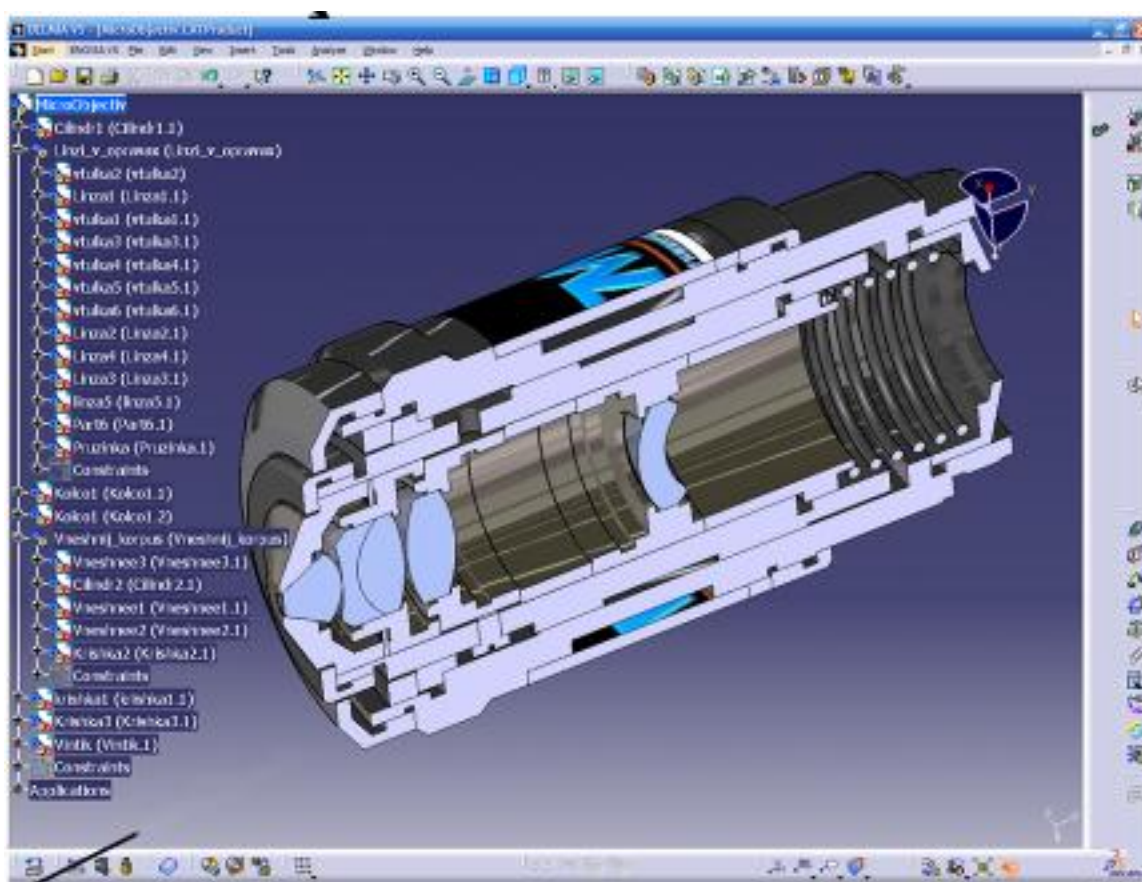


**Е. И. Яблочников А. А. Грибовский**

**М. Я. Афанасьев Б. С. Падун**

**Применение ИПИ-технологий в проектировании  
и производстве**



**Санкт-Петербург  
2017**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Е. И. Яблочников А. А. Грибовский

М. Я. Афанасьев Б. С. Падун

**Применение ИПИ-технологий  
в проектировании  
и производстве**

**Учебное пособие**

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Санкт-Петербург**

**2017**

Е. И. Яблочников, А. А. Грибовский, М. Я. Афанасьев, Б. С. Падун. Применение ИПИ-технологий в проектировании и производстве. Учебное пособие — СПб: Университет ИТМО, 2017. — 56 с.

Учебное пособие посвящено принципам и средствам поддержки жизненного цикла изделия на различных этапах. Рассматривается ключевая роль трёхмерной модели изделия на этапах жизненного цикла. Особое внимание уделено этапам проектирования и производства. Подробно описаны средства контроля качества изделия на основе анализа его геометрических характеристик.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 12.04.01 «Приборостроение».

Рекомендовано к печати учёным советом факультета систем управления и робототехники, протокол № 3 от 03 апреля 2017 г.



*Университет ИТМО* — ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО — участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО — становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017

© Е. И. Яблочников, А. А. Грибовский, М. Я. Афанасьев,  
Б. С. Падун, 2017

# Оглавление

Список сокращений	5
Список иллюстраций	7
Введение	9
<b>1 Цифровые модели производства</b>	<b>11</b>
1.1 Коммуникационная роль трёхмерной модели изделия . . . . .	12
1.2 Использование трехмерных моделей на различных этапах жизненного цикла изделия .	20
<b>2 Физические прототипы</b>	<b>23</b>
2.1 Трёхмерное сканирование . . . . .	23
2.2 Построение моделей изделий на основе трёхмерного сканирования (реверс-инжиниринг)	32
<b>3 Координатно-измерительные машины</b>	<b>39</b>

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

3.1	Выбор методики обмера элементов детали . . .	43
3.2	Основные этапы создания программы измерения	50
	<b>Литература</b>	<b>55</b>

---

# СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

**BOM** — Bill of materials

**CAD** — Computer-aided design

**CAE** — Computer-aided engineering

**CALS** — Computer-aided acquisition and lifecycle support

**CAM** — Computer-aided manufacturing

**CRM** — Customer relationship management

**ERP** — Enterprise resource planning

**MRP** — Manufacturing resource planning

**PDM** — Product data management

**PLM** — Product lifecycle management

**SCM** — Supply chain management

**STEP** — Standard for exchange of product model data

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

**БД** — База данных

**ГОСТ** — Государственный стандарт

**ИПИ** — Информационная поддержка жизненного цикла изделия

**ИЭТР** — Интерактивное электронное техническое руководство

**МКЭ** — Метод конечных элементов

**МЭМС** — Микроэлектромеханические системы

**НТД** — Нормативно-техническая документация

**САПР** — Система автоматизированного проектирования

**ТП** — Технологический процесс

**ТПП** — Технологическая подготовка производства

**ТУ** — Технические условия

**УП** — Управляющая программа

**ЖЦИ** — Жизненный цикл изделия

**ЭМИ** — Электронная модель изделия

**ЧПУ** — Числовое программное управление

# Список иллюстраций

1.1	Этапы жизненного цикла изделия . . . . .	12
1.2	Построение модели с использованием примитивов и различных булевых операций . . . . .	15
1.3	Модель детали, построенная с помощью операций твердотельного моделирования . . . . .	16
1.4	Модель отражателя фары автомобиля, построенная с помощью операций гибридного моделирования . . . . .	17
2.1	Схема действия систем сканирования, основанных на методе точечной триангуляции . . . . .	24
2.2	Схема действия систем сканирования, основанных на методе точечной триангуляции . . . . .	25
2.3	Фотография погрешностей поверхности, возникших из-за ошибки по хорде . . . . .	25
2.4	Схематическое изображение метода линейной триангуляции . . . . .	26
2.5	Схема, демонстрирующая причину появления недоступной зоны для систем, основанных на методе линейной триангуляции . . . . .	27
2.6	Схема получения координат точек на поверхности объекта . . . . .	27
2.7	Схематическое изображение метода интерференционного проецирования . . . . .	28
2.8	Проецирование множества интерференционных полос на поверхность изделия . . . . .	29



## СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ

---

2.9	Метод получения координат точек с поверхности (а) и проецирования интерференционных полос (б) . . . . .	30
2.10	Мобильный трёхмерный сканнер ATOS . . . . .	31
2.11	Турбинная лопатка (а), построенная на основе набора сечений (б) . . . . .	34
2.12	Корпус с выделенными на нём примитивами . . . . .	35
2.13	Поэтапное восстановление трёхмерной модели . . . . .	35
2.14	Внешний вид модели с выделенными границами и пример создания новой границы . . . . .	37
2.15	Построенные на основе отсканированной модели патчи . . . . .	37
3.1	КИМ фирмы DEА и измерительная головка . . . . .	40
3.2	Диаграммы, отражающие отличия методов точечного и сканирующего контроля на реальной детали . . . . .	41
3.3	Ощупывание цилиндра и конуса . . . . .	44
3.4	Пример ощупывания поверхности высотой $\leq 5$ мм . . . . .	46
3.5	Отчёт по результатам контроля на КИМ . . . . .	53

---

# ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие посвящено вопросам применения средств информационной поддержки при решении задач на различных этапах жизненного цикла изделий. При этом основное внимание уделяется этапам жизненного цикла изделия, связанным с проектированием изделий, технологической подготовкой производства, автоматизированным контролем изделий. Актуальность предложенной проблематики вызвана следующими обстоятельствами.

В последние 10 лет значительно расширилось глобальное взаимодействие при организации производства изделий, из-за чего оно перестало быть «локальным» и может быть организовано во многих точках мира. Активно развиваются современные формы кооперации в виде расширенных предприятий, когда каждый этап производства выполняется в той стране и на том предприятии, где это наиболее выгодно. В этой ситуации резко увеличилась роль информационных технологий в сфере проектирования, производства и реализации продукции.

Центральная роль в создании интегрированных автоматизированных систем, основанных на методологии информационной поддержки жизненного цикла изделия (сокр. *ИПИ*)

## ВВЕДЕНИЕ

---

принадлежит цифровым описаниям моделей изделия, технологических процессов и производственной среды, в которой осуществляется их изготовление.

В процессе освоения ИПИ-технологий в приборостроении магистранты ознакомятся с широким спектром используемых автоматизированных систем и способов их использования, и на основании этого приобретут необходимый комплекс профессиональных компетенций, позволяющих использовать технологии информационной поддержки на различных этапах жизненного цикла изделий.

---

---

# 1

---

## ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА

Высокие темпы развития новых технологий (киберфизических систем, трёхмерной печати, интеллектуальной робототехники, облачных сервисов и др.) заставляют компании активно реформировать свой бизнес, внедрять и развивать новые подходы и технологии его ведения, обеспечивая высокое конкурентное качество продукции и высокую производительность.

В этих условиях стала очевидна необходимость рассматривать изделие как некий информационный объект, содержащий все необходимые данные об изделии на каждом этапе его существования — от идеи создания до утилизации, то есть на протяжении всего «Жизненного Цикла Изделия» (сокр. *ЖЦИ*).



Рис. 1.1. Этапы жизненного цикла изделия

### 1.1 Коммуникационная роль трёхмерной модели изделия

ИПИ-технологии (сокр. от *Информационная Поддержка жизненного цикла Изделия*) подразумевают использование трёхмерных геометрических компьютерных моделей изделия как базового элемента ЖЦИ (рис. 1.1). Построение пространственной геометрической модели изделия в настоящее время является ключевой задачей компьютерного проектирования. Именно эта модель используется для решения задач формирования чертежно-конструкторской документации, проектирования средств технологического оснащения и разработки управляющих программ для станков с ЧПУ и координатно-измерительных машин (сокр. *КИМ*).

По компьютерной модели с помощью методов и средств быстрого прототипирования может быть получен физический образец изделия. Трёхмерная модель может быть не только построена средствами определенной САД-системы, но и принята из другой САД-системы через один из согласованных интерфейсов (при их наличии для этой пары систем)

## 1.1. КОММУНИКАЦИОННАЯ РОЛЬ ТРЁХМЕРНОЙ ...

---

или сформирована по результатам трёхмерного сканирования физического изделия-прототипа с использованием соответствующего оборудования.

В САД-системах применяют поверхностное (каркасно-поверхностное), твердотельное и смешанное (гибридное) моделирование. При поверхностном моделировании сначала строится каркас — пространственная конструкция, состоящая из отрезков прямых, дуг окружностей и сплайнов. Каркас играет вспомогательную роль и служит основой для последующего построения поверхностей, которые «натягиваются» на элементы каркаса.

Хотя поверхности и определяют границы тела, но самого понятия «тело» в режиме поверхностного моделирования не существует, даже если поверхности ограничивают замкнутый объем. Это наиболее важное отличие поверхностного моделирования от твердотельного.

Другая особенность состоит в том, что элементы каркасно-поверхностной модели никак не связаны друг с другом. Изменение одного из элементов не влечёт за собой автоматического изменения других. Это даёт большую свободу при моделировании изделий свободной формы, но одновременно значительно усложняет работу с регулярной геометрией в модели.

С другой стороны, твердотельная модель представляет собой целостный объект, занимающий замкнутую часть пространства. Данный объект строится с использованием параметров модели и соотношений между ними. Параметризация позволяет за короткое время «проиграть» (с помощью изменения параметров или геометрических соотношений) различные конструктивные схемы и избежать принципиальных ошибок. Благодаря этому всегда можно точно сказать, находится ли точка внутри твёрдого тела, на его поверхности или вне тела. При изменении в модели любого элемента будут изменяться

## 1. ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА

---

все другие элементы, которые связаны с ним, и полная форма твёрдого тела, но целостность нарушена не будет.

Элементами, из которых строится твёрдое тело, могут быть:

- примитивы (элементы, соответствующие распространённым геометрическим фигурам, таким как сферы, цилиндры, конусы, кубы и т. п.);
- элементы вытягивания (полученные вытягиванием плоского контура перпендикулярно его плоскости);
- элементы вращения (полученные вращением плоского контура вокруг заданной оси);
- фаски;
- скругления;
- оболочки;
- рёбра жесткости.

Обычно твердотельный объект строится путем последовательного «добавления» или «вычитания» элементов. Так, если к уже имеющейся твердотельной модели «добавить» элемент вытягивания, то этот элемент образует на модели выступ, а при «вычитании» элемента на модели образуется углубление. Если при построениях доступны одновременно несколько твердотельных объектов, то над любыми двумя твердотельными объектами, пересекающимися в пространстве, можно выполнять булевы операции объединения, вычитания и пересечения.

При использовании операции пересечения двух объектов формируется новый объект, который состоит только из их общей части (на рис. 1.2 иллюстрируется выполнение булевых операций: А — элемент типа «куб», В — элемент типа «сфера»).

Твердотельное моделирование предполагает возможность установки параметрических зависимостей между элементами твёрдого тела или нескольких тел. При этом изменение одного из параметров (например, длины элемента) приводит к соответствующей перестройке всех параметрически связанных

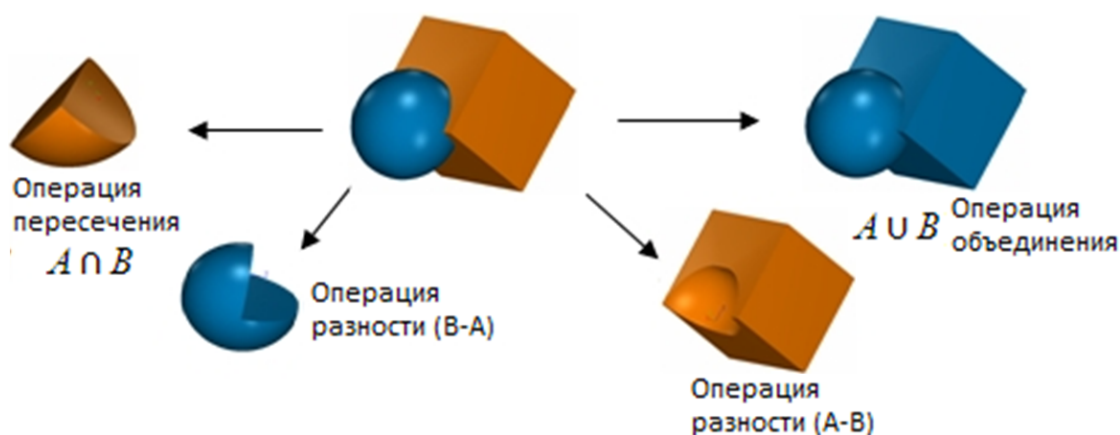


Рис. 1.2. Построение модели с использованием примитивов и различных булевых операций

элементов. Такое моделирование, называемое параметрическим, даёт конструктору дополнительные удобства. Так, можно установить параметрические зависимости между элементами твердотельной сборки и, тем самым, автоматизировать контроль собираемости изделия.

Твердотельное моделирование позволяет быстро создавать модели изделий относительно простых форм (под простотой здесь понимается отсутствие сложных поверхностей). К таким изделиям можно отнести внутренние детали машин и механизмов, металлические корпусные детали и др. (рис. 1.3).

При гибридном моделировании обеспечивается возможность одновременной работы с твердотельными объектами и с поверхностями. При этом можно «отрезать» поверхность часть твёрдого тела, превращать замкнутый поверхностями объём в твёрдое тело и т.п. Гибридное моделирование позволяет сочетать все удобства твердотельного моделирования с возможностью построения объектов сколь угодно сложной геометрической формы.

Гибридное моделирование, в частности, характерно при построении моделей пластмассовых изделий сложной пространственной формы, таких как различные детали автомобилей, самолетов, бытовых приборов и др. (рис. 1.4).



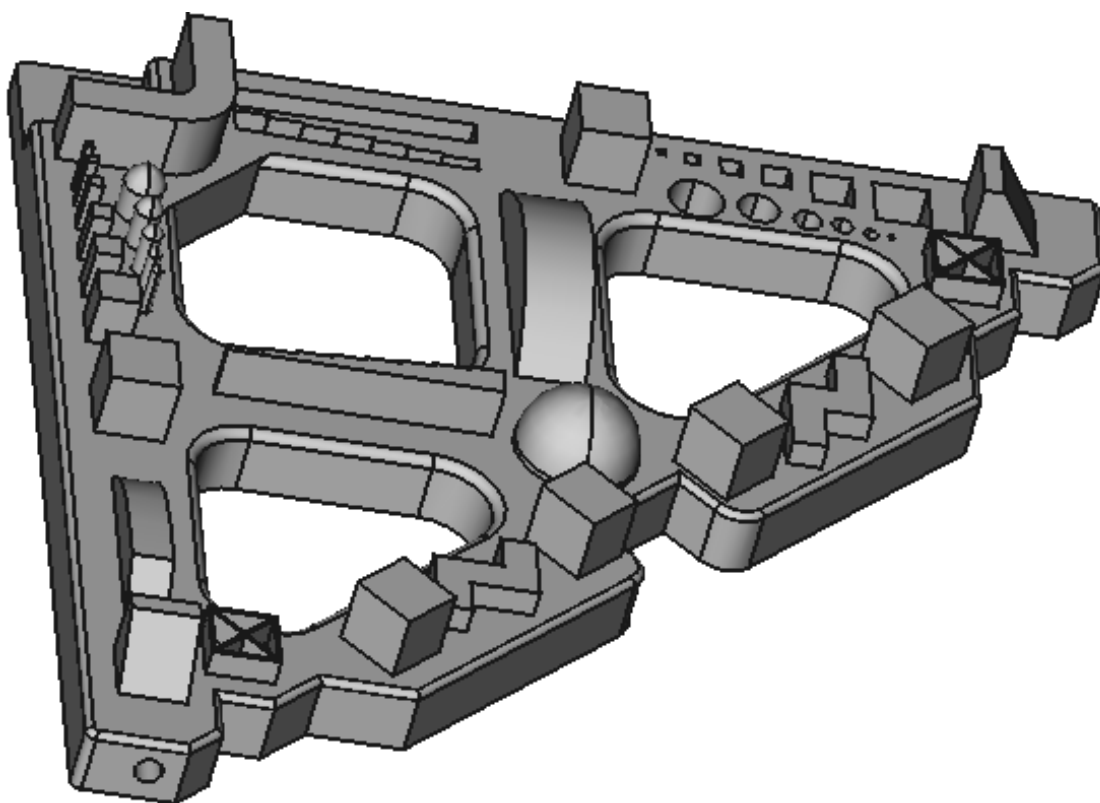


Рис. 1.3. Модель детали, построенная с помощью операций твердотельного моделирования

Способность эффективно хранить и предоставлять информацию об изделии на основе трёхмерной модели напрямую зависит от парадигмы моделирования, которая закладывается в CAD-систему. Особенности представления данных связываются с определённым форматом модели, который обычно уникален для каждой CAD-системы и в большинстве случаев является закрытым для редактирования или анализа. Таким образом, передача модели от системы к системе является нетривиальной задачей, сопряжённой с множеством сложностей. Использование единой структуры трёхмерной модели упрощает не только получение данных, но и работу с моделью изделия на всех этапах ЖЦИ.

Современных стандартов описания трёхмерных моделей имеется достаточно много. При этом в популярных конверторах, которые преобразуют данные между различными видами

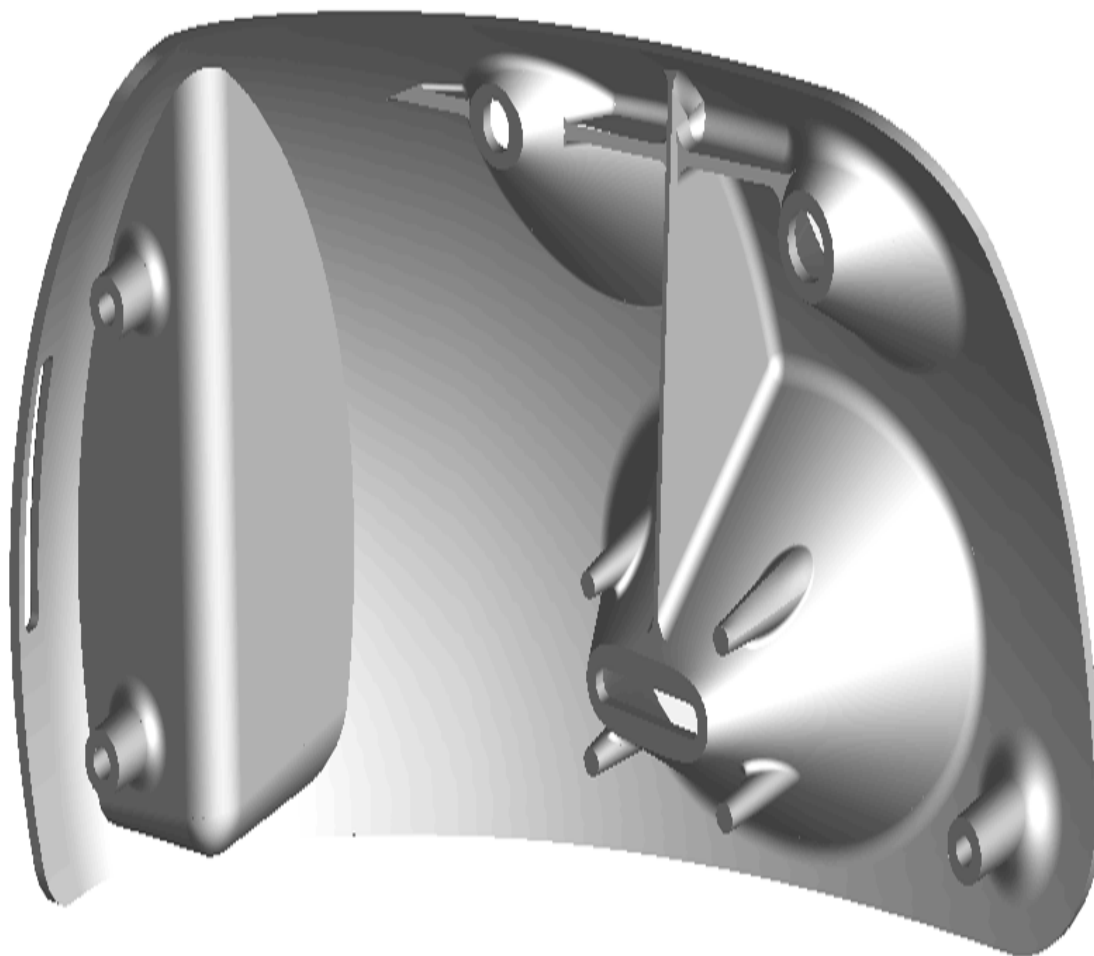


Рис. 1.4. Модель отражателя фары автомобиля, построенная с помощью операций гибридного моделирования

моделей, насчитывается более 100 типов форматов, хотя они и не отражают специализированные варианты, применяемые внутри различных систем трёхмерного моделирования.

Рассмотрение даже такого количества моделей, ограниченного в соответствии с частотой использования, нецелесообразно. Поэтому выделим несколько форматов, которые являются наглядными представителями своих классов и позволяют отразить все особенности трёхмерного моделирования. К ним отнесём следующие форматы: 3ds, stl, ascii, max, sat/sab, step,

## 1. ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА

---

iges. Отдельно выделяются форматы САD-систем, связанные с особенностями определённого ядра такие, как SATPart и 3dxml в CATIA, prt в Creo [1].

Все эти стандарты можно разделить на несколько типов и подтипов. Учитывая контекст их использования, деление будем проводить с точки зрения закладываемых в тот или иной формат возможностей для использования в технологической подготовке производства. Так, 3ds является одним из широко распространённых форматов, но его использование в сфере САD/САМ/САЕ крайне ограничено из-за специализации данного формата, связанной с трёхмерной анимацией.

Аналогичная ситуация с другими подобными форматами трёхмерной графики, такими как max. Ко второму типу отнесём такие форматы как STL, ASCII и т.п. Эти форматы могут использоваться как в компьютерной графике, так и для производственных задач.

Простота внутренней структуры и ограничения, накладываемые на содержание данных форматов, привели к широкому распространению их в качестве трансляторов для использования при решении определённого класса задач, таких как трёхмерное сканирование изделий или изготовление на установках быстрого прототипирования. Использование этих форматов в других сферах производства проблематично, так как их структура состоит из наборов координат, которые не могут быть представлены в виде примитивов без дополнительной трудоёмкой компьютерной обработки.

Совокупность различных форматов данных, используемых в САD-системах, можно разбить на два подтипа. Первый подтип — внутренние стандарты, которые открываются либо только определённой системой моделирования, либо несколькими системами, работающими на едином графическом ядре.

## 1.1. КОММУНИКАЦИОННАЯ РОЛЬ ТРЁХМЕРНОЙ ...

---

Некоторые из этих форматов могут восприниматься и сторонними программами-конвертерами,<sup>1</sup> но качество такой обработки обычно оставляет желать лучшего. Конвертирование внутри одного формата, но для разных версий САД-системы, вызывает нарушения структуры модели и ошибки в отображении.

Второй подтип — трёхмерные модели, которые формируются одной из систем, но становятся доступными для отображения в различных программах-просмотрщиках (англ. *viewers*), которые обычно распространяются бесплатно. Такие программы могут отображать различную информацию (зачастую специализированную), но при этом внесение изменений или извлечение данных становится либо невозможным, либо крайне проблематичным. К таким стандартам можно отнести, например, стандарт 3DXML, активно продвигаемый компанией Dassault Systèmes, но обладающий перечисленными выше ограничениями.

Третьим типом являются форматы-интерфейсы. Эти форматы специально разработаны для передачи данных от системы к системе, и в случае постоянной поддержки и обновлений позволяют на высоком уровне представлять информацию о модели с включением разных типов данных.

Наиболее распространены форматы SAT/SAB (ACIS-ядро), STEP и IGES. При этом формат SAT/SAB применяется в специализированных задачах и передаёт в основном трёхмерную геометрию с упором на обработку примитивов, что часто используется в таких системах контроля как координатно-измерительные машины (например, CarlZeiss DuraMax).

С другой стороны, IGES и STEP являются форматами-контейнерами с широкими возможностями внутреннего наполнения. Сама трёхмерная модель в таком случае может состоять либо из примитивов, либо иметь представление в виде точек (аналогично ASCII или STL). Формат IGES длительное время

---

<sup>1</sup>от англ. *converter* — преобразователь; устройство передачи данных с необходимым преобразованием; в программных средах используется для трансляции из одного формата в другой формат-аналог.

## 1. ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА

---

использовался для передачи данных (в первую очередь чертёжных) между системами [2]. При этом зачастую передаваемая информация отображалась в целевой системе некорректно. Также имелись существенные ошибки в отображении трёхмерных моделей изделий.

Учитывая такие особенности, был начат проект STEP, предназначенный для замены формата IGES. После первого релиза STEP в 1994 г., интерес к дальнейшей разработке IGES угас, и версия 5.3 (1996) была последним выпущенным стандартом. Формат IGES обошли стороной многие тенденции развития трёхмерной графики, но он все-таки часто используется для передачи геометрии со структурой низкой сложности.

### 1.2 Использование трехмерных моделей на различных этапах жизненного цикла изделия

**Проектирование.** Этот этап обычно разделяют на концептуальное (предварительное) проектирование и рабочее (более детализированное) проектирование. На этапе концептуального проектирования формируются и уточняются технические требования к изделию, осуществляется поиск и выбор принципиальных решений, обеспечивающих требуемую функциональность. Трёхмерные модели могут использоваться для представления концептуальных решений (например, принципа функционирования механического устройства), их анализа и последующего отбора.

На этапе рабочего проектирования концептуальные решения, выбранные ранее конкретизируются: определяется состав узлов и деталей, точные геометрические размеры изделия, используемые материалы. В результате рабочего проектирования формируется конструкторская документация. При этом 3D модели служат основной формой представления геометрической

## 1.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ...

---

информации об изделии, позволяют проводить компьютерные инженерные расчёты, анализировать собираемость деталей и узлов, производить прототипы (функциональные, тестовые, рабочие), получать чертёжно-конструкторскую документацию.

**Подготовка производства.** На этапе подготовки производства, который является одним из самых длительных и сложных, выделим подэтап технологическая подготовка производства (сокр. *ТПП*). До появления средств трёхмерного компьютерного моделирования исходной информацией для этапа ТПП служила чертёжно-конструкторская документация.

В настоящее время трёхмерные модели рассматриваются не только как составная часть конструкторской документации на изделие, но и как полная замена описания изделий в виде чертежей. При этом часть задач ТПП уже не может быть в принципе решена без трёхмерной модели. К таковым можно отнести задачи многокоординатной обработки, требующие сложных математических вычислений, которые не возможно провести вручную, либо задачи применения аддитивных технологий, базирующейся только на использовании трёхмерной модели.

**Производство.** На этапе производства трёхмерные модели используются для анализа и оптимизации производственных процессов. Например, в роботизированной линии по сборке сложного изделия трёхмерные модели технологического оборудования совместно со специализированным программным обеспечением для виртуального моделирования производственных процессов позволяют не только контролировать столкновения, но и обеспечивать синхронизацию действий отдельных роботов и людей по времени.

## 1. ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА

---

**Реализация, эксплуатация, ремонт и утилизация.** Этапы реализации, эксплуатации, ремонта и утилизации современных изделий невозможен без информационной поддержки (в коммерческих предложениях, для рекламных целей или в качестве элементов и составных частей документации по эксплуатации и ремонту).

Например, слайды, анимационные фильмы и другие подобные данные, могут выгодно представить созданное изделие и пояснить принципы его работы. Такая поддержка организуется на базе трёхмерных моделей. В целом количество способов применения трёхмерных моделей для решения задач информационной поддержки этапов ЖЦИ достаточно обширно.

---

---

## 2

---

# ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОТОТИПЫ

### 2.1 Трёхмерное сканирование

Задачи модификации технологического процесса на основании анализа изготовленного изделия, изучения собираемости деталей, высокоточного контроля непосредственно на рабочем месте или проведения виртуальных испытаний на основе трёхмерных моделей выявили необходимость создания нового класса оборудования, получившего название «трёхмерный сканер» [3].

В данный класс оборудования входят различные устройства, метод работы которых зачастую коренным образом отличается друг от друга, но все они позволяют формировать трёхмерную модель на основе физического объекта. Методов контроля изделия или формирования трёхмерной модели существует много, в том числе электромагнитные и ультразвуковые измерения, томография поверхности, но наиболее часто используемые можно разделить на три группы:



## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОТОТИПЫ

---

- точечная триангуляция;
- линейная триангуляция;
- интерференционное проецирование.

**Точечная триангуляция.** При использовании точечной триангуляции с помощью щупа в один момент времени получают координаты одной точки. Схема действия представлена на рис. 2.1.

Для получения всей модели изделия производится обход по характерным точкам. Если объект измерения представляет собой сложную модель, тогда количество измерений приходится увеличивать пропорционально сложности. Поверхность между ближайшими измеренными точками выстраивается по математическим алгоритмам, тем самым вносится погрешность в построение модели.

На рис. 2.2 представлена схема возникновения погрешности. Для уменьшения ошибки по хорде приходится вводить промежуточные измерения, тем самым, увеличивая в несколько раз время сканирования. Если визуально сложно определить специфические особенности модели, и в техническом задании

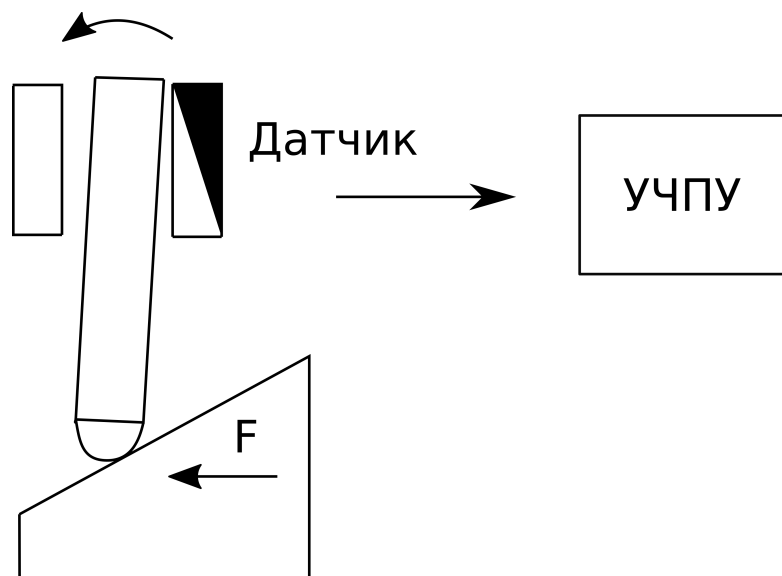


Рис. 2.1. Схема действия систем сканирования, основанных на методе точечной триангуляции

## 2.1. ТРЁХМЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ

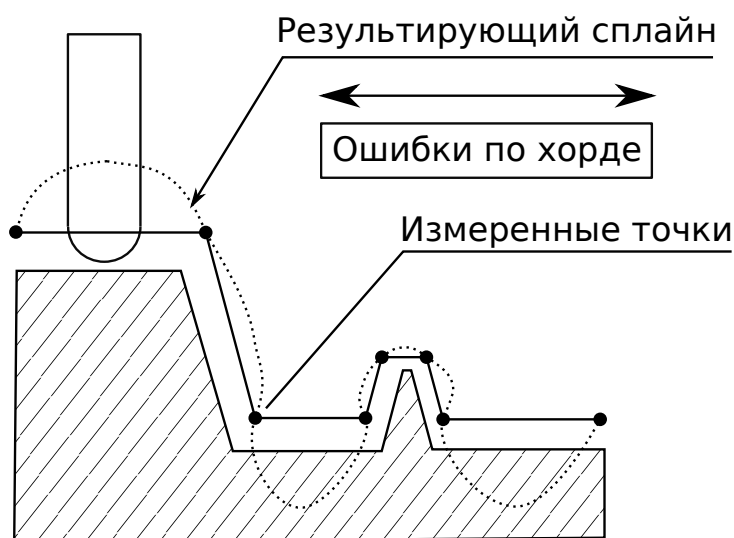


Рис. 2.2. Схема действия систем сканирования, основанных на методе точечной триангуляции

на сканирование эти особенности не указываются, тогда они не будут отражены в компьютерной модели.

На рис. 2.3 приведена увеличенная фотография модели, полученной методом точечной триангуляции. Метод точечной триангуляции обеспечивает высокую точность передачи конкретных параметров модели. Такая точность реализуется благодаря фиксированному положению объекта на протяжении всего процесса измерения.

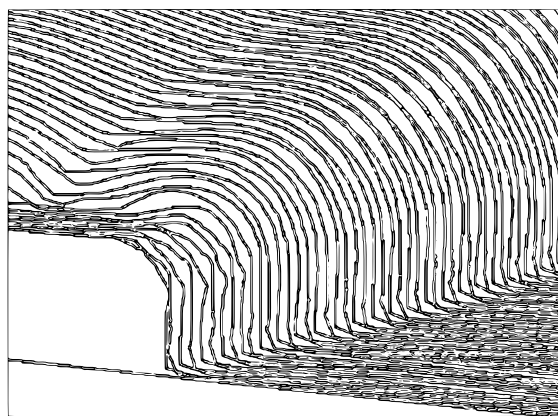


Рис. 2.3. Фотография погрешностей поверхности, возникших из-за ошибок по хорде

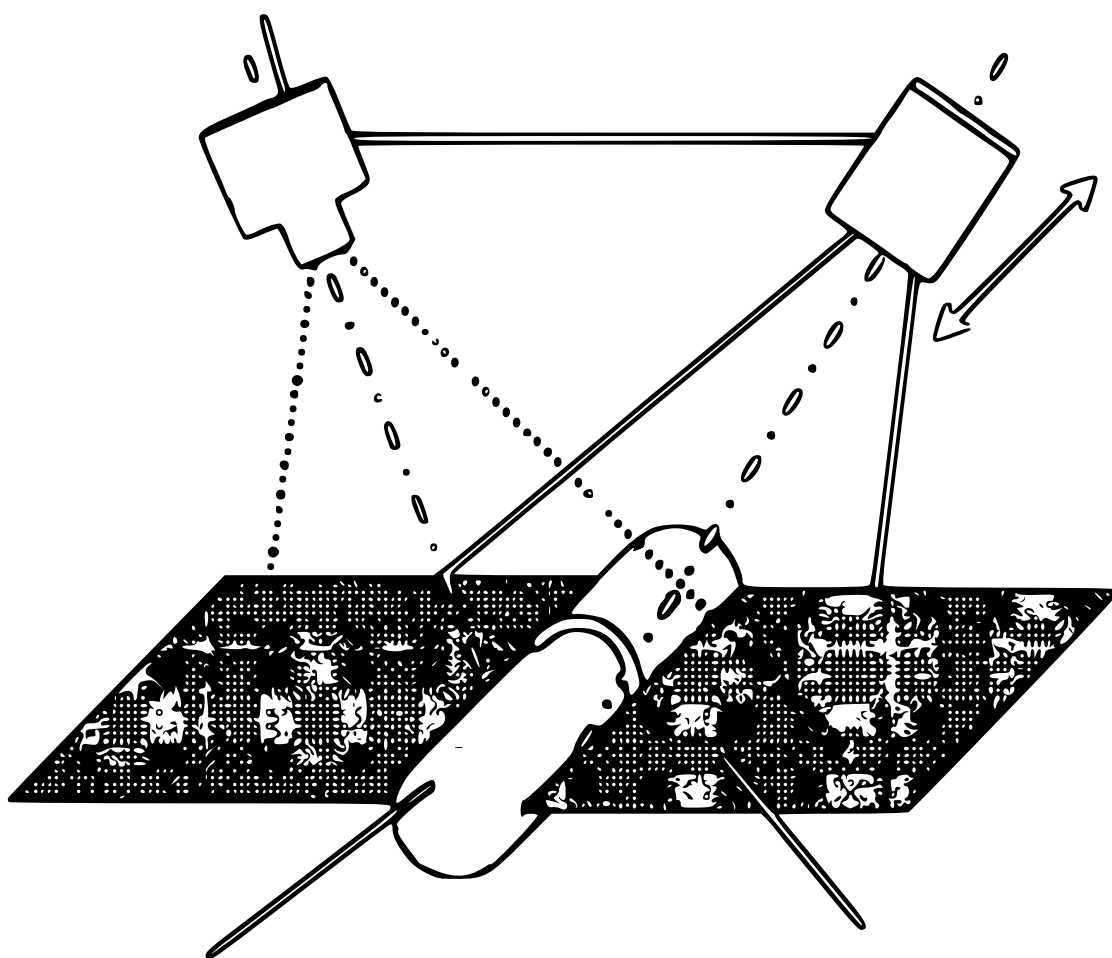


Рис. 2.4. Схематическое изображение метода линейной триангуляции

**Линейная триангуляция.** При линейной триангуляции с помощью луча лазера или источника света проецируется полоса, которая считывается цифровой камерой. Схема действия систем, основанных на данном методе, приведена на рис. 2.4.

Последовательно проецируя полосу на все поверхности, объект охватывается полностью. Считанные полосы преобразуются в координаты составляющих их точек. На рис. 2.5 изображена схема получения координат точек поверхности.

В связи с особенностями проецирования полосы, возникают ограничения по возможности сканирования объектов. На рис. 2.6 изображена зона на поверхности изделия, недоступная для лазерных сканеров.

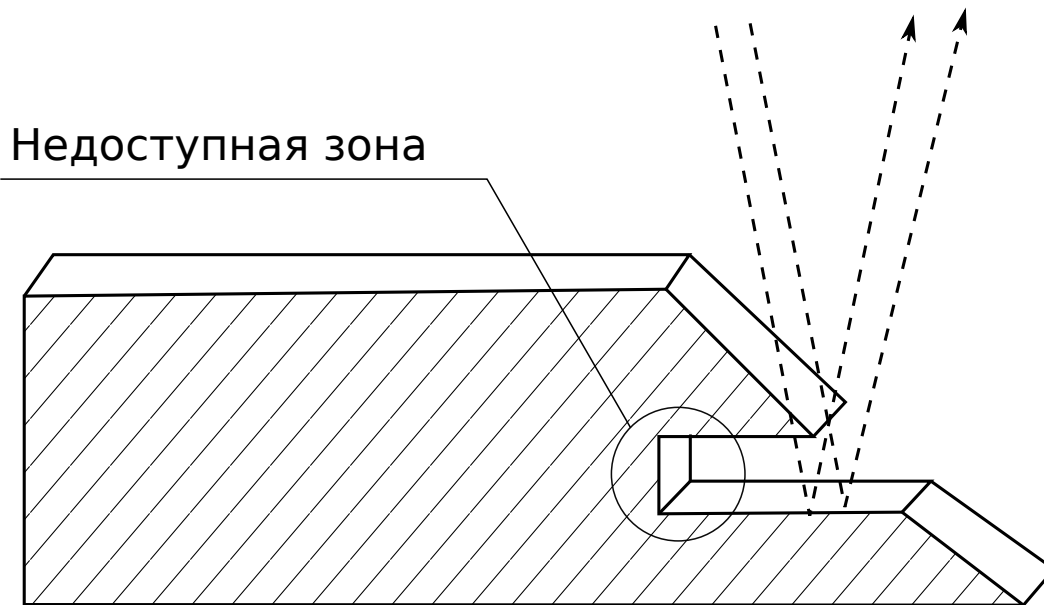


Рис. 2.5. Схема, демонстрирующая причину появления недоступной зоны для систем, основанных на методе линейной триангуляции

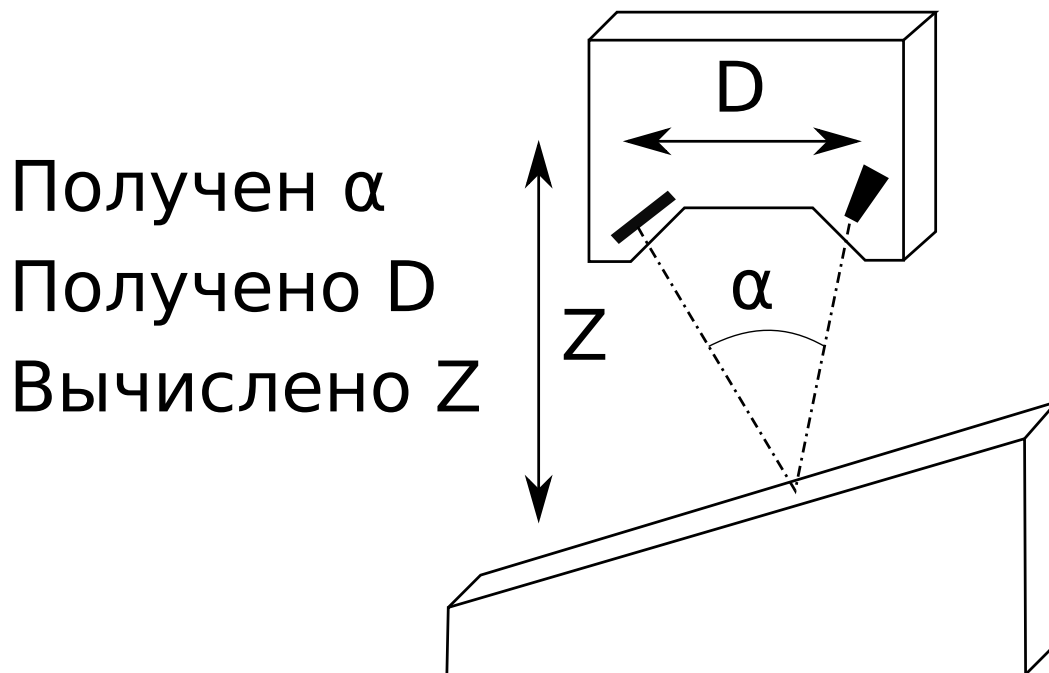


Рис. 2.6. Схема получения координат точек на поверхности объекта

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОТОТИПЫ

---

**Интерференционное проецирование** Интерференционные трёхмерные сканеры основаны на проецировании белого света поверх считываемого цифровыми камерами участка поверхности. Схема работы систем, основанных на данном методе, приведена на рис. 2.7. Цифровой камерой считывается положение точек объекта сразу со всей измерительной площади, за счёт проецирования множества линий на участок поверхности. На рис. 2.8 изображена деталь, на которую спроецированы интерференционные линии.

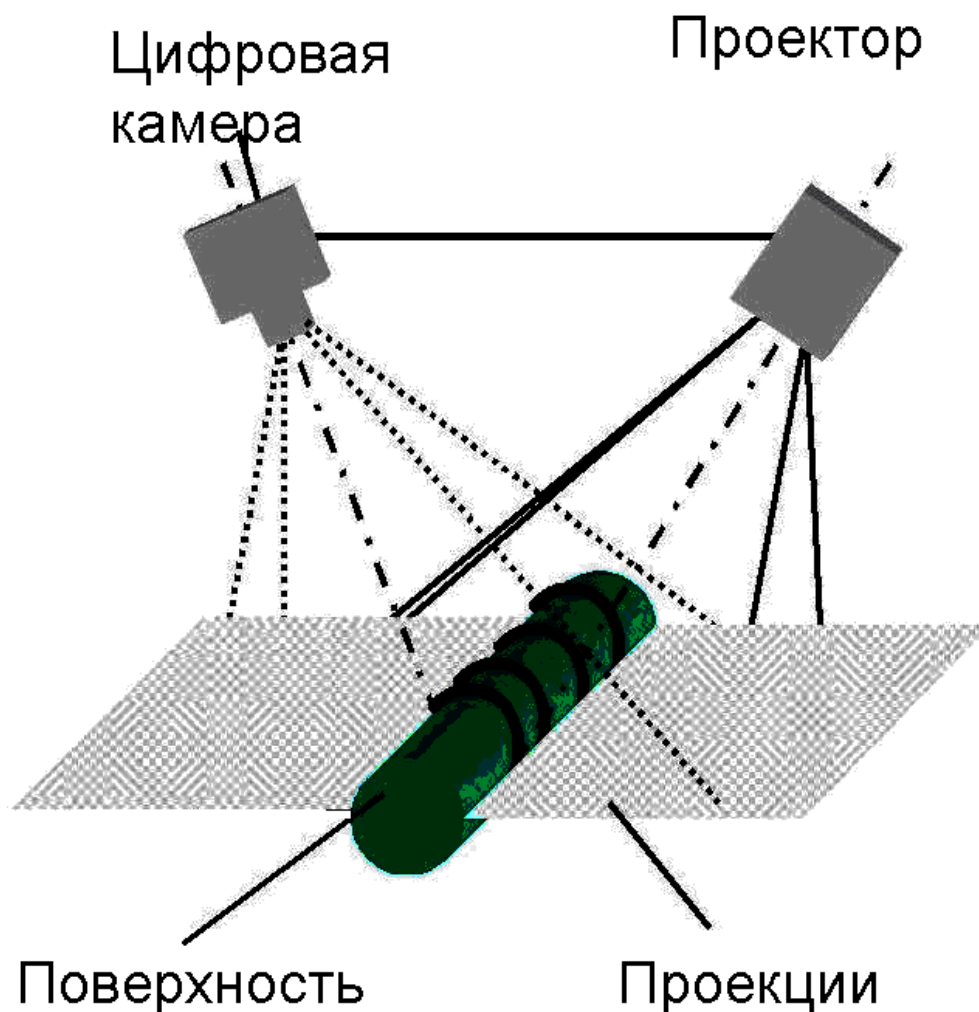


Рис. 2.7. Схематическое изображение метода интерференционного проецирования

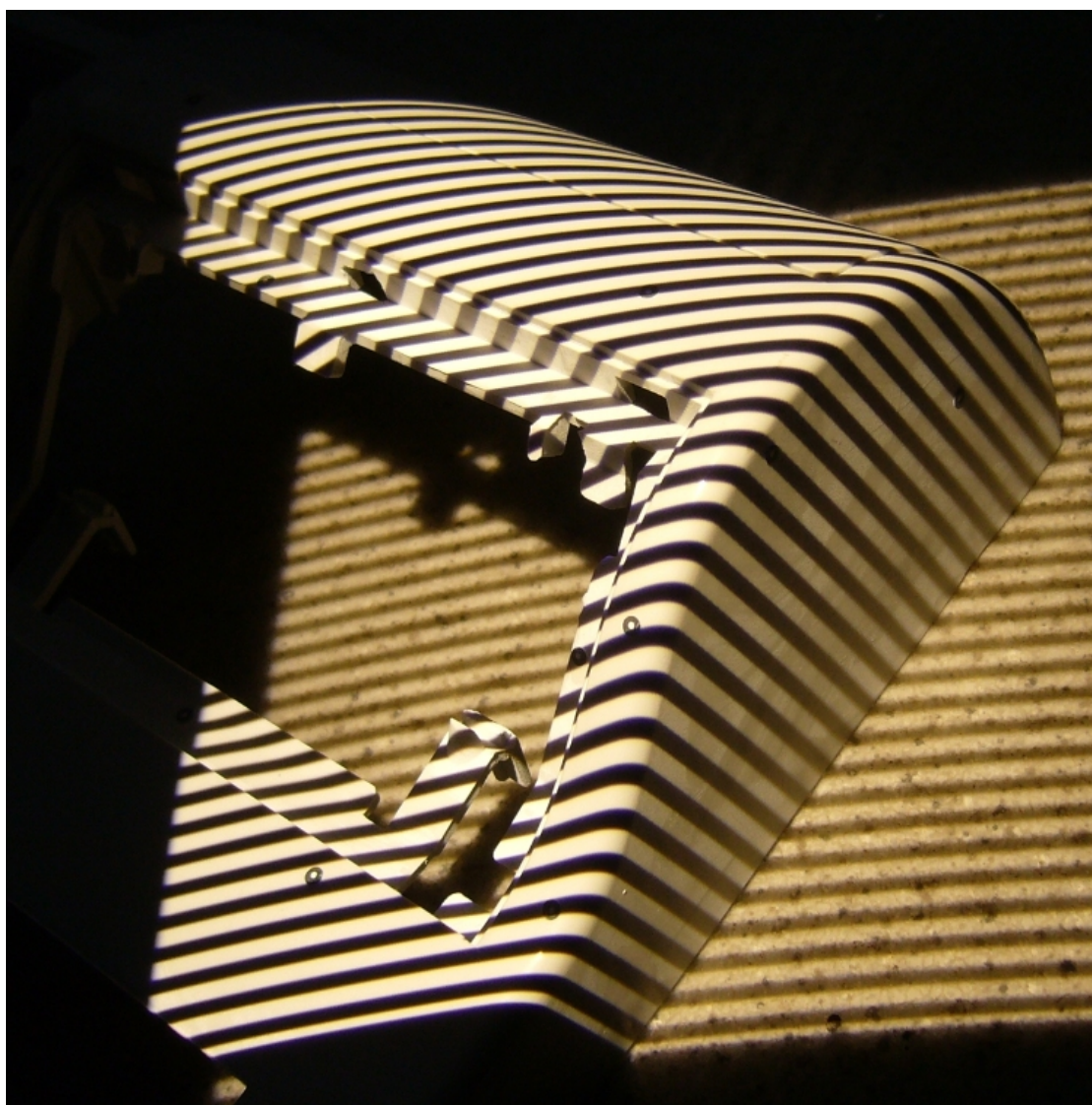


Рис. 2.8. Проецирование множества интерференционных полос на поверхность изделия

Система сканирования производит автоматический сдвиг линии и получает координаты точек со всего участка поверхности изделия. Для получения полной модели изделие сканируется с разных сторон.

За одно измерение проецируется несколько интерференционных картин, покрывающих всю исследуемую область. Используя снимки с камер и учитывая постоянство угла между камерами, программным обеспечением системы определяются координаты точек на поверхности объекта [4].

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОТОТИПЫ

На рис. 2.9 изображен метод получения координат точек с поверхности и метод проецирования интерференционных полос.

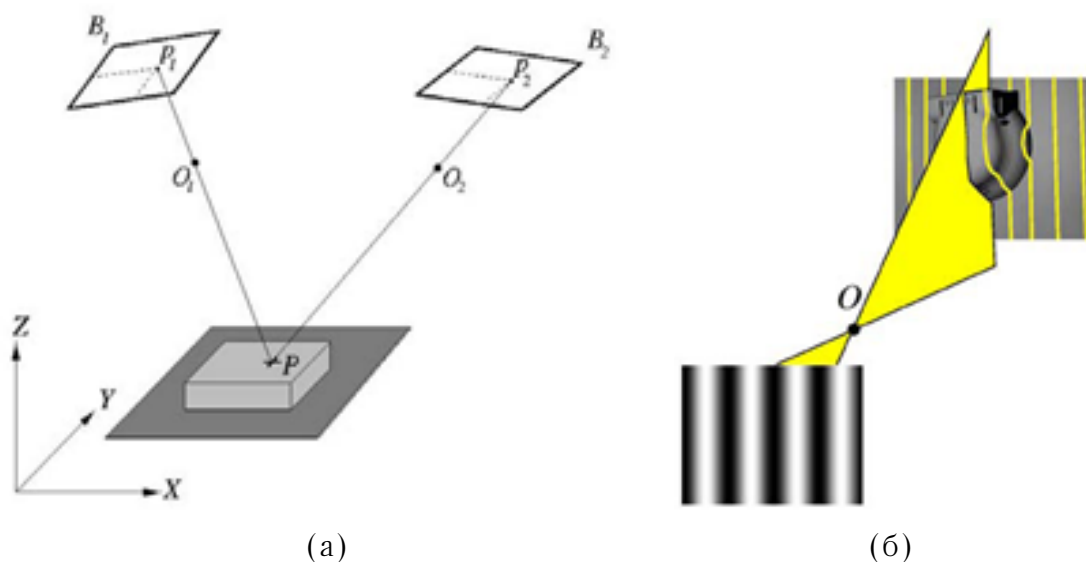


Рис. 2.9. Метод получения координат точек с поверхности (а) и проецирования интерференционных полос (б)

Метод точечной триангуляции предоставляет повышенную точность сканирования по сравнению с другими за счёт определения положения точек поверхности контактным способом. Для достижения высокой точности измерений требуется, чтобы система сканирования находилась в строго фиксированном положении, поэтому установки, основанные на методе точечной триангуляции, являются не мобильными или ограниченно мобильными.

Метод линейной триангуляции уступает по точности всем представленным методам сканирования. Большинство систем, основанных на данном методе, являются мобильными. Скорость работы при линейной триангуляции намного больше, чем у точечной триангуляции, но ниже чем у интерференционного проецирования.

Метод интерференционного проецирования уступает по точности методу точечной триангуляции. Скорость оцифровки выше, чем у других методов. Точность передачи сложной геометрии сравнима с точностью у метода линейной триангуляции.

## 2.1. ТРЁХМЕРНОЕ СКАНИРОВАНИЕ

---

На методе интерференционного проецирования основан ряд мобильных систем (рис. 2.10). Таким образом, в зависимости от требований имеется возможность выбрать метод, позволяющий получить оптимальные характеристики для конкретной задачи.



Рис. 2.10. Мобильный трёхмерный сканнер ATOS



### 2.2 Построение моделей изделий на основе трёхмерного сканирования (реверс-инжиниринг)

Реверс-инжиниринг<sup>1</sup> — изучение технологических принципов приборов, изделий или систем путем анализа его структуры, функций и выполняемых действий. Реверс-инжиниринг применяется во многих областях и является одним из ключевых способов анализа, позволяющего создавать изделия, устройства и системы без наличия документации, но с доступом к объекту исследования. Для производства изделий такая задача особенно актуальна в связи с переходом от бумажных технологий к цифровым данным, что в свою очередь приводит к отсутствию большого количества данных требуемых для производства в цифровой форме.

Ряд производственных задач (например, быстрое прототипирование или работа с некоторыми САМ-системами) не требует твердотельной геометрии, а позволяет оперировать напрямую с трёхмерным сканом (облаком точек) изделия, но число таких задач значительно меньше по сравнению с теми, которые требуют твердотельных или поверхностных моделей. Реверс-инжиниринг геометрии изделий подразумевает построение твердотельных моделей на основе трёхмерного скана изделия.

В связи с тем, что большинство систем трёхмерного моделирования не поддерживают формирования твердотельной модели на основе триангулярной поверхности, то возникла потребность создания специализированных средств для преобразования сканированных данных в поверхности, с которыми могут работать САД-системы.

В таких известных системах моделирования как Cimatron и CATIA были созданы специальные модули для работы со

---

<sup>1</sup>англ. *reverse engineering* — обратный инжиниринг.

сканированными поверхностями. Также имеются специализированные системы для осуществления реверс-инжиниринга трёхмерной геометрии. При этом в зависимости от сложности изделия могут применяться три подхода к реверс-инжинирингу:

- а) Использование трёхмерного скана как каркаса для поэтапного выстраивания геометрии.
- б) Трёхмерное моделирование на основе набора примитивов.
- в) Построения твердотельной геометрии из отдельных «патчей»,<sup>2</sup> покрывающих трёхмерный скан.

Первый подход обычно не требует дополнительных модулей, что позволяет ограничиться функционалом САД-систем. Применяется для изделий высокой точности с элементами криволинейной формы. В данном подходе трёхмерный скан используется в качестве основы для создания ориентиров (точки, линии, плоскости), построения базовой системы координат и измерения размеров. Затем трёхмерный скан используется только для сравнения с построенной моделью и визуального контроля. Характерным примером использования такого подхода является турбинная лопатка (рис. 2.11 а), которая строится на основе набора сечений (рис. 2.11 б).

Второй подход применяется для большинства изделий и в зависимости от сложности изделия может быть использован для построения полной модели или только набора ключевых элементов, которые позже объединяются с поверхностями свободной формы.

Примитивы могут быть созданы как в специализированном программном обеспечении для реверс-инжиниринга, что позволит провести эту процедуру в максимально автоматизированном режиме, так и могут быть измерены в программном обеспечении, которое взаимодействует с трёхмерным сканером с последующим построением в САД-системе. Последний

---

<sup>2</sup>от англ. *patches* — заплаты.

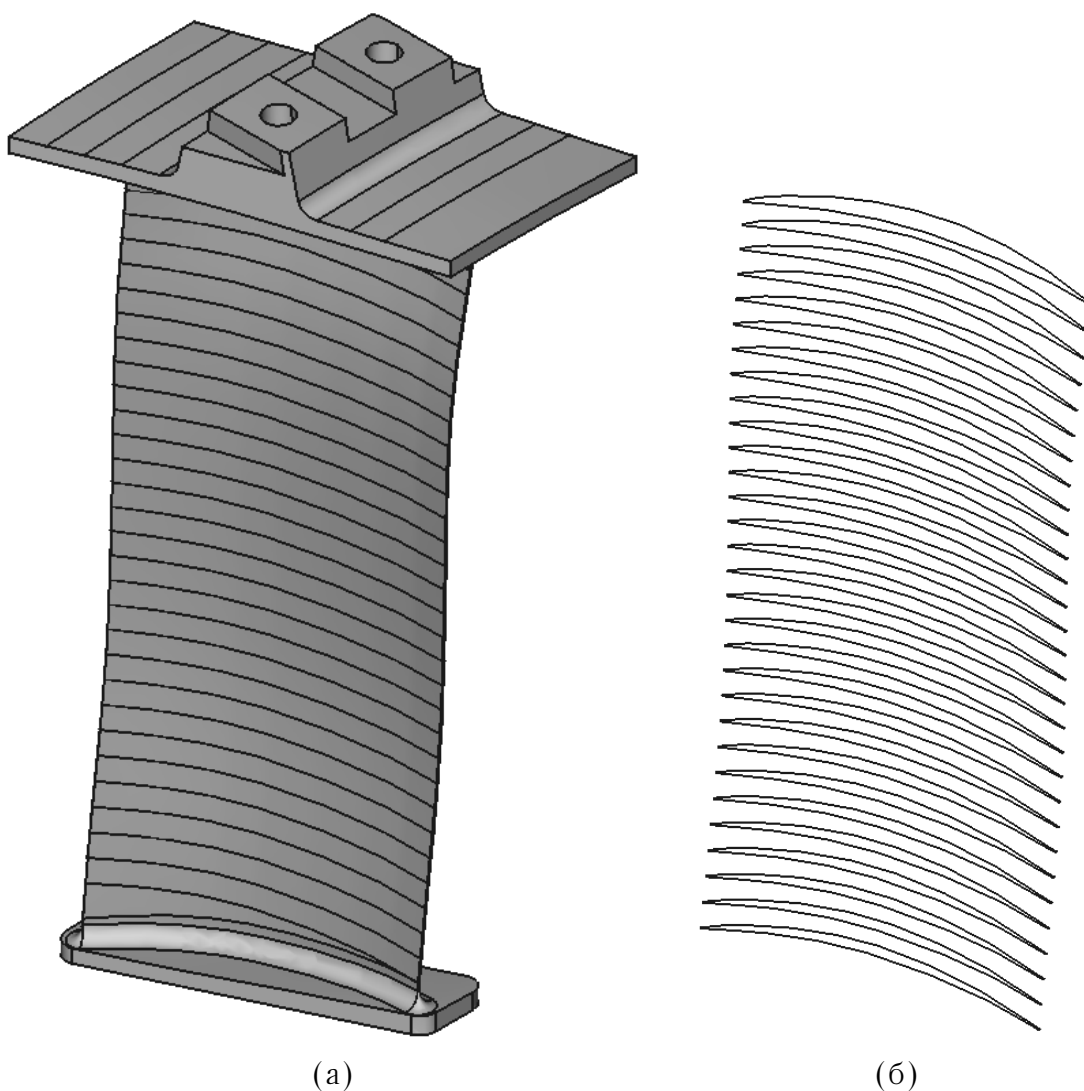


Рис. 2.11. Турбинная лопатка (а), построенная на основе набора сечений (б)

вариант наиболее универсален и не требует дополнительных капиталовложений (рис. 2.12).

Примитивы могут быть переданы в CAD систему через стандартные интерфейсы (например, IGES), либо измерены для последующего построения. После импорта в CAD-систему выполняется поэтапное восстановление трехмерной модели и её улучшение (рис. 2.13).

## 2.2. РЕВЕРС-ИНЖИНИРИНГ

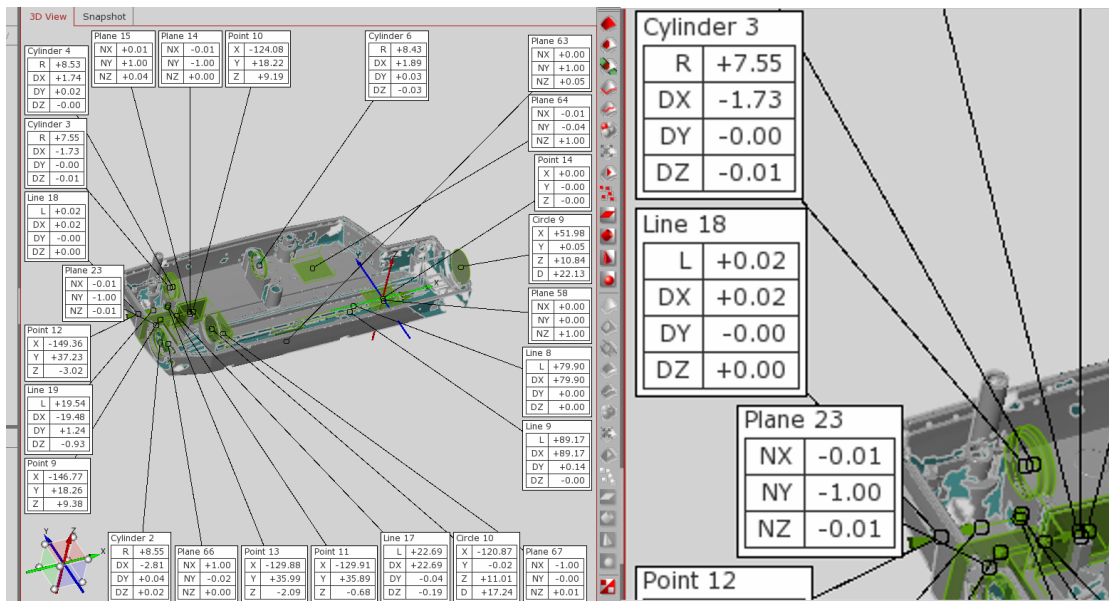


Рис. 2.12. Корпус с выделенными на нём примитивами

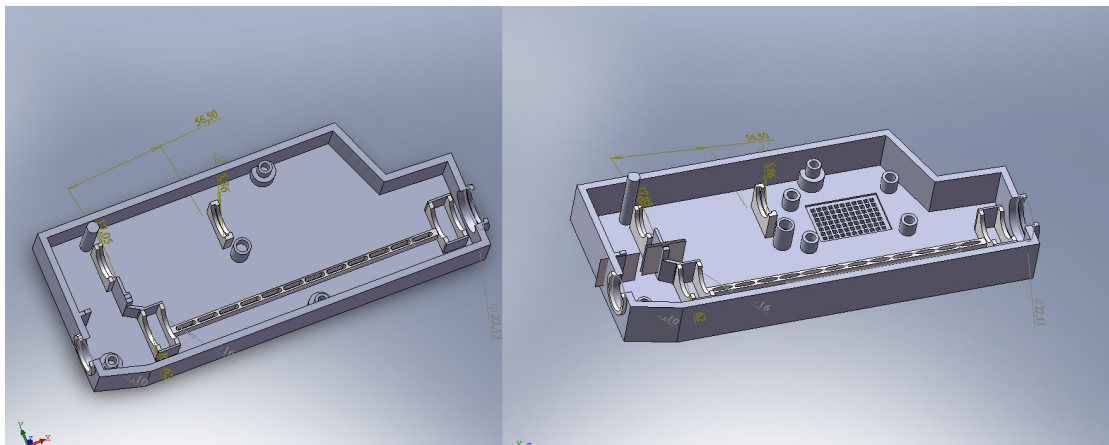


Рис. 2.13. Поэтапное восстановление трёхмерной модели

Третий подход применяется для построения моделей свободной формы. При этом точность получаемой модели получается ниже, чем для представленных выше подходов, но и скорость построения значительно выше, а в некоторых случаях и процесс построения может быть полностью автоматизирован.

Основная проблема при таком преобразовании в том, что триангулированная модель состоит из треугольников, не лежащих в одной плоскости, поэтому для формирования единой поверхности требуется «сшить» между собой все части.

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОТОТИПЫ

---

Так как количество полигонов характеризует детализацию модели, то для получения точной поверхности требуется объединить десятки, сотни тысяч или, в некоторых случаях, миллионы треугольников. Поверхность, состоящая из такого количества частей, будет обрабатываться большое количество времени даже на высокопроизводительных компьютерах, что потребует оптимизировать данный процесс.

В связи с необходимостью создания поверхностей, в которых сотни тысяч треугольников заменяются десятками частей, системой Geomagic Wrap или её аналогами используется специальный алгоритм преобразования, который позволяет при формировании поверхности из нескольких частей сохранить высокую точность [5]. Такой механизм положен в основу инструментария, который может быть настроен и использован как в ручном, так и в автоматизированном режиме.

В случае выбора ручного метода построения поверхности, вначале требуется создать контуры модели, на основе которых будет строиться сетка. Контуров требуются для создания границ, которые разделяют области с различной кривизной. На рис. 2.14 представлена модель с определенными границами. Если границ, полученных при автоматическом определении недостаточно, то дополнительные границы можно добавить вручную. Для этого используется инструмент «кисть».

На основе созданных границ формируются патчи. Размеры ячейки сетки задают участки, в рамках которых будет формироваться отдельная часть поверхности. Их количество задаётся в зависимости от необходимой точности (рис. 2.15).

На основе патчей создается сетка, представляющая собой небольшие ячейки, между которыми происходит сглаживание для формирования объединенной поверхности.

Далее система по сформированной сетке «натягивает» САД-поверхность, которая впоследствии может быть экспортирована в STEP или IGES-формате. При автоматическом построении

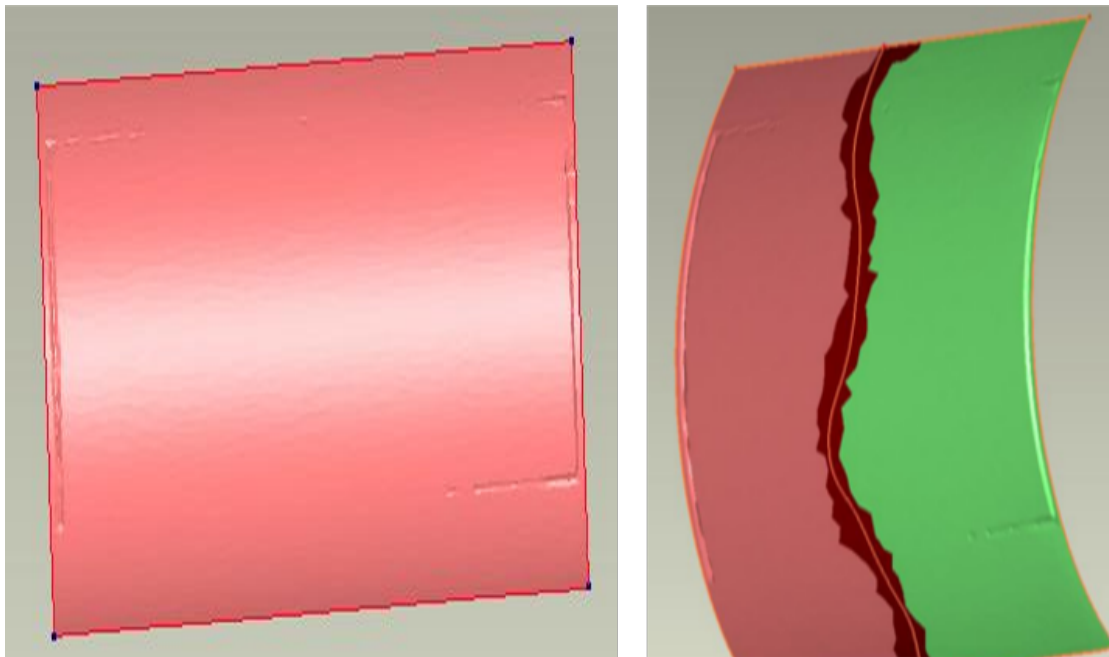


Рис. 2.14. Внешний вид модели с выделенными границами и пример создания новой границы

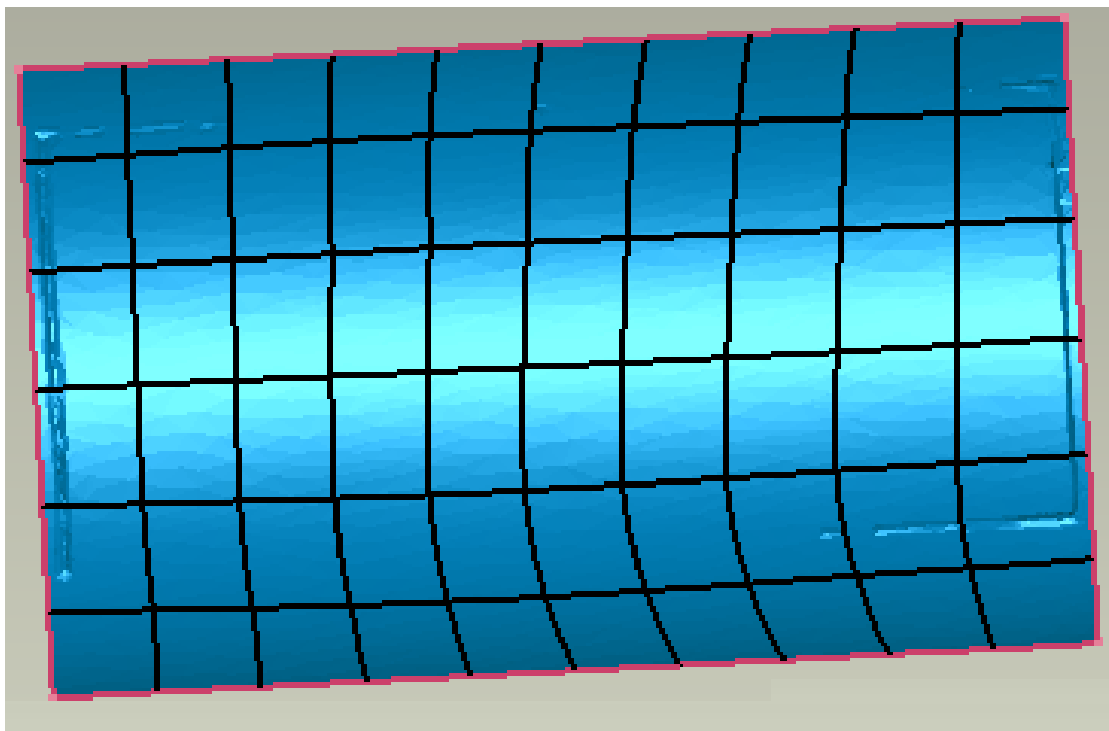


Рис. 2.15. Построенные на основе отсканированной модели патчи

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОТОТИПЫ

---

моделей применяются различные принципы в зависимости от используемых систем. Так, система Geomagic Wrap при построении в автоматическом режиме проходит те же этапы, что и в ручном, но со сниженной точностью, что позволяет получить корректную поверхность достаточно быстро. САД-система с открытым исходным кодом FreeCAD использует схожий принцип «натягивания» поверхности, но в качестве основы используются отдельные треугольники.

---

---

# 3

---

## КООРДИНАТНО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Обеспечение высокого качества выпускаемой продукции является основой её конкурентоспособности. Показатели качества изделий тесно связаны с точностью обработки [6]. Полученные при обработке размер, форма и расположение элементарных поверхностей определяют технические параметры продукции, влияющие на её качество, надёжность и экономические показатели производства и эксплуатации [7].

Одним из универсальных средств контроля изделий является координатно-измерительная машина (сокр. *КИМ*). На КИМ возможен контроль геометрии отдельных элементов, проверка их взаимного расположения, контроль точности изготовления заданной формы поверхности и т.д. При этом контролироваться могут как простые изделия, так и изделия со сложной пространственной геометрией.



### 3. КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

---

Измерительные машины любого типа (портальные, многоосевые, измерительные руки, оптические) являются сложными устройствами, требующими как навыков обращения с ними, так и корректно выстроенного алгоритма использования, зафиксированного в виде стандартов и регламентов [8]. В КИМ портального типа (рис. 3.1) используется координатный метод измерения, сводящийся к последовательному нахождению координат ряда точек изделия и последующему расчёту размеров с учётом отклонений размера, формы и расположения в соответствующих системах координат [9].



Рис. 3.1. КИМ фирмы DEA и измерительная головка

Традиционные порталные КИМ обычно применяются в тех случаях, когда точность измерения является наиболее критичным параметром. Самая высокая точность порталной КИМ возможна лишь в условиях регулируемой температуры и влажности [10]. При любых отклонениях точность будет нарушаться.

Современные КИМ используют специализированное программное обеспечение как для контроля, так и для обработки результатов. Часть программных систем позволяет даже проводить контроль поверхностей свободной формы и их сравнение

---

с САD-моделями. В процессе работы на экран монитора выводится САD-модель, положение щупа в реальный момент времени, расположение измеряемых точек и величина их отклонения. Это упрощает и ускоряет процесс контроля.

С помощью КИМ можно не только контролировать детали поточечным ощупыванием, но и с использованием сканирующего ощупывания. Возможность сканирования помогает решать некоторые проблемы при измерении, например, определение формы или положения. Чтобы измерить форму детали необходимо задать большое количество расположенных на ней точек. Без сканирования этот процесс занимает достаточно много времени, при этом плотность точек достаточно низкая, а используя сканирование можно измерить огромное количество точек на любой указанной траектории, что помогает достаточно точно определить форму детали (рис. 3.2).

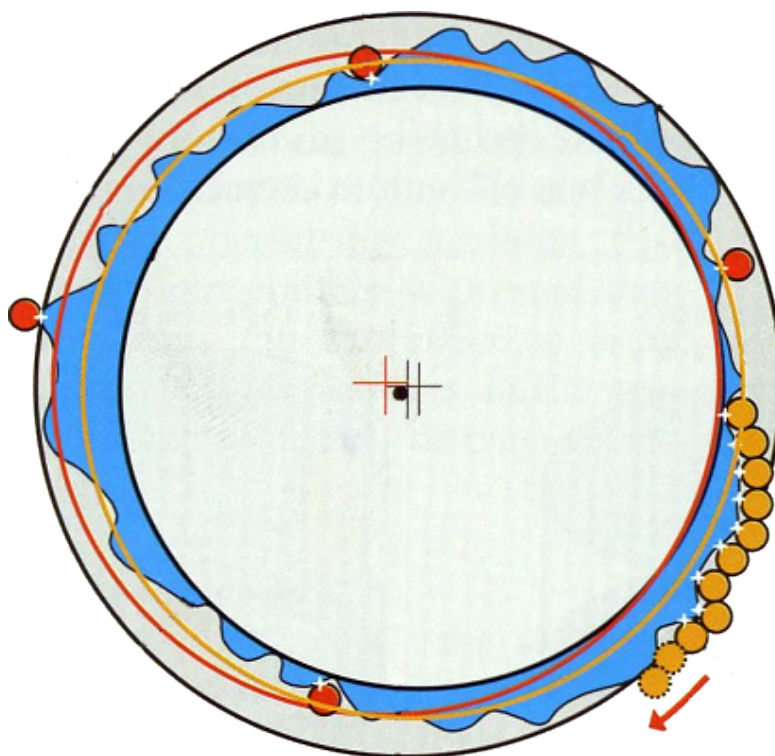


Рис. 3.2. Диаграммы, отражающие отличия методов точечного и сканирующего контроля на реальной детали

### 3. КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

---

Перед началом каких-либо действий оператор КИМ получает задание на проведение требуемых работ. В задании обычно присутствует наименование детали, её описание, предыдущие данные её контроля (если таковой проводился) и контролируемые параметры. Дополнительно к заданию должны прилагаться трёхмерная модель детали, и чертежи (либо только САД-модель с трёхмерными аннотациями), где указаны все контролируемые параметры и их допуска [11].

Для начала работы необходимо определить состав видов конструкторско-технологических элементов (сокр. *КТЭ*), которые включает в себя контролируемая деталь. Как правило, даже в самой простой детали может содержаться множество КТЭ, и правильное их определение будет влиять на всю дальнейшую работу оператора.

При этом у отдельного элемента детали могут контролироваться различные параметры, которые измеряются отличным друг от друга способом. Такие элементы разделяются на несколько отдельных КТЭ [12]. Например, измерение диаметра отверстия и его же соосности относительно какой-либо базы. Эти характеристики не могут быть внесены в один КТЭ, так как принципы их измерения отличаются сразу по нескольким параметрам:

- для измерения диаметра отверстия требуется всего 4–8 точек, а при измерении отклонения от соосности для более корректного измерения требуется ощупать уже 16 или более точек;
- при измерении диаметра используется всего один элемент детали, так как диаметр не зависит от каких-либо других элементов или их расположения, а для измерения соосности КТЭ должен включать в себя два элемента: сам измеряемый элемент и базовый элемент или ось, относительно которой рассматривается измеряемый параметр.

Программы измерения должны учитывать такую многовариантность, то есть иметь несколько сценариев (условий проверки).

### 3.1 Выбор методики обмера элементов детали

Для обмера изделий с использованием координатно-измерительных машин используется специализированный термин «ощупывание», определяющий касание поверхности для получения точек и проведения последующих измерений.

Существует несколько основных правил по методике ощупывания элементов детали на КИМ. Большинство поверхностей детали можно разбить на простейшие геометрические элементы: конус, цилиндр, плоскость и сфера. Каждый из этих элементов имеет свою методику ощупывания. Конус и цилиндр ощупывается как две окружности в верхней и нижней части элемента. Особенность работы с цилиндром заключается в том, что при его очень малой высоте для контроля диаметра используется только одна окружность, то есть цилиндр становится вырожденным. При тех же условиях измерение конуса оказывается невозможно.

**Обмер цилиндра.** Для измерения цилиндра сначала нужно выделить контролируемые параметры. Они влияют на количество точек, которыми будет определен элемент. Далее нужно оценить высоту цилиндра, если она меньше или равна 5 мм, то считается, что на таком цилиндре невозможно ощупать две окружности (рис. 3.3).

Ключевые причины: не существует настолько малого диаметра шарика щупа, а также человек не сможет подвести щуп точно к предполагаемым измеряемым точкам, не используя дополнительное увеличительное оборудование.

Ещё одним фактором, влияющим на выбор методики обмера, является отношение величины диаметра к высоте цилиндра: при большом диаметре и малой высоте ось элемента

### 3. КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

---

определяется с большой погрешностью, поэтому чаще всего программа автоматически определяет такой элемент как окружность. В данном случае рассматривается типовая КИМ высокой точности (типа DEA Global Performance). Для прецизионных КИМ с точностью в десятки-сотни нанометров учитываются другие масштабы измерения, но общая методика остаётся неизменной.

**Обмер конуса.** Для конуса действуют все те же правила, что и для цилиндра, но считается, что измеряемый конус по высоте всегда превышает 5 мм. В противном случае этот элемент измерить на КИМ невозможно.

**Обмер плоскости.** При выборе методики ощупывания плоскости, требуется знать, нужен ли контроль её формы или положения. Для определения плоскости требуется ощупать минимум три точки, желательно максимально удаленных друг от друга. Так как плоскость не может быть абсолютно идеальной, то для исключения погрешности формы рекомендуется ощупывать не 3, а 4 точки. Если же плоскость очень большая, то также рекомендуется взять несколько точек в её средней части.

Если же для плоскости требуется выполнить контроль формы или положения её относительно какого-либо другого



Рис. 3.3. Ощупывание цилиндра и конуса

### 3.1. ВЫБОР МЕТОДИКИ ОБМЕРА ЭЛЕМЕНТОВ ...

---

элемента, то рекомендуется использовать большое количество определяющих её точек. Конкретное число точек определяется лишь величиной плоскости. Для более точного контроля рекомендуется применять сканирование. Существует несколько видов траектории движения щупа при сканировании:

а) *Сканирование сеткой*. Это самый распространённый способ сканирования плоскости. Траектория щупа имеет вид змейки с контролируемым шагом и шириной. Данный вид сканирования подходит не для каждой плоскости, так как чаще всего они имеют отверстия или различные выступающие элементы, так как в данном виде щуп обходить эти препятствия не будет.

б) *Сканирование по окружности*. Данный способ подходит для сканирования плоскости вокруг какого-либо отверстия или круглого выступающего элемента, например, для определения торцевого биения.

В общем случае для ощупывания элемента типа:

- *прямая* требует задания 2 точек;
- *окружность* — 3 точек;
- *плоскость* — 3 точек (желательно 4 максимально удаленных друг от друга);
- *цилиндр* — 5 точек (желательно 6: по 3 в различных сечениях, максимально отдалённых друг от друга);
- *конус* — 6 точек, по 3 в различных сечениях, максимально отдалённых друг от друга;
- *сфера* — как минимум 4 точки, 2 у полюса; 2 вдоль экватора.

Для различных случаев существуют следующие методики ощупывания:

**Форма или положение элемента не измеряются, высота элемента  $\leq 5$  мм.** При ощупывании такого элемента достаточно ощупать всего 3 точки. Для исключения погрешности формы, рекомендуется ощупать 4 точки. Измерение следует производить на одной высоте цилиндра, поэтому элемент будет принят

### 3. КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

---

за окружность. Если же в качестве метода обмера использовать сканирование, то добавляется погрешность определения размера. Она может появиться из-за плохой очистки детали или попадания пыли в зону сканирования, а также на измерение начинает оказывать влияние микрогеометрия. Конус при таких условиях проконтролировать нельзя (рис. 3.4).

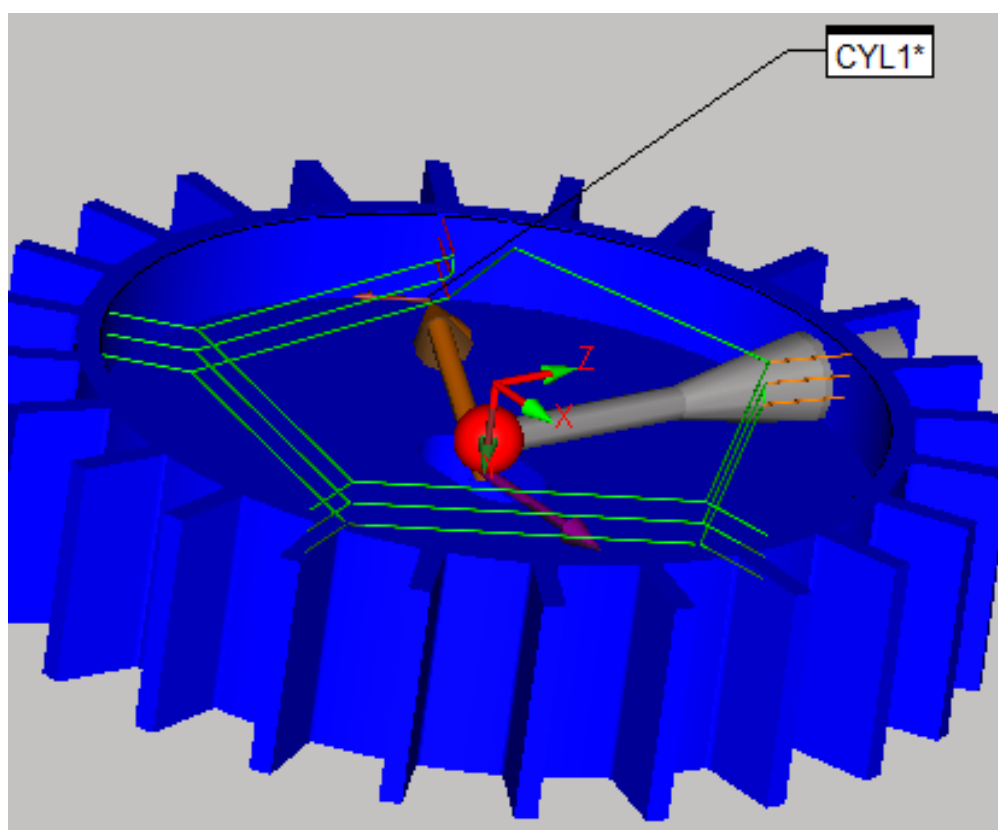


Рис. 3.4. Пример ощупывания поверхности высотой  $\leq 5$  мм

**Измеряются форма или положение элемента, высота элемента  $\leq 5$  мм.** Из-за малой высоты цилиндра нельзя точно определить его ось, то есть необходимо работать с усреднённым центром цилиндра. Это создаёт некоторую дополнительную погрешность, но при такой малой высоте она оказывается незначительной. Количество контролируемых точек напрямую влияет на точность определения положения усредненного центра: чем больше точек ощупано, тем меньше погрешность.

### 3.1. ВЫБОР МЕТОДИКИ ОБМЕРА ЭЛЕМЕНТОВ ...

---

Для определения позиции центра измеряемой окружности цилиндра или её формы рекомендуется ощупать не менее 8 точек. Для более точного определения искомого центра или формы рекомендуется использовать сканирование. При сканировании щуп не отрывается от детали, что позволяет ощупать большое число точек за сравнительно небольшой промежуток времени. Конус при таких условиях проконтролировать нельзя.

**Форма или положение элемента не измеряются, высота элемента  $\geq 5$  мм.** Для контроля размеров такого цилиндра достаточно ощупать всего 5 точек, но, как было сказано выше, для исключения погрешности формы, лучше использовать 8 точек: 4 в верхней части цилиндра и 4 в нижней. Для более точного измерения рекомендуется также ощупать 4 точки в центральной части цилиндра, так как он может иметь бочкообразную или вогнутую форму. Для конуса достаточно ощупать 8 точек: 4 в верхней части конуса и 4 в нижней.

**Измеряются форма или положение элемента, высота элемента  $\geq 5$  мм.** Для контроля формы или положения такого цилиндра минимальное количество ощупываемых точек — 16: 8 в верхней части цилиндра и 8 в нижней. Для более точного измерения формы или положения рекомендуется использовать сканирование, а также ощупывать точки в центральной части цилиндра, так как он может иметь бочкообразную или вогнутую форму. Для конуса достаточно ощупать 16 точек: 8 в верхней части конуса и 8 в нижней.

Также можно выделить следующие общие методы контроля:

- *Ощупать* точки элементов на двух высотах, не менее 8 точек на каждой (или использовать сканирование).
- *Ощупать* точки элемента на двух высотах, не менее 4 точек на каждой.



### 3. КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

---

- *Ощупать* точки элемента на одной высоте, не менее 8 точек (или использовать сканирование).
- *Ощупать* 4 точки по окружности на одной высоте.
- *Ощупать* элемент сканированием (вид сканирования: сетка).
- *Ощупать* 4 точки, максимально удалённых друг от друга.

В итоге приведённый подход позволяет для выбранного типа деталей простыми методами определить наборы имеющихся КТЭ, которые обеспечат создание последовательности контроля и конкретной схемы построения. При этом учитываются:

- геометрические особенности конкретной детали;
- состав контролируемых параметров;
- влияние значения параметров на конкретный метод обмера; возможности КИМ.

Для контроля изделия необходимо сформировать комбинации примитивов и построить связывающие их элементы, которые непосредственно будут определять тот или иной контролируемый параметр. Таким образом, непосредственно оператором с использованием КИМ выполняется сбор точек, которые образуют элементы.

Далее все расчёты производятся в программном обеспечении путем формирования вспомогательных примитивов или связей между ними. Далее для контроля партии изделий достаточно установить одну деталь из партии, определить её расположение в системе и провести контроль по заранее сформированной программе.

При закреплении детали на столе КИМ необходимо учитывать, что контроль заданных размеров должен быть произведён с минимальным количеством перезакреплений, а также должен быть обеспечен беспрепятственный подход щупа к контролируемым элементам и использование оснастки, обеспечивающей минимальную трудоемкость измерений.

### 3.1. ВЫБОР МЕТОДИКИ ОБМЕРА ЭЛЕМЕНТОВ ...

---

Деталь должна иметь жёсткую фиксацию, исключаящую её перемещение, нельзя допустить повреждение детали или её деформацию. Если создается ситуация, когда щуп машины не может подойти к измеряемой поверхности, либо касание происходит с нарушением методики измерения, деталь необходимо перезакрепить. При этом появляются дополнительные погрешности, которые необходимо учитывать при расчёте суммарной погрешности измерения.

Процедуры измерения элементов можно отнести к трем типам:

- а) Измерение контролируемых элементов.
- б) Измерение вспомогательных элементов.
- в) Измерение элементов для базирования.

Базирование имеет большую важность, так как является основой автоматизации измерения. Обычно используют стандартную схему базирования «3 – 2 – 1», широко распространенной разновидностью которой является вариация «плоскость – линия – точка».

Как было описано ранее, для контроля изделия оно разбивается на отдельные элементы, именуемые конструкторско-технологическими элементами (сокр. *КТЭ*). Такие элементы соответствуют определённому типу геометрии с набором параметров, которые нужно проконтролировать. Способ их измерения и последующего контроля не меняется от детали к детали, поэтому может быть зафиксирован.

В результате каждую новую деталь можно разбивать на *КТЭ* и строить программу контроля по уже имеющимся программам для деталей со схожим конструктивом. При наличии средств компьютерного анализа геометрии изделия такие элементы могут выделяться автоматически, что позволит создавать программу с минимальным участием оператора.

## 3.2 Основные этапы создания программы измерения

Создание программы измерения включает ряд действий по работе с КИМ и программного обеспечения КИМ. Основные этапы создания программы измерения (сокр. *ПИ*).

**Выбор щуповой системы.** В зависимости от сложности детали, числа измеряемых параметров и размеров геометрических элементов необходимо выбрать конфигурацию щуповой системы. При этом могут варьироваться: число щупов в щуповой системе, их взаимное расположение, положение щупа в пространстве, размеры щупа.

Щуповую систему можно выбрать в ПО КИМ из списка уже имеющихся, если же требуемый вариант отсутствует, то его можно создать. Принципы, по которым выбирается щуповая система:

- *упрощение калибровки*, например, если щуповая система содержит только один щуп, то необходимо откалибровать лишь его, а не пять как у «звезды»,<sup>1</sup> что значительно сокращает время работы и увеличивает точность измерений;
- *удобство работы* — одним щупом проще работать, так как в процессе подхода к детали не мешают боковые щупы;
- *удобство работы* — упрощённое задание плоскости безопасности.

**Калибровка КИМ.** Если на предыдущем этапе инженер-метролог решил создать новую щуповую систему, то перед началом работы с КИМ её необходимо откалибровать. Калибровка производится по специализированной калибровочной сфере особой точности.

---

<sup>1</sup>Щуповая система типа «звезда» — набор щупов из 5 штук, закрепленных вместе таким образом, что 4 щупа направлены вдоль осей  $\pm X$  и  $\pm Y$ , а пятый щуп по оси  $-Z$ .

**Обмер/ощупывание базовых элементов детали.** Переопределять базовое выравнивание нужно лишь тогда, когда устанавливается новая деталь или заново закрепляется старая. После выбора щуповой системы, нужно задать базу детали, то есть её положение в пространстве. Базовое выравнивание необходимо для определения расположения детали в рабочем пространстве КИМ.

Стандартная система координат у КИМ состоит из трёх элементов, ограничивающих деталь в пространстве, лишая её всех 6 степеней свободы (при необходимости). КИМ и её ПО работают с точками или их множеством. Каждая точка задается 6 параметрами — это 3 координаты, определяющие расположение точки в пространстве системы координат машины и 3 вектора, которые определяют, как направление касания щупа, так и кривизну поверхности детали.

Достаточно ощупать несколько базовых геометрических элементов, так как остальные элементы ПО КИМ определит по 3D-модели детали и их останется только извлечь. В качестве базовых необходимо выбирать наиболее крупные или протяженные элементы.

**Выравнивание.** Выравнивание позволяет позиционировать детали в координатном пространстве КИМ. В общем случае деталь может быть развёрнута относительно этих координат. Чтобы КИМ смогла в ходе автоматического прогона ощупать деталь и точно определить её положение на рабочем столе, перед началом измерений необходимо определить (рассчитать) её положение относительно осей КИМ.

Именно это выполняется во время расчётного выравнивания: система координат детали наклоняется и разворачивается при помощи вычислений до тех пор, пока базовые геометрические элементы детали не совпадут с осями системы координат

### 3. КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

---

детали. Для определения полного положения детали в рабочем пространстве необходимо ограничить её по всем шести степеням свободы (три вращательные, и три поступательные).

**Обмер/ощупывание контролируемых элементов.** Для того чтобы измерить элементы нужно указать ПО КИМ сами элементы и способ их ощупывания. В зависимости от вида элементов, их размеров и набора контролируемых параметров методы их ощупывания могут быть различными.

При наличии САД-модели и выполненном позиционировании (базирование путём выравнивания) КИМ автоматически определяет положение всех элементов, поэтому достаточно задать лишь методику ощупывания. В случае отсутствия САД-модели придётся ощупывать на КИМ каждый измеряемый элемент, чтобы определить его позицию относительно системы координат детали.

Для измерения контролируемых параметров можно использовать как реальные элементы детали, так и создавать мнимые, такие как пересечения или проекции. Также можно задавать мнимые элементы из нескольких уже имеющихся, например создание линии проходящей через центры двух окружностей.

**Задание плоскостей безопасности.** Для предотвращения столкновения щупа с деталью или с используемой оснасткой задаются плоскости безопасности. Плоскости безопасности представляют собой поверхности виртуального параллелепипеда внутри которого находится деталь вместе со средствами закрепления, за пределы которого в обязательном порядке отходит щуп после измерения каждого элемента детали.

Плоскости безопасности создаются либо заданием их координат вручную, либо снятием виртуальных точек в двух противоположных концах параллелепипеда.

## 3.2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ...

**Измерение детали.** Данный блок работ включает непосредственно обмер детали и контроль её параметров.

**Формирование отчета об измерении.** Структура и содержание отчёта (рис. 3.5) задаются в ПО КИМ в зависимости от потребности и пожеланий инженера-метролога [13].

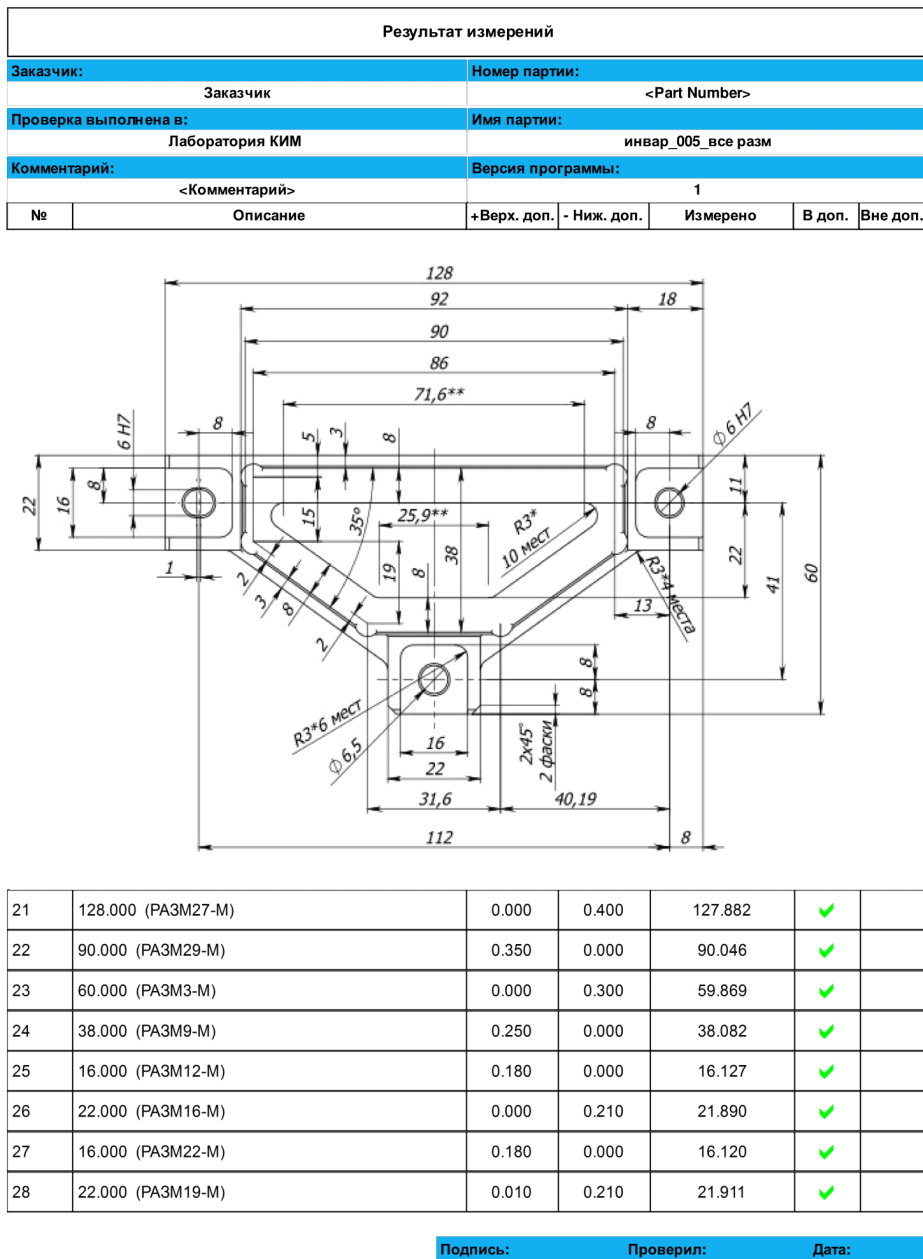


Рис. 3.5. Отчёт по результатам контроля на КИМ



---

# ЛИТЕРАТУРА

1. *Климов А.С.* Форматы графических файлов / Сост. А.С. Климов. — Киев: Диасофт лтд., 1995. — 480 с.

2. *Гардан К., Люка М.* Машинная графика и автоматизированное конструирование: Пер. с франц. — М.: Мир, 1987. — 272 с.

3. *Грибовский А.А., Пирогов А.В., Алёшина Е.Е.* Использование технологии оптического сканирования при подготовке производства новых изделий // Известия вузов. Приборостроение. — 2010. — Том 53. — № 8. — С. 60–64.

4. *Грибовский А.А., Яблочников Е.И.* Применение методов оптического сканирования в подготовке производства изделий // Сборник аннотаций студенческих выпускных квалификационных работ СПбГУ ИТМО. — 2009. — С. 67–68.

5. *Грибовский А.А., Пирогов А.В., Алёшина Е.Е.* Разработка технологических процессов изготовления изделий на базе научно-образовательного центра СПбГУ ИТМО // Межрегиональная научно-методическая конференция «Инновационные технологии в образовательной деятельности». Сборник материалов. — СПб.: СЗТУ. — 2009. — С. 76–77.

6. *Медунецкий В.М.* Основы обеспечения качества и сертификация промышленных изделий. Учебное пособие. — СПб: НИУ ИТМО, 2013. — 61 с.



7. Назаров В. Н., Карабегов М. А., Мамедов Р. К. Основы метрологии и технического регулирования. Учебное пособие. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. — 76 с.

8. ГОСТ Р 8.674-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Общие требования к средствам измерений и техническим системам и устройствам с измерительными функциями.

9. ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин.

10. Гвоздев В. Д. Прикладная метрология: Точность измерений. — М.: МИИТ, 2011.

11. СТП 632.08.032-2005. Система менеджмента качества. Электронная информация об изделии. Конструкторский состав изделия. Порядок формирования и изменения. — ОАО «Техприбор», 2005. — 23 с.

12. Грибовский А. А. Разработка и использование интегрированных моделей изделий в автоматизированных системах технологической подготовки производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук / НИУ ИТМО. — Санкт-Петербург, 2012. — 22 с.

13. Сизиков В. С. Устойчивые методы обработки результатов измерений. Учебное пособие. — СПб: «СпецЛит», 1999. — 132 с.

*Миссия университета* — генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

## **КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

Кафедра технологии приборостроения относится к числу ведущих кафедр института со дня его основания в 1931 году. Тогда она называлась кафедрой механической технологии и возглавлялась известным ученым в области разработки инструмента профессором А. П. Знаменским. Позже она была переименована в кафедру технологии приборостроения.

За время своего существования кафедра выпустила из стен института более двух тысяч квалифицированных инженеров, более сотни кандидатов и докторов наук. В разные годы ее возглавляли известные ученые и педагоги профессора Николай Павлович Соболев и Сергей Петрович Митрофанов. Кафедра имеет выдающиеся научные достижения.

Заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, профессором С. П. Митрофановым были разработаны научные основы группового производства, за что он был удостоен Ленинской премии СССР. Методы группового производства с успехом применяются в промышленности и постоянно развиваются его учениками. Заслуженным изобретателем Российской Федерации Юрием Григорьевичем Шнейдером разработаны метод и инструментарий нанесения регулярного микрорельефа на функциональной поверхности.

В настоящее время кафедра осуществляет выпуск бакалавров по направлениям подготовки 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» и 12.03.01 «Приборостроение»; магистров по направлениям подготовки 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» и 12.04.01 «Приборостроение».

Евгений Иванович Яблочников  
Андрей Александрович Грибовский  
Максим Яковлевич Афанасьев  
Борис Степанович Падун

**Применение ИПИ-технологий  
в проектировании и производстве**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н. Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе