

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра технологии машиностроения

Составитель  
М. С. Махалов

## **CALS- И CASE-ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

### **Методические указания к практическим занятиям**

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления  
подготовки 15.04.05 Конструкторско-технологическое  
обеспечение машиностроительных производств  
в качестве электронного издания  
для использования в учебном процессе

Кемерово 2019

Рецензенты

Кречетов А. А. – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения

Клепцов А. А. – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения

**Махалов Максим Сергеевич.**

**CALS- И CASE технологии в машиностроении:** методические указания к практическим занятиям [Электронный ресурс] для обучающихся направления подготовки 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств всех форм обучения / сост.: М. С. Махалов; КузГТУ. – Кемерово, 2019.

В методических указаниях изложен материал для выполнения практических работ по дисциплине «CALS и CASE-технологии в машиностроении».

© КузГТУ, 2019  
© Махалов М. С.,  
составление, 2019

## **1. Введение**

Практические занятия проводятся с целью освоения и закрепления методов экспериментального исследования, а также приобретения навыков самостоятельной постановки научного исследования по теме учебной исследовательской работы.

Описание практических работ дается в сжатом виде, так как их содержание тесно увязано с содержанием лекций и лабораторных работ, выполняемых студентами по другим учебным дисциплинам.

По результатам выполнения практической работы необходимо составить и оформить отчет в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105–95. Оформленный отчет студент сдает для проверки преподавателю перед началом следующего практического занятия.

## 2. Содержание практических занятий

### Работа № 1

## ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЕГО ЭТАПОВ

**Цель работы:** изучение понятия CALS технологий, их назначения, задач и основных элементов. Изучение видов обеспечения CALS технологий и этапов жизненного цикла промышленных изделий.

Современное производство сложной техники подразумевает согласованную работу многих предприятий и соответственно существует необходимость информационного взаимодействия между предприятиями и подразделениями внутри предприятий.

Для обеспечения согласованной работы всех предприятий, участвующих в проектировании, производстве, реализации и эксплуатации сложной техники, используется соответствующая информационная поддержка этапов жизненного цикла промышленных изделий.

### Что такое CALS технологии

Что такое CALS? CALS – это аббревиатура, которая сменила несколько значений.

Первоначально это буквосочетание и расшифровывалось как CALS (Computer Aided Logistics Support – компьютерная поддержка логистических процессов), затем «непрерывная поддержка закупок и жизненного цикла». Некоторые сегодня применяют расшифровку «коммерция со скоростью звука».

В настоящее время эту аббревиатуру принято расшифровывать иначе, а именно Continuous Acquisition and Lifecycle Support, что по-русски означает Информационная поддержка стадий жизненного цикла изделий.

Фактически, CALS не является ни программным комплексом, ни технологией, а, скорее, концепцией, способом организации электронной поддержки продукта во время всего периода жизнедеятельности.

## **Назначение, задачи и преимущества**

**Назначение CALS-технологий** – обеспечивать предоставление необходимой информации в нужное время, в нужном виде, в конкретном месте любому из участников жизненного цикла какого-либо процесса или изделия.

### **Основные задачи CALS-систем:**

- структурирование и моделирование данных об изделиях и процессах;
- обеспечение эффективного управления и обмена данными между всеми участниками жизненного цикла изделия или процесса;
- создание и сопровождение документации, необходимой для поддержки всех этапов жизненного цикла изделий.

Эффективность управления данными подразумевает прежде всего представление информации в форме, обеспечивающей легкость ее восприятия и однозначное ее понимание всеми участниками жизненного цикла изделий. Это требование распространяется на любую документацию, используемую в разных процедурах этапов жизненного цикла.

Для успешного применения современных информационных технологий в промышленности необходимо располагать квалифицированными инженерными кадрами, знающими и умеющими использовать CALS-технологии.

Причины, которые могут побудить компанию выбрать эту технологию:

- удовлетворить запросы потребителей;
- оптимизировать свои планы и программы;
- снизить стоимость и затраты времени;
- эффективно выполнять операции;
- поддержать свою конкурентоспособность.

CALS-технологии призваны служить средством, интегрирующим промышленные автоматизированные системы проектирования и управления в единую многофункциональную систему.

Цель интеграции – повышение эффективности создания и использования сложной техники.

В чем выражается повышение эффективности?

### **1. Улучшается качество изделий за счет более полного учета имеющейся информации при проектировании и принятии управленческих решений.**

Так например, обоснованность решений, принимаемых в автоматизированной системе управления предприятием (АСУП), будет выше, если лицо, принимающее решение, и соответствующие программы АСУП имеют оперативный доступ не только к базе данных АСУП, но и к базам данных других автоматизированных систем – системы автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП) и автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП) и, следовательно, могут оптимизировать планы работ, содержание заявок, распределение исполнителей, выделение финансов и т. п.

При этом под оперативным доступом необходимо понимать не просто возможность считывания данных из баз данных, но и легкость их правильной интерпретации, т. е. согласованность по синтаксису и семантике с протоколами, принятыми в АСУП. То же относится и к другим системам. Этого не так легко добиться, если основное предприятие и организации-смежники работают с разными автоматизированными системами.

### **2. Сокращаются материальные и временные затраты на проектирование и изготовление изделий.**

Применение CALS-технологий позволяет существенно сократить объемы проектных работ, так как описания ранее выполненных удачных разработок компонентов и устройств, многих составных частей оборудования, машин и систем, проектировавшихся ранее, хранятся в базах данных сетевых серверов, доступных любому пользователю CALS-технологиями. Доступность опять же обеспечивается согласованностью форматов, способов, руководств в разных частях общей интегрированной системы.

### **3. Значительно снижаются затраты на эксплуатацию благодаря реализации функций интегрированной логистической поддержки.**

Существенно облегчается решение проблем ремонтпригодности, интеграции продукции в различного рода системы и среды, адаптации к меняющимся условиям эксплуатации и т. п.

**CALS-технология** – это технология комплексной компьютеризации сфер промышленного производства, комплексность обеспечивается унификацией и стандартизацией спецификаций промышленных изделий на всех этапах их жизненного цикла. Основные спецификации представлены проектной, технологической, производственной, маркетинговой, эксплуатационной документацией.

**В CALS-системах предусмотрены:** хранение, обработка и передача информации в компьютерных средах, оперативный доступ к данным в нужное время и в нужном месте.

**Преимущества CALS технологий:**

- услуги и изделия с конкурентными ценами;
- сокращение затрат времени;
- снижение общей стоимости жизненного цикла;
- снижение затрат на поддержку эксплуатации;
- повышение эффективности операций;
- точную информацию в точное время;
- улучшение взаимодействия потребителя с поставщиком;
- снижение объемов незавершенного производства;
- возможность принимать лучшие решения;
- повышение квалификации персонала.

**Основные элементы CALS технологий**

**1. Люди.** Совместная работа происходит в условиях существенно более тесного сотрудничества, чем раньше. При этом в ней могут участвовать как люди, работающие в разных подразделениях одной организации, так и сотрудники разных организаций, которые нуждаются в совместной работе и использовании распределенной в разных базах данных информации о предшествующих фазах жизненного цикла изделий.

**2. Данные.** Ключевой идеей концепции является «создать данные один раз, использовать много раз». Это означает, что должен быть один источник цифровых данных, к которому все должны обращаться, по мере необходимости. Часто данные находятся в разных географических точках и в различных автоматизированных системах. Это означает, что техническая и деловая информация должна собираться из баз данных множества организаций-поставщиков, подрядчиков, субподрядчиков. Любое

лицо, уполномоченное на это, может получить и использовать необходимую ему информацию, объем которой возрастает по мере продвижения к концу жизненного цикла изделия.

**3. Разумное соглашение.** Работа с распределенной информацией нуждается в соглашениях. Один из путей связан с созданием «Объединенной службы технической информации подрядчиков» – (CI-TTS). Это обеспечивает создание сетевых услуг, которые создают всеохватывающую, управляемую среду распределенных цифровых данных, что улучшает деловые процессы и делает ненужным бумажный документооборот.

**Главная задача создания и внедрения CALS технологий** – обеспечение единообразных описания и интерпретации данных независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных.

Структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки ее представления должны быть стандартизованными. Тогда:

- становится реальной успешная работа над общим проектом разных коллективов, разделенных во времени и в пространстве;
- одна и та же конструкторская документация может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же технологическая документация – адаптирована к разным производственным условиям, что позволяет существенно сократить и удешевить цикл проектирования и производства;
- упрощается эксплуатация систем.

CALS-технологии не отвергают существующие автоматизированные системы проектирования и управления, а являются средством их эффективного взаимодействия.

### **Виды обеспечения CALS технологий**

Проблематика CALS имеет ряд аспектов, которые называют **видами обеспечения CALS**. Это лингвистическое, информационное, программное, математическое, методическое, техническое и организационное.

**Лингвистическое** – языки и форматы данных о промышленных изделиях и процессах, используемые для представления и обмена информацией на этапах жизненного цикла изделий.



**Информационное** – базы данных, в которых имеются сведения о промышленных изделиях, используемые разными системами в процессе проектирования, производства, эксплуатации и утилизации продукции. В состав информационного обеспечения входят также серии международных и национальных CALS-стандартов и спецификаций.

**Программное** – программные комплексы, предназначенные для поддержки единого информационного пространства этапов жизненного цикла изделий. Это прежде всего системы управления документами и документооборотом, управления проектными данными, взаимодействия предприятий, подготовки интерактивных электронных технических руководств и некоторые другие.

**Математическое** – методы и алгоритмы создания и использования моделей взаимодействия различных систем. В первую очередь – это методы имитационного моделирования сложных систем, методы планирования процессов и распределения ресурсов.

**Методическое** – методики выполнения таких процессов, как параллельное (совмещенное) проектирование и производство, структурирование сложных объектов, их функциональное и информационное моделирование, объектно-ориентированное проектирование, создание онтологии приложений.

**Техническое** – аппаратные средства получения, хранения, обработки и визуализации данных при информационном сопровождении изделий.

**Организационное** – различного рода документы, соглашения и инструкции, регламентирующие роли и обязанности участников жизненного цикла промышленных изделий.

#### **Работа в режиме CALS:**

- электронное взаимодействие между всеми участниками;
- оптимизация затрат на жизненный цикл на этапе проектирования;
- создание/ведение баз данных по промышленным изделиям;
- информация создается в цифровом виде один раз, используется многократно;
- непрерывное обучение и тренировка персонала;
- общий подход к управлению звеньями снабжения, закупки и поддержки жизненного цикла;

- оптимизация проекта по критериям стоимости и продолжительности жизненного цикла.

### **Этапы жизненного цикла промышленных изделий**

Основные этапы жизненного цикла промышленных изделий представлены на рис. 1.1. Системы, указанные на рис. 1.1, поддерживают следующие этапы и процедуры в жизненном цикле изделий:

- CAE – Computer Aided Engineering (автоматизированные расчеты и анализ);
- CAD – Computer Aided Design (автоматизированное проектирование);
- CAM – Computer Aided Manufacturing (автоматизированная технологическая подготовка производства);
- PDM – Product Data Management (управление проектными данными);
- ERP – Enterprise Resource Planning (планирование и управление предприятием);
- MRP-2 – Manufacturing (Material) Requirement Planning (планирование производства);
- MES – Manufacturing Execution System (производственная исполнительная система);
- SCM – Supply Chain Management (управление цепочками поставок);
- CRM – Customer Relationship Management (управление взаимоотношениями с заказчиками);
- SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition (диспетчерское управление производственными процессами);
- CNC – Computer Numerical Control (компьютерное числовое управление);
- S&SM – Sales and Service Management (управление продажами и обслуживанием);
- CPC – Collaborative Product Commerce (совместный электронный бизнес).

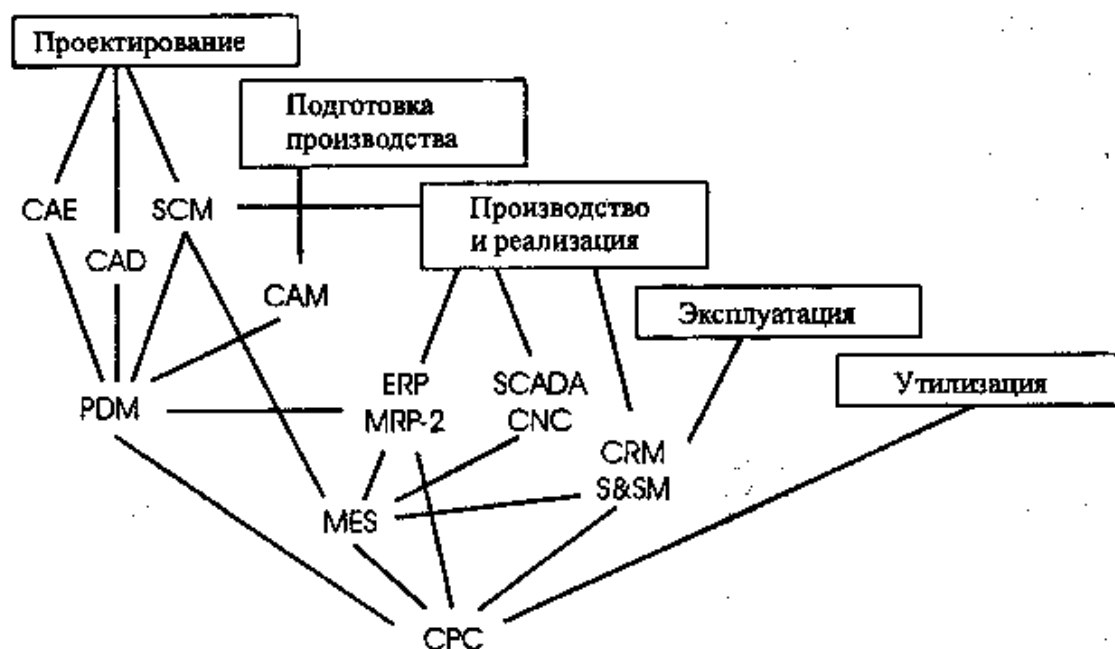


Рис. 1.1. Основные этапы жизненного цикла промышленных изделий

Далее приведена краткая характеристика названных этапов и соответствующих систем автоматизации.

**Современные САПР (или системы CAE/CAD)** – обеспечивают сквозное проектирование сложных изделий, выполняют большинство проектных процедур и имеют многомодульную структуру.

Модули различаются ориентацией на те или иные проектные задачи применительно к тем или иным типам устройств и конструкций.

При этом возникают проблемы, связанные с построением общих баз данных с выбором протоколов, форматов данных и организацией совместного использования этих модулей. Особенно много этих проблем на предприятиях, производящих сложные изделия, в частности с механическими и радиоэлектронными подсистемами, поскольку САПР машиностроения и радиоэлектроники до недавнего времени развивались отдельно и самостоятельно.

**Системы PDM** – разрабатываются для решения проблем совместного функционирования компонентов САПР различного назначения. Они либо входят в состав модулей конкретной

САПР, либо имеют самостоятельное значение и могут работать совместно с разными САПР.

**Система SCM, иногда называемой системой управления поставками комплектующих (Component Supplier Management)** – на этапе производства обеспечивает поставки необходимых материалов и комплектующих, однако ее услуги требуются уже на этапе проектирования.

**АСТПП, составляющие основу системы САМ,** выполняют:

- синтез технологических процессов и программ для оборудования с ЧПУ;
- выбор технологического оборудования, инструмента, оснастки, расчет норм времени.

Модули системы САМ обычно входят в состав развитых САПР, и поэтому интегрированные САПР часто называют системами CAE/CAD/CAM/PDM.

Функции управления на предприятиях выполняются автоматизированными системами на нескольких иерархических уровнях.

**АСУП, классифицируемые как системы ERP или MRP-2,** осуществляют автоматизацию управления на верхних уровнях от корпорации (производственных объединений предприятий) до цеха.

**Наиболее развитые системы ERP** выполняют различные бизнес-функции: планирование производства, закупки, сбыт, анализ и управление финансами, персоналом, складским хозяйством, учетом основных фондов и т. п.

**Системы MRP-2** выполняют бизнес-функции, непосредственно связанные с производством.

**Системы MES** ориентированы на решение оперативных задач управления проектированием, производством и маркетингом.

**Систему SCADA** вводят в состав АСУТП для выполнения диспетчерских функций: сбора и обработки данных о состоянии технологического оборудования и протекании технологических процессов, а также для разработки программного обеспечения для встроенного оборудования.

**Системы CNC на базе контроллеров**, встроенных в технологическое оборудование, используют для непосредственного программного управления технологическим оборудованием.

**С помощью системы CRM** на этапе реализации продукции выполняются функции управления отношениями с заказчиками и покупателями, проводится анализ рынка, определяются перспективы спроса на планируемые к выпуску изделия

**Система S&SM** служит для решения проблем обслуживания и выполняет маркетинговые функции.

На этапе эксплуатации применяются специализированные компьютерные системы, занятые вопросами ремонта, контроля, диагностики эксплуатируемых систем. Обслуживающий персонал использует интерактивные учебные пособия и технические руководства, а также средства для дистанционного консультирования при поиске неисправностей, программы для автоматизированного заказа деталей взамен отказавших.

Перечисленные автоматизированные системы могут работать автономно, и в настоящее время так обычно и происходит. Однако эффективность автоматизации выше, если данные, генерируемые в одной из систем, будут доступны в других системах, поскольку принимаемые в них решения станут более обоснованными.

Чтобы достичь должного уровня взаимодействия промышленных автоматизированных систем, требуется создание **единого информационного пространства** не только на отдельных предприятиях, но и в рамках объединения предприятий. ЕИП выступает как единый источник данных для всех участников ЖЦ изделия. ЕИП обеспечивается благодаря унификации, как формы, так и содержания информации о конкретных изделиях на различных этапах их жизненного цикла.

**Унификация формы** достигается использованием стандартных форматов и языков представления информации в межпрограммных обменах и при документировании.

**Унификация содержания** – однозначная правильная интерпретация данных о конкретном изделии на всех этапах его жизненного цикла.

Указанная унификация является основой для единого электронного описания изделия в CALS-пространстве.

Стратегия CALS предусматривает два этапа разработки ЕИП:

- автоматизацию отдельных процессов ЖЦ изделия и представление данных о них в электронном виде согласно международным стандартам;
- интеграцию автоматизированных процессов и относящихся к ним данных в составе ЕИП.

### **Интегрированная информационная среда и методика функционального моделирования процессов в CALS-технологиях**

Важной составляющей CALS технологий является интегрированная информационная среда (ИИС). На ИИС строится любая CALS-система, то есть техническая и информационная поддержка и сопровождение ЖЦ изделия осуществляются этой самой ИИС. Обычно ИИС определяют как «совокупность распределенных баз данных, содержащих сведения об изделиях, производственной среде, ресурсах и процессах предприятия, обеспечивающая корректность, актуальность, сохранность и доступность данных тем субъектам производственно-хозяйственной деятельности, участвующим в осуществлении ЖЦ изделия, кому это необходимо и разрешено. Все сведения (данные) в ИИС хранятся в виде информационных объектов». ИИС, в соответствии с концепцией CALS, представляет собой модульную систему, в которой реализуются следующие базовые принципы CALS:

- прикладные программные средства отделены от данных;
- структуры данных и интерфейс доступа к ним стандартизованы;
- данные об изделии, процессах и ресурсах не дублируются, число ошибок в них минимизируется, обеспечивается полнота и целостность информации;
- прикладные средства работы с данными представляют собой, как правило, типовые коммерческие решения различных производителей, что обеспечивает возможность дальнейшего развития ИИС.

Все процессы информационного обмена посредством ИИС имеют своей конечной целью максимально возможное исключение из деловой практики традиционных бумажных документов

и переход к прямому безбумажному обмену данными. Преимущества и технико-экономическая эффективность такого перехода очевидны.

Концепция CALS предполагает последовательное, непрерывное изменение и совершенствование бизнес-процессов разработки, проектирования, производства и эксплуатации изделия. Для этого используется набор разнообразных методов, в т. ч. реинжиниринг бизнес-процессов (business process reengineering), бенчмаркинг (benchmarking), непрерывное улучшение процессов (continuous process improvement) и т. д. Построению интегрированной системы информационной поддержки ЖЦ изделия должны предшествовать:

- анализ существующей ситуации;
- разработка комплекса функциональных моделей бизнес-процессов, описывающих текущее состояние среды, в которой реализуется ЖЦ изделия;
- выработка и сопоставление возможных альтернатив совершенствования как отдельных бизнес-процессов, так и системы в целом.

Результатами анализа являются:

- функциональные модели бизнес-процессов ЖЦ изделия «как есть сейчас»;
- функциональные модели альтернативных вариантов усовершенствованных бизнес-процессов ЖЦ «как должно быть»;
- оценка затрат и рисков для каждого варианта;
- выбор предпочтительного варианта на основе взвешенного критерия минимума затрат и рисков;
- описание технической архитектуры ИИС для выбранного варианта;
- оценка технических характеристик ИИС для выбранного варианта;
- план действий по реализации выбранного варианта совершенствования бизнес-процессов ЖЦ и ИИС.

В настоящее время технология моделирования и анализа бизнес-процессов достаточно формализована. Для разработки функциональных моделей рекомендуется использовать методологию и нотацию SADT, регламентированную под названием

IDEF0 федеральным стандартом США FIPS 183 и официально принята в России.

Общая методика изменения бизнес-процессов в связи с внедрением CALS-технологий на предприятии включает в себя следующие этапы:

- Мотивация необходимости изменений.
- Разработка плана изменений и его утверждение руководством.

Создание организационной структуры (рабочей группы CALS), которая будет реализовывать разработанный план. На первых этапах эту структуру должен возглавлять руководитель организации.

- Обучение членов группы CALS и другого персонала, причастного к проведению изменений.
- Определение промежуточных (тактических) целей и способов оценки результатов (определение метрик).
- Разработка рабочих планов для всех участников группы CALS.
- Создание временных многофункциональных рабочих групп для решения тактических задач.
- Реализация планов.
- Оценка достигнутых результатов.

IDEF0 – это более строгая реализация ранее предложенной методики SADT (Structured Analysis and Design Technique). Начиная с момента создания первой версии методика успешно применялась для проектирования телефонных сетей, систем управления воздушными перевозками, производственных предприятий и др.

Описание объектов и процессов в IDEF0 выполняется в виде совокупности взаимосвязанных блоков (рис. 1.2), называемых блоками ICOM (Input-Control-Output-Mechanism), где I – вход, C – управление, M – механизм, O – выход.



Рис. 1.2. Блок ICOM



Модель начинается с представления системы как единого целого – прямоугольника с взаимодействиями, простирающимися за пределы системы. В качестве контекстной выбирается главная функция всей системы в целом. Блок, описывающий главную функцию системы, называется *контекстной диаграммой* или *контекстной функцией*.

Блоки представляют функции (работы), и их названия выражаются глаголами или отглагольными существительными. Типичные примеры: планировать, разработать, классифицировать, измерить, изготовить, отредактировать, рассчитать, продать (или планирование, разработка, классификация, измерение» изготовление, редактирование, расчет, продажа).

Число блоков на одном уровне иерархии – не более 6, иначе восприятие диаграмм будет затруднено.

Число уровней иерархии не ограничено, но обычно – не более 5.

Блоки в диаграммах IDEF0 связаны дугами (стрелками), которые отображают множества объектов (данных). **Управление (control)** определяет условия выполнения. Примеры управления: требования, чертеж, стандарт, указания, план. **Механизм (mechanism)** выражает используемые средства, например: компьютер, САПР, оснастка, заказчик, фирма. **Входы и выходы** могут быть любыми объектами.

Пример диаграммы IDEF0 показан на рис. 1.3, где представлены функции, выполняемые на начальных этапах процесса реинжиниринга предприятия.

На диаграмме показаны 4 этапа подготовки к реинжинирингу на предприятии. После формулировки заказа на перестройку процессов функционирования на базе информатизации управления проводится обследование предприятия, выявляются его структура, информационные потоки между подразделениями, внешние информационные связи, степень компьютеризации, наличие вычислительной сети и т. п.

На основании полученных данных составляется функциональная модель As Is («как есть») и разрабатывается модель To Be («как должно быть»). Эта модель верхнего уровня далее конкретизируется, каждая из функций раскрывается более подробно на диаграммах следующих уровней.

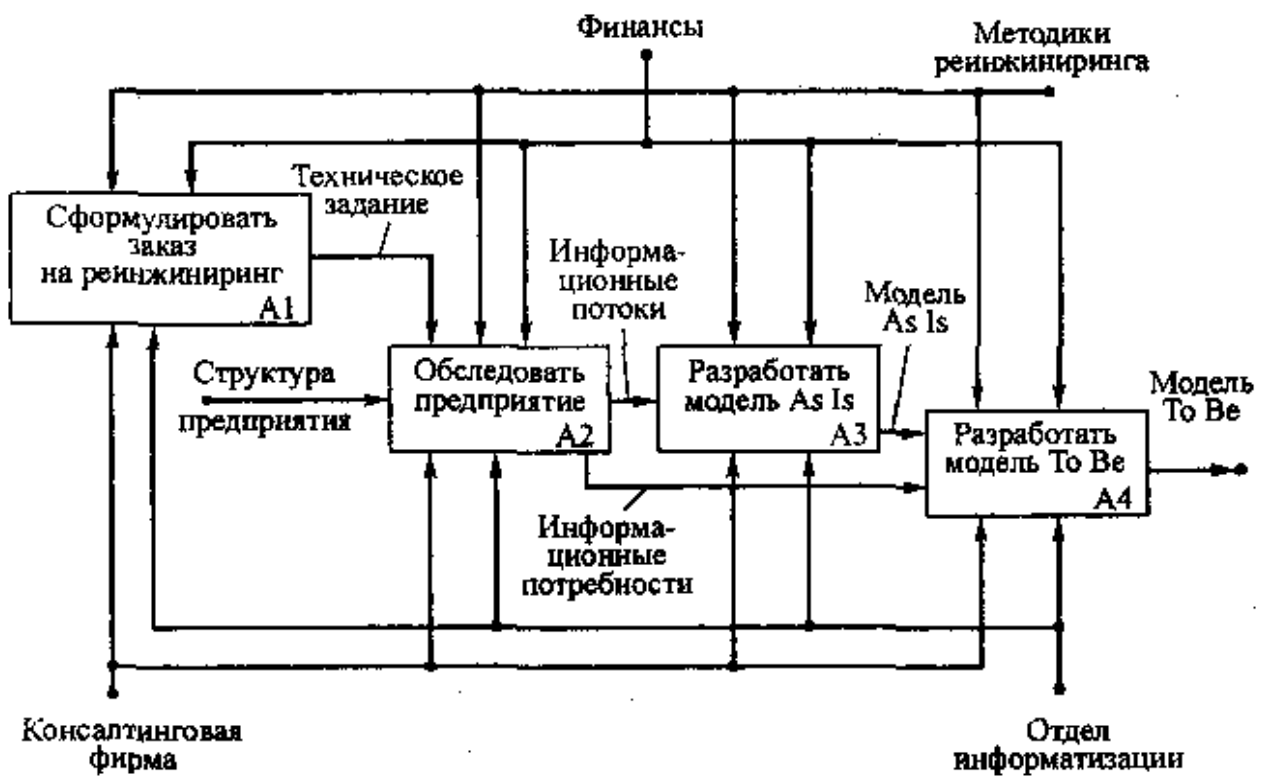


Рис. 1.3. Пример IDEF0-диаграммы

## Работа № 2

# АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**Цель работы:** изучение основ поверхностного и твердотельного моделирования и адаптивных форм.

### Уровни программного обеспечения

Одним из наиболее важных этапов проектирования машиностроительных изделий является конструирование:

- формируется концептуальный облик будущего изделия;
- создаются геометрические модели как отдельных деталей, так и всего изделия, которые будут играть определяющую роль на всех последующих этапах жизненного цикла.

В настоящее время, существующее программное обеспечение автоматизированного конструирования классифицируется по функциональной полноте и условно делится на 3 уровня.

**Нижний уровень** – программы, реализующие 2D модели в виде чертежей и эскизов.

Например, пакеты: БАЗИС-Конструктор 4.5, Графика-81, APM Graph, CADMECH на базе AutoCAD 14, T-Flex CAD LT, КОМПАС-ГРАФИК, АДЕМ и др.

**Средний уровень** – программные комплексы, которые позволяют создавать трехмерную геометрическую модель сравнительно несложного изделия в основном методом твердотельного моделирования.

К числу этих программных комплексов можно отнести: AutoCAD 2000, Solid Works, Solid Edge, PowerSHAPE, Prelude Design, GeMMa-30, T-Flex CAD 3D и др.

**Верхний уровень** – наиболее мощные программные системы сквозного проектирования и производства. Среди них можно выделить: CATIA5, EUCLID3, UNIGRAPHICS, Pro/ENGINEER и др.

Программное обеспечение автоматизированного конструирования должно удовлетворять требованию функциональной полноты и учитывать специфику моделей и задач, решаемых на каждом рабочем месте.

Поэтому, вместо одного пакета программ с множеством универсальных функций должны устанавливаться специализированные, разработанные в соответствии с этими задачами.

В основе автоматизированного конструирования машиностроительных изделий лежит объемное моделирование.

Для создания объемной модели изделия используются методы:

1. Трехмерного твердотельного моделирования,
2. Поверхностного моделирования,
3. Сочетания этих методов.

### ***Твердотельное моделирование***

Под твердым телом понимается заполненная «материалом» замкнутая область пространства.

Твердое тело характеризуется многогранным представлением и историей своего создания.

Многогранное представление тела отображается в виде прозрачного или непрозрачного объема, границы которого состоят из совокупности линий (ребер) и поверхностей (граней).

Геометрические модели твердых тел всегда математически точные, однако их отображение на экране осуществляется с заданной точностью и зависит от размера рабочей области, выбранной конструктором.

В качестве примера представлено отображение на экране монитора одного и того же тела с различной степенью полигонизации (рис. 2.1).

Все твердые тела делятся на **базовые** и **составные**.

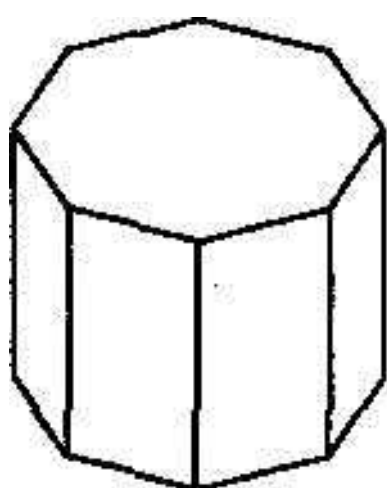
**Базовые тела, или твердотельные примитивы** – это параллелепипед, цилиндр, шар, конус и др. Они строятся с указанием формообразующих линий и контуров или с помощью задания значений параметров.

**Составные тела** формируются в результате топологических операций (булевы функции сложения, вычитания, пересечения) над базовыми телами. В данном случае базовые тела называют конструктивными элементами сложного тела.

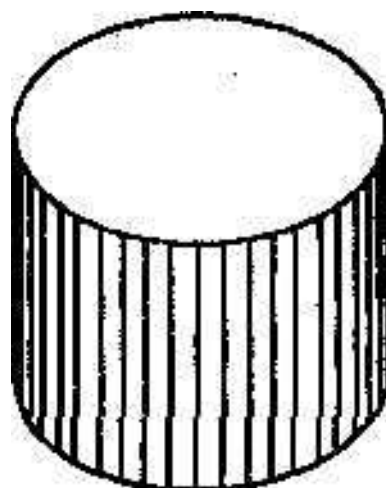
Кроме функций построения базовых тел, пакеты твердотельного моделирования реализуют различные функции создания тел сложной внешней формы. Это так называемые **кинематические**

**тела и тела вращения** (рис. 2.2). В качестве формообразующих линий в таких телах могут использоваться кривые, двумерные примитивы, сложные замкнутые или незамкнутые контуры, которые строятся с помощью прямых, дуг, окружностей, многоугольников.

Выбор метода построения контуров и тел в дальнейшем определяет способ внесения изменений в геометрическую модель изделия и проектирование технологии ее обработки.

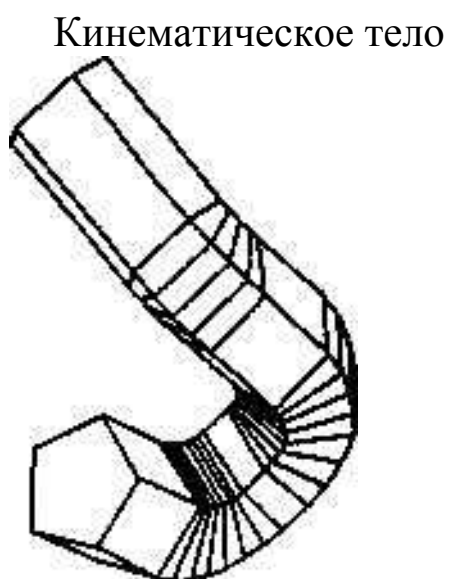


Грубая

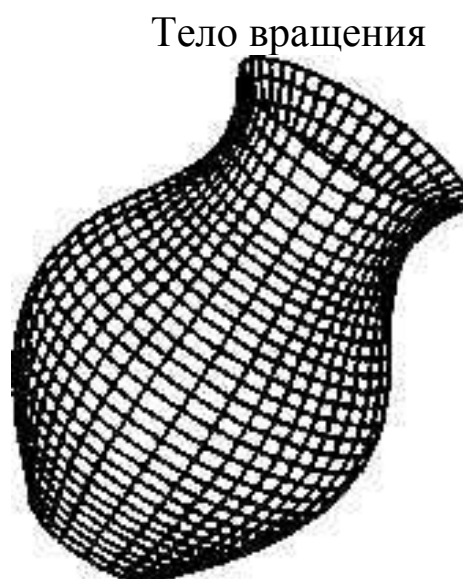


Точная

Рис. 2.1. Степень полигонизации  
(точность многогранного представления)



Кинематическое тело



Тело вращения

Рис. 2.2.

Способы получения сложного контура:

- по вспомогательным пересекающимся: указываются части сегментов и точки их пересечения (рис. 2.3);
- по вспомогательным непересекающимся: все элементы в указанном порядке замыкаются в цепочку, недостающие сегменты достраиваются автоматически (рис. 2.4);
- построение одной полилинией за одну операцию, используя для задания вершин алфавитно-цифровой ввод, ссылочные точки или «привязки» к уже созданным линейным или трехмерным объектам;
- топологическими операциями над замкнутыми контурами (рис. 2.5);
- в результате применения к линейным элементам матрицы преобразований (сдвиг, поворот, копирование массивом и т. д.) (рис. 2.6).

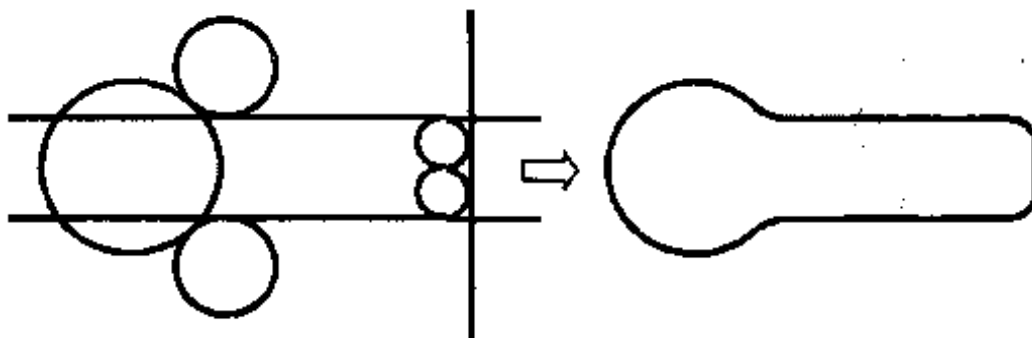


Рис. 2.3. Способ получения сложного контура по вспомогательным пересекающимся

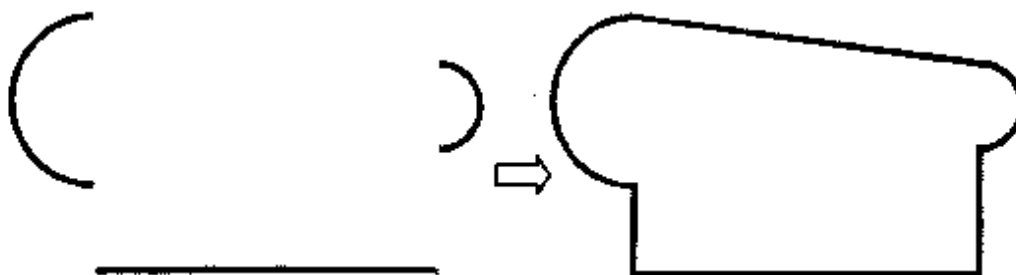


Рис. 2.4. Способ получения сложного контура по вспомогательным непересекающимся

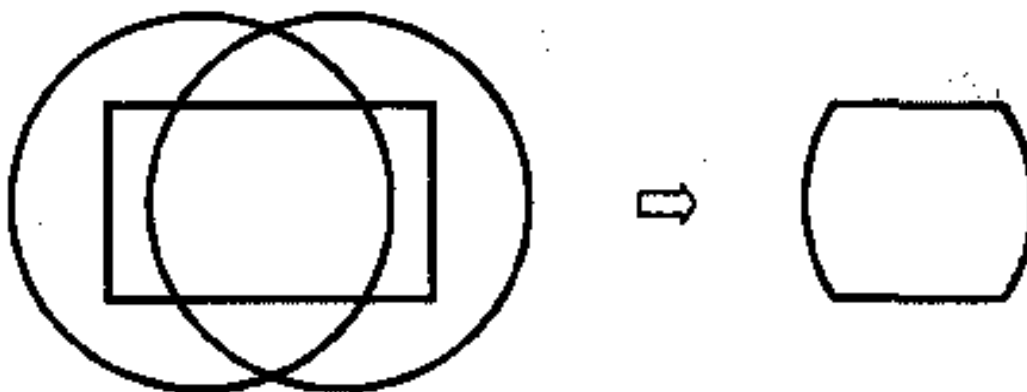


Рис. 2.5. Способ получения сложного контура топологическими операциями над замкнутыми контурами



Рис. 2.6. Способ получения сложного контура применением преобразований к линейным элементам матрицы

Функции редактирования сложных контуров:

1. Добавление, удаление и изменение положения вершин контура.
2. Геометрическое перестроение сегментов: отсечение и дотягивание до указанных границ, удаление указанной части сегмента, рассечение в указанных точках.
3. Геометрическое перестроение контура в целом: растягивание или сжатие в заданном направлении или масштабе, создание скруглений и фасок и т. д.

Вернемся к трехмерным объектам. Рассмотрим два правила модификации составного тела:

- если при построении использовались базовые тела, редактируются либо значения параметров конструктивных элементов, либо топологические операции;
- если при построении использовались образующие линии, редактировать надо геометрию этих линий.

Пока не существует программная среда, заранее определяющая методологию проектирования в зависимости от типа изделий. Поэтому в основе методологии проектирования лежит субъективный подход к выбору способа построения модели.

Выбор оптимального способа конструктор делает с учетом следующих критериев: компактность модели, время и трудоемкость ее построения, технологичность.

Рассмотрим некоторые особенности способов на примере модели детали (рис. 2.7).

**1. Построение тела вращения.** Формообразующий контур состоит из незамкнутой цепочки линейных сегментов и дуги (рис. 2.8). При построении тела вращения использовались контур и параметры – угол поворота и ось вращения.

**2. Построение сложного тела с помощью двух элементов.** Такое построение выполняется в три этапа с помощью топологической операции вычитания над двумя конструктивными элементами (рис. 2.9) – цилиндром с объемной фаской и тором.

При построении тела использовались: параметры цилиндра, длина фаски, радиус тора и траектория протягивания.

**3. Построение сложного тела с помощью трех элементов.** Такое построение выполняется в три этапа с помощью топологической операции сложения над тремя конструктивными элементами (рис. 2.10).

1. Первый элемент – тело вращения. Для него необходимо вначале построить сложный контур.

2. Два других элемента – твердотельные примитивы – цилиндр и конус. Каждый из них строится без предварительных построений формообразующих контуров.

3. Результирующее тело получается после выполнения топологической операции сложения над тремя этими элементами.

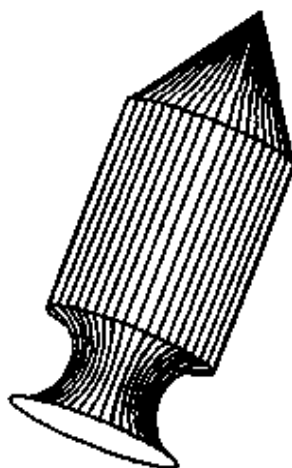


Рис. 2.7. Внешний вид модели детали





Рис. 2.8. Формообразующий контур и тело вращения



Рис. 2.9. Элементы (цилиндр и тор) и результат топологической операции вычитания

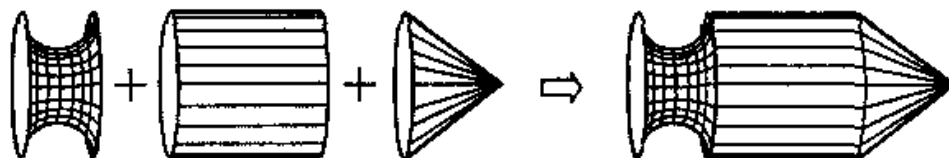


Рис. 2.10. Элементы (тело вращения, цилиндр и конус) и результат топологической операции сложения

**Системе «все равно»**, каким способом построена модель, однако на дальнейшем этапе модификации конструктор убеждается в корректности выбранной методологии проектирования.

Рассмотренные способы построения можно считать равноценными, учитывая, что внешний вид (многогранное представление) результирующего тела всегда одинаковый.

Однако размер объекта в структуре данных в первом случае минимальный, поскольку содержит описание полигона формообразующей, в двух других – значительно больше, поскольку содержит характеристики всех твердотельных конструктивных элементов и топологических операций.

**Важной характеристикой является история создания (ИС) твердого тела.**

Содержательная часть ИС включает:

1. Описание всех элементов, используемых для построения тела;
2. Параметры и последовательность выполненных операций.

**ИС имеет иерархическую структуру.**

**На нижнем уровне** размещаются геометрические примитивы (плоские или объемные) и их параметры.

**На всех последующих уровнях** могут размещаться сборки тел, полученные в результате преобразований над объектами нижнего уровня, а также промежуточные результаты топологических операций над отдельными конструктивными элементами.

**На верхнем уровне ИС** всегда находится результирующее тело (например, деталь) или сборка результирующих тел (например, узел или агрегат).

**ИС твердого тела** содержит граничное представление всех конструктивных элементов, параметры и названия всех использованных объектов.

Выделение самостоятельных геометрических моделей конструктивных элементов производится копированием из ИС, что дает возможность быстрого доступа в любых моделях сложных тел к любым промежуточным результатам и использования их при построении новых тел.

ИС позволяет организовать коллективный доступ к результатам работы многих конструкторов в едином проекте, не создавая дополнительных копий конструктивных элементов.

Кроме геометрии, в ИС хранится описание каждой операции в хронологическом порядке их выполнения.

Пример схемы ИС твердого тела приведен на рис. 2.11.

**На нижнем уровне** – формообразующий контур тела вращения, из которого будут вычитаться «инструменты», а также два цилиндра, образующие впоследствии отверстия разного диаметра, и требуемого размера параллелепипед, образующий на задней стенке детали полочку.

**На среднем уровне** – тело вращения («заготовка» для вычитания) и две сборки цилиндров; первая сборка – массив из четырех копий цилиндров большего диаметра, расставленных вокруг оси вращения через  $90^\circ$ , вторая сборка – массив из шести цилиндров меньшего диаметра (поворот на  $60^\circ$ ) (все «инструменты» должны располагаться относительно «заготовки» в нужном месте).

**На верхнем уровне** – результат топологической операции вычитания.

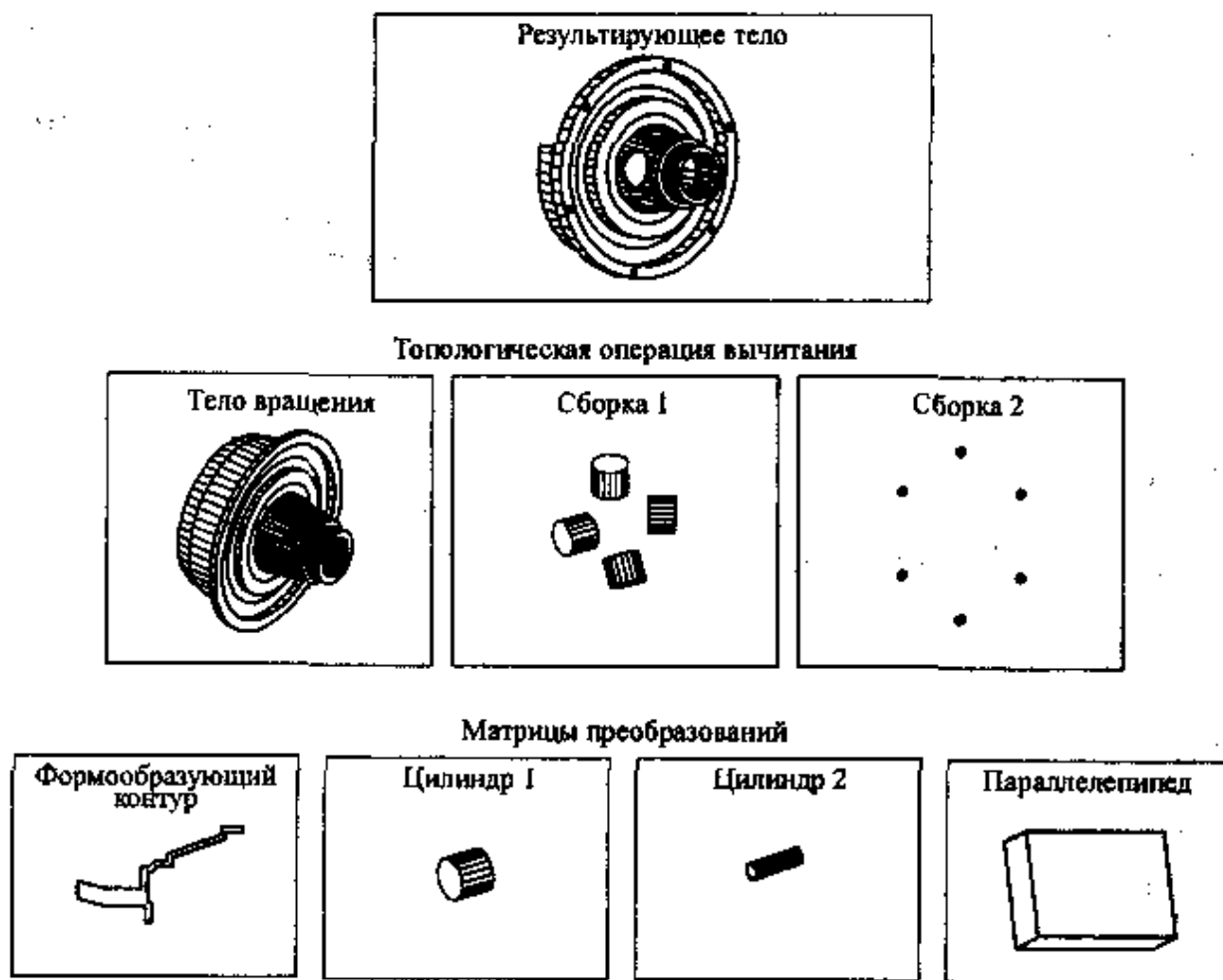


Рис. 2.11. Схема истории создания модели оси гироскопа

**Модификация твердого тела** – это процедура преобразования исходной модели в новую модель изделия.

Модификация модели зависит от способа построения и базируется на ИС твердого тела. Редактирование модели сложного тела выполняется на любом этапе ИС.

**На самом нижнем уровне можно:** редактировать параметры контуров, перестраивать их геометрию и изменять значения параметров твердотельных примитивов.

**На любом другом уровне можно** модифицировать сложное тело путем манипуляций конструктивными элементами.

Рассмотрим три способа модификации тела, построенного ранее (рис. 2.7).

Модель детали, которую необходимо получить в результате модификации, показана на рис. 12.

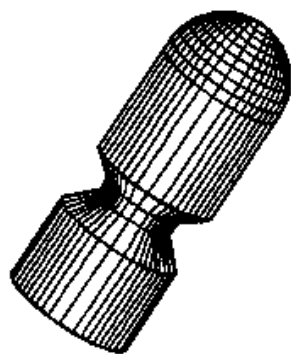


Рис. 2.12. Внешний вид модели детали, которую необходимо получить в результате модификации

Различные ИС тела диктуют способ его модификации.

Если ИС состоит из двух уровней, бывает проще построить новый формообразующий контур и создать новое тело вращения, чем редактировать существующий в истории контур.

**Модификация тела вращения.** Включает процедуры редактирования формообразующего контура. Можно перестраивать цепочку элементов, добавляя и удаляя новые вершины или сегменты линии, чтобы получить нужный формообразующий контур (рис. 2.13).

**Модификация сложного тела, построенного с помощью двух элементов** заключается в редактировании конструктивных элементов (см. рис. 2.9).

1. Удаление на цилиндре объемной фаски и создание объемного скругления нужного радиуса.
2. Перемещение тора в новое место.
3. Построение контура и нового тела вращения, затем замена им тора в результирующем теле.
4. Пересчет результатов топологического вычитания с новыми элементами (рис. 2.14).

**Модификация сложного тела, построенного с помощью трех элементов** (см. рис. 2.10).

1. В образующей первого элемента нужно преобразовать дугу в правильный четырехугольный сегмент.
2. Изменить длину цилиндра.
3. Образующую конуса сначала преобразовать в образующую цилиндра, а затем скруглить вершину.

4. Первый элемент переместить из его первоначального положения в новое положение.

5. Пересчитать результаты топологического сложения с новыми элементами (рис. 2.15).



Рис. 2.13. Модифицированный контур и тело вращения

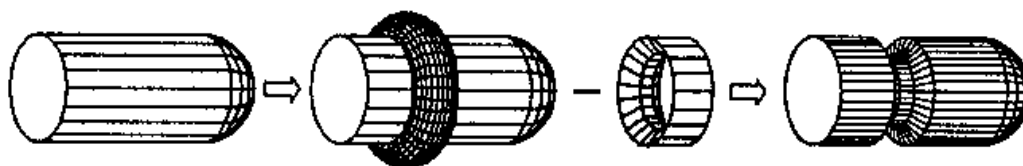


Рис. 2.14. Модифицированные элементы и результат вычитания

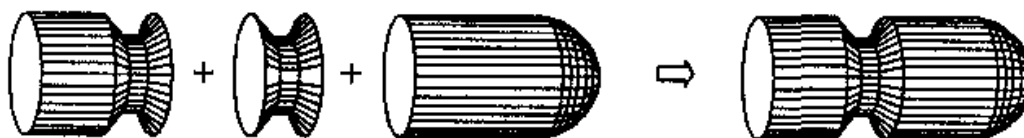


Рис. 2.15. Модифицированные элементы и результат сложения

Модификация сложных тел включает в себя следующие способы:

1. Изменение формы путем ввода новых значений параметров (в примитивах), а также методом графического редактирования формообразующих контуров.

2. Редактирование назначенных параметров, обеспечивающих изменение формы детали в соответствии с установленными зависимостями (параметризация).

3. Изменение положения в составном теле его твердотельных конструктивных элементов – изменение расстояний между элементами и базовыми точками, между осями элементов, изменение наклона элемента, изменение углового расстояния между массивом элементов, повтор или отмена последнего перемещения.

4. Удаление, добавление, замена новым элементом существующего элемента составного тела.

5. Преобразования в дереве истории создания (обмен элементами в дереве истории, выделение их из дерева истории, дублирование элементов) и получение новых версий модели.

На рис. 2.16 приведен пример модификации сборки двух деталей, выполненной в результате операций с ветвями дерева истории создания, т. е. изменения последовательности элементов в топологических операциях.

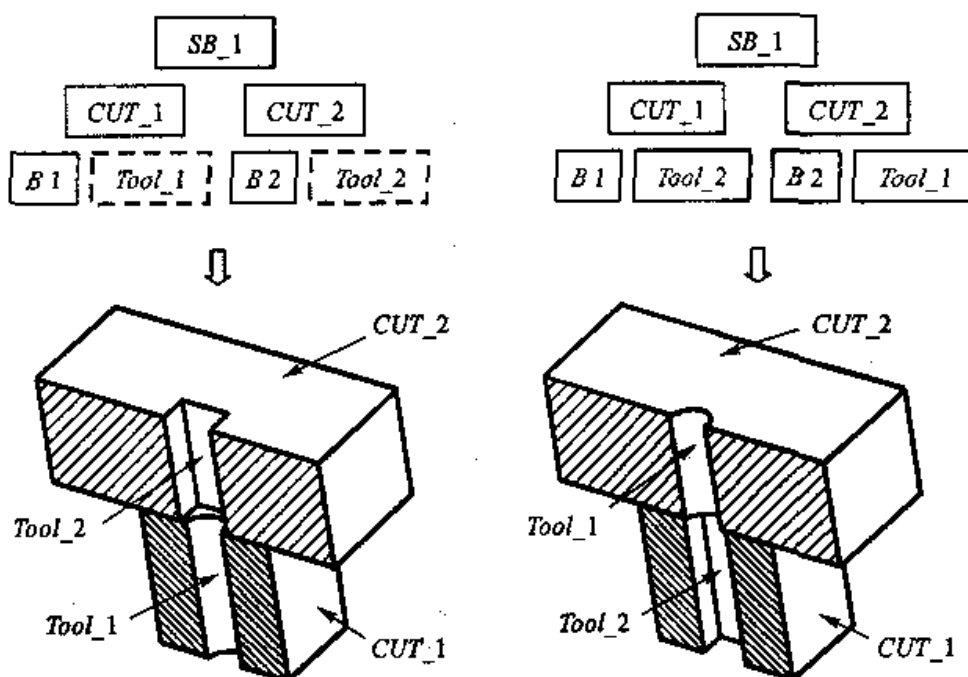


Рис. 2.16. Результаты модификации тела с использованием дерева его истории

Сборка **SB\_1** состоит из двух деталей – **CUT\_1**, **CUT\_2**. Деталь **CUT\_1** получена в результате вычитания из параллелепипеда **B1** цилиндрического отверстия **Tool\_1**, а деталь **CUT\_2** – в результате вычитания из параллелепипеда **B2** отверстия квадратной формы **Tool\_2**. Если поменять местами в дереве истории элементы **Tool\_1** и **Tool\_2**, то сборка автоматически перестроится.

Твердотельное моделирование наиболее часто используется в следующих случаях:

- при проектировании типовых деталей и узлов машиностроительных изделий;
- для выполнения модификации модели с использованием истории создания;

- для оценки свойств проектируемых деталей (площадь поверхности, масса, центр тяжести и т. п.);
- для контроля взаимного расположения деталей и работы механизма;
- для автоматизации подготовки конструкторской документации;
- для последующей обработки на станках с ЧПУ;

### Параметризация

В твердотельном моделировании реализованы два режима создания объектов - режим адаптивной (свободной) параметризации и режим принудительной параметризации.

В режиме **адаптивной параметризации** создается модель изделия без первоначальных позиционных ограничений на ее конструктивные элементы. Позволяет быстро и оперативно вносить изменения в модель. Можно в результате оперативного редактирования просмотреть различные варианты изделия и вернуться к первоначальному. При этом, не пропадает последовательность построения. На любом этапе модель может быть модифицирована.

**Принудительная** предполагает описание арифметическими выражениями или отношениями совокупности связанных друг с другом геометрических элементов конструкции. Любой параметр геометрического элемента можно представить его значением, переменной или выражением.

Например, рассмотрим параметризацию формообразующих контуров шатуна (рис. 2.17). Предположим, что его геометрические параметры заданы в виде следующих математических выражений:  $D1 = D2 = 80$ ,  $R1 = 25$ ,  $R1 + 10 = 35$ ,  $R2 = 15$ ,  $R2 + 10 = 25$ ,  $D1 - R1 - 15 = 40$ ,  $D2 - R2 - 15 = 50$ .

Используя эти параметрические контуры, можно построить тело шатуна как результат вычитания цилиндрических отверстий из внешнего объема, полученного пересечением двух призм (рис. 2.18).

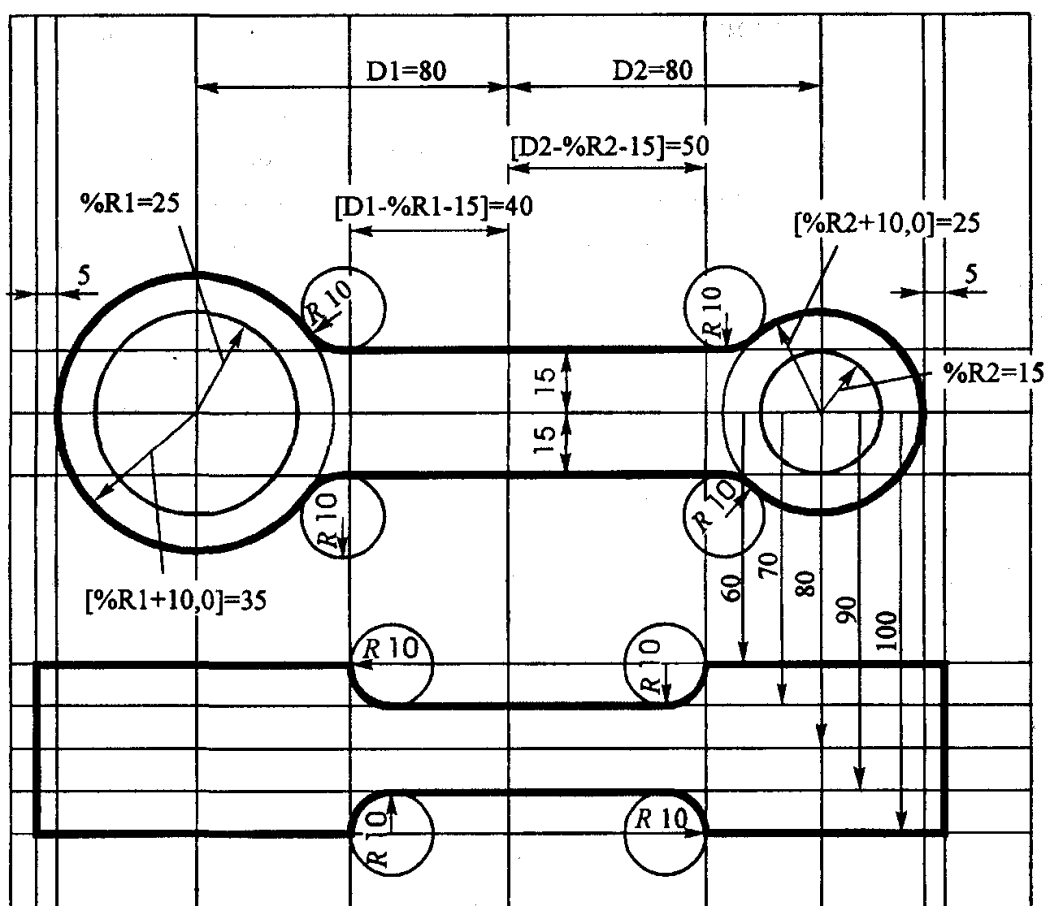


Рис. 2.17. Исходное параметризованное описание модели шатуна

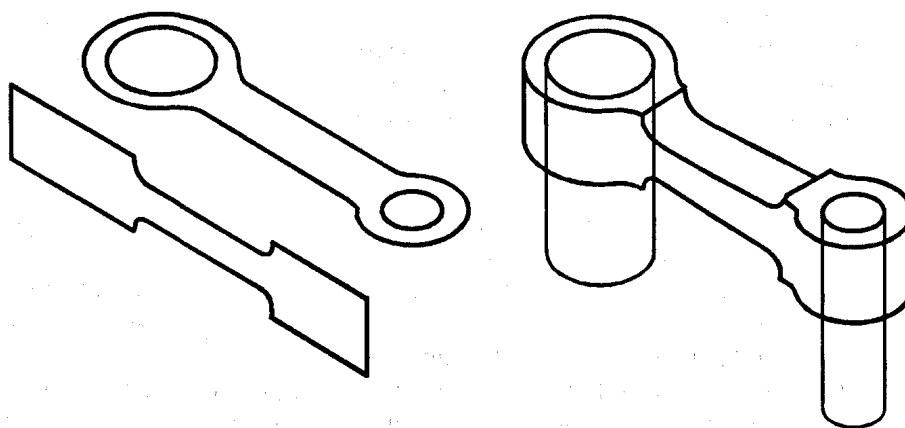


Рис. 2.18. Создание параметризованной объемной модели шатуна

При изменении одного параметра все связанные с ним элементы автоматически изменяются.

Если исходный контур используется для построения объемной модели, то модификация контура приведет к автоматическому обновлению модели.



Если параметризованные контуры и модель были сохранены в базе данных, модификация любого из них повлечет автоматическое редактирование другого, так как они связаны взаимными ссылками.

Поэтому любое изменение параметров конструктивных элементов тела шатуна приведет к редактированию математических выражений в параметрических контурах, формированию новой версии детали и автоматическому изменению ее формы (рис. 2.19).

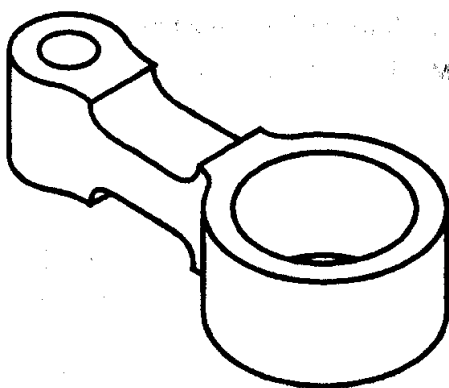


Рис. 2.19. Модель шатуна после модификации

### **Поверхностное моделирование**

С различной степенью полноты реализовано только в программных системах верхнего уровня: CATIA5, EUCLID3 (Франция), UNIGRAPHICS, Pго/ENGINEER и CADD5 (США).

Предназначено для:

- создания объектов сложной формы – поверхности деталей внешнего вида (самолеты, автомобили, бытовая техника);
- проектирования изделий, изготавливаемых штамповкой, и оформляющих элементов пресс-форм;
- проектирования изделий, изготавливаемых литьем, и их литевых форм.

**Поверхностное моделирование изделий позволяет:**

- достоверно представить изделия сколь угодно сложной формы;
- точно рассчитать их инерционно-массовые характеристики;
- проконтролировать взаимное расположение деталей, их собираемость;

- готовить управляющие программы для станков с ЧПУ

Деталь, построенная поверхностным моделированием, представляет собой пустотелую оболочку – «поверхность» (surface), состоящую из большого числа элементарных участков – «патчей» (patch-лоскут).

**Топологическая поверхность и патч** – основные понятия поверхностного моделирования.

**Поверхность** является одним из типов геометрических моделей и представляет собой границу двух полупространств, на которые она делит рабочее пространство.

Математически – это множество точек, координаты которых удовлетворяют системе уравнений

$$X = x(U, V), Y = y(U, V), Z = z(U, V),$$

где  $U, V$  – параметры.

Замкнутые и незамкнутые поверхности могут участвовать в топологических операциях.

Геометрические модели поверхностей являются аналитическими и в отличие от тел имеют единственное представление в структуре данных.

Поверхности не имеют истории создания.

Точность отображения на экране также регулируется коэффициентом полигонизации.

В программах обычно представлены два типа участков поверхностей – **базовые (или точные) и свободные**.

Различия определяются способом их формообразования. Причем, такое деление не означает, что свободные поверхности не могут быть точно изготовлены.

**Базовые поверхности** строятся на основе генераторов (линейчатые участки, поверхность вращения, параллелепипед, цилиндр, сфера, призма, конус, тор).

Точные участки используются для создания конструктивных элементов на сложных деталях и конструктивных элементов деталей, аналогичных построенным методом твердотельного моделирования.

**Свободные поверхности** (участки) (поверхности Безье, B-spline и др.) используются как для формирования видовых де-

талей (дизайна изделия), так и для построения сложных сопряжений на деталях, где обычные подходы не позволяют получать удовлетворительные результаты.

Над поверхностями могут выполняться сопряжения и топологические операции (сложение, вычитание, выделение части). При выполнении топологических операций над поверхностями результат может отличаться от результата аналогичных операций над телами. Поверхности можно преобразовать в тела или в адаптивные элементы.

Поверхности могут быть проанализированы на топологию (контроль дефектов), при этом могут быть точно рассчитаны их геометрические и инерционно-массовые характеристики (объем, масса, моменты инерции, площадь поверхности и др.).

Построение изделий методами поверхностного моделирования имеет определенные преимущества:

- многоэлементные поверхности обрабатываются как единые геометрические элементы (топологические поверхности);
- операции пересечения выполняются над поверхностью как над единым объектом;
- поверхности автоматически обрезаются при сопряжении или объединении;
- одну поверхность можно объединять с другими многоэлементными поверхностями;
- по заданной поверхности может быть построена сетка конечных элементов.

### ***Кривые***

Для построения кривой необходимо создать определенное количество точек. Ломаная линия, соединяющая заданные точки, называется **дескриптором** кривой, а точки – его **вершинами**.

Очередность создания вершин дескриптора задает направление кривой. Количество вершин в дескрипторе задает **класс** кривой.

**Порядок** кривой – это количество отрезков в ее дескрипторе. Первая вершина дескриптора является начальной точкой кривой, а последняя – конечной.

Кривая должна быть касательна к первому и последнему отрезкам дескриптора в начальной и конечной точках соответственно.

Положение точки на кривой задается параметром  $U$ .

Существуют несколько типов кривых: кривые Безье, B-spline и эквидистанты, которые различаются методами построения.

### Кривая Безье

На рис. 2.20 показан пример построения кривой Безье, которая формируется по дескриптору трех вершин. В начальной точке кривой  $U = 0$ , в конечной точке –  $U = 1$ .

Для определения положения третьей точки нужно соединить середины отрезков дескриптора и найти середину полученного отрезка. В этой точке параметр  $U = 0,5$ . Можно построить аналогичным образом еще несколько точек на различных расстояниях вдоль отрезков, пока не начнут вырисовываться очертания кривой.

На рис. 2.20 изображена кривая Безье третьего класса, второго порядка.

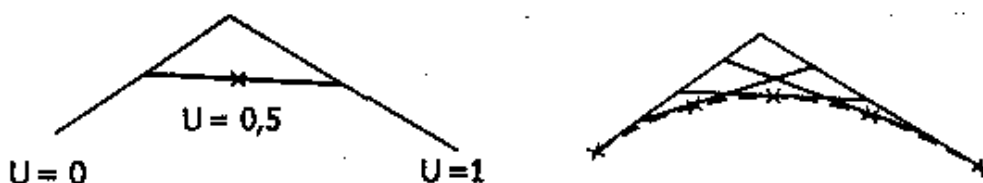


Рис. 2.20. Метод построения кривой Безье

### Кривая типа B-spline

B-spline – это непрерывная последовательность кривых третьего порядка. В граничных точках кривые имеют общие касательные. B-spline определяется одной линией – дескриптором.

Отрезки дескриптора делятся следующим образом (рис. 2.21):

- первый и последний отрезки не делятся;
- второй и предпоследний делятся пополам;
- промежуточные делятся на три отрезка.

Новые точки на отрезках соединяются и образовавшиеся отрезки делятся пополам. Середины являются точками сопряжения кривых Безье, а каждая кривая Безье строится как было описано.



Рис. 2.21. B-Spline и кривая Безье, построенные по одинаковым дескрипторам

### Патчи поверхности

В программах верхнего уровня встречаются различные виды патчей. Например, в системе EUCLID3 определено несколько их видов: ограниченные патчи, патчи поверхностей вращения и эквидистантные патчи.

**Ограниченный патч** формируется 3-я или 4-мя граничными кривыми.

**Патч поверхности вращения** – это аналитически точный патч, поскольку при построении используются: образующая поверхности вращения, ось и угол поворота образующей (так же как и для модели твердого тела), а не дескриптор.

**Эквидистантный патч** строится по ранее созданному патчу на заданном расстоянии по нормальям в каждой точке. Не имеет своего дескриптора.

Положение точки на поверхности патча описывается параметрами  $U$  и  $V$ . Координаты той же точки в декартовой системе координат являются функциями этих параметров, т. е.  $X(U,V)$ ,  $Y(U,V)$  и  $Z(U,V)$ . Когда значение одного из параметров ( $U$  или  $V$ ) постоянно, а значение другого изменяется от 0 до 1, точка лежит на изо-параметрической кривой (рис. 2.22).

### Патч поверхности Безье

Это геометрическое место точек, принадлежащих кривой Безье в процессе ее перемещения вдоль другой кривой Безье.

Дескриптор патча Безье – совокупность дескрипторов кривых Безье.

Каждая точка на патче поверхности Безье является точкой пересечения изопараметрических кривых с заданными значениями параметров  $U$  и  $V$  (рис. 2.22).

На рис. 22 изображена точка  $A$  с декартовыми координатами  $X = 10,987$ ,  $Y = 0,621$  и  $Z = 95,079$ , соответствующими параметрическим координатам  $U = 0,3$  и  $V = 0,7$ .

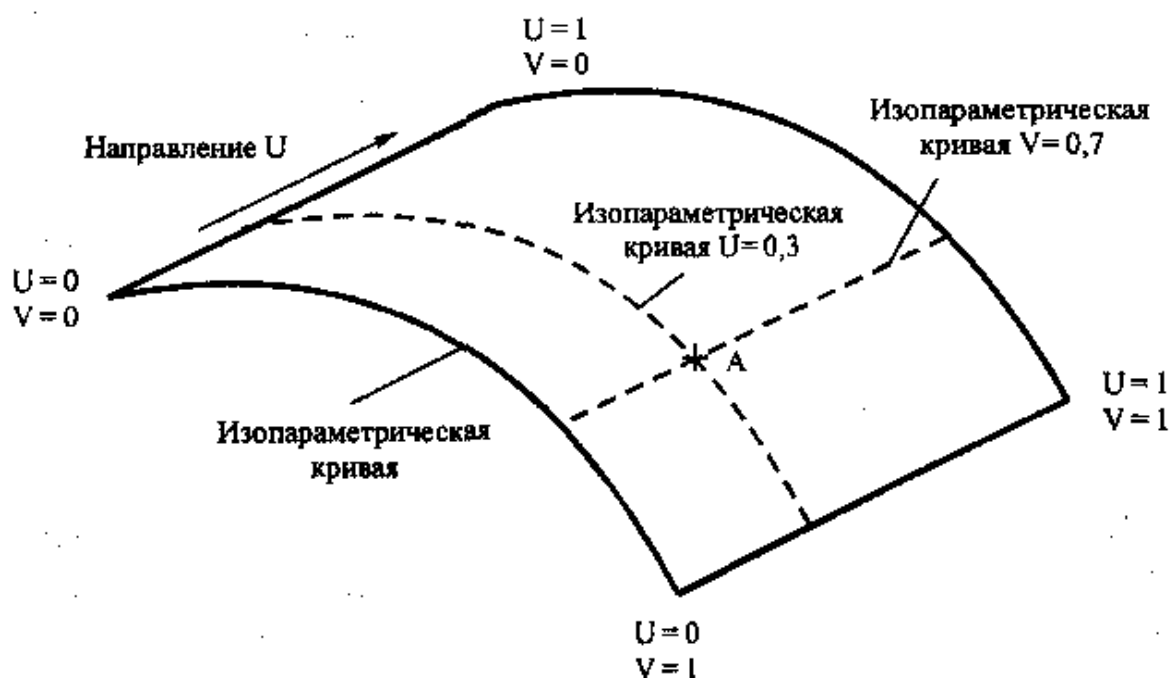


Рис. 2.22. Изопараметрические кривые на патче

### Патчи NURBS поверхности

Патчи NURBS (Non Uniform Rational B-spline) имеют ту же структуру, что и патчи поверхности вращения, а отображаются, как патчи Безье. Патчи NURBS поверхностей могут включать: патчи Безье порядка больше 9 и патчи B-spline.

Патчи поверхности могут: объединяться в одну поверхность, разбиваться на части. Из поверхности можно удалить часть ее патчей.

При модификации поверхности могут быть: разрезаны, сглажены, сопряжены.

Форму патча можно изменить путем редактирования положения вершин его дескриптора.

### **Адаптивные формы**

Объемное моделирование с помощью адаптивных форм (АФ) – промежуточная форма между твердотельным и поверхностным моделированием.

АФ сохраняют историю своего создания и могут участвовать в топологических операциях как тела, а также могут быть незамкнутыми, как поверхности.

Делятся на базовые и составные. Строятся они аналогично телам.

В отличие от операций над телами, топологические операции выполняются над замкнутыми или незамкнутыми АФ.

Созданные ранее тела и поверхности могут быть преобразованы в АФ.

Топологические операции над АФ:

- Объединение двух или группы элементов (рис. 2.23). В случае пересечения незамкнутых АФ результат объединения всегда можно выбрать;

- Вычитание одной АФ из другой;
- Пересечение между двумя адаптивными формами с одновременным скруглением получаемой общей части;
- Соединение двух незамкнутых АФ с общей границей.

#### **Способы модификации адаптивных форм:**

- изменение геометрии – модификация геометрических примитивов (редактирования параметров или образующих линий) или топологических операций путем обращения к ИС;

- изменение топологии – изменение типа топологических операций между двумя адаптивными формами. В этом случае нельзя редактировать составные адаптивные формы;

- изменение сопряжений – создание или редактирование сопрягающих радиусов скругления;

- изменение структуры – удаление, замена или извлечение геометрических примитивов из адаптивных форм. Можно модифицировать ИС путем удаления примитивов или замены одних форм другими;

- изменение положения геометрических примитивов в адаптивной форме (расстояния от ссылочной точки, угла наклона по отношению к ссылочной плоскости, расположения осей).

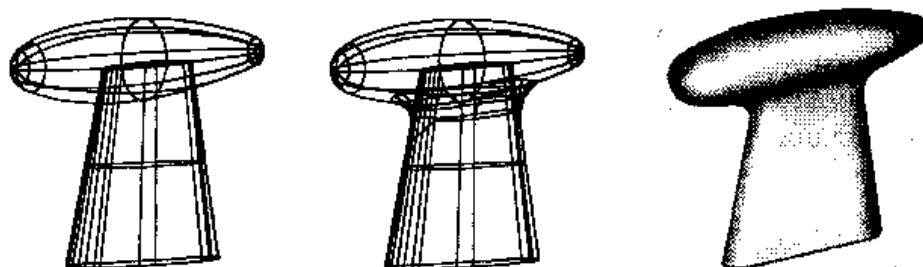


Рис. 2.21. Объединение преобразованной в адаптивную форму поверхности («сигары») с адаптивной призмой



## ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**Цель работы:** изучение методов и программного обеспечения для реализации инженерного анализа в машиностроении. Изучение основ моделирования методом конечных элементов.

Многообразие физических процессов в наукоемких изделиях привело к созданию огромного числа специальных методик, алгоритмов и программ анализа машиностроительных изделий.

В концепции CALS-технологий программы анализа можно условно разделить на 4 основные группы:

- программные системы проектирования;
- универсальные программы анализа;
- специализированные программы анализа;
- программы анализа систем управления.

**Программы 1-ой группы** – объединяют процессы конструирования и анализа в едином комплексе, о них уже шла речь. Это CATIA5, EUCLID3, UNIGRAPHICS и др. – системы верхнего уровня.

При их использовании не возникают трудности с созданием сложной и математически точной модели изделия. Также хорошо организован обмен между подсистемами конструирования и анализа – обе подсистемы оперируют одной базой данных или имеют внутренние форматы данных. Состав различных видов анализа ограничен по сравнению с составом универсальных программ.

**2-я группа** – универсальные программы анализа машиностроительных изделий. Мировыми лидерами в этой области – ANSYS, Inc. (США), SAMTECH (Бельгия), MacNeal Schwendter Corporation (MSC) (США).

В 1970-е годы одним из ведущих методов компьютерного моделирования стал метод конечно-элементного анализа (FEA). Благодаря этому инженерный анализ стал повсеместным и перерос в мощное направление, получившее свое воплощение в системах автоматизированного анализа (CAE).

Ведущей многоцелевой программой семейства программ ANSYS Inc. является ANSYS/Multiphysics. В дополнение к ней

создано подмножество автономных, специализированных пакетов, расширяющих возможности основной программы:

- ANSYS/Mechanical – решение задач прочности, теплопередачи и акустики. Расчет и оптимизация конструкции, определение перемещений, напряжений, усилий, давлений и температур;
- ANSYS/Structural – прочностной анализ проектируемого изделия с учетом геометрических и физических нелинейностей, нелинейного поведения конечных элементов и потери устойчивости;
- ANSYS/LinearPlus – упрощенная версия пакета ANSYS/Mechanical для решения задач линейной статике, динамики и устойчивости конструкции;
- ANSYS/Thermal – анализ стационарных и нестационарных тепловых процессов;
- ANSYS/PrePost – предназначен для построения конечно-элементной сетки на стадии подготовки задачи и обработки результатов решения в требуемом виде;
- ANSYS/FLOTTRAN – решение задач гидроаэродинамики, включая ламинарное и турбулентное течение несжимаемых или сжимаемых потоков;
- ANSYS/Emag – используется для моделирования электромагнитных полей;
- ANSYS/LS-DYNA – решение прочностных задач динамики с учетом больших нелинейностей – это поведение изделия при столкновениях и ударах, при конечных деформациях, а также задачи нелинейного поведения материала и т. п.

Компанией SAMTECH разработана универсальная система анализа SAMCEF, все расчетные модули которой связаны с единым графическим пре- и постпроцессором BACON. Модули:

- THERNL – нелинейный температурный анализ стационарных и переходных режимов; расчет задач электропроводности, конвекции, излучения. Исследования электрических и тепловых явлений, связанных с ударом молнии или искровым разрядом;
- ASEF – линейный статический анализ с учетом нелинейных условий;
- SPECTRAL – расчет случайных характеристик усталостных разрушений, базирующийся на спектральном анализе;

- REPDYN – анализ переходных, гармонических и сейсмических процессов;

- STABI – определение условий потери устойчивости конструкции;

- DYNAM – расчет собственных частот упругих систем.

Дополнительные разработки этой фирмы:

- MECANO/STRUCTURE – совместный нелинейный анализ структуры и податливости элементов механизмов;

- COMPOSITES – база данных композитных материалов;

- ROTOR – инструмент динамического анализа вращательных механизмов.

Программные разработки фирмы MSC это:

- MSC.NASTRAN – анализ линейной и нелинейной статики и динамики, устойчивости, теплопередачи, акустики, аэроупругости, оптимизации конструкций;

- MSC.PATRAN – интегрированная среда систем моделирования, анализа и проектирования;

- MSC.DYTRAN – анализ высоконелинейных быстротекущих динамических процессов. Столкновение конструкций с разрушением, попадание предметов в авиадвигатель, обрыв лопатки, взрывы, штамповка металла и т. д.;

- MSC.MARC – комплексный нелинейный анализ конструкций и решение сложных задач термпрочности;

- MSC.FATIGUE – анализ ресурса и долговечности. Усталость, появление и рост трещин, оптимизация конструкции по критерию долговечности;

- MSC.CFDesign – газо- и гидродинамика. Задачи течения жидкости и газа с учетом тепловых процессов;

- MSC.NVII Manager – комплексный анализ акустики, вибраций и устойчивости автомобиля;

- MSC.AMS – пре- и постпроцессор для моделирования конструкции автомобиля;

- MSC.Flight Loads&Dynamics – комплексный анализ аэроупругих, динамических и прочностных характеристик летательных аппаратов;

- MSC.MVISION – база данных о свойствах материалов.

Универсальные программы используются при проектировании изделий: машиностроения, судостроения, аэрокосмической и электротехнической отраслей.

Позволяют выполнять различные виды инженерного анализа: статический и динамический анализ, анализ устойчивости, нелинейный температурный анализ, спектральный анализ, расчет электрического поля, анализ упругих механизмов, усталостные разрушения, анализ явлений вязкопластичности и др.

Многоцелевая направленность программ позволяет также применять их для решения смешанных задач: анализ прочности при тепловом нагружении, влияние магнитных полей на прочность конструкции, тепломассоперенос в электромагнитном поле.

В универсальные программы анализа включены собственные средства построения геометрической модели изделия, однако их возможности намного слабее по сравнению с программными системами 3D проектирования.

Все универсальные программы анализа имеют стандартные форматы обмена графической информацией с пакетами конструирования. При необходимости геометрическая модель проектируемого изделия может быть предварительно создана на этапе конструирования в САД-системе.

**3-я группа** – это многочисленные специализированные программы. Среди них:

- пакет MSCSuperForge (фирма MSC) – предназначен для объемного моделирования процессов штамповки иковки;
- Euler (Автомеханика) – динамический анализ многокомпонентных механических систем;
- ИСПА (АЛЕКСОФТ) – расчет и анализ на прочность;
- ПОЛИГОН (ЦНИИ материалов) – система моделирования литейных, гидродинамических, тепловых и усадочных процессов в 3D-постановке;
- РИМАН (ПроПроГруппа) – расчет и анализ напряженно-деформированного состояния конструкций, решение упругих и пластических задач, в том числе штамповки и ударных напряжений;
- АРМ WinMachine (НТЦ АПМ) – комплекс программ для проектирования и расчетов деталей машин, анализа напряженно-деформированного состояния конструкций и их элементов;

- ДИАНА (НИЦ АСК) – анализ конструкций и их элементов.

К сожалению, многие из перечисленных пакетов не имеют стандартных интерфейсов, и их использование в сквозных процессах проектирования проблематично.

**4-я группа** – специальные программы для исследования динамических процессов, протекающих в системах автоматического регулирования и управления: MATRIX, Simulink, VisSim, EASY5, MBTU.

### **Постановка задачи конечно-элементного анализа**

Различные виды анализа, выполняемые в программах 1-й, 2-й и 3-й групп, основаны на классических инженерных подходах к разработке математических моделей поведения изделия при различных воздействиях.

В конечно-элементной постановке задачи моделирования исследуемая область предварительно разбивается на ограниченное множество конечных элементов, связанных между собой конечным числом узлов.

Искомými переменными уравнений математических моделей являются перемещения, повороты, температура, давление, скорость, потенциалы электрических или магнитных полей. Эти переменные определяют степени свободы узлов. Конкретное содержание зависит от типа (физической природы) элемента, который связан с данным узлом. Например, в задачах прочностного анализа для каждого элемента с учетом степеней свободы его узлов могут быть сформированы матрицы масс, жесткости (или теплопроводности) и сопротивления (или удельной теплоемкости).

Множество степеней свободы, определяющих состояние всей системы в данный момент, называют **волновым фронтом**, который может расширяться или сужаться по мере того, как неизвестные переменные вводятся в рассматриваемую совокупность или исключаются из нее.

После прохождения волнового фронта через все элементы и вычисления всех искомых переменных анализируются полученные результаты и строятся гипотезы о поведении исследуемого изделия.

В постановке задачи прочностного динамического анализа учитывается возмущающее воздействие, которое является функцией времени.

Можно принимать во внимание рассеяние энергии, инерционные эффекты и переменные во времени нагрузки. Примерами таких нагрузок являются:

- циклические нагрузки (например, вращение коленчатого вала двигателя);
- внезапно прикладываемые нагрузки (удар или взрыв);
- случайные нагрузки и любые другие переменные нагрузки.

Общее уравнение движения в конечно-элементной форме записывается в виде:

$$MU'' + CU' + KU = F(t),$$

где  $M$ ,  $C$ ,  $K$  – матрицы соответственно масс, сопротивлений, жесткостей;  $U''$ ,  $U'$ ,  $U$  – векторы соответственно узловых ускорений, узловых скоростей, узловых перемещений;  $F$  – вектор нагрузок;  $t$  – время.

Искомые переменные системы уравнений – это элементы вектора узловых перемещений  $U$ , которые в любой момент времени должны удовлетворять условиям равновесия системы при наличии сил инерции и рассеяния энергии.

Если действие сил инерции или процессы рассеяния энергии пренебрежимо малы и не оказывают существенного влияния на поведение изделия, то задача может быть сформулирована в виде статического прочностного анализа.

Такой тип анализа наиболее часто используется, например, для определения концентрации напряжений в галтелях конструктивных элементов или для расчета температурных напряжений, для определения перемещений, напряжений, деформаций и усилий в результате приложения механических сил.

Уравнение статического анализа записывается в виде:

$$KU = F,$$

где  $K$  – матрица жесткостей;  $U$  – вектор перемещений;  $F$  – вектор сил.

Компоненты вектора сил: сосредоточенные силы, тепловые нагрузки, давления и силы инерции. В процессе анализа можно учитывать такие нелинейные свойства, как пластичность и ползучесть материала, большие прогибы, большие деформации и контактное взаимодействие при условии, что нагрузки возрастают постепенно.

### **Библиотека конечных элементов**

В каждой программе, реализующей конечно-элементный анализ, описывается совокупность используемых элементов. Чем шире набор и функциональные свойства элементов, тем большими возможностями обладает тот или иной программный комплекс.

Примеры некоторых конечных элементов, их графическое представление и краткое описание приведены в табл. 3.1. Эти и многие другие сведения об элементах можно найти в специальной литературе.

Конечные элементы группируются по назначению:














- стационарного и нестационарного теплообмена;
- для моделирования вязкоупругих и вязкопластичных материалов;
- сплошной среды для анализа движения потоков жидкости и газа, решения задач гидроаэромеханики, акустики и течения сред в каналах;
- для расчета статических и динамических напряжений;
- для анализов, включающих как тепловые, так и электрические эффекты;
- для анализа произвольно меняющихся во времени магнитных полей;
- элементы связанной задачи для расчетов, в которых учитывается взаимовлияние результатов двух или более видов анализа (прочностного, теплового, магнитного, сплошной среды, электрического);
- элементы для моделирования нелинейного контакта;
- элементы комбинированные, матричные, поверхностные и др.

Таблица 3.1

Название элемента	Графическое представление	Количество узлов	Размерность пространства	Степени свободы
Стержень		2	2D	Перемещения (X, Y)
Упругая балка		2	2D	Перемещения (X, Y), вращение (Z)
Гибкая нить		2	3D	Перемещения (X, Y), вращение (Z)
Упругая балка		2	3D	Перемещения (X, Y, Z), вращение (X, Y, Z)
Треугольный твердотельный элемент		6	2D	Перемещения (X, Y)
Осесимметричный твердотельный элемент для гармонического анализа		4	2D	Перемещения (X, Y, Z)
Прочностной твердотельный элемент		4	2D	Перемещения (X, Y)
Прочностной твердотельный элемент		8	3D	Перемещения (X, Y)
Прочностной оболочечный элемент		8	3D	Перемещения (X, Y, Z), вращение (X, Y, Z)
Оболочечный элемент с конечными деформациями		4	3D	Перемещения (X, Y, Z), вращение (X, Y, Z)
Прочностной твердотельный элемент		8	3D	Перемещения (X, Y, Z)
Твердотельный элемент со степенями поворота		4	3D	Перемещения (X, Y, Z), вращение (X, Y, Z)
Прочностной твердотельный элемент		20	3D	Перемещения (X, Y, Z)



Продолжение таблицы 3.1

Вязкоупругий твердотельный элемент		20	3D	Перемещения (X, Y, Z)
Твердотельный элемент с конечными деформациями		8	2D	Перемещения (X, Y, Z)
Прочностной твердотельный элемент		8	3D	Перемещения (X, Y, Z), скорости (X, Y, Z), вектор магнитных потенциалов (X, Y, Z)
Гиперупругий смешанный U-P-твердотель- ный элемент		4	3D	Перемещения (X, Y, Z)
Гиперупругий твердотельный элемент		8	3D	Перемещения (X, Y, Z)
Теплопроводящий стержень		2	3D	Температура
Осесимметричный тепловой твердо- тельный элемент для гармоничес- кого анализа		4	2D	Температура
Тепловой твердотельный элемент		8	3D	Температура
Прочностной твердотельный элемент		20	3D	Температура
Акустический элемент сплошной среды		4	3D	Перемещения (X, Y), давление
Трубчатый элемент тепло- массообмена		2	3D	Температура, давление
Элемент контакта		4	3D	Перемещения (X, Y, Z)
Электро- статический твердотельный элемент		20	3D	Напряжение

Продолжение таблицы 3.1

Твердотельный элемент связанной задачи (тепло+электричество)		4	2D	Температура, напряжение
Источник тока		2	2D	Скалярный магнитный потенциал
Твердотельный элемент связанной задачи		4	2D	Перемещения (X, Y), температура, напряжение, вектор магнитных потенциалов (Z)
Твердотельный элемент связанной задачи		8	3D	Перемещения (X, Y, Z), температура, напряжение, скалярный магнитный потенциал
Осесимметричный гармонический элемент для анализа течения среды в каналах		4	2D	Перемещения (X, Y, Z)
Элемент теплообмена модуля FLOTTRAN		8	3D	Перемещения (X, Y, Z), давление, температура, кинетическая энергия турбулентного потока, параметр рассеяния турбулентной энергии
Амортизатор		2	3D	Перемещения (X, Y, Z), вращение (X, Y, Z), давление, температура
Элемент пограничного эффекта		8	3D	Перемещения (X, Y, Z), температура
Матричный элемент жесткости, массы или сопротивления		2	3D	Перемещения (X, Y, Z), вращение (X, Y, Z)
Элемент условий на бесконечность		4	3D	Вектор магнитных потенциалов (Z), напряжение, температура

Конечные элементы предназначены для формализации задач в двумерной (2D) или трехмерной (3D) постановке. Графическими примитивами элементов являются «узел», «связь», «грань».

Элементы могут быть линейными или нелинейными (с промежуточными узлами в середине связи). Нелинейные элементы позволяют получать более достоверные результаты.

### **Препроцессорная подготовка**

Конечно-элементный анализ состоит из трех основных этапов:

- начальной (препроцессорной) подготовки;
- получения решений;
- обработки результатов моделирования (постпроцессорной обработки).

Среди задач, 1-го этапа: создание модели изделия, создание сеточной модели, контроль качества сеточной модели и ее модификацию, определение данных и ограничений и др.

**Типы моделей:** геометрическая, расчетная и сеточная.

**Геометрическая** модель обычно представляет собой модель машиностроительного изделия в целом или его детали.

**Расчетная** модель — это упрощенная геометрическая модель, которая используется для анализа. Упрощение или идеализация геометрической модели достигается путем удаления тех ее элементов, которые несущественно влияют на результаты анализа.

**Сеточная** модель представляет собой совокупность узлов и элементов, которая накладывается на расчетную модель. Как уже отмечалось, геометрическая и расчетная модели обычно создаются на этапе конструирования средствами твердотельного и поверхностного моделирования.

### **Построение сеточной модели**

В универсальных программах существует несколько способов генерации сетки. Например, в ANSYS используются методы экструзии, создания упорядоченной сетки, создания произвольной сетки и адаптивного построения.

**Экструзия (выдавливание)** — способ построения 3D модели сетки путем сдвига основания в определенном направлении

или вращения поперечного сечения вокруг заданной оси (рис. 3.1).

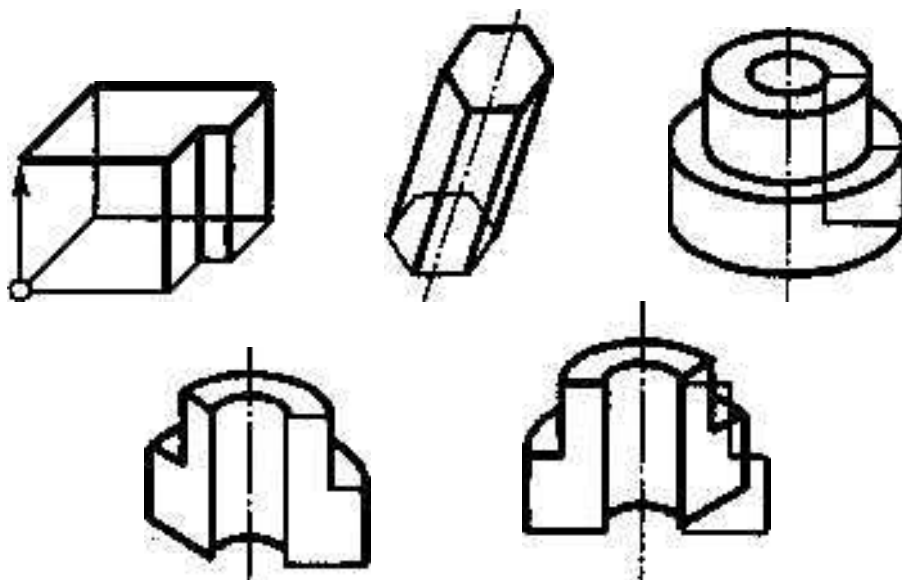


Рис. 3.1. Генерация элементов сетки методом экструзии

Основание, на котором строится экструзия, может быть скомпоновано из узлов или одно- и двумерных элементов. Можно использовать результат экструзии в качестве основания следующей экструзии. Например, при помощи экструзии одномерного элемента будет получен двумерный элемент, который может быть использован как основание для экструзии трехмерного элемента.

При построении **упорядоченной сетки** расчетная модель предварительно разбивается на участки с простой геометрией, вводятся ограничения и критерии качества сеточной модели, затем запускается генерация сетки.

В различных программах анализа имеются специальные средства генерации **произвольной сетки**, с помощью которых она может наноситься непосредственно на модель достаточно сложной геометрии. Строится из треугольных, четырехугольных и четырехгранных элементов. Генераторы произвольной сетки обладают широким набором функций управления качеством сетки, например, в ANSYS реализован алгоритм выбора размеров конечного элемента.

На предварительном этапе проверяется качество сетки, а именно выявляются и предъявляются пользователю незамкнутые элементы и элементы с несогласованной ориентацией.

**Адаптивное построение сетки** состоит в том, что после создания расчетной модели и задания граничных условий генерируется конечно-элементная сетка, затем выполняется анализ, оценивается ошибка дискретизации сетки, после чего меняется размер сетки. Процесс протекает до тех пор, пока значение погрешности не станет меньше заданного, или число итераций не достигнет допустимого значения.

Программы могут выполнять контроль соответствия элементов расчетной и сеточной моделей, вводить, удалять и изменять положение конечных элементов, обеспечивая тем самым формирование сетки высокого качества (рис. 3.2).

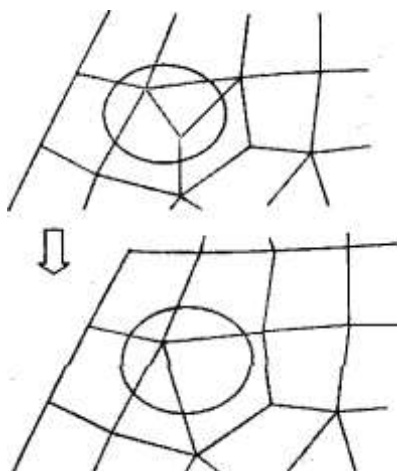


Рис. 3.2. Редактирование элементов сетки

### **Определение данных и ограничений**

Исходные данные анализа, введенные на этапе предварительной подготовки, становятся частью базы данных пакета. Содержанием базы данных являются: множества типов элементов, свойств материала, параметров узлов, нагрузок и др., которые соответствующим образом группируются.

Для описания свойств материала изделия используются параметры, необходимые для выполнения требуемого вида анализа. Так, в **прочностном анализе** учитываются модуль упругости (модуль Юнга), коэффициент теплового расширения при задан-

ной температуре, коэффициент Пуассона, плотность, коэффициент трения, модуль сдвига, коэффициент внутреннего трения.

Для проведения **теплового анализа** следует задать удельную теплоемкость, энтальпию, коэффициент теплопроводности, коэффициент конвективной теплоотдачи поверхности, степень черноты и т. д.

Необходимые параметры материалов содержатся в соответствующих библиотеках. Свойства могут быть постоянными, нелинейными или зависеть от температуры. Списки существующих материалов в БД могут быть дополнены новыми материалами.

### **Управление работой решателя**

Прежде чем конкретный вариант задачи будет передан на расчет, выполняются проверка и подтверждение входных данных анализа на соответствие их выбранному методу решения задачи и настройкам опций решателя.

После проверки запускается процесс вычисления, требующий значительных ресурсов компьютера. В значительной степени потери времени зависят от выбранного решателя. Многочисленные решатели разных фирм-разработчиков используют различные алгоритмы решения систем уравнений.

Решатели **явного типа**, к которым относится фронтальный решатель, определяют точное решение для совместной системы линейных уравнений. Например, фронтальный решатель программы ANSYS использует так называемый Rank-n алгоритм, обеспечивающий параллельную обработку системы уравнений. Решатель явного типа ANSYS/LS-DYNA фирмы Livermore Software Technology (США) дает возможность эффективно проводить анализ динамических процессов.

**Итеративные** решатели при расчетах систем совместных линейных уравнений дают сходящееся, от итерации к итерации приближенное решение, сокращают время решения и экономят ресурсы компьютера при анализе больших моделей.

### **Постпроцессорная обработка результатов**

Существуют следующие возможности представления результатов:

- области напряжений, деформаций, температур и т. д. отображаются в виде геометрии или сетки.

- визуализация предельных значений полей напряжений, деформаций или температур.

- визуализация деформированного состояния на исходном объеме.

- графическое представление значений результата в виде:

- объемной оболочки – показывает значения на внешней оболочке объема;

- плоского сечения – показывает значения внутри объема, разрезая геометрию плоскостью и двигая это сечение в любом направлении внутри объема от места максимального значения до места минимального значения;

- патча поверхности – показывает результаты внутри объема в виде изоповерхности, она искажается, изображая значения от нижней границы до верхней границы результата.

- анимация любого из графических режимов.

- листинг результатов – интерактивное окно с числовыми результатами, позволяет вести обработку полученных значений, например, сортировать по порядковому номеру или величине.

- оценка погрешности результатов в линейном статическом анализе для объемных элементов. Ошибки представляются в виде:

- абсолютной ошибки (в единицах параметра, например давления);

- относительной ошибки напряжения (в %);

- количества элементов, имеющих совокупную ошибку, более 10 %.

- Режим отображения результата (способ представления):

- градуированное цветоделение до 10 цветов;

- тонирование – спектр от синего до красного;

- символьный – стрелки вектора в узлах или многогранники, размер и цвет которых отражают величину соответствующего значения;

- цифровой – значения параметра располагаются в центре элемента или в узле.

Работа № 4

## МЕТОДОЛОГИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. СТАНДАРТЫ IDEF

Цель работы: научиться моделировать процессы с использованием методологии функционального моделирования SADT, реализованной в стандартах группы IDEF.

Анализ и моделирование любого процесса или объекта, как правило является сложной многопараметровой задачей, решение которой помимо прочего зависит от точки зрения автора модели.

Учитывая это, разработана и широко используется методология функционального моделирования SADT (Structured Analysis and Design Technique), позволяющая наглядно представить моделируемые объекты или процессы.

Такой подход позволяет определить суть решаемой проблемы, выявить и в дальнейшем установить необходимые взаимосвязи внутри системы с учетом точки зрения автора.

### Основные принципы построения моделей стандарта IDEF0

IDEF0 – это более строгая реализация методологии SADT. Начиная с момента создания первой версии, методика успешно применялась для проектирования телефонных сетей, систем управления воздушными перевозками, производственных предприятий и др.

Описание объектов и процессов в IDEF0 выполняется в виде совокупности взаимосвязанных блоков (рис. 4.1), называемых блоками ICOM (Input-Control-Output-Mechanism), где I – вход, C – управление, M – механизм, O – выход.

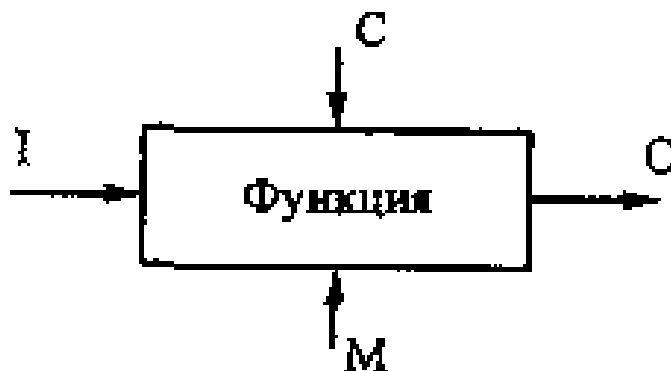


Рис. 4.1. Блок ICOM



Сами блоки представляют функции (работы), и их названия выражаются глаголами или отглагольными существительными.

Типичные примеры: планировать, разработать, классифицировать, измерить, изготовить, отредактировать, рассчитать, продать (или планирование, разработка, классификация, измерение, изготовление, редактирование, расчет, продажа).

Число блоков на одном уровне иерархии – не более 6, иначе восприятие диаграмм будет затруднено.

Число уровней иерархии не ограничено, но обычно – не более 5.

Блоки в диаграммах IDEF0 связаны дугами (стрелками), которые отображают множества объектов (данных).

**Управление (control)** определяет условия выполнения. Примеры управления: требования, чертеж, стандарт, указания, план.

**Механизм (mechanism)** выражает используемые средства, например: компьютер, САПР, оснастка, заказчик, фирма.

**Входы и выходы** могут быть любыми объектами.

Пример диаграммы IDEF0 показан на рис. 4.2, где представлены функции, выполняемые на начальных этапах процесса реинжиниринга предприятия.

На диаграмме показаны 4 этапа подготовки к реинжинирингу на предприятии. После формулировки заказа на перестройку процессов функционирования на базе информатизации управления проводится обследование предприятия, выявляются его структура, информационные потоки между подразделениями, внешние информационные связи, степень компьютеризации, наличие вычислительной сети и т. п.

На основании полученных данных составляется функциональная модель As Is («как есть») и разрабатывается модель To Be («как должно быть»). Эта модель верхнего уровня далее конкретизируется, каждая из функций раскрывается более подробно на диаграммах следующих уровней.

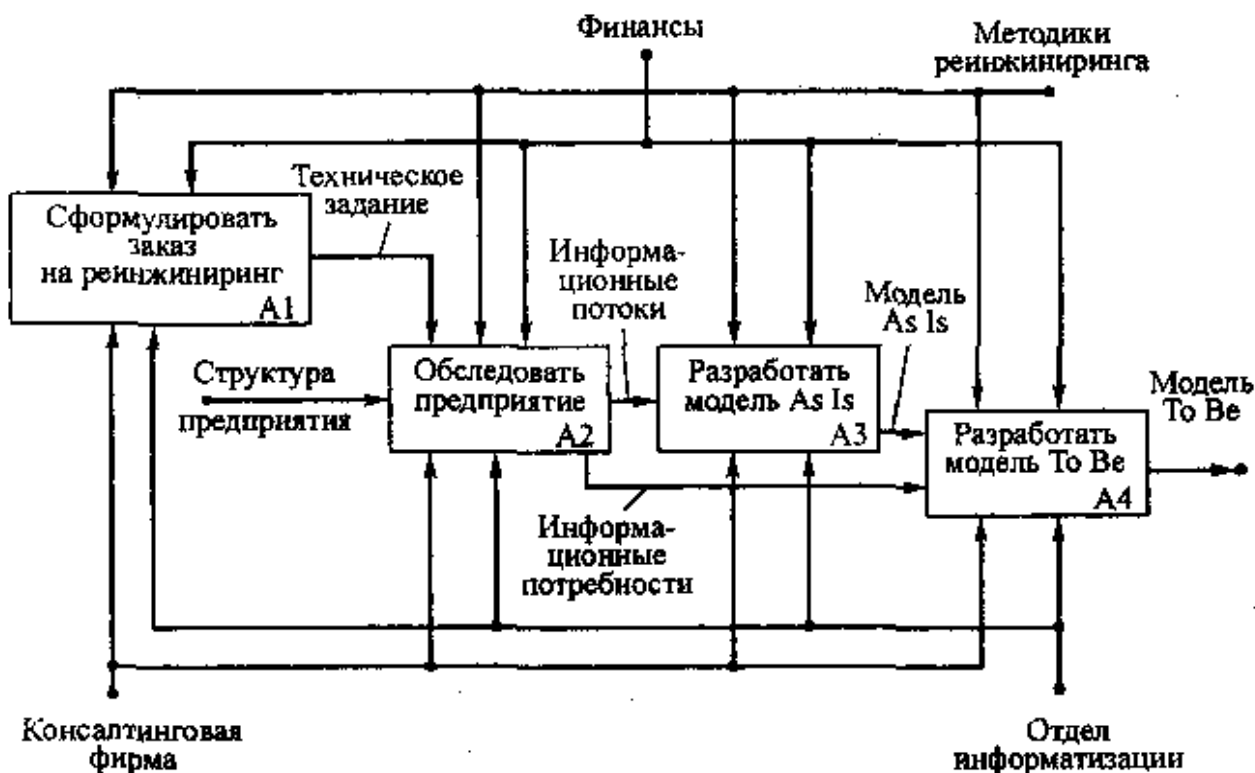


Рис. 4.2. Пример IDEF0 – диаграммы

### Примеры моделей

**Пример 1.** Модель управления параметрами механического состояния поверхностного слоя металла на стадии упрочняющей обработки размерным совмещенным обкатыванием (PCO)».

Модель начинается с представления системы как единого целого - прямоугольника с взаимодействиями, простирающимися за пределы системы. В рамках данного примера в качестве контекстной выбрана функция «Управлять параметрами механического состояния поверхностного слоя металла на стадии PCO с целью обеспечения заданной циклической долговечности детали». На контекстной диаграмме определены и описаны основные взаимодействия (стрелки), которые активируют родительскую функцию (рис. 4.3).

В рассматриваемом примере в качестве входа принято состояние поверхностного слоя детали *C0*, поступающей на стадию обработки PCO, которое характеризуется параметрами, наследуемыми от предыдущей операции механической обработки. Индексом обозначена стадия предшествующего нагружения (до выполнения данной функции).

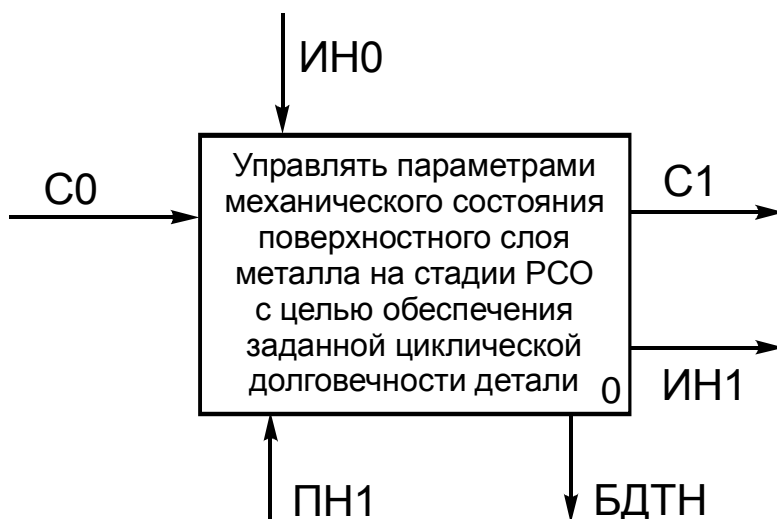


Рис. 4.3. Контекстная диаграмма уровня *A0*

В качестве управляющего воздействия на стадии РСО принята история нагружения **ИНО**, описываемая в терминах и категориях механики технологического наследования (рис. 4.3).

В соответствии с представлениями автора в процессе обработки РСО, как и при любом другом процессе механической обработки, происходит изменение состояния поверхностного слоя, которое выражается в накоплении деформации, частичном исчерпании запаса пластичности и формировании тензора остаточных напряжений.

Продуктом выполнения функции является измененное состояние поверхностного слоя после текущей стадии обработки РСО **С1**.

Помимо **С1**, результатом выполнения функции является также история нагружения **ИН1**, измененная на текущей стадии нагружения.

В качестве механизма реализации функции принята программа нагружения **ПН1**, которая определяет протекание процесса пластической деформации на стадии РСО и при этом сама определяется совокупностью параметров режима обработки, назначаемого технологом.

В рамках данной модели осуществляется запрос к внешней (за пределами модели) базе данных технологического наследования **БДТН** с целью получения информации о правилах формирования очагов деформации, состояния поверхностного слоя

и реализации механизма обеспечения оптимальной долговечности и эксплуатационных свойств поверхностного слоя детали.

Одна из наиболее важных особенностей методологии SADT состоит в постепенной детализации описания модели.

Декомпозиция контекстной диаграммы производилась путем построения диаграмм-потомков (рис. 4.4).

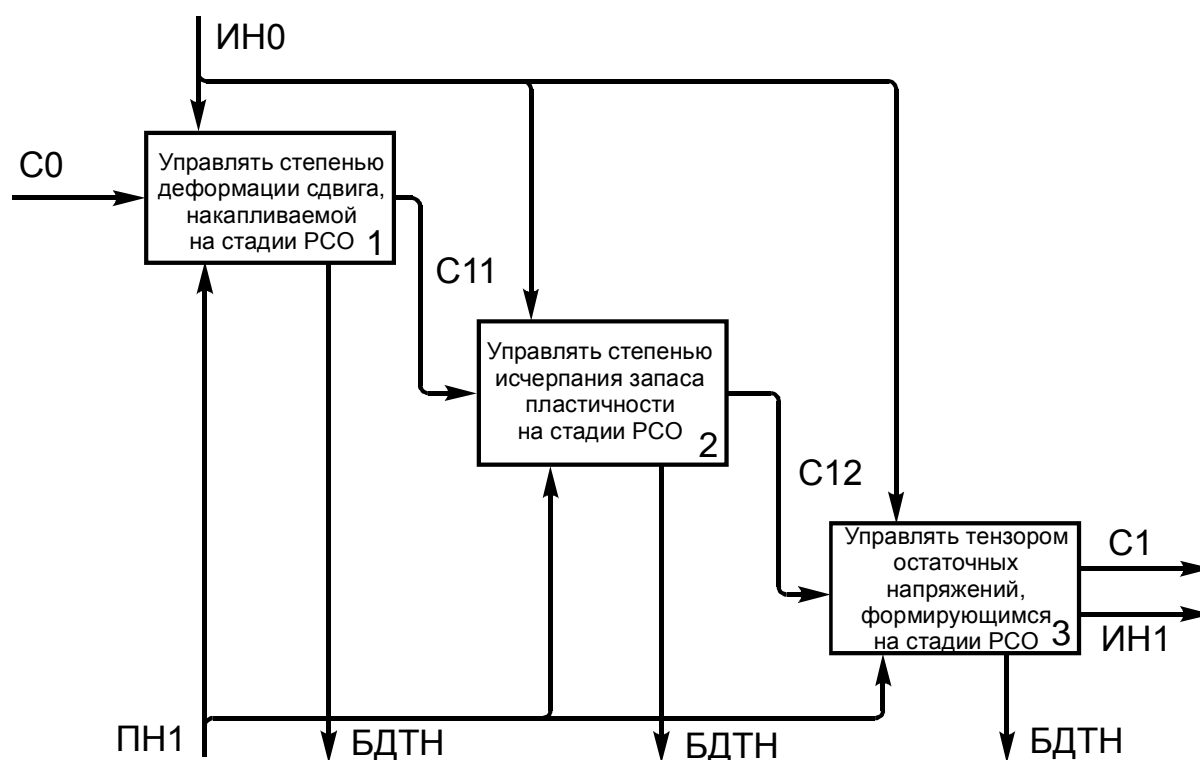


Рис. 4.4. Декомпозиция диаграммы уровня **A0**

Отличительными особенностями детализированной диаграммы уровня **A0** являются:

1. Каждый блок диаграммы представляет основную подфункцию исходной функции (блок **A0**).

2. Обеспечение заданной циклической долговечности осуществляется путем одновременного управления тремя основными интегральными параметрами – степенью деформации сдвига (блок **A1**) (рис. 4.5), степенью истощения запаса пластичности (блок **A2**) (рис. 4.6) и тензором остаточных напряжений (блок **A3**) (рис. 4.7).

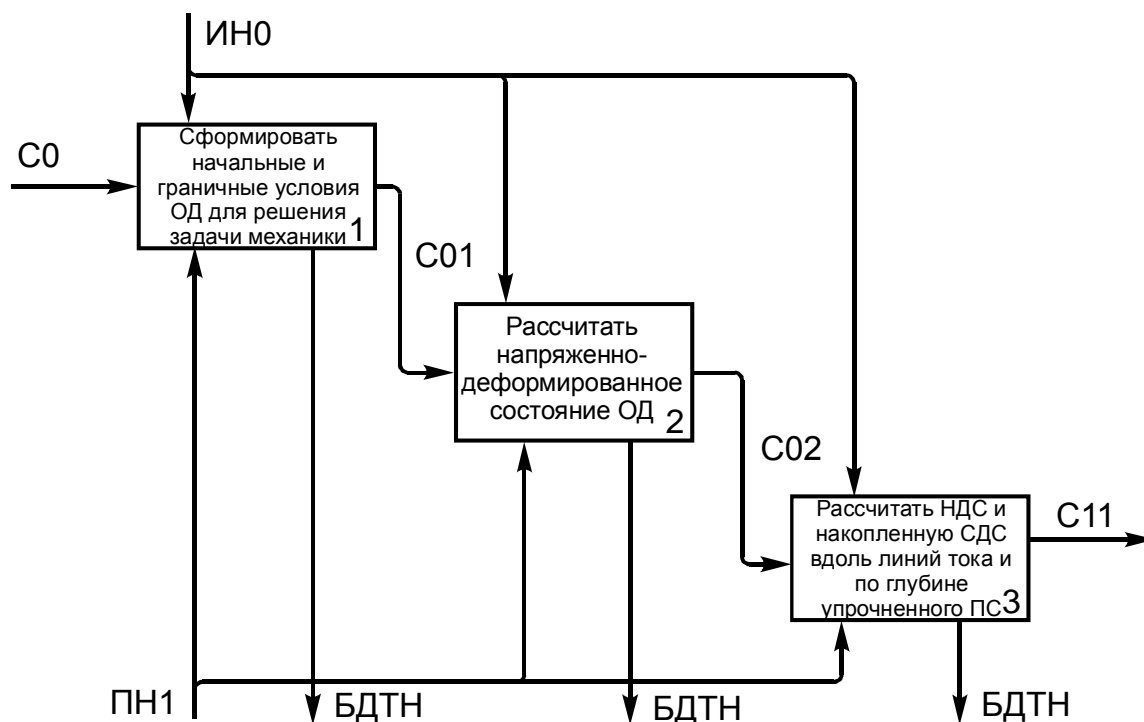


Рис. 4.5. Декомпозиция диаграммы **A1**

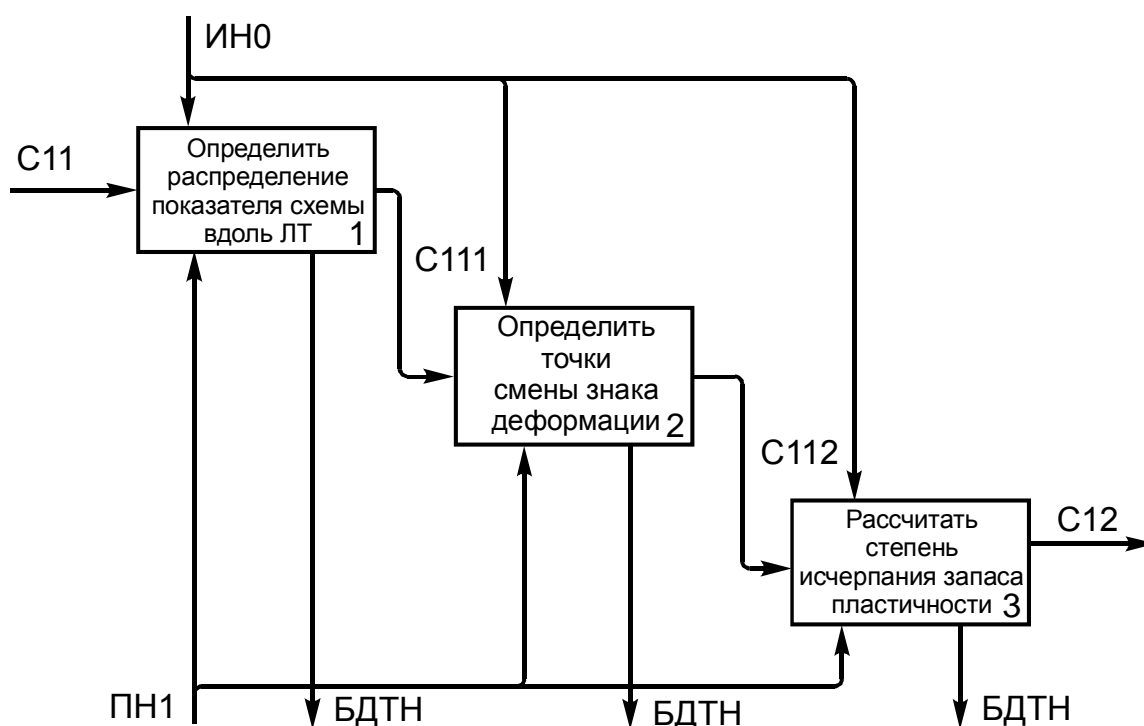


Рис. 4.6. Декомпозиция диаграммы **A2**

Декомпозиция диаграммы уровня **A3** была проведена по компонентам, которые в соответствии с теоремой о разгрузке составляют тензор остаточных напряжений (рис. 7).

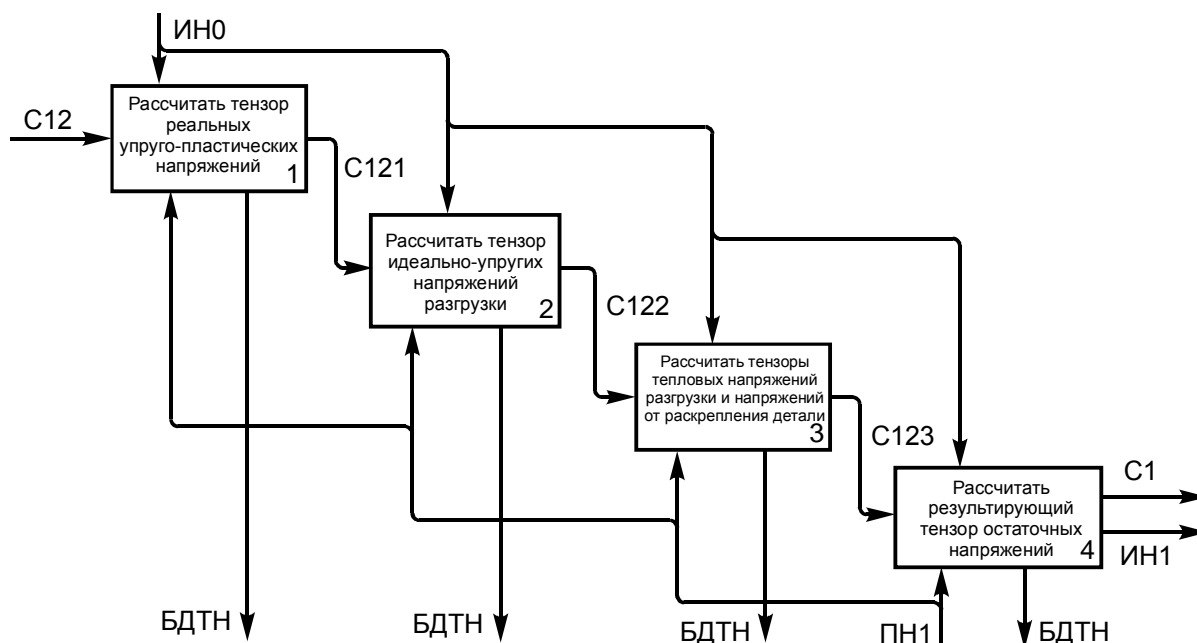


Рис. 4.7. Декомпозиция диаграммы А3

Каждый блок на диаграмме имеет свой номер (табл. 4.1). Семантика ярлыков в терминах и категориях механики ТН представлена в табл. 4.2.

Таблица 4.1

Схема индексации узлов

Индекс		Семантика узлов
узла	подузла	
<b>A0</b>		Управлять параметрами механического состояния поверхностного слоя металла на стадии PCO с целью обеспечения заданной циклической долговечности детали
<b>A1, A2, A3</b>		Блоки-потомки, детализирующие родительский блок <b>A0</b>
<b>A1</b>		Управлять степенью деформации сдвига, накапливаемой на стадии PCO
	<b>A11, A12, A13</b>	Блоки-потомки, детализирующие блок <b>A1</b>
	<b>A11</b>	Сформировать начальные и граничные условия очага деформации для решения задачи механики

Индекс		Семантика узлов
узла	подузла	
	<i>A12</i>	Рассчитать напряженно-деформированное состояние очага деформации
	<i>A13</i>	Рассчитать напряженно-деформированное состояние и накопленную степень деформации сдвига вдоль линий тока и по глубине упрочненного поверхностного слоя
<i>A2</i>		Управлять степенью истощения запаса пластичности на стадии РСО
	<i>A21, A22, A23</i>	Блоки-потомки, детализирующие блок <i>A2</i>
	<i>A21</i>	Определить распределение показателя схемы напряженного состояния вдоль линий тока
	<i>A22</i>	Определить точки смены знака деформации
	<i>A23</i>	Рассчитать степень истощения запаса пластичности с учетом залечивания поврежденности и частичного восстановления запаса пластичности
<i>A3</i>		Управлять тензором остаточных напряжений, формирующимся на стадии РСО
	<i>A31, A32, A33, A34</i>	Блоки-потомки, детализирующие блок <i>A3</i>
	<i>A31</i>	Рассчитать тензор реальных упруго-пластических напряжений
	<i>A32</i>	Рассчитать тензор идеально-упругих напряжений разгрузки
	<i>A33</i>	Рассчитать тензоры тепловых напряжений разгрузки и напряжений от раскрепления детали
	<i>A34</i>	Рассчитать результирующий тензор остаточных напряжений

Таблица 4.2

Семантика некоторых ярлыков на функциональных схемах

Обозначение ярлыков	Семантика ярлыков
<i>C0</i>	Наследуемое состояние поверхностного слоя до стадии обработки РСО
<i>C01, C02, C11, C12, C111, C112, C121, C122, C123</i>	Текущее состояние поверхностного слоя на соответствующих промежуточных этапах стадии обработки РСО
<i>C1</i>	Состояние поверхностного слоя после стадии РСО
<i>ИН0</i>	История нагружения, представляющая собой информацию, передаваемую со всех предшествующих стадий нагружения на стадию нагружения РСО
<i>ИН1</i>	Трансформированная история нагружения, передаваемая на последующую стадию и представляющая собой информацию о характере накопления параметров состояния ПС на предыдущих стадиях нагружения, включая стадию РСО
<i>ПН1</i>	Программа нагружения на стадии обработки РСО
<i>БДТН</i>	Запрос к базе данных технологического наследования по правилам формирования ОД

Для функциональной модели, описывающей трансформацию параметров на стадии РСО характерно:

1. Наличие исходного (наследуемого) состояния поверхностного слоя в виде *C0*.

2. Запрос к базе данных технологического наследования *БДТН* с целью получения информации о режимах обработки.

3. Наличие наследственной информации в виде истории нагружения на предшествующих стадиях *ИН0*.



4. Генерирование собственной (измененной на стадии РСО) наследственной информации в виде **ИН1**.

5. Состояние поверхностного слоя после выполнения обработки РСО в виде **С1**, которое является исходным перед началом стадии циклической долговечности.

**Пример 2. Модель синтеза технологического процесса (ТП) упрочняющей обработки с учетом явления технологического наследования (ТН).**

Главная цель этапа физической реализации ТП упрочняющей обработки – обеспечить требуемую долговечность изделия на стадиях механической обработки и в процессе эксплуатации. Поэтому в качестве контекстной функции выбрана: «Разработать технологический процесс (ТП) упрочняющей обработки, обеспечивающий требуемое состояние поверхностного слоя (ПС) изделия с учетом ТН». В данном случае функция включает все возможные стадии жизненного цикла изделия, включая усталостное нагружение и возможные технологии по частичному восстановлению запаса пластичности (рис. 4.8).

Ресурс – «Базовая информация» и «Состояние поверхностного слоя». «Базовая информация» включает данные, содержащиеся в конструкторских документах, программу выпуска, а также условия эксплуатации изделия. «Состояние поверхностного слоя» – начальное для проектирования технологического процесса состояние поверхностного слоя.

Продукт – «Технологический процесс, обеспечивающий требуемое состояние поверхностного слоя детали с учетом технологического наследования». Реализация данного технологического процесса позволяет получить поверхностный слой с требуемыми параметрами, обеспечивающими заданную долговечность детали на стадии усталостного нагружения с учетом технологического наследования.

Управляющие воздействия – «Руководящая информация (РИ)» и «История нагружения (ИН)». Руководящая информация содержится в стандартах всех уровней на технологические процессы, оборудование и оснастку, а также в документации на перспективные ТП, производственных инструкциях. История нагружения отражает состояния поверхностного слоя после выполне-

ния предшествующих операций (воздействий на поверхностный слой).

Механизм реализации функции – «Исполнитель». Это следует понимать так, что ТП механической обработки формирует человек, а обеспечивает выполнение этой технологии выбранный (назначенный или рассчитанный) режим нагружения поверхностного слоя изделия.

Вызов (запрос) – «База данных технологической наследственности (БДТН)». БДТН представляет собой электронное хранилище данных, содержащее информацию о правилах формирования очагов деформации, режимах и программах нагружения, действующих унифицированных ТП на изделия-аналоги и прогрессивных методах обработки, а также каталоги, номенклатурные справочники, материалы по выбору технологических нормативов и др.

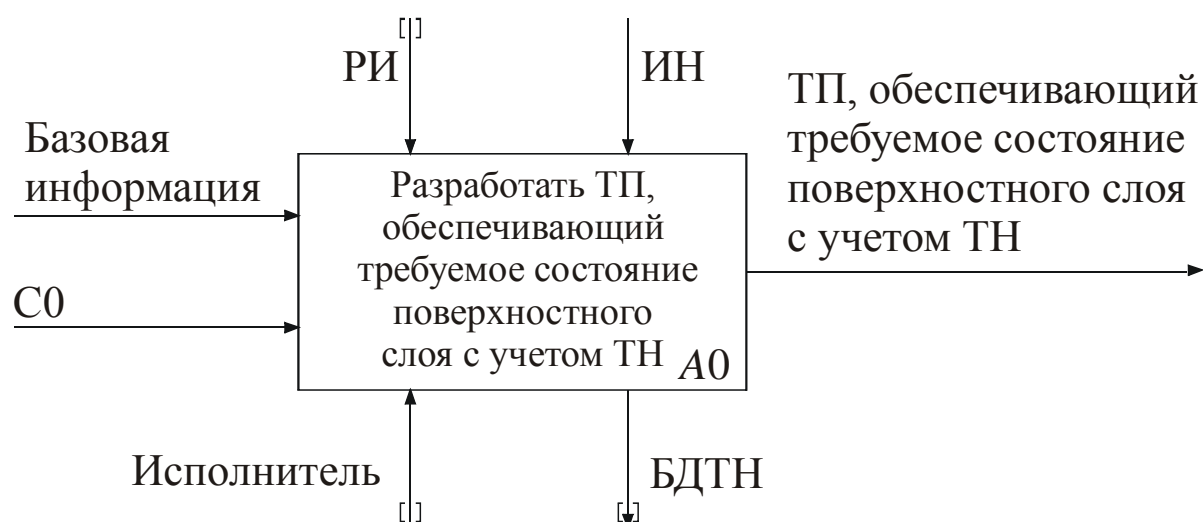


Рис. 4.8. Функциональная модель уровня *А0*.  
Родительский блок (ярлыки и семантика названий)

В процессе декомпозиции контекстной функции учтен многолетний опыт проектирования технологических процессов механической обработки (рис. 4.9, табл. 4.3-4.4). В основе проектирования технологии по данной методике лежат точностные расчеты, а требуемая точность определяет режимы механической обработки. При этом параметры качества поверхностного слоя рассчитывают исходя из известных режимов по совокупности эмпирических моделей.

Точностной анализ предполагает расчеты численных значений припусков по технологическим переходам и операциям. Основная методика расчетов припусков учитывает явление технологического наследования, поскольку в ее структуре представлены значения высоты неровностей профиля  $Rz_{i-1}$ , глубины дефектного поверхностного слоя  $h_{i-1}$  и суммарных отклонений расположения поверхности  $(\Delta_\Sigma)_{i-1}$  на предшествующем  $i-1$  переходе. Шероховатость поверхности в методике расчета припусков является составляющим элементом, определяющим точность механической обработки. В то же время при оценке состояния поверхности шероховатость выступает в роли параметра качества поверхностного слоя.

Можно полагать, что припуск – это «стыковочный» параметр, определяющий, с одной стороны, точность механической обработки, а с другой – качество поверхностного слоя.

Таблица 4.3

Схема индексации узлов

Индекс			Семантика узлов
Узла	Подузла n-уровня		
	n = 1	n = 2	
A0			Разработать технологический процесс (ТП) упрочняющей обработки, обеспечивающий требуемое состояние поверхностного слоя (ПС) с учетом ТН
A1-A5			Блоки-потомки, детализирующие родительский блок A0
A1			Выполнить технологический контроль конструкторской документации
A2			Разработать маршрутный технологический процесс
A3			Разработать операционный технологический процесс
	A31		Определить структуру операции
	A32		Выбрать средства технологического оснащения (СТО)

Индекс			Семантика узлов
Узла	Подузла n-уровня		
	n = 1	n = 2	
	A33		Рассчитать припуски и режимы обработки
	A34		Рассчитать точность обработки
	A35		Рассчитать качество поверхностного слоя
		A351	Определить геометрические параметры очага деформации
		A352	Рассчитать напряженно-деформированное состояние
		A353	Рассчитать программу нагружения
		A354	Изменить состояние поверхностного слоя в очаге деформации
		A355	Рассчитать параметры качества поверхностного слоя
		A356	Выполнить акустико-эмиссионный и ультразвуковой контроль
	A36		Выполнить нормирование операции
A4			Оценить технологические решения
A5			Подготовить технологическую документацию

Таблица 4.4

Семантика некоторых ярлыков на функциональных схемах

Обозначение ярлыков	Семантика ярлыков
<i>С0</i>	Начальное состояние поверхностного слоя
<i>РИ</i>	Руководящая информация
<i>ИН</i>	История нагружения
<i>МТП</i>	Маршрутный технологический процесс
<i>ОТП</i>	Операционный технологический процесс
<i>ТР</i>	Технологическое решение
<i>ТД</i>	Технологическая документация
<i>О12</i>	Структура технологической операции
<i>О23</i>	Перечень средств технологического оснащения
<i>О34</i>	Припуски на механическую обработку

Обозначение ярлыков	Семантика ярлыков
<i><b>O45</b></i>	Точностные параметры
<i><b>O56</b></i>	Параметры качества поверхностного слоя
<i><b>PK12</b></i>	Геометрические параметры очага деформации
<i><b>PK23</b></i>	Параметры напряженно-деформированного состояния
<i><b>PK45</b></i>	Состояние поверхностного слоя
<i><b>PK56</b></i>	Параметры качества поверхностного слоя

Исходя из сказанного, выполнена декомпозиция подфункции ***A3***, где наряду с расчетом припусков и режимов (блок ***A33***), выполняются расчеты точности (блок ***A34***) и качества поверхностного слоя (блок ***A35***) (рис. 4.10).

Особенностью детализации дальнейшего описания является учет наследственных закономерностей, представленных в категориях механики технологического наследования. Это нашло отражение в декомпозиции блока ***A35***, которая полностью соответствует ранее принятой функциональной модели механики технологического наследования (рис. 4.11). Технологическое наследование качества поверхностного слоя определяется путем решения задач механики (блоки ***A351-A353***), по результатам которых происходит формирование программ нагружения поверхностного слоя. На входе в блок ***A354*** в качестве управляющего воздействия используется история нагружения, а программа нагружения выступает в качестве механизма реализации данной подфункции. Параметры качества поверхностного слоя (блок ***A355***) рассчитываются с учетом установленных физических закономерностей ТН, и в случае получения неудовлетворительного результата, по обратной связи проводится корректировка структуры операции. По итогам выполнения операции проводится АЭ или УЗ контроль (блок ***A356***).

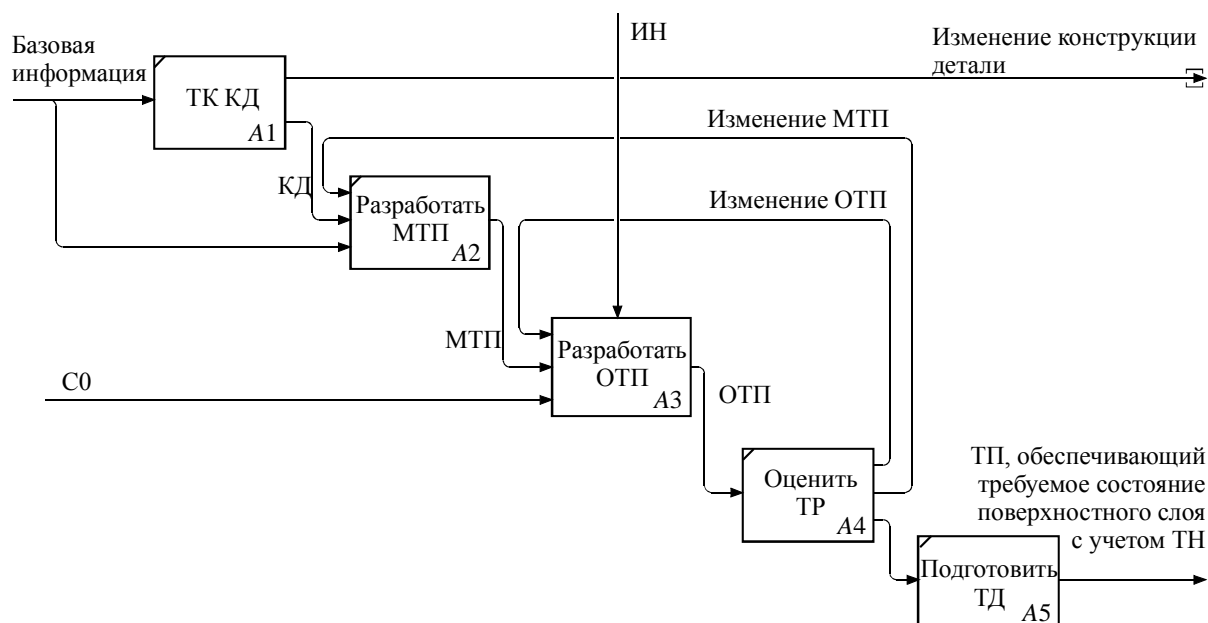


Рис. 4.9. Декомпозиция функциональной модели механики ТН уровня **A0**

Особенностью рассматриваемой функциональной модели является возможность ее дальнейшего расширения и дополнения, например:

1. По результатам проектирования ТП выявлена необходимость разработки новых методов механической обработки с вполне определенными возможностями в плане создания программ нагружения. Использование расчетных моделей позволяет сформулировать комплекс требований и совокупность технологических параметров. Тогда функциональная модель может быть декомпозирована, а информация уточнена до требуемого уровня детализации; система обратных связей позволяет уточнить правила ТН и внести уточнения в модели, учитывающие историю нагружения.

2. Появляется необходимость учета стадии ремонта (частичного или полного восстановления запаса пластичности) детали. Тогда после выполнения подфункции контроля, вводится подфункция ремонта с соответствующей системой обратных связей и т. д.

На этапе внедрения научных разработок возможно расширение контекста и использование таких важных подфункций, как предпроектное обследование производства, экономическое обоснование привлекательности инвестиций в предлагаемую техноло-

гию, уточнение дополнительных организационных и технологических факторов, передача готового продукта заказчику и др.

Преобразование совокупности функциональных моделей в модель данных позволяет использовать их для решения задач автоматизации проектирования технологий упрочняющей механической обработки, в частности, разработки БДТН.

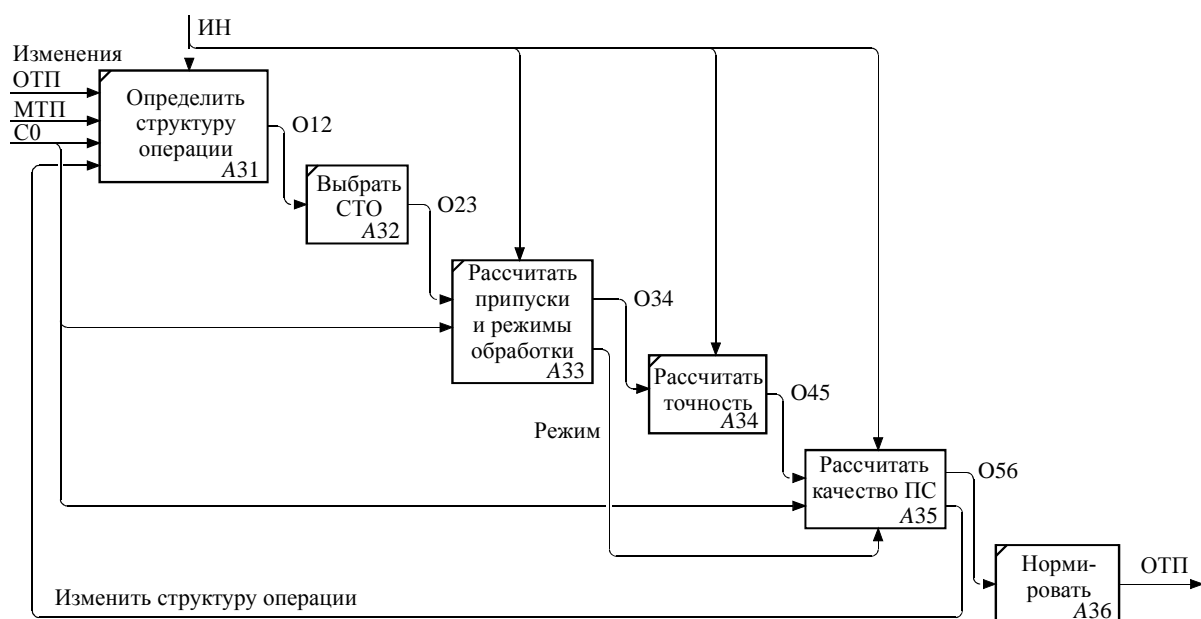


Рис. 4.10. Декомпозиция диаграммы АЗ

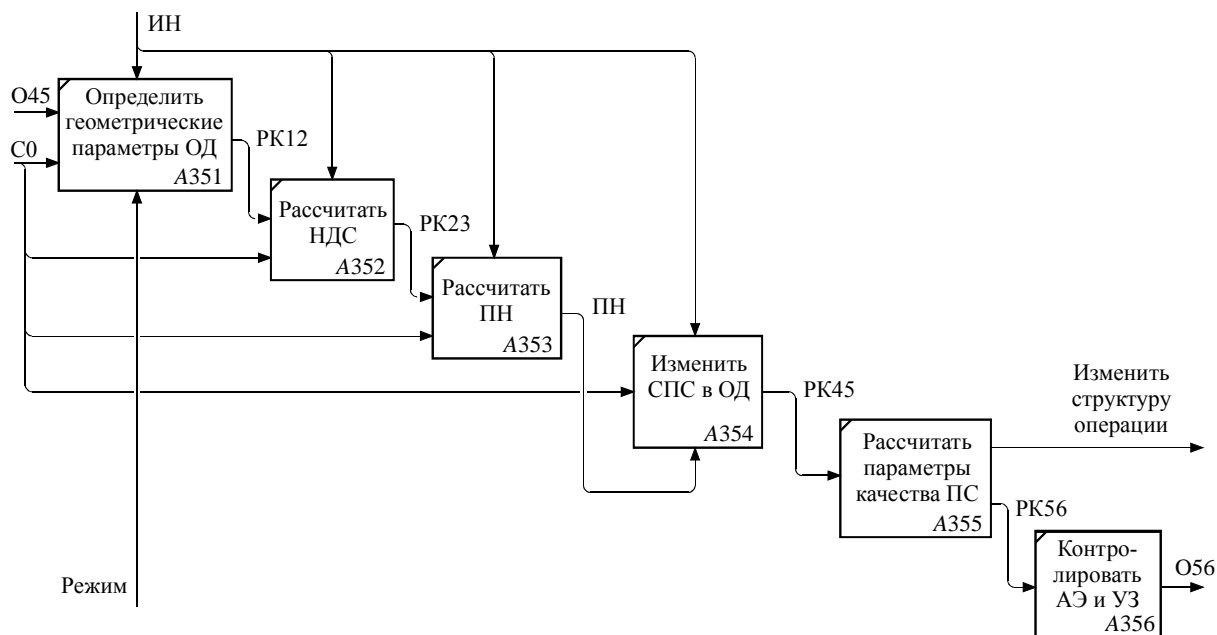


Рис. 4.11. Декомпозиция диаграммы А35

### **3. Перечень вопросов для устного опроса**

#### **Устный опрос по работе №1.**

1. Что такое жизненный цикл промышленных изделий?
2. Что такое CALS-технологии?
3. Предпосылки и причины появления CALS-технологий.
4. Назначение, задачи и преимущества CALS-технологий.
5. Виды обеспечения CALS-технологий.
6. Этапы жизненного цикла промышленных изделий.

#### **Устный опрос по работе №2.**

1. Автоматизация конструирования в машиностроении.
2. Уровни программного обеспечения.
3. Твердотельное моделирование.
4. История создания твердого тела.
5. Модификация твердого тела.
6. Параметризация.
7. Виды параметризации.

#### **Устный опрос по работе №3.**

1. Постановка задачи конечно-элементного анализа.
2. Библиотека конечных элементов.
3. Препроцессорная подготовка.
4. Построение сеточной модели.
5. Определение данных и ограничений.
6. Управление работой решателя.
7. Постпроцессорная обработка результатов.

#### **Устный опрос по работе №4.**

1. Методология функционального моделирования: основные принципы построения моделей.
2. Стандарты IDEF и их разновидности.



#### 4. Список рекомендуемой литературы

1. Маклаков С. В. ВРwin и ERwin: CASE-средства разработки информационных систем / С. В. Маклаков. – Москва: Диалог-МИФИ, 2000. – 454 с.
2. Смирнова Г. Н. Проектирование экономических информационных систем: учебник для вузов / Г. Н. Смирнова, А. А. Сорокин, Ю. Ф. Тельнов; под ред. Ю. Ф. Тельнова. – Москва: Финансы и статистика, 2002. – 512 с.
3. Вендров А. М. Практикум по проектированию программного обеспечения экономических информационных систем: учеб. пособие для вузов / А. М. Вендров. – Москва: Финансы и статистика, 2002. – 190 с.
4. Советов Б. Я. Информационные технологии: учебник для вузов / Б. Я. Советов, В. В. Цехановский. – Москва: Высшая школа, 2005. Изд. 2-е, стер. – 263 с.
5. Советов Б. Я. Базы данных: Теория и практика: учебник для вузов по направлениям «Информатика и вычислительная техника» и «Информационные системы» / Б. Я. Советов, В. В. Цехановский, В. Д. Чертовской. – Москва: Высшая школа, 2005. – 463 с.
6. Кравец О. Я. Практикум по проектированию информационных систем : учеб. метод. пособие для вузов / О. Я. Кравец, С. А. Олейникова. – Воронеж: Научная книга, 2006. 2-е изд., перераб. и доп. – 208 с.
7. Сирота А. А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем: учеб. пособие для студентов вузов / А. А. Сирота. – Москва: Техносфера, 2006. – 280 с.
8. Калянов Г. Н. Моделирование, анализ, реорганизация и автоматизация бизнес-процессов: учеб. пособие для студентов вузов / Г. Н. Калянов. – Москва: Финансы и статистика, 2006. – 240 с.
9. Советов Б. Я. Теоретические основы автоматизированного управления: учебник для студентов вузов / Б. Я. Советов, В. В. Цехановский, В. Д. Чертовской. – Москва: Высшая школа, 2006. – 463 с.
10. Блюменштейн В. Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей ма-

шин / В. Ю. Блюменштейн, В. М. Смелянский. – Москва: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

11. Гагарина Л. Г. Разработка и эксплуатация автоматизированных информационных систем: учеб. пособие для студентов учреждений сред. проф. образования / Л. Г. Гагарина, Д. В. Киселев, Е. Л. Федотова; под ред. Л. Г. Гагариной. – Москва: Форум, 2007. – 384 с.

12. Кознов Д. В. Основы визуального моделирования : учеб. пособие для студентов вузов / Д. В. Кознов. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 246 с.

## Содержание

1. Введение	3
2. Содержание практических занятий	4
Работа № 1. Жизненный цикл промышленных изделий и автоматизация его этапов	4
Работа № 2. Автоматизация конструирования в машиностроении	19
Работа № 3. Инженерный анализ в машиностроении	41
Работа № 4. Методология функционального моделирования. Стандарты IDEF	56
3. Перечень вопросов для устного опроса	72
4. Список рекомендуемой литературы	73