговая система	+	+ -
Обеспечение диалогового режима	-	+
Система управления базами данных (СУБД)	+	+ -
Трансляторы и интерпретаторы языков программирования	+	+
Средства машинной геометрии и графики: Геометрический процессор	+	+ -
Графический процессор	+	+
Формирование текстовой документации	+ -	+
Формирование чертёжно-графической документации	+	+
Общетехнические расчёты	+	+ -
Обеспечение связи АРМ-АРМ, ЦВК-АРМ	+	+
Проектирование компоновки и топологии	+	+
Оптимизация	+	+ -

**Примечание:** Знак «-» означает, что наличие компонента в составе комплекса необязательно, знак «+ -» означает, что необходимость комплектации устройством данного типа должна устанавливаться в техническом задании на создание АРМ. обязательно, знак «-» означает, что наличие компонента в составе комплекса необязательно, знак «+ -» означает, что необходимость комплектации устройством данного типа должна устанавливаться в техническом задании на создание АРМ.

# 4. КОМПОНЕНТЫ ВИДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР.

Средства автоматизации проектирования можно сгруппировать по видам обеспечения автоматизированного проектирования (рис. 4.1.).

Основы автоматизации проектирования машин					
<b>Математическое обеспечение</b>					
методы описания объекта, процесса	Экспериментально-статистические методы моделирования	Аналитические, численные и имитационные методы и систем моделирования	Методы оптимизации	Алгоритмы решения задач проектирования	
<b>Программное обеспечение</b>					
Базовые программы, операционные системы	Языки и системы программирования	Пакеты прикладных программ	Библиотеки прикладных программ	Диалоговые системы	Системы машинной графики
<b>Техническое обеспечение - технические средства</b>					
ТС программной обработки данных	ТС подготовки и ввода данных	ТС отображения и документирования	ТС архива проектных решений	ТС передачи данных	
<b>Информационное обеспечение</b>					
Информационно-поисковые системы	Автоматизированные базы данных	Системы управления базами данных	Базы знаний	Экспертные системы	

Рис.4.1. Составные части автоматизации проектирования машин

## 4. КОМПОНЕНТЫ ВИДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР.

Математическое обеспечение. Основу математического обеспечения (МО) САПР составляют алгоритмы, по которым разрабатывается программное обеспечение САПР. Элементы математического обеспечения в САПР чрезвычайно разнообразны.

Среди них имеются инвариантные элементы – принципы построения функциональных моделей, методы численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, постановки экстремальных задач, поиски экстремума. Разработка математического обеспечения является самым сложным этапом создания САПР, от которого в наибольшей степени зависят производительность и эффективность функционирования САПР в целом.

По назначению и способам реализации МО САПР делится на две части:

- математические методы и построенные на их основе математические модели, описывающие объекты проектирования;
- формализованное описание технологии автоматизированного проектирования.

Способы и средства реализации первой части математического обеспечения наиболее специфичны в различных САПР и зависят от особенностей объектов проектирования.

Способы и средства реализации первой части математического обеспечения наиболее специфичны в различных САПР и зависят от особенностей

## 4. КОМПОНЕНТЫ ВИДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР.

Что касается этой части математического обеспечения, то формализация процессов автоматизированного проектирования в комплексе оказалась более сложной задачей, чем алгоритмизация и программирование отдельных проектных задач.

При решении этой задачи должна быть формализована вся логика технологии проектирования, в том числе логика взаимодействия проектировщиков друг с другом на основе использования средств автоматизации.

Математическое обеспечение САПР должно описывать во взаимосвязи объект, процесс и средства автоматизации проектирования.

Важным результатом совершенствования и типизации технологии процессов автоматизированного проектирования явилась разработка методических указаний Госстандарта «САПР. Типовые функциональные схемы проектирования изделия в условиях функционирования систем». В них подчеркивается, что процесс автоматизированного проектирования по составу и последовательности процедур, содержанию и формам проектной документации качественно отличается от традиционного процесса проектирования.

Вместе с тем в процессе автоматизированного проектирования можно

## 4. КОМПОНЕНТЫ ВИДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР.

~~Перспективной в совершенствовании и типизации технологии процессов автоматизированного проектирования является централизованная разработка математического аппарата моделирования типового процесса проектирования и выпуск базовых программно-методических комплексов, реализующих такие модели.~~

*Программное обеспечение САПР.* Программное обеспечение (ПО) САПР представляет собой совокупность всех программ и эксплуатационной документации к ним, необходимых для выполнения автоматизированного проектирования. Программное обеспечение делится на общесистемное и специальное (прикладное). Общесистемное ПО предназначено для организации функционирования технических средств, т. е. для планирования и управления вычислительным процессом, распределения имеющихся ресурсов, и представлено операционными системами ЭВМ и вычислительных комплексов (ВК). Общесистемное ПО обычно создается для многих приложений и специфику САПР не отражает.

В специальном (прикладном) ПО реализуется математическое обеспечение для непосредственного выполнения проектных процедур. Прикладное ПО обычно имеет форму пакетов прикладных программ (ППП), каждый из которых обслуживает определенный этап процесса проектирования или

группу однотипных задач внутри различных этапов.

## 4. КОМПОНЕНТЫ ВИДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР.

Рассмотрим принципиальные особенности ПО, влияющие на организацию и эффективность создания и использования САПР. С развитием и совершенствованием ЭВМ все большее значение приобретает такой компонент общесистемного ПО, как операционные системы (ОС). Возможности, предоставляемые пользователям современными ОС, в большей степени определяются их операционными системами, чем техническими устройствами. ОС организует одновременное решение различных задач на ЭВМ, динамическое распределение каналов передачи данных и внешних устройств между задачами, планирование потоков задач и последовательность их решения с учетом установленных критериев, динамическое распределение памяти вычислительного комплекса. Однако ОС требует для своей работы определенных ресурсов: процессора, внешней и основной памяти. Чем большими возможностями обладает ОС, тем больше требуется для нее ресурсов.

Операционные системы можно генерировать применительно к определенным конфигурациям технических средств вычислительного комплекса и кругу решаемых задач. Но при этом параметры и состав технических средств ограничивают возможности ОС.

## 4. КОМПОНЕНТЫ ВИДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР.

Важным компонентом общесистемного ПО является базовое ПО. Базовое ПО не является объектом разработки при создании программного обеспечения САПР. Примером может служить базовое ПО для обработки геометрической и графической информации, для формирования и использования баз данных (БД).

Использование АРМ, в состав которых включено подобное базовое ПО, реализующее стандартные проектные процедуры, существенно снизит трудоемкость создания программного обеспечения САПР. Однако во всех случаях за создателями САПР останется разработка прикладного ПО. С расширением области применения вычислительной техники и усложнением задач автоматизации.

Техническое обеспечение САПР представляет собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для выполнения автоматизированного проектирования. Техническое обеспечение делится на группы средств программной обработки данных, подготовки и ввода данных, отображения и документирования, архива проектных решений, передачи данных.



## 4. КОМПОНЕНТЫ ВИДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР.

*Средства программной обработки данных* представлены процессорами и запоминающими устройствами, т.е. Устройствами ЭВМ, в которых реализуются преобразования данных и программное управление вычислениями. *Средства подготовки, ввода, отображения и документирования данных* служат для общения человека с ЭВМ. *Средства архива проектных решений* представлены запоминающими устройствами; *средства передачи данных* используются для организации связей между территориально разнесенными ЭВМ (локальные, корпоративные сети).

*Информационное обеспечение САПР* объединяет всевозможные данные, необходимые для выполнения автоматизированного проектирования. Эти данные могут быть представлены в виде тех или иных документов на различных носителях, содержащих сведения справочного характера о материалах, комплектующих изделиях, типовых проектных решениях, параметрах элементов, сведения о состоянии текущих разработок в виде промежуточных и окончательных проектных решений, структур и параметров проектируемых объектов и т.п.

## 4. КОМПОНЕНТЫ ВИДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР.

Основная составная часть информационного обеспечения САПР – *банк данных*, представляющий собой совокупность средств для централизованного накопления и коллективного использования данных в САПР. Банк данных состоит из базы данных и системы управления базой данных. *База данных* – сами данные, находящиеся на запоминающих устройствах и структурированные в соответствии с принятыми в данном банке данных правилами. *Система управления базами данных* – совокупность программных средств, обеспечивающих функционирование банка данных. С помощью систем управления производятся запись данных в банк данных, их выборка по запросам пользователей и прикладных программ, обеспечивается защита данных от искажений и от несанкционированного доступа и т.п.

*Лингвистическое обеспечение САПР* представлено совокупностью языков, применяемых для описания процедур автоматизированного проектирования и проектных решений. Основная часть лингвистического обеспечения – языки общения человека с ЭВМ.

*Методическое обеспечение САПР* составляют документы, характеризующие состав, правила отбора и эксплуатации средств автоматизированного проектирования. Допускается более широкое толкование понятия методического обеспечения, подразумевающего совокупность математического, лингвистического и названных документов, реализующих

## 4. КОМПОНЕНТЫ ВИДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САПР.

Организационное обеспечение САПР включает положения, инструкции, приказы, штатные расписания, квалификационные требования и другие документы, регламентирующие организационную структуру подразделений проектной организации и взаимодействие подразделений с комплексом средств автоматизированного проектирования.

## 5. РАЗНОВИДНОСТИ САПР

### 5. Разновидности САПР

#### 5.1. История САПР

#### 5.2. Обзор машиностроительных САПР

## 5. РАЗНОВИДНОСТИ САПР

Сегодня под словом «САПР» понимается гораздо большее, нежели просто «программно-технический комплекс для выполнения проектных работ с использованием компьютеров», и зачастую этот термин используется, прежде всего, как удобная аббревиатура для обозначения большого класса систем автоматизации. Это связано с тем, что за последние 10 – 15 лет такие системы прошли большой путь развития от «электронных кульманов» первого поколения, предназначенных в основном для машинной подготовки проектной документации, до современных систем, автоматизирующих практически все процессы, связанные с проектированием и изготовлением новых изделий, будь то деталь, узел машины или целый автомобиль, самолет или здание.

Разумеется, чем сложнее разрабатываемое изделие, тем более сложной и многофункциональной должна быть САПР. Системы проектирования принято классифицировать по ряду признаков, например, по приложению, целевому назначению, масштабам (комплексности решаемых задач), характеру базовой подсистемы – ядра САПР. По приложениям:

1. Mechanical CAD (MCAD) – САПР для применения в отраслях общего машиностроения (машиностроительные САПР);
2. Electronic CAD – САПР для радиоэлектроники;
3. САПР в области архитектуры и строительства (ГИС).

## 5. РАЗНОВИДНОСТИ САПР

~~Кроме того, известны более специализированные САПРы, или выделяемые в указанных группах, или представляющие самостоятельную ветвь в классификации. Примерами таких систем являются: САПР больших интегральных схем (БИС); САПР летательных аппаратов; САПР электрических машин и т.п.~~

По *целевому назначению* различают САПР обеспечивающие разные аспекты проектирования, так в составе MCAD следует выделить CAD/CAM/CAE системы:

CAD (*Computer Aided Design*)-системы – для геометрического моделирования и машинной графики;

CAM (*Computer Aided Manufacturing*)-системы – для технологической подготовки производства;

CAE (*Computer Aided Engineering*)-системы – для инженерных расчетов и анализа с целью проверки проектных решений.

Современный рынок САПР представлен широким спектром программных продуктов, предназначенных для решения задач инженерной деятельности на производстве и в проектных организациях.

## 5.1 ИСТОРИЯ САПР

Под термином “САПР для машиностроения” в нашей стране обычно подразумеваются пакеты, выполняющие функции CAD/CAM/CAE/PDM, т. е. автоматизированного проектирования, подготовки производства и конструирования, а также управления инженерными данными. Первые САД-системы появились еще на заре вычислительной техники – в 60-х годах. Именно тогда в компании General Motors была разработана интерактивная графическая система подготовки производства, а в 1971-м ее создатель – доктор Патрик Хэнретти (его называют отцом САПР) – основал компанию Manufacturing and Consulting Services (MCS), оказавшую огромное влияние на развитие этой отрасли. По мнению аналитиков, идеи MCS составили основу почти 70% современных САПР. В начале 80-х, когда вычислительная мощность компьютеров значительно выросла, на сцену вышли первые САМ-пакеты, позволяющие частично автоматизировать процесс производства с помощью программ для станков с ЧПУ, и САЕ-продукты, предназначенные для анализа сложных конструкций.

## 5.1 ИСТОРИЯ САПР

Таким образом, к середине 80-х системы САПР для машиностроения обрели форму, которая существует и сейчас. Но наиболее бурное развитие происходило в течение 90-х годов – к тому времени на поле вышли новые игроки “средней весовой категории”. Усиление конкуренции стимулировало совершенствование продуктов: благодаря удобному графическому интерфейсу значительно упростилось их использование, появились новые механизмы твердотельного моделирования ACIS и Parasolid, которые сейчас используются во многих ведущих САПР, значительно расширились функциональные возможности. В результате спрос на САПР рос как на дрожжах на протяжении почти всего десятилетия. Но в последнее время, в связи со снижением производственной активности в США и Европе и насыщением рынка продуктами САПР, этот рост постепенно замедлился: по оценке аналитической компании Daratech, в 1999 г. объем продаж систем CAD/CAM за год увеличился на 11,1%, в 2000-м – на 4,7%, в 2001-м – на 3,5%, а в 2002 г. – на 1,3% (предварительная оценка).

Можно сказать, что переход в новый век стал для рынка САПР переломным моментом. В такой ситуации на первый план вышли две основные тенденции – поглощения компаний и поиск новых направлений для роста. Яркий пример первой тенденции – покупка компанией EDS в 2001 г. двух известных разработчиков тяжелых САПР – Unigraphics и SDRC, а второй – активное продвижение концепции PLM (Product Lifecycle Management), подразумевающей управление информацией об изделии на протяжении



# 5.1 ИСТОРИЯ САПР

КЛАСС САПР	ПРОДУКТ	КОМПАНИЯ
Тяжелый	Unigraphics NX	EDS
	CATIA	Dassault Systemes/IBM
	Pro/Engineer	PTC
Средний	<i>Зарубежные системы</i>	
	SolidWorks	SolidWorks (принадлежит Dassault)
	SolidEdge	EDS
	Inventor и Mechanical Desktop	Autodesk
	Cimatron	Cimatron
	think3	Think3 S.p.A.
	CadKey	CadKey
	Power Solutions	Delcam
	<i>Отечественные продукты</i>	
	КОМПАС (CAD/CAM/CAE/PDM)	"Аскон"
	T-Flex (CAD/CAM/CAE/PDM)	"Топ Системы"
	ADEM (CAD/CAM/PDM)	Omega Adem Technologies
	Sprut (CAD/CAM/CAE)	"СПРУТ-Технология"
	APM WinMachine (CAD/CAE)	НТЦ АПМ
	Party Plus (PDM)	"Лоция Софт"
КРЕДО (CAE)	НИЦ АСК	
Легкий	AutoCAD	Autodesk
	SurfCAM 2D	Surfware
	DataCAD	DataCAD
	IntelliCAD	CADopia
	TurboCAD	IMSI
Специализированные САПР		
<i>Промышленное проектирование</i>	AutoPlant	Rebis (принадлежит фирме Bentley)
<i>Расчеты трубопроводов</i>	"Астра-Нова"	НИЦ "СтандиО"
<i>Строительное проектирование (железобетон)</i>	Robot Millennium	RoboBAT
<i>Архитектурное проектирование</i>	Architectural Desktop	Autodesk
<i>Проектирование металлоконструкций</i>	StruCAD	AceCad Software

Примечание. В таблице перечислены далеко не все САПР, а только основные продукты, представленные на российском рынке.

## 5.2 ОБЗОР МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ САПР

Основными требованиями к промышленному производству являются сокращение срока выхода продукции на рынок, снижение ее себестоимости и повышение ее качества. Выполнить эти требования невозможно без широкого использования методов и систем автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа (CAE/CAD/CAM-систем).

Историю САПР в машиностроении часто разделяют на несколько этапов.

На первом этапе (до конца 70-х годов) был получен ряд научно-практических результатов, доказавших принципиальную возможность автоматизированного проектирования сложных промышленных изделий. Так, теория В-сплайнов была представлена И.Шоенбергом (I.J.Schoenberg) в 1946 г., позднее приведшая к широкому использованию в геометрическом моделировании неравномерных рациональных В-сплайнов (NURBS), предложенных К.Весприллом (K.J.Versprille, 1975 г.). Моделированию кривых и поверхностей любой формы были посвящены работы П.Безье (P.E.Bezier), выполненные на рубеже 60-70-х годов прошлого века.

Возможности систем на первом этапе в значительной мере определялись характеристиками имеющихся в то время весьма не развитых графических аппаратных средств. Преимущественно использовались графические терминалы, подключаемые к мэйнфреймам, в качестве которых применялись компьютеры компаний IBM и CDC, или к мини-ЭВМ типа PDP/11. По данным Dataquest в начале 80-х гг. стоимость одной лицензии САД-системы

## 5.2 ОБЗОР МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ САПР

На втором этапе (80-е годы) появились и начали использоваться графические рабочие станции компаний Intergraph, Sun Microsystems с архитектурой SPARC или автоматизированные рабочие места на компьютерах VAX от DEC под управлением ОС Unix. К концу 80-х годов стоимость САД-лицензии снизилась, примерно, до \$20000. Тем самым были созданы предпосылки для создания САД/САМ/САЕ-систем более широкого применения.

На третьем этапе (начиная с 90-х годов) бурное развитие микропроцессоров привело к возможности использования рабочих станций на персональных ЭВМ, что заметно снизило стоимость внедрения САПР на предприятиях. На этом этапе продолжается совершенствование систем и расширение их функциональности. Начиная с 1997 г., рабочие станции на платформе Wintel не уступают Unix-станциям по объемам продаж. Стоимость лицензии снизилась до нескольких тысяч долларов.

Четвертый этап (начиная с конца 90-х годов) характеризуется интеграцией САД/САМ/САЕ-систем с системами управления проектными данными PDM и с другими средствами информационной поддержки изделий.

## 5.2 ОБЗОР МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ САПР

Принято делить CAD/CAM-системы по их функциональным характеристикам на три уровня (верхний, средний и нижний). В 80-е годы и в начале 90-х такое деление основывалось на значительном различии характеристик используемого для САПР вычислительного оборудования. Аппаратной платформой CAD/CAM-систем верхнего уровня были дорогие высокопроизводительные рабочие станции с ОС Unix. Такая техника позволяла выполнять сложные операции как твердотельного, так и поверхностного геометрического моделирования применительно к сборочным узлам из многих деталей. CAD-системы нижнего уровня предназначались только для автоматизации чертежных работ, выполнявшихся на низкопроизводительных рабочих станциях и персональных компьютерах. По мере улучшения характеристик персональных компьютеров удавалось создавать сравнительно недорогие системы с возможностями параметрического и ассоциативного 3D-моделирования. Такие системы стали относить к CAD/CAM-системам среднего уровня. Сегодня деление CAD/CAM-систем на САПР верхнего, среднего и нижнего уровней еще сохраняется, хотя и страдает очевидной нечеткостью.

## 5.2 ОБЗОР МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ САПР

Проектирование механических изделий заключается прежде всего в конструировании, т.е. в определении геометрических форм тел и их взаимного расположения. Поэтому история автоматизация проектирования в машиностроении связана с историей компьютерной графики и практически началась с создания первой графической станции. Это была станция Sketchpad с использованием дисплея и светового пера, представленная в 1963 г. И.Сазерлендом. И.Сазерленд в дальнейшем работал в ARPA, возглавив в этом агентстве департамент анализа и обработки информации, а позже стал профессором Гарвардского университета. Растровые дисплеи стали применяться в 70-е годы.

К 1982 г. твердотельное моделирование начинают применять в своих продуктах компании Computervision, IBM, Prime и др., однако методы получения моделей тел сложной формы еще не развиты, отсутствует поверхностное моделирование. В следующем году разработана техника создания 3D моделей с показом или удалением скрытых линий. В 1986 г. компания Autodesk выпускает свой первый САД-продукт Autocad, пока однопользовательскую версию на языке С с поддержкой формата IGES. В 1988 г. создается аппаратура для прототипирования изделий с помощью лазерной стереолитографии по данным, получаемым в МСАД. Также в 1988 г. компания PTC впервые реализует параметризацию моделей.

## 5.2 ОБЗОР МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ САПР

Развитие компьютерной графики определялось не только возможностями аппаратных средств, но и характеристиками программного обеспечения. Оно должно было быть инвариантным по отношению к используемым аппаратным средствам ввода и вывода графической информации. Поэтому значительное внимание с 70-х годов уделяется вопросам стандартизации графических программ. Стандарт на базисную графическую систему включает в себя функциональное описание и спецификации графических функций для различных языков программирования.

В 1977 г. ACM публикует документ Core, описывающий требования к аппаратно-независимым программным средствам. А в начале 1982 г. появляется система Graphical Kernel System (GKS), задающая примитивы, сегменты и преобразования графических данных и ставшая стандартом в 1985 г. В 1987 г. разработан вариант GKS-3D с ориентацией на 3D графику.

В 1986 г. появляется ряд новых стандартов. Среди них CGI (Computer Graphics Interface) и PHIGS P (Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System) – стандарт ANSI, ставший стандартом ISO в 1989 г. В 1993 году компанией Silicon Graphics предложен стандарт OpenGL (SGI Graphical Language), широко используемый в настоящее время.

## 5.2 ОБЗОР МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ САПР

В этих системах используются графические форматы для обмена данными, представляющие собой описание изображения в функциях виртуального графического устройства (в терминах примитивов и атрибутов). Графический формат (метафайл) обеспечивает возможность запоминать графическую информацию единым образом, передавать ее между различными системами и интерпретировать для вывода на различные устройства. Такими форматами стали CGM – Computer Graphics Metafile, PostScript – Adobe Systems' Language, GEM – GEM Draw File Format и др.

Работы по стандартизации были направлены на расширение функциональности графических языков и систем, включение в них средств описания не только данных чертежей и 3D-моделей, но и других свойств и характеристик изделий.

В области автоматизации проектирования унификация основных операций геометрического моделирования привела к созданию инвариантных геометрических ядер, предназначенных для применения в разных САПР. Распространение получили два геометрических ядра: Parasolid (продукт фирмы Unigraphics Solutions) и ACIS (компания Spatial Technology). Ядро Parasolid разработано в 1988 г. и в следующем году становится ядром твердотельного моделирования для CAD/CAM Unigraphics, а с 1996 г. –

промышленным стандартом.

## 5.2 ОБЗОР МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ САПР

Параллельно проводились работы по стандартизации описаний геометрических моделей для обмена данными между различными системами на различных этапах жизненного цикла промышленной продукции. Вначале появился стандарт IGES (Initial Graphics Exchange Specification). Фирма Autodesk в своих продуктах стала использовать формат DXF (Autocad Data eXchange Format). Затем были разработаны язык Express и прикладные протоколы AP203 и AP214 в группе стандартов ISO 10303 STEP (Standard for Exchange Product Model Data).

Примерами CAD/CAM-систем верхнего уровня являются CATIA (компания Dassault Systemes), Unigraphics (Unigraphics Solution), Pro/Engineer (PTC). Продукты этих фирм доступны с 1981, 1983 и 1987 г. соответственно. К числу САПР верхнего уровня в 90-е годы относились также EUCLID3 (Matra Datavision), I-DEAS (UGS), CADD5 (Computervision), но их развитие было прекращено в связи со слиянием компаний.

Так, в 2001 г. происходит слияние компании Unigraphics Solution с SDRC, что означало постепенное прекращение развития I-DEAS и использование удачных решений двух систем I-DEAS и Unigraphics (UG) в новых версиях системы Unigraphics NX.



## 5.2 ОБЗОР МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ САПР

Еще раньше система CADD5 была приобретена компанией PTC (Parametric Technology Corp.). Эта компания, штаб-квартира которой расположена в США, основана в 1985 г. бывшим профессором Ленинградского университета Семеном Гейзбергом.

Наиболее известными CAD/CAM-системами среднего уровня на основе ядра ACIS являются AutoCAD 2000, Mechanical Desktop и Autodesk Inventor (Autodesk Inc.); Cimatron (Cimatron Ltd.); ADEM (Omega Technology); Mastercam (CNC Software, Inc.); Powermill (DELCAM) и др. К числу CAD/CAM-систем среднего уровня на основе ядра Parasolid принадлежат, в частности, Solid Edge и Unigraphics Modeling (Unigraphics Solutions); SolidWorks (SolidWorks Corp.); MicroStation Modeler (Bentley Systems Inc.); Pro/Desktop (Parametric Technology Corp.); Anvil Express (MCS Inc.) и др. Компания PTC в своих продуктах начинает применять разработанное ею в 2000 г. геометрическое ядро Granite One.

В 1992 году корпорация Intergraph, один из ведущих на тот момент производителей САД-систем для машиностроения, приняла решение о разработке нового программного продукта, целиком построенного на базе платформы Wintel. В результате в конце 1995 года появилась система геометрического моделирования Solid Edge (такое имя получила новая система). В 1998 году к Unigraphics перешло все отделение Intergraph, занимающееся САПР для машиностроения. В это же время Solid Edge меняет геометрическое ядро ACIS на ядро Parasolid. В 1999 год появляется 6-я версия

## 5.2 ОБЗОР МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ САПР

В 1993 г. в США создается компания Solidworks Corporation и уже через два года она представила свой первый пакет твёрдотельного параметрического моделирования Solidworks на базе геометрического ядра Parasolid. Система Solidworks вошла в число ведущих систем среднего уровня.

Ряд САД/САМ систем среднего и нижнего уровней разработан в СССР и России. Наибольшее распространение среди них получили Компас (компания Аскон) и T-Flex CAD (Топ Системы) и некоторые другие системы.

Компания Аскон основана в 1989 г. В нее вошел коллектив разработчиков, который до этого в Коломенском конструкторском бюро машиностроения проектировал систему Каскад. Первая версия Компас для 2D проектирования на персональных компьютерах появилась в том же 1989 г. В 2000 г. САПР Компас распространена на 3D проектирование. В 2003 г. выпущена 6-я версия Компас и PDM система Лоцман.PLM.

Автоматизация технологической подготовки производства в системах САМ не была столь жестко привязана к аппаратным средствам машинной графики, как автоматизация конструирования в системах САД. Среди первых работ по автоматизации проектирования технологических процессов нужно отметить создание языка АРТ (Automatic Programming Tools) в 1961 г. в США. Этот язык стал родоначальником многих других языков программирования для оборудования с числовым программным управлением. В СССР Г.К.Горанский создает программы для расчетов режимов резания в первой половине 60-х годов. В.Д.Цветков, Н.М.Капустин, С.П.Митрофанов и др. разрабатывают

## 5.2 ОБЗОР МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ САПР

В системах инженерных расчетов и анализа САПР центральное место занимают программы моделирования полей физических величин, прежде всего это программы анализа прочности по методу конечных элементов (МКЭ).

Метод конечных элементов разработан к 1950 г. специалистами, работающими в областях строительной механики и теории упругости. В 1963 г. был предложен сравнительно простой способ применения МКЭ для анализа прочности путем минимизации потенциальной энергии. Появились программно-методические комплексы для анализа и моделирования на основе МКЭ.

В 1965 г. NASA для поддержки проектов, связанных с космическими исследованиями, ставит задачу разработки конечно-элементного программного пакета. К 1970 г. такой пакет под названием NASTRAN (NAsa STRuctural ANalysis) был создан и начал эксплуатироваться. Стоимость разработки, продолжавшейся 5 лет, составила 3-4 млн долларов. Одной из компаний, участвовавших в разработке, была MSC (MacNeal-Schwendler Corporation). С 1973 г. MSC (с 1999 г. компания называется MSC.Software Corporation) самостоятельно продолжает развивать пакет MSC.NASTRAN, который стал мировым лидером в своем классе продуктов.

В 1976 г. разработан комплекс DYNA3D (позднее названный LS-DYNA),

## 5.2 ОБЗОР МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ САПР

К числу лидеров программ САЕ следует отнести также комплекс Ansys. Интересно отметить, что в 2000 г. с помощью средств многоаспектного моделирования, реализованных в Ansys, продемонстрирована возможность совместного моделирования электромагнитных, механических и тепловых процессов при проектировании микроэлектромеханических устройств.

Мировым лидером среди программ анализа на макроуровне считается комплекс Adams, разработанный и развиваемый компанией Mechanical Dynamics Inc. (MDI). Компания создана в 1977 г. Основное назначение Adams (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) – кинематический и динамический анализ механических систем с автоматическим формированием и решением уравнений движения.

Для проектирования систем, функционирование которых основано на взаимовлиянии процессов различной физической природы, важное значение имеет возможность многоаспектного моделирования. Теоретические основы многоаспектного моделирования на базе аналогий физических величин рассматривались Г.Ольсоном (1947 г.), В.П.Сигорским (1975 г.) и были реализованы в программах моделирования ПА6 – ПА9, разработанных в МВТУ им. Н.Э.Баумана в 70-80-е годы. Основные положения многоаспектного моделирования в 1999 г. были закреплены в стандарте IEEE, посвященном языку VHDL-AMS.

# 6. ИНТЕГРАЦИЯ CAD/CAM

## 6. Интеграция CAD\CAM

- 6.1. Производственный цикл детали
- 6.2. Технологическая подготовка производства
  - 6.2.1. Неавтоматизированный подход
  - 6.2.2. Модифицированный подход
  - 6.2.3. Генеративный подход

## 6. ИНТЕГРАЦИЯ CAD/CAM

~~Спроектированная деталь воплощается в готовый продукт средствами~~ производства. Автоматизация производства обеспечивается соответствующим программным обеспечением (CAM software). Таких программных продуктов существует достаточно много. В состав типичного пакета САМ входит система автоматизированной технологической подготовки производства (computer-aided process planning – CAPP), система числового управления (NC software), позволяющая изготавливать деталь при помощи станков с ЧПУ, программы контроля и программы управления роботами, используемые, соответственно, на этапах проверки и сборки.

Многие производители коммерческих систем САД и САМ преувеличивают выгоды от их использования. Реальный выигрыш от этих систем гораздо меньше рекламируемого из-за низкой степени их интеграции. Для повышения производительности и обеспечения выживания на глобальных рынках с постоянно возрастающей конкуренцией необходимо улучшение интеграции. Первоочередной задачей является полная автоматизация технологической подготовки производства, потому что эта фаза связывает проектирование и производство. Именно подготовка производства стала основным препятствием на пути к интеграции САД и САМ. Основные усилия исследователей были направлены на создание систем автоматизированной подготовки производства, которые должны были попытаться обеспечить взаимодействие инженеров-проектировщиков и инжене

## 6.1. Производственный цикл детали

Все производство может быть поделено на дискретное и непрерывное. Под дискретным производством понимается изготовление продукта, проходящего через конечное число технологических и сборочных операций. Непрерывное производство подразумевает изготовление продукта, претерпевающего непрерывные изменения, например в ходе химических реакций, в результате которых заготовка преобразуется в готовую деталь. Мы сосредоточим внимание на дискретном производстве, а конкретнее — на механообработке, которая является типичным методом изготовления деталей. Главные этапы такого процесса приведены в схеме на рис. 6.1

## 6.1. Производственный цикл детали

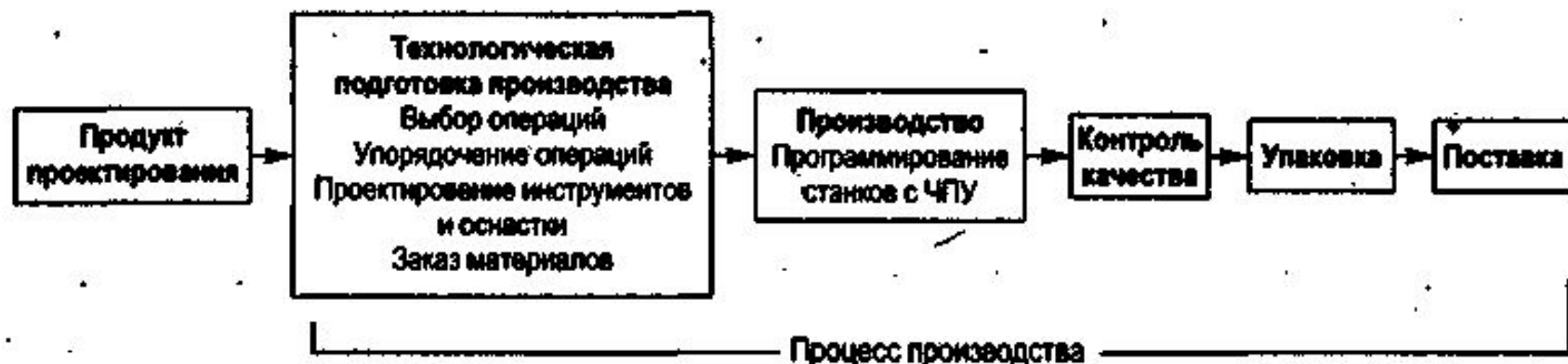


Рис. 6.1. Главные этапы дискретного производства



## 6.1. Производственный цикл детали

Когда готовый проект передается в производственный отдел, инженер-технолог преобразует описание деталей и устройств в технологические инструкции. Эти инструкции подробно описывают процессы, необходимые для превращения необработанных заготовок в готовые детали, а также последующие операции сборки этих деталей в конечный продукт. Процедура, таким образом, заключается в сопоставлении требований к деталям и имеющихся производственных мощностей. Инженер-технолог должен интерпретировать инженерно-техническую документацию, принимать решения о том, как разрезать листы и собирать детали, определять порядок выполнения операций, выбирать инструмент, станки и крепеж и решать другие подобные задачи. Эта задача значительно упрощается, если у инженера уже есть готовый план для аналогичного продукта. Поэтому похожие детали обычно группируются в семейства, что позволяет использовать концепцию групповой обработки.

## 6.1. Производственный цикл детали

После завершения фазы технологической подготовки начинается реальное производство детали в соответствии с инструкциями, подготовленными на предыдущем этапе. Если для обработки детали используются станки с ЧПУ, оператор станка должен написать соответствующую программу. Существует множество программных средств, позволяющих создать программу для станка с ЧПУ непосредственно по базе данных системы автоматизированного проектирования. Готовые детали проверяются в соответствии с разработанными стандартами качества. Прошедшие проверку детали собираются, упаковываются, помечаются и отправляются заказчикам.

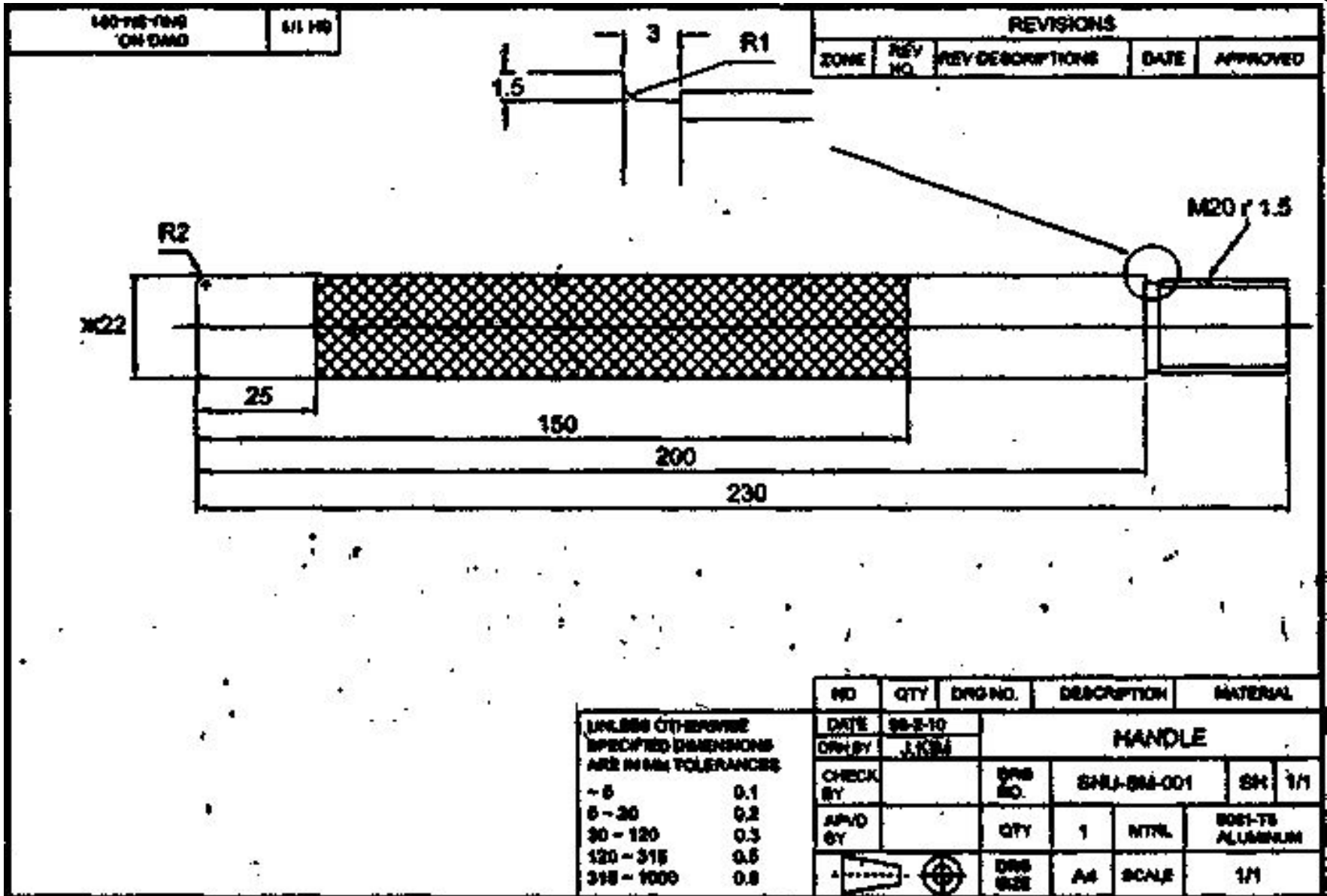
Таким образом, интерфейсом между проектированием и производством оказывается технологическая подготовка. Интеграция средств проектирования и производства не будет завершена до тех пор, пока технологическая подготовка не будет автоматизирована.

## 6.2. Технологическая подготовка производства

Технологическая подготовка производства (process planning) заключается в выборе технологических процессов и их параметров, а также оборудования для проведения этих процессов. Задача состоит в том, чтобы превратить заготовку в деталь, изображенную на техническом чертеже. Альтернативное определение технологической подготовки гласит, что под этим термином подразумевается подготовка подробных технологических инструкций для станка или сборщика агрегата из деталей.

На выходе этапа технологической подготовки получается план, описывающий последовательность технологических процессов или сборочных операций. План производства иногда называется операционной картой, маршрутной картой или сводкой планирования операций. В табл. 6 приведен план процесса производства детали, изображенной на рис. 6.2. Помимо выбора и упорядочения операций важную часть плана составляет выбор инструментов и крепежа. Выбор инструмента включает также выбор станка, на котором этот инструмент будет установлен. Крепежные устройства направляют инструмент или держат обрабатываемую деталь

# 6.2. Технологическая подготовка производства



## 6.2. Технологическая подготовка производства

План производства детали или агрегата зависит от множества факторов. К ним относятся геометрия детали, требуемая точность и качество поверхности, количество деталей и используемый материал. Например, для изготовления очень «гладкой» поверхности может потребоваться шлифовка, тогда как для более грубой поверхности достаточно токарной обработки (при той же самой геометрии детали). Небольшое количество деталей можно изготовить на станке, а большие количества выгоднее штамповать на прессе. Выбор операций также во многом определяется имеющимися средствами.

## 6.2. Технологическая подготовка производства

Деталь №				Название	Дата
SNU-SM-001				Ручка	10 февраля 1998
Материал				Размер	
6061-Т6 алюминий				Ø22×206	
№ оп	Станок	Стандарт. настройка	Время работы, мин	Инструкции	Инструменты и параметры
010	Токарный	6	0,5	Установить материал в патрон. Длина выступающей части 45 мм Обработать торец Внешний диаметр Ø21,8×25 Напильником снять фаску R2	700 об/мин 0,15 мм/об 80° алмазный напильник Т/Ф
020	Токарный	7	0,5	Установить материал наоборот. Длина выступающей части 45 мм Обработать торец Снять 30 мм до выступа Сформировать канавку 3×1,5×R1	Гравировальный резец Резец для бороздки
030	Токарный	5	2	Однозаходная резьба М20×1,5 Довести резьбу леркой	Резец для резьбы 200 об/мин Рычаг подачи установить по резьбе Шаг винта 1,5 мм Лерка М20×1,5
040	Токарный	2	1,5	Галтование резьбы	Напильник №3
050	Токарный	9	2	Сверление по центру 60°×Ø8 (приблизит.)	Сверло, теплоотвод
060	Токарный	3	3	Продвинуть заготовку Зажать 12 мм необработанного материала Пододвинуть бабку Сделать насечку 125 мм	Резец для насечки
070	Верстак	0	3	Очистить, снять заусенцы, проверить	

Таблица 6. Пример плана производства

## 6.2.1. Неавтоматизированный подход

Традиционно планирование производства всегда выполнялось вручную. Теперь это называется неавтоматизированным подходом. Состоит данный подход в том, что опытный сотрудник, часто бывший оператор-станочник, изучает чертеж детали и подготавливает инструкции по ее изготовлению, то есть план производства. В зависимости от цеха вырабатываемый им план может быть достаточно сложным, а может быть простой совокупностью описаний отдельных операций. В опытном производстве, где все операторы имеют высокую квалификацию и могут работать с несколькими станками, а большинство деталей относятся к одному и тому же типу, технологический план обычно становится не более чем последовательностью операций обработки, а все подробности выполнения этих операций определяются операторами самостоятельно. Однако если деталь должна быть изготовлена на полностью автоматизированной производственной линии, технологический план будет содержать подробные сведения о каждой операции. Вне зависимости от сложности плана его подготовка очень сильно зависит от знаний планировщика, имеющихся инструментов, материалов, стандартных приемов и характерных масштабов стоимости. К сожалению, эти сведения обычно документируются недостаточно полно, а чаще всего хранятся исключительно в памяти технолога. Если память у него хорошая, он может вспомнить план производства аналогичной детали и видоизменить его под новую деталь. В некоторых компаниях планы классифицируются вручную и хранятся в рабочих журналах.

## 6.2.1. Неавтоматизированный подход

В процессе разработки планов производства новых продуктов инженеры-технологи чаще всего действуют примерно одинаково. Типичная последовательность этапов планировки приведена ниже.

1. Изучение формы детали в целом. Технолог изучает инженерно-техническую документацию, определяет общую структуру детали и потенциальные трудности, которые могут возникнуть при ее производстве. Можно ли зажать эту деталь в тиски, поместится ли она между губками? Не окажется ли, что она слишком длинная и тонкая, и изогнется, когда ее зажмут? И так далее.

2. Определение оптимальной формы заготовки, если она не задана в документации. По чертежу планировщик обычно с легкостью определяет очертания детали. Это помогает ему выбрать форму заготовки, из которой данная деталь может быть изготовлена минимальным объемом отходов металла. Определение базовых поверхностей и конфигураций. Инженер-технолог определяет минимальное количество конфигураций, необходимых для получения базовых поверхностей механической обработкой. Затем он записывает операции для каждой конфигурации.



## 6.2.1. Неавтоматизированный подход

3. Определение элементов детали. Инженер-технолог выделяет элементы детали, то есть геометрические формы, которые должны быть вырезаны на заготовке, из которой будет сделана деталь. Форма элементов определяет форму инструментов и траекторию их перемещения при обработке заготовки. Характерные элементы (и субэлементы), получаемые механической обработкой, изображены на рис. 6.3 и рис. 6.4 соответственно

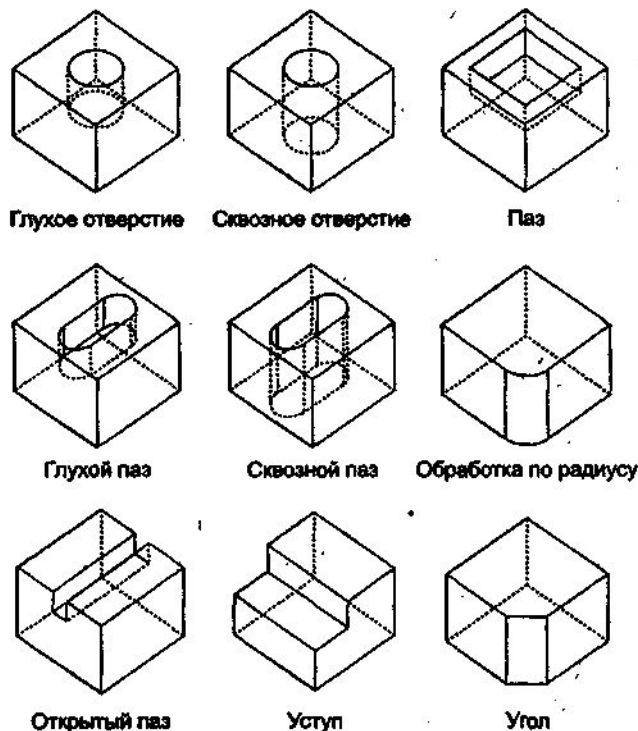


Рис. 6.3. Элементы, получаемые машинной обработкой

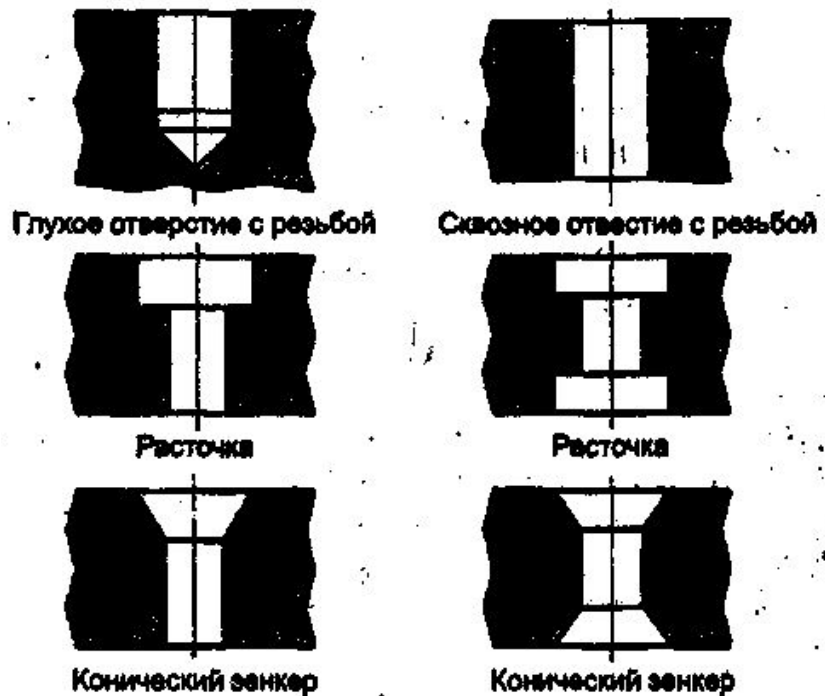


Рис. 6.4. Субэлементы, получаемые машинной обработкой

## 6.2.1. Неавтоматизированный подход

4. Группировка элементов по конфигурациям. Инженер-технолог группирует элементы таким образом, что каждая группа формируется в рамках одной и той же конфигурации. Некоторые детали могут быть произведены в конфигурациях, определенных ранее для базовых поверхностей, другие могут потребовать задания новых конфигураций. Затем формируется список операций по изготовлению элементов детали для каждой конфигурации.

5. Упорядочение операций. Внутри каждой конфигурации порядок операций по производству соответствующих базовых поверхностей и элементов определяется взаимозависимостями этих операций и их взаимным влиянием.

6. Выбор инструментов для каждой операции. Технолог старается по возможности использовать один и тот же инструмент для нескольких операций. Ему приходится учитывать время на смену инструмента и время на обработку.

7. Выбор или проектирование зажимов для каждой конфигурации. Этот этап планирования сильно зависит от опыта технолога, потому что количество стандартных зажимов и крепежных приспособлений невелико. Правильный выбор зажимов очень важен для достижения высокого качества продукта

## 6.2.1. Неавтоматизированный подход

8. Итоговая проверка плана. Инженер-технолог проверяет осуществимость конкретных конфигураций, вероятность создания помех инструментам крепёжными приспособлениями и т. д.
9. Уточнение плана производства. Технолог добавляет в план подробности по изготовлению отдельных элементов, выбирает скорость подачи и обработки, оценивает затраты и время изготовления и т. д.
10. Подготовка документации. Готовый технологический план производства отдаётся главному технологу.

## 6.2.2. Модифицированный подход

Модифицированный подход — это один из двух методов/используемых для разработки систем автоматизированной технологической подготовки. Другой подход называется генеративным (generative approach), речь о нем пойдет в следующем разделе. Модифицированный подход (variant approach) называется так потому, что он является модификацией неавтоматизированного подхода, суть которой состоит в том, что технолог пользуется не только своей памятью, но и памятью компьютера. Другими словами, рабочий журнал технолога хранится в компьютерном файле. Типичный технологический план производства подобной детали может автоматически извлекаться из такого файла после описания анализируемой детали в соответствии с определенной системой кодирования. Выбранный план производства может редактироваться в интерактивном режиме; в него вносятся поправки, соответствующие специфике конкретной детали. Таким образом, модифицированный подход требует наличия базы данных со стандартными планами производства для каждого семейства деталей. Такой план должен содержать все инструкции, которые будут входить в план производства любой детали из данного семейства. Детали классифицируются по семействам на основании концепции групповой технологии. Согласно этой концепции, каждой детали присваивается код, зависящий от ее элементов, после чего детали группируются в семейства в соответствии с присвоенными кодами.

## 6.2.2. Модифицированный подход

Модифицированный подход к разработке плана производства выражается в следующем. Технологическая подготовка производства новой детали начинается с кодирования ее особенностей, что эквивалентно описанию детали на языке групповой технологии. Затем деталь может быть отнесена к какому-либо семейству на основании ее кода. После этого из базы данных извлекается стандартный план производства для деталей этого семейства. В этом плане содержатся общие инструкции по производству любых деталей семейства, поэтому может потребоваться его редактирование для получения плана нужной детали. Редактирование осуществляется средствами компьютерной системы. Часто изменения оказываются незначительными, потому что новый план представляет собой лишь небольшую модификацию стандартного. Благодаря этому на этапе подготовки плана экономится масса времени, а готовые планы оказываются гораздо более последовательными, чем разрабатываемые вручную. Если деталь не может быть отнесена к одному из существующих семейств, технолог может разработать новый стандартный план производства в интерактивном режиме.

### 6.2.3. Генеративный подход

Генеративный подход (generative approach) состоит в том, что технологический план вырабатывается автоматически на основании технических требований к детали. В технические требования должны включаться подробные сведения о материале, особенностях обработки и предлагаемых методиках проверки, а также графическое изображение формы детали.

На первом этапе разработки плана производства новой детали в генеративном подходе технические требования вводятся в компьютерную систему, в идеале они должны считываться непосредственно из базы данных САПР. Для этого необходимо, чтобы автоматизированная система технологической подготовки могла распознавать элементы детали, требующие машинной обработки, такие как отверстия, пазы и выемки. Реализация первого этапа значительно упрощается, если при моделировании детали используется объектно-ориентированный подход. Однако даже конструктивные элементы, используемые в системе объектно-ориентированного моделирования, могут потребовать преобразования к элементам, которые могут быть изготовлены машинной обработкой.

## 6.2.3. Генеративный подход

~~Некоторые конструктивные элементы однозначно сопоставляются~~ технологическим, тогда как преобразование других представляет собой не слишком тривиальную процедуру. Кроме того, информации об элементах, вообще говоря, недостаточно для технологической подготовки производства. Например, большинство моделей САД не содержат сведений о допусках и материалах, и их приходится вводить вручную. Это лишь часть причин задерживающих разработку полностью автоматизированных систем технологической подготовки производства до настоящего времени. Вместо этого технические требования к детали часто кодируются вручную. Схема кодирования должна определять все геометрические элементы и их параметры, в частности положение, размеры и допуски. Закодированные данные сопровождаются информацией в текстовом формате. Наконец, система должна иметь сведения о форме заготовки.

На втором этапе закодированные данные и текстовая информация преобразуются в подробный технологический план производства детали. На этом этапе определяется оптимальная последовательность операций и условия их выполнения; К условиям относятся используемые инструменты, крепления, измерительные приборы, зажимы, схемы подачи и скорости обработки. Для построения столь подробного плана производства детали произвольной сложности требуется большая база данных и сложная логическая система. Поэтому на сегодняшний день, автоматизированный подход ограничивается отдельными классами деталей с относительно

# 7. Быстрое прототипирование и изготовление

## 7. Быстрое прототипирование и изготовление

7.1. Обзор

7.2. Процессы быстрого прототипирования и изготовления

7.2.1. Стереолитография

7.2.2. Отверждение на твердом основании

7.2.3. Избирательное лазерное спекание

7.2.4. Трехмерная печать

7.2.5. Ламинирование

7.2.6. Моделирование методом наплавления



## 7. Быстрое прототипирование и изготовление

~~Хотя геометрическая модель используется как источник общих данных, процессы проектирования и производства не были непосредственно интегрированы в процедуру обработки. Иными словами, чтобы станок с ЧПУ мог выполнить обработку по данным геометрической модели, требовался ряд промежуточных шагов: планирование процессов, рассмотрение конструкций зажимов и креплений, выбор оборудования.~~

Еще один способ использования геометрической модели в производстве — это быстрое прототипирование. Существуют разные процессы быстрого прототипирования, но все их объединяет то, что прототип изготавливается путем послойного наложения композитного материала. Основное преимущество быстрого прототипирования состоит в том, что прототип создается за один прием, а исходными данными для него служит непосредственно геометрическая модель детали. Таким образом, отпадает необходимость в планировании последовательности технологических процессов, специальном оборудовании для обработки материалов, транспортировке от станка к станку и т. д. Однако по сравнению с обработкой на станке с ЧПУ этот процесс имеет существенный недостаток — ограниченность выбора материалов. Поскольку станки с ЧПУ способны обрабатывать большую часть доступных промышленных материалов, включая металлы, то физические объекты, изготовленные методом быстрого прототипирования, используются главным образом в качестве прототипов или шаблонов для других производственных процессов.

## 7.1. Обзор

После появления систем твердотельного моделирования в начале 70-х гг. XX в. делались попытки генерировать физические объекты непосредственно из геометрических данных, не прибегая к использованию традиционных инструментов. Новая технология получила название быстрое прототипирование (rapid prototyping), а также послойное изготовление (layered manufacturing), трехмерная печать (3D printing), настольное изготовление (desktop manufacturing) и изготовление объемных деталей произвольной формы (solid freeform manufacturing). С того времени эта технология шагнула далеко вперед, найдя множество применений на производстве помимо изготовления прототипов. Исходя из этого, более удачным обозначением для нее в настоящий момент представляется термин быстрое прототипирование и изготовление {rapid prototyping and manufacturing), или БПИ, который мы и будем использовать в этой главе.

В основе своей процессы быстрого прототипирования и изготовления состоят из трех шагов: формирование поперечных сечений изготавливаемого объекта, послойное наложение этих сечений и комбинирование слоев. 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.

## 7.1. Обзор

~~Отпадает необходимость в топологическом проектировании и распознавании~~ по элементам, поскольку планирование процессов, в ходе которого используется эта информация, не требуется. Аналогичным образом, не нужно преобразовывать элементы конструкции в элементы изготовления.

Достаточно иметь трехмерную поверхностную или твердотельную модель детали, на основе которой будут сгенерированы данные поперечных сечений.

Не требуется определять геометрию пустого пространства, поскольку в ходе процессов БПИ материал добавляется, а не снимается.

Не нужно определять несколько наборов оборудования или сложные последовательности обработки материала, поскольку деталь изготавливается за один прием.

Нет необходимости рассматривать конструкции зажимов и креплений. (Некоторые процессы могут требовать создания вместе с деталью поддерживающих структур. О поддерживающих структурах речь пойдет позже.)

Не нужно проектировать и изготавливать формы и штампы, так как процессы

Таким образом, поскольку **7.1. Обзор** БПИ позволяют создать физический объект без использования инструментов, они хорошо подходят для интеграции проектирования и изготовления без планирования процессов.

Слои поперечных сечений могут создаваться и комбинироваться одним из следующих методов:

полимеризация смол лазером, другими источниками света или лампами;

избирательное спекание твердых частиц или порошка лучом лазера;

связывание жидких или твердых частиц путем склеивания или сварки;

резка и ламинирование листового материала;

плавление и отверждение.

Типичные процессы быстрого прототипирования и изготовления

## 7.2. Процессы быстрого прототипирования и изготовления

Характеристики некоторых серийно выпускаемых машин для быстрого

прототипирования и изготовления, использующих различные типы процессов, сведены

в таблице

Тип процесса	Стереолитография								
Машина	SmartStart (SLA-250/30A)	SLA-250/40,50	SLA-3500	SLA-5000	LMS	JSC-1000 JSC-2000 JSC-3000	SOUP-400, -530, -600, -850	COLAMN -300	Aaroflex Solid Imager
Компания	3D Systems (США)				Fockle & Schwarze (Германия)	SONY/ DMEC Ltd. (Япония)	CMET, inc. (Япония)	Mitsui Zosen (Япония)	Aaroflex, Inc. (США)
Рабочее пространство	250× 250× 250 мм	250× 250× 250 мм	350× 350× 400 мм	508× 508× 584 мм	400× 400× 350 мм	1000× 800× 500 мм	400×400×400, 530×355×355, 600×400×400, 860×600×500 мм		560× 560× 560 мм
Толщина слоя	0,15 мм	0,1 мм			0,1 мм	0,1–0,3 мм			0,05 мм
Точность	0,1 мм				0,01 мм	0,1–0,2 мм		0,05 мм	0,06 мм
Материал	Любая фотополимерная смола								
Тип процесса	Ламинирование			Моделирование методом наплавления	Спекание порошка		Отверждение на твердом основании		
Машина	LOM-1015 LOM-2030H	Kira Solid Center	Hot Plot	FDM 1650, FDM 2000, FDM 8000	Sinterstation 2000, Sinterstation 2500	EOSINT P350 EOSINT M250 EOSINT S700	Solider 4600 Solider 5600	LSI-0609MA, LSI-1115MA, LSI-2224MA	SOMOS

## 7.2. Процессы быстрого прототипирования и изготовления

Компания	Helisys, Inc. (США)	Kira (Япония)	Sparx AB (Швеция)	Stratasys (США)	DTM (США)	EOS (Германия)	Cubital (Израиль)	Light Sculpting, Inc. (США)	Teijin Seiki (Япония)
Рабочее пространство	381×254×356, 813×559×508 мм	400×280×300 мм		254×254×254, 254×254×254, 457×457×609 мм	Высота 304,8 мм, глубина 381 мм	340×340×590, 250×250×150, 720×380×380 мм	350×350×350, 500×350×500 мм	150×150×230, 280×280×380, 560×560×600 мм	300×300×300 мм
Толщина слоя	0,1 мм	0,1 мм	1,0 мм	0,05 мм	0,08 мм	0,1–0,2 мм	0,1–0,15 мм	0,01 мм	0,1–0,5 мм
Точность	0,1 мм	0,2 мм		0,127 мм, 0,127 мм, 0,127–0,254 мм	0,38 мм	0,03 мм	0,5 мм	0,03 мм	0,05 мм (x, y) 0,15 мм (z)
Материал	Бумага с покрытием	Обычная копировальная бумага	Лист с покрытием (полиэтилен)	ABS, воск, полиамидный пластик	ABS, пластик, ПВХ, воск для литья по выплавляемым моделям, металлокерамика с поликарбонатным порошком, песок	Полиамид, поликарбонат, полистирен, металлический сплав	Фотополимер + растворимый в воде воск		

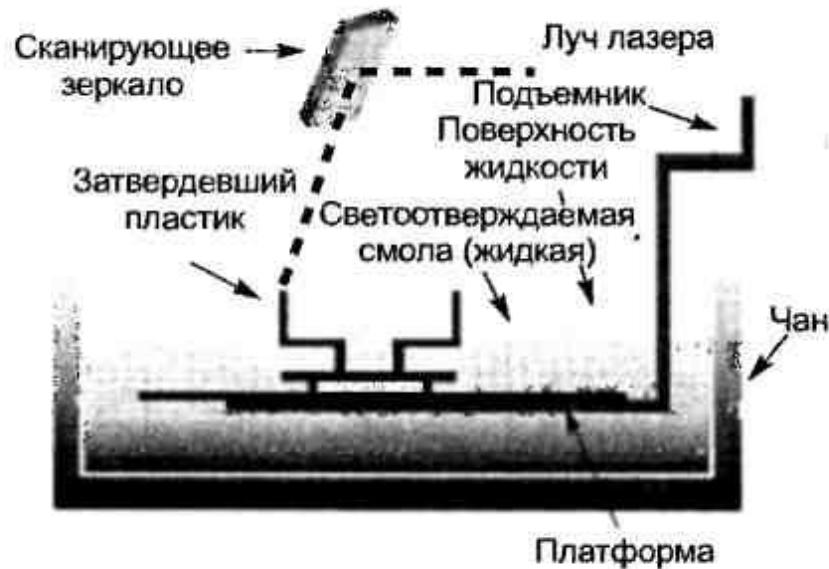
## 7.2.1. Стереолитография

В конце 70-х — начале 80-х гг. XX в. А. Герберт из корпорации 3М в Миннеаполисе, Х. Кодама из Исследовательского института префектуры Нагоя в Японии и К. Халл из корпорации Ultra Violet Products (UVP) в Калифорнии независимо друг от друга работали над идеями быстрого прототипирования, основанными на избирательном отверждении поверхностного слоя фото полимера и построении трехмерных объектов из последовательно наложенных слоев, Герберт и Кодама прекратили работу из-за недостатка финансирования, так и не сумев разработать коммерческий продукт. Халл благодаря стабильной поддержке от UVP разработал систему, способную автоматически изготавливать детали сложной формы. Халл ввел в обращение термин стереолитография (stereolithography) и в 1986 г. основал корпорацию 3D Systems, которая начала производить стереолитографические аппараты (stereo lithography apparatus — SLA).

Процесс изготовления детали изображен на рис. 7.1, а и протекает следующим образом.

## 7.2.1. Стереолитография

1. Фоточувствительный полимер, затвердевающий на свету, поддерживается в жидком состоянии. На толщину одного слоя ниже поверхности жидкого полимера располагается платформа, способная двигаться в вертикальном направлении.



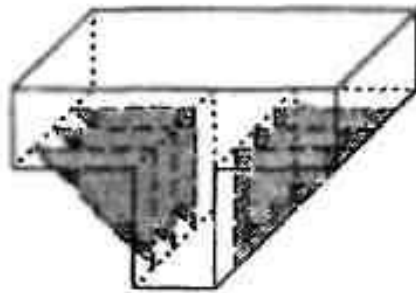


## 7.2.1. Стереолитография

2. Ультрафиолетовый лазер сканирует слой полимера над платформой, отверждая полимер по форме соответствующего поперечного сечения. Обратите внимание, что этот процесс начинается с нижнего поперечного сечения детали.
3. Платформа опускается в ванну с полимером на толщину одного слоя, давая полимеру растечься по поверхности детали для начала нового слоя.
4. Шаги 3 и 4 повторяются, пока не будет наращен верхний слой детали.
5. Для полного затвердевания детали выполняется окончательное отверждение. Этот шаг необходим, поскольку в каждом слое могут еще оставаться жидкие участки. Так как лазерный луч имеет конечные размеры, сканирование каждого слоя аналогично закрашиванию некоторой фигуры тонкой цветной ручкой.

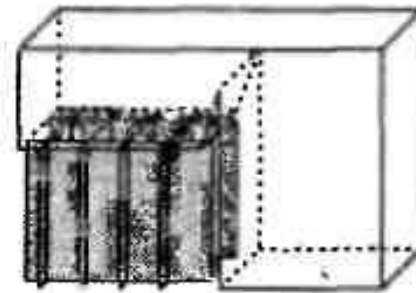
## 7.2.1. Стереолитография

Стереолитография наиболее популярна среди процессов быстрого прототипирования и изготовления, и ее интерфейс с твердотельной моделью стал стандартом для других процессов.



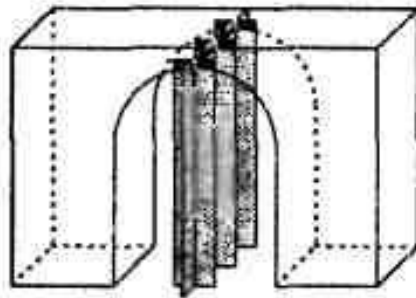
Угловое соединение

а



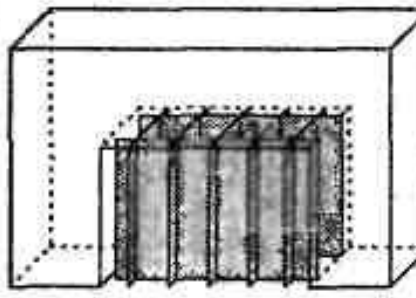
Островок

б



Потолок с аркой

в

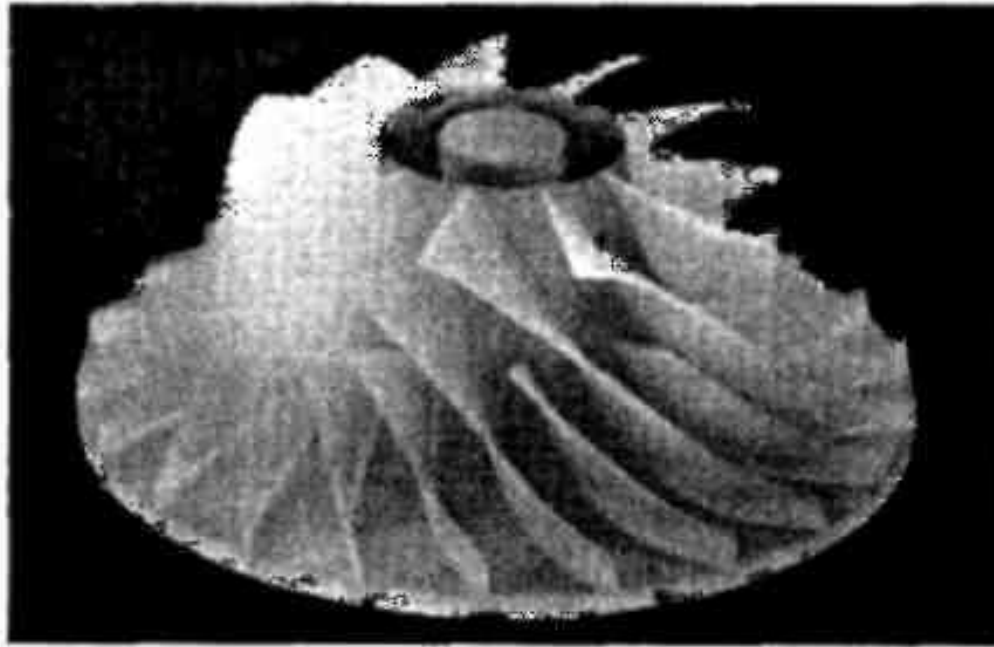


Потолок

г

*Поддерживающие структуры в стереолитографии*

## 7.2.1. Стереолитография



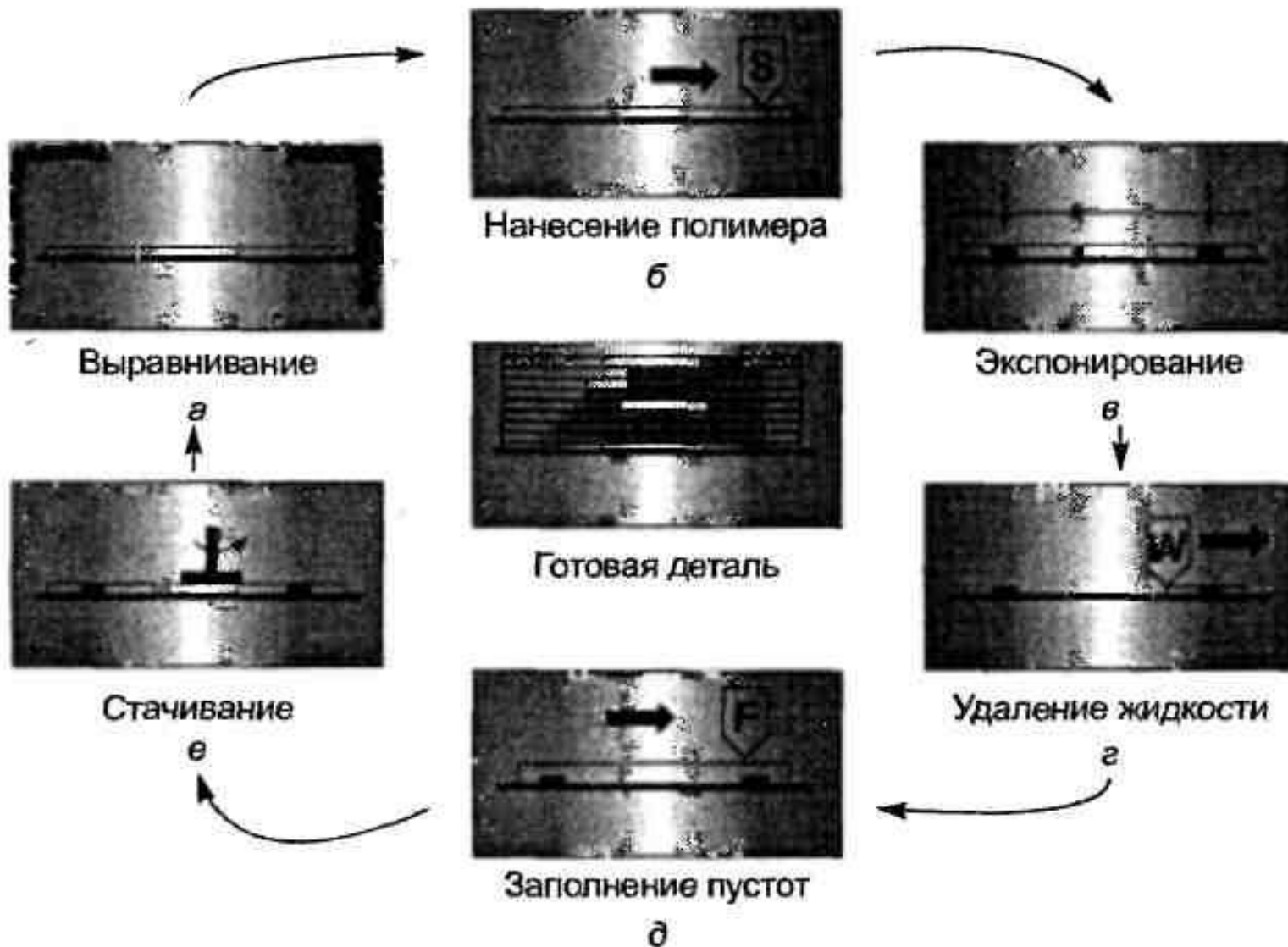
Однако она требует создания поддерживающих структур, если деталь имеет вырезы внизу, то есть верхнее поперечное сечение детали имеет большую площадь, чем нижнее. Изготовленная методом стереолитографии крыльчатка изображена на рисунке. Более подробно процесс стереолитографии будет описан далее.

## 7.2.2. Отверждение на твердом основании

В процессе отверждения на твердом основании (solid ground curing, SGC) каждый слой отверждается путем экспонирования ультрафиолетовой лампой, а не сканирования лазерным лучом. Таким образом, все точки слоя затвердевают одновременно и окончательное отверждение не требуется. Типичный процесс отверждения на твердом основании имеет место 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. 7.4, а), платформа покрывается тонким слоем жидкого фотополимера (рис. 7.4, б).
4. Над поверхностью жидкой пластмассы помещается маска, соответствующая текущему слою, и пластмасса экспонируется светом мощной ультрафиолетовой лампы (рис. 7.4, в). Обратите внимание, что процесс начинается с маски, соответствующей нижнему слою.
5. Оставшаяся жидкость удаляется с изделия аэродинамическим wiper (рис. 7.4, г).

## 7.2.2. Отверждение на твердом основании



## 7.2.2. Отверждение на твердом основании

6. Изделие покрывается слоем жидкого воска, который заполняет пустоты (рис. 7.4, д). Затем к воску прикладывается холодная пластина, и он затвердевает.
7. Слой стачивается до желаемой толщины с помощью шлифовального диска (рис. 7.4, 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.

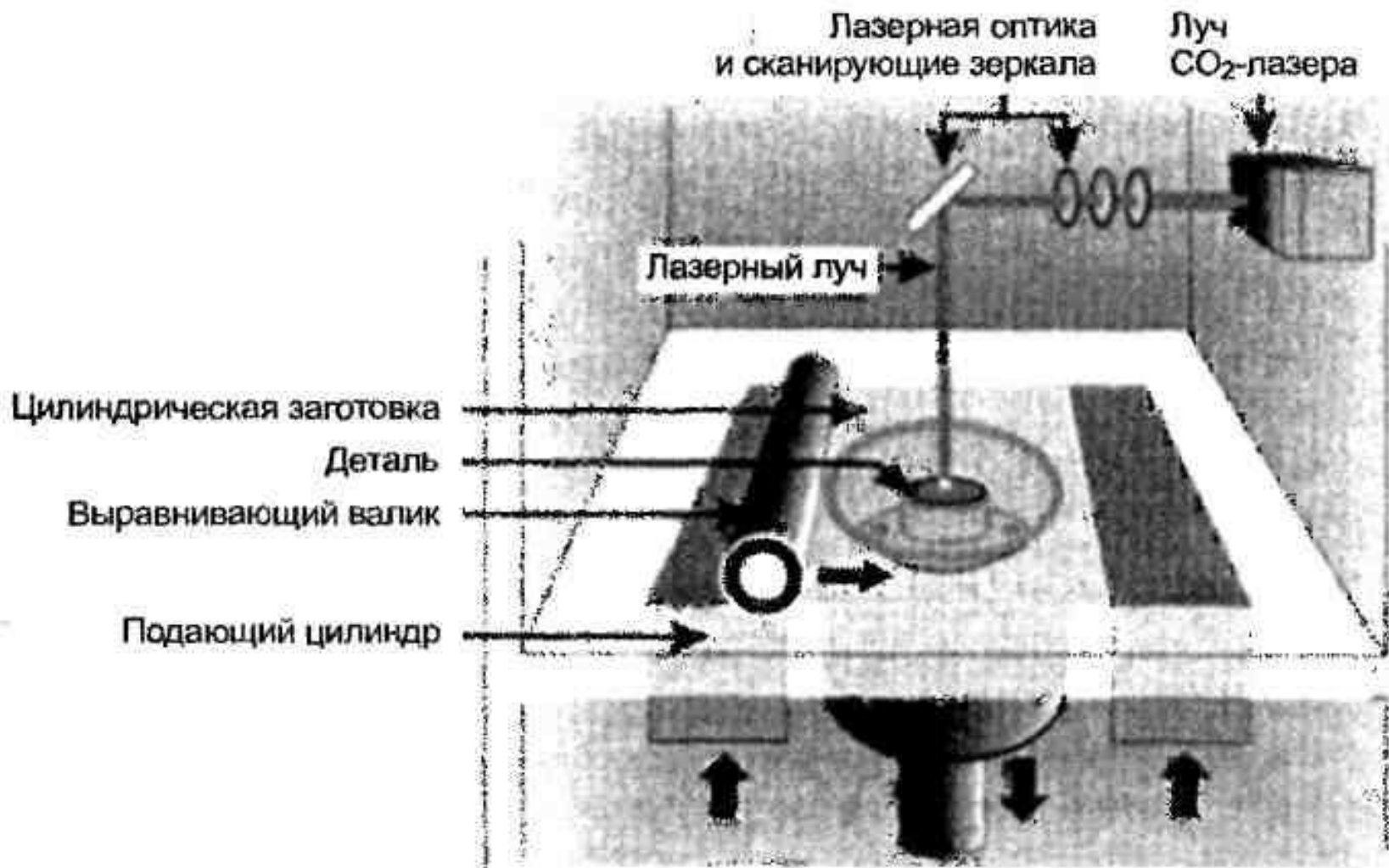
Главным преимуществом отверждения на твердом основании по сравнению со стереолитографией является отсутствие необходимости в поддерживающих структурах. Это обусловлено тем, что пустоты заполняются воском. Кроме того, благодаря использованию света лампы вместо лазерного луча исключается операция окончательного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

## 7.2.3. Избирательное лазерное спекание

Процесс изготовления детали методом избирательного спекания, разработанный фирмой DTM (США), протекает следующим образом.

1. Цилиндрическая заготовка помещается на высоте, необходимой для того, чтобы на нее можно было осадить слой порошкового материала желаемой толщины. Порошковый материал, используемый для изготовления прототипа, поступает из подающего цилиндра и наносится выравнивающим валиком (рис. 7.5).
2. Слой порошка избирательно сканируется и нагревается лучом лазера, вследствие чего частицы слипаются между собой. Просканированные частицы порошка образуют требуемое поперечное сечение. Обратите внимание, что этот процесс начинается с нижнего поперечного сечения детали.
3. Цилиндрическая заготовка опускается на толщину одного слоя для нанесения нового слоя порошка.
4. Луч лазера сканирует новый слой порошка, склеивая его с предыдущим и формируя следующее поперечное сечение.
5. Шаги 3 и 4 повторяются, пока не будет создан самый верхний слой детали.
6. Для некоторых материалов может понадобиться окончательное

## 7.2.3. Избирательное лазерное спекание





## 7.2.3. Избирательное лазерное спекание

Поддерживающая структура не требуется, потому что пустоты каждого слоя заполняются необработанным порошком. Более того, в качестве материала для процесса избирательного спекания потенциально может использоваться любой плавкий порошок, даже металлический, если лазер обладает достаточной мощностью. На практике для металлических порошков, частицы которых покрыты термопластическим связующим материалом, используется косвенное спекание. Под лучом лазера связующий материал расплавляется и свободно связывает частицы металлического порошка, образуя желаемую форму, которая называется «зеленой деталью» (green part). В этом случае достаточно, чтобы мощности лазера хватало для расплавления связующего материала. Затем зеленая часть подвергается обработке в печи, в ходе которой связующий материал выжигается, а частицы металлического порошка связываются за счет обычных механизмов спекания.

## 7.2.3. Избирательное лазерное спекание

Получившаяся деталь носит название «коричневой детали» (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.

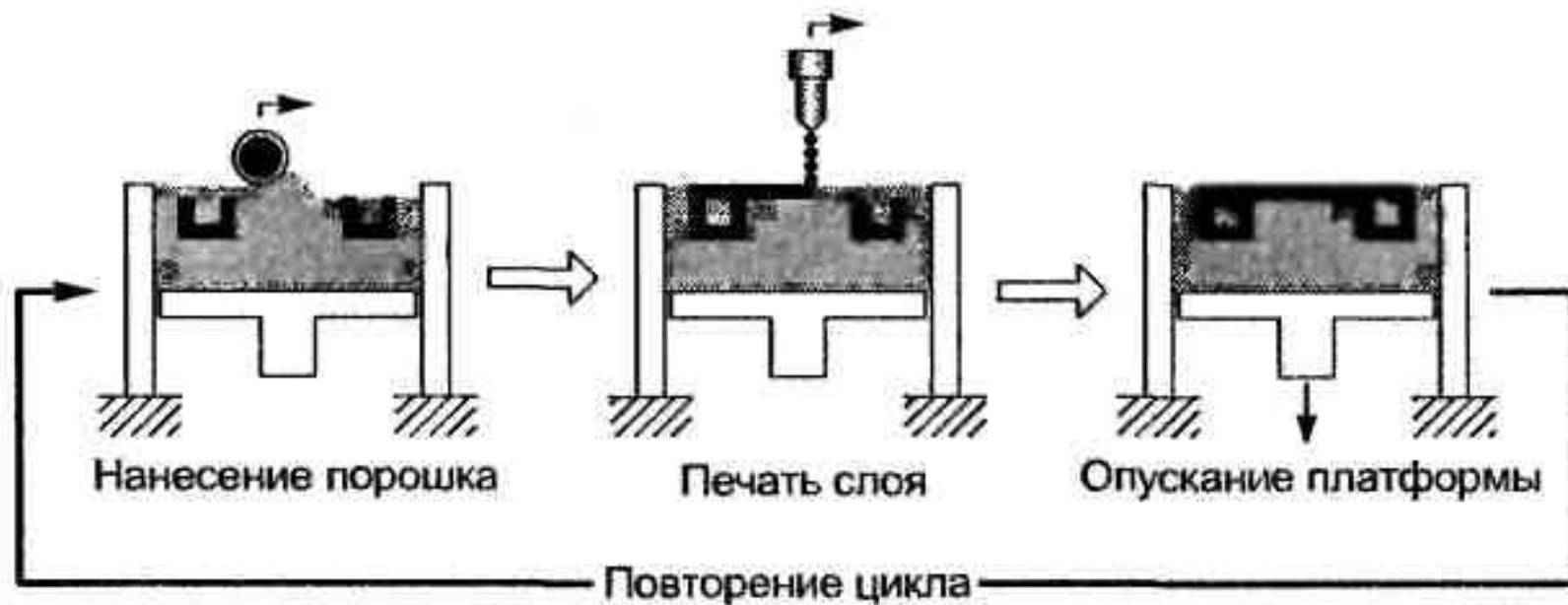
Данный метод используется для изготовления форм для литья непосредственно по их геометрическим моделям. Ресурса таких форм достаточно для изготовления от 2500 до 10 000 деталей-прототипов.

## 7.2.4. Трёхмерная печать

Разработанный в Массачусетском Технологическом институте процесс трёхмерной печати был назван так из-за своей схожести с печатью на струйном принтере. В трёхмерной печати вместо чернил используется жидкое связующее вещество. Процесс трёхмерной печати происходит следующим образом (рис. 7.6).

1. Платформа располагается на высоте, необходимой для того, чтобы можно было нанести на нее слой керамического порошка надлежащей толщины.
2. Нанесенный слой керамического порошка избирательно сканируется печатающей головкой, из которой поступает жидкое связующее вещество, вызывающее прилипание частиц друг к другу. /Отсканированные печатающей головкой частицы образуют требуемую форму поперечного сечения. Обратите внимание, что этот шаг начинается с нижнего поперечного сечения.
3. Платформа опускается на одну толщину слоя, позволяя нанести следующий слой порошка.
4. Новый слой сканируется, образуя следующее поперечное сечение и склеиваясь с предыдущим слоем.
5. Шаги 3 и 4 повторяются, пока не будет создан верхний слой детали.
6. Для отверждения детали проводится последующая тепловая обработка.

## 7.2.4. Трехмерная печать



## 7.2.4. Трехмерная печать

С помощью трехмерной печати было бы удобно изготавливать формы для литья, поскольку форма изготавливается как цельная деталь, состоящая из оболочки и полостей, и положение полостей относительно оболочки можно было бы задавать точно. Однако формы для литья, изготовленные путем современной трехмерной печати, имеют невысокое качество поверхности.

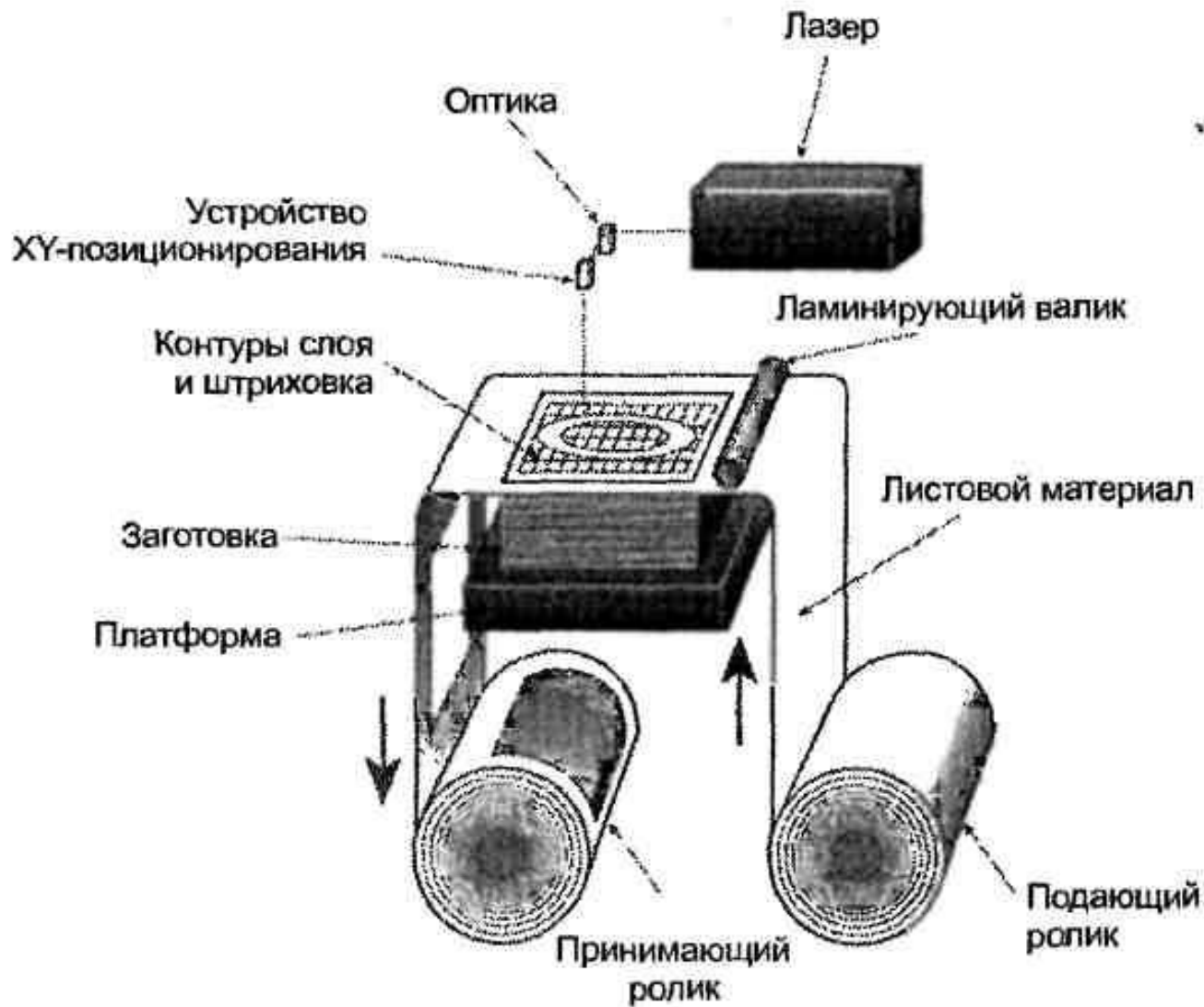
## 7.2.5. Ламинирование

В процессе ламинирования (laminated object manufacturing – LOM), коммерциализированном фирмой Helisys, деталь изготавливается путем ламинирования и лазерной резки материалов, поступающих в листовом виде. Слипание листов происходит за счет наличия термоадгезивного покрытия. Процесс протекает следующим образом.

1. Каждый лист приклеивается к заготовке с помощью нагрева и давления, образуя очередной слой. Листовой материал подается в виде непрерывного рулона с одной стороны машины и принимается с противоположной стороны (рис. 7.7). Температуру и давление, необходимые для ламинирования, обеспечивает нагретый валик. Обратите внимание, что когда к стопке приклеивается следующий лист, платформа опускается на толщину одного листа.

2. После того как слой (лист) приклеен, он сканируется лазером вдоль контуров текущего поперечного сечения. Обычно для этой цели используется лазер на углекислом газе мощностью 25 или 50 Вт. Как и в других процессах, этот шаг начинается с нижнего поперечного сечения. Обратите внимание, что здесь сканирование производится только по контурам. Это делает данный процесс более эффективным, чем процессы, требующие растрового сканирования.

## 7.2.5. Ламинирование



3. Области слоя, выходящие за пределы контуров, штрихуются

**7.2.5. Ламинирование**  
лазером (то есть рассекаются на маленькие кусочки, называемые черепичками (tiles), для последующего удаления, когда деталь будет закончена).

4. Шаги 1-3 повторяются до тех пор, пока не будет наклеен и вырезан верхний слой детали.

5. После топ) как все слои будут готовы, результатом будет деталь, находящаяся внутри блока поддерживающего материала. Этот материал затем разламывается на кусочки вдоль линий лазерной штриховки.

6. Готовую деталь можно покрыть герметиком, чтобы предохранить ее от влажности.

Наличие поддерживающего материала вокруг детали имеет свои преимущества и недостатки. Прежде всего оно исключает необходимость во внешних поддерживающих структурах. При изготовлении детали внутри блока поддерживающего материала, имеющего определенную форму, геометрия всей структуры стабилизирована в процессе изготовления и, соответственно, ей не грозит перекося под собственным весом. Более того, нам не приходится беспокоиться об изолированных «островках», которые часто образуются, когда твердое тело, спроектированное в САД-системе,



## 7.2.5. Ламинирование

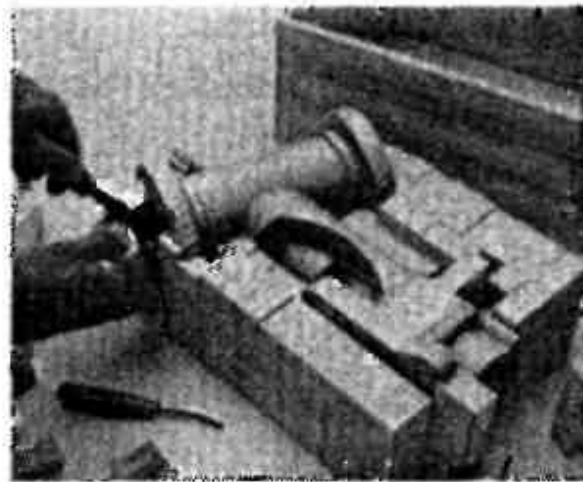
Иными словами, ламинирование позволяет избежать создания специальных подпорок, которые точно фиксировали бы эти «островки» в пространстве, пока в процессе изготовления не будут созданы «мосты» к оставшимся частям детали. Однако удаление лишнего материала по окончании изготовления детали является непростой задачей (рис, 12.8).

Чтобы гарантировать, что удалены будут только излишки, а хрупкие части детали не будут при этом сломаны, необходима бережная очистка, выполняемая вручную. Кроме того, полую структуру с замкнутыми поверхностями невозможно изготовить в виде единой части, поскольку в этом случае излишки материала невозможно будет извлечь изнутри. Сложность удаления ненужного материала характеризует любую часть с узкими перемычками, внутренними полостями с ограниченным доступом, слепыми отверстиями и т. п. Далее, большая часть материала, расходуемая при ламинировании, идет не на саму деталь, а остается неиспользованной в рулоне или образует поддерживающие структуры, которые будут удалены после изготовления. Это может быть весьма расточительно, если применяются более дорогостоящие материалы, чем бумага.

## 7.2.5. Ламинирование



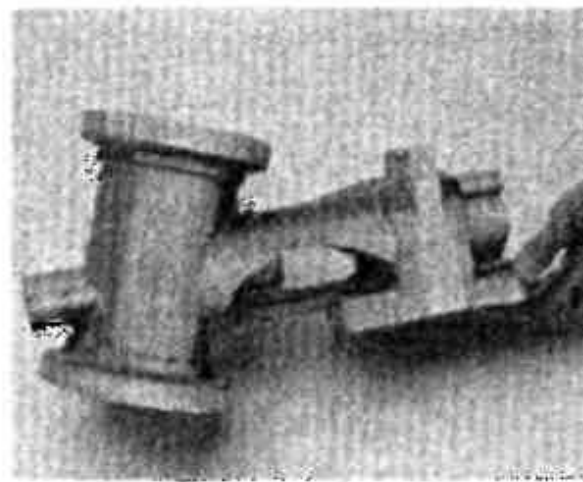
а



б



в



г

Рис. 7.8. Процесс удаления черепичек

## 7.2.5. Ламинирование

Помимо преимуществ и недостатков процесс ламинирования имеет следующие характеристики.

- Это субтрактивный, а не аддитивный процесс (то есть для создания слоя, с требуемым поперечным сечением материал удаляется, а не добавляется). Во всех прочих процессах БПИ слон образуются путем добавления материала.
- Таким образом, потенциально ламинирование является самой быстрой технологией изготовления деталей с большим отношением объема к площади поверхности.
- Детали образуются перемежающимися слоями материала и клейкого вещества. Соответственно, многие из их физических свойств являются неоднородными и анизотропными.
- Потенциальная точность процесса изготовления ламинированных объектов высока. В нем может использоваться сколь угодно тонкий листовой материал, что позволяет достичь хорошей разрешающей способности в направлении наращивания детали. В действительности изготовить тонкий однородный листовой материал несложно, и усадка при ламинировании не представляет проблемы, поскольку контуры вырезаются после того, как происходит усадка.

## 7.2.5. Ламинирование

Хотя процесс потенциально применим ко многим материалам, включая пластики, композиты и металлы, наиболее популярным на сегодняшний день является бумажное ламинирование.

## 7.2.6. Моделирование методом наплавления

В процессе наплавления (fused-deposition modeling – FDM), коммерциализированном фирмой Stratasys, каждый слой формируется путем выдавливания термопластичного материала, находящегося в жидком состоянии (рис. 7.9).

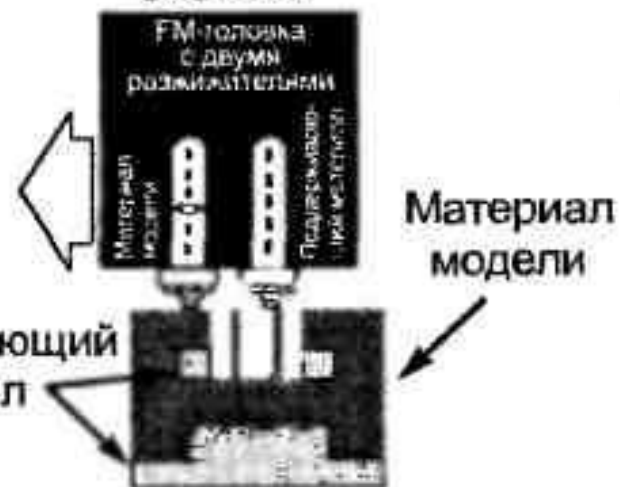
Температура выдавливаемого материала незначительно превышает его температуру затвердевания: это аналогично созданию надписей на торте шоколадным кремом. Деталь изготавливается путем последовательного наплавления слоев. Этот процесс относительно прост, но его применение ограничено термопластичными материалами.

## 7.2.6. Моделирование методом наплавления

Высокоскоростная  
трехосная система



Быстроразъемная поддерживающая  
система



## 7.2.6. Моделирование методом наплавления



## 7.2.6. Моделирование методом наплавления





## 7.2.6. Моделирование методом наплавления

