



Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Материаловедение в машиностроении»

Н. В. Грудина

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ

ПОСОБИЕ

**для студентов специальности 1-36 07 02
«Производство изделий на основе трехмерных
технологий» дневной формы обучения**

Гомель 2022

УДК 004.925.8(075.8)
ББК 32.937.26я73
Г90

*Рекомендовано научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 5 от 27.05.2021 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Металлургия и технологии обработки материалов»
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *Ю. Л. Бобарикин*

Грудина, Н. В.

Г90 Компьютерное моделирование и инженерный анализ : пособие для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» днев. формы обучения / Н. В. Грудина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2022. – 340 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Изложена система автоматизированного проектирования PTC Creo Parametric и создания трехмерных моделей деталей машин. Приведены теоретические сведения, необходимые для изучения дисциплины «Компьютерное моделирование и инженерный анализ».

Для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» дневной формы обучения.

УДК 004.925.8(075.8)
ББК 32.937.26я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2022

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Компьютерное моделирование КМ, возникшее как одно из направлений математического моделирования с развитием информационных компьютерных технологий стало самостоятельной и важной областью применения компьютеров. В настоящее время компьютерное моделирование в научных и практических исследованиях является одним из основных методов познания. Без компьютерного моделирования сейчас невозможно решение крупных научных и экономических задач, практически не осталось такой научной области, где бы эти методы не нашли своего применения. Особую роль компьютерное моделирование играет при решении естественно-научных и технических задач. Так, компьютерный эксперимент, наряду с традиционным, «натурным» экспериментом, сегодня является одним из основных методов исследования сложных систем и физических процессов.

Цель автоматизации проектирования – повышение качества, снижение материальных затрат, сокращение сроков проектирования и ликвидация тенденции к росту числа инженерно-технических работников, занятых проектированием, повышение производительности их труда.

Автоматизация проектирования возникла на базе достижений конкретных технических дисциплин, вычислительной математики и вычислительной техники.

Автоматизация проектирования как научно-техническая дисциплина включает в себя:

- 1) методологию автоматизированного проектирования;
- 2) математическое обеспечение, объединяющее математические модели, методы и алгоритмы для выполнения различных проектных процедур;
- 3) вопросы состава технических средств и разработки специализированной аппаратуры;
- 4) вопросы разработки и использования программно-информационного обеспечения банков данных, пакетов прикладных программ, операционных систем ЭВМ.

Появление первых программ для автоматизации проектирования за рубежом и в бывшем СССР относится к началу 60-х годов. Тогда были созданы программы для решения задач строительной механики, анализа электронных схем проектирования печатных плат. Дальней-

шее развитие шло по пути создания аппаратных и программных средств машинной графики, повышения вычислительной эффективности программ моделирования и анализа, упрощения пользовательского интерфейса.

К настоящему времени компьютерами насыщены проектные подразделения, конструкторские бюро и офисы. Работа конструктора за кульманом, расчеты с помощью логарифмической линейки или оформление отчета на пишущей машинке стали “вчерашним днем”. Предприятия, ведущие разработки без применения средств вычислительной техники или лишь с малой степенью их использования, оказываются неконкурентоспособными как из-за больших материальных временных затрат на проектирование, так и из-за невысокого качества проектов.

Создано большое количество программно-методических комплексов для систем автоматизированного проектирования с различной степенью специализации и прикладной ориентацией. В результате автоматизация проектирования и компьютерное проектирование стали необходимой составной частью подготовки инженеров разных специальностей. Инженер, не владеющий знаниями и не умеющий работать на компьютере и в САПР, не может считаться полноценным специалистом.

Цель изучения дисциплины “Компьютерное моделирование и инженерный анализ” – познакомить учащихся с теорией и практикой основных методов компьютерного моделирования, получение навыков постановки инженерных задач, решения их с помощью ЭВМ на уровне технических заданий и разработки эскизных и рабочих чертежей, изучение методик проектирования с помощью ЭВМ.

Задачи дисциплины:

- 1) изучение основных понятий проектирования технических систем;
- 2) овладение методологией проектирования технических систем;
- 3) изучение технических средств автоматизированного проектирования;
- 4) изучение программного обеспечения компьютерного проектирования;
- 5) практическое овладение навыками автоматизации конструкторского и технологического проектирования.

Раздел 1. Компьютерное моделирование и инженерный анализ. Актуальность и перспективы

Тема 1.1. Основные программные комплексы САПР. Идеология моделирования и производства сопутствующей документации

К настоящему времени методы компьютерного моделирования получили столь широкое распространение, что практически не осталось такой научной области, где бы они эти методы не нашли своего применения. Особую роль компьютерное моделирование играет при решении естественно-научных и технических задач. Так, компьютерный эксперимент, наряду с традиционным, «натурным» экспериментом, сегодня является одним из основных методов исследования сложных систем и физических процессов.

Более того, компьютерное моделирование как инструмент исследования обладает целым рядом преимуществ по сравнению с реальным экспериментом, в частности, компьютерный эксперимент может быть выполнен в таких условиях, когда проведение натурального эксперимента затруднено или даже невозможно.

Техника компьютерного моделирования включает в себя: (1) разработку компьютерной (вычислительной) модели (2) разработку программного кода для реализации данной модели и выполнения необходимых расчетов. Компьютерная модель представляет собой схематическое описание объекта или множества объектов, а также законов поведения данного объекта (объектов). Конкретное содержание компьютерной модели определяется спецификой системы, ассоциированной с данной моделью.

Процесс компьютерного моделирования включает три элемента:

- Субъект (исследователь);
- Объект исследования;
- Модель, определяющую (отражающую) отношения познающего субъекта и познаваемого объекта.

Компьютерное моделирование является одним из эффективных методов изучения сложных систем. Часто компьютерные модели проще и удобнее исследовать, они позволяют проводить вычислительные эксперименты, реальная постановка которых затруднена или может дать непредсказуемый результат. Логичность и формализованность компьютерных моделей позволяет выявить основные факторы,

определяющие свойства изучаемых объектов, исследовать отклик физической системы на изменения ее параметров и начальных условий.

Компьютерное моделирование требует абстрагирования от конкретной природы явлений, построения сначала качественной, а затем и количественной модели. За этим следует проведение серии вычислительных экспериментов на компьютере, интерпретация результатов, сопоставление результатов моделирования с поведением исследуемого объекта, последующее уточнение модели и т.д.

Задачи компьютерного моделирования:

- **создание** (синтез) моделей объектов и систем для дальнейшей их практической реализации или подготовки производства изделий в промышленности;
- **анализ** свойств объектов и систем на основе исследований их моделей, которые используются для выявления значений параметров проектируемых объектов систем и поддержки процессов принятия инженерных решений.

Понятие системы является базовым для компьютерного моделирования, и, в зависимости от задач моделирования, может быть определено по-разному. Приведем несколько типичных определений: Система – множество взаимосвязанных элементов, обладающих общим (системным) свойством, не сводящимся к свойствам этих элементов. (Интернет-энциклопедия). Система–комплекс взаимодействующих компонентов. (Л. Фон Берталанфи, системный аналитик). Система– совокупность элементов, находящихся в определенных отношениях друг с другом и со средой (Л. фон Берталанфи, системный аналитик). И, наконец, наиболее функциональное определение: 3“Системой является все, что мы хотим рассматривать как систему” (Б.Гейнс, системный аналитик).

Компьютерное моделирование является базовым этапом в аддитивных технологиях. Под понятием аддитивные технологии (Additive Fabrication (AF) или Additive Manufacturing (AM)) следует понимать технологию создания изделия путем его послойного синтеза. В отличие от классических «вычитающих» методов, когда от заготовки отсекают ненужные материал, для получения необходимого изделия, объект создается путем добавления материала слой за слоем. На ряду, с аддитивными технологиями можно так же услышать понятие – быстрое прототипирование (Rapid Prototyping). По своей сути оно является неотъемлемой частью аддитивных технологий, которая отвечает непосредственно за процесс изготовления объекта, будь это прототип,

опытный образец или серийный экземпляр. Одной из самых распространенных на данный момент аддитивных технологий является 3D-печать.

У данной технологии по сравнению с «вычитающими», есть несколько неоспоримых преимуществ:

- Экономия сырья на производстве. За счет послойного создания изделия практически отсутствуют отходы материала. В отличие от традиционных методов, когда потери сырья могут быть в районе 70-75%;

- Отсутствие в деталях дефектов производства. Это достигается за счет постепенного создания изделия слой за слоем;

- Изготовление изделий сложной геометрической формы. Благодаря оборудованию, применяемому в аддитивных технологиях возможно создание сборок деталей;

- Отсутствие «человеческого» фактора при изготовлении объекта. Его построение происходит в полностью автоматическом режиме;

- Скорость изготовления объекта от прототипа до серийного образца.

Рассмотрим несколько самых распространенных методик создания изделий на 3D – принтере:

- SLS (Selective laser sintering) – Выборочное лазерное спекание. Технология основана на последовательном спекании слоев порошкового материала с помощью лазеров высокой мощности (рис. 1.1).

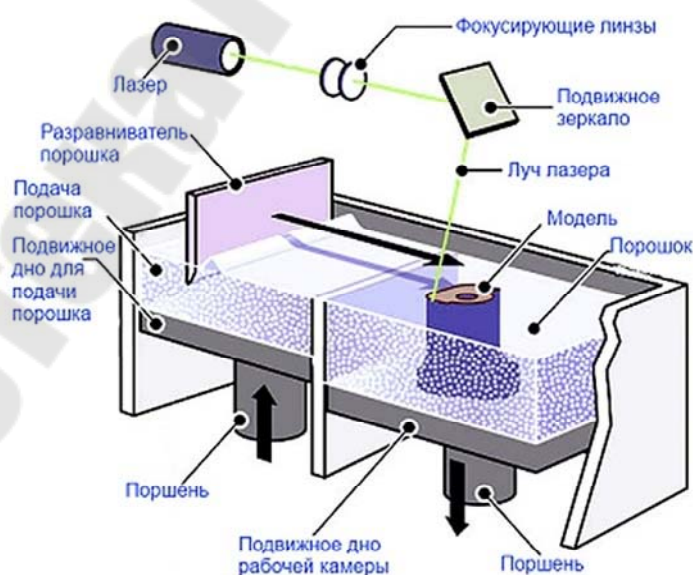


Рис. 1.1. Выборочное лазерное спекание

– SLM (Selective laser melting) – Выборочная лазерная плавка. В данном случае создание объекта происходит за счет сплавления металлических порошков (рис. 1.2).

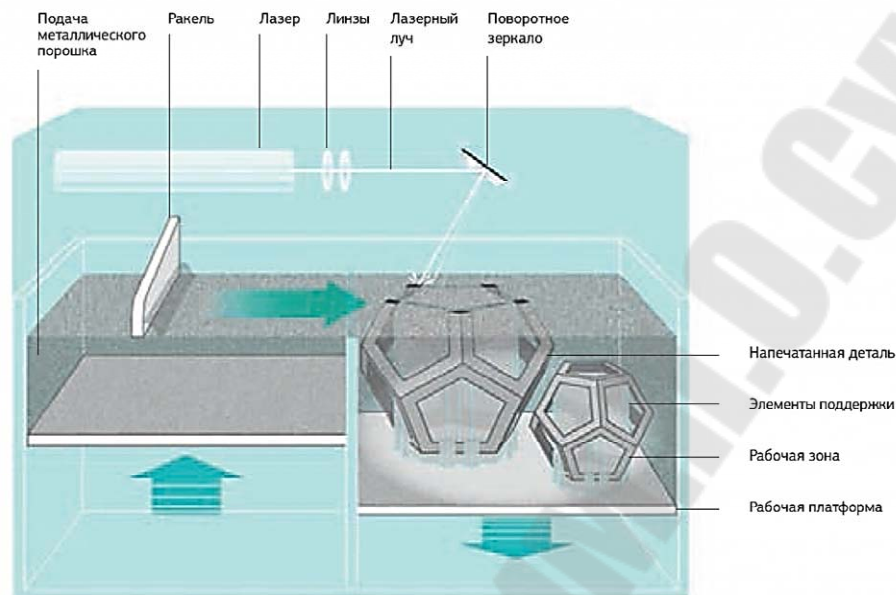


Схема технологического процесса селективного лазерного плавления

Рис. 1.2. Выборочная лазерная плавка

– SLA (сокращенно от Stereolithography) – Стереолитография. Создание моделей, прототипов и готовых изделий из жидких фотополимерных смол (рис. 1.3). Отвердевание смолы происходит за счет облучения ее лазером.

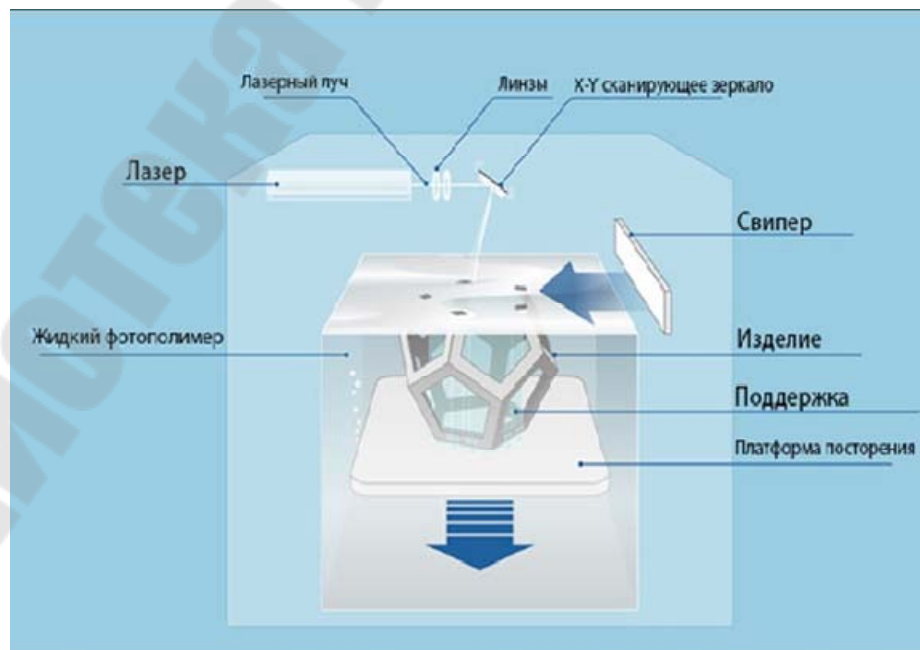


Рис. 1.3. Стереолитография

– MJM (Multi-jet Modeling) – Технология много струйного моделирования (рис. 1.4). В данной технологии главную роль играет уникальная печатающая головка. Она содержит тончайшие сопла, количество которых может достигать до 448 штук. Данная технология использует термопластичный материал – твердый воск.

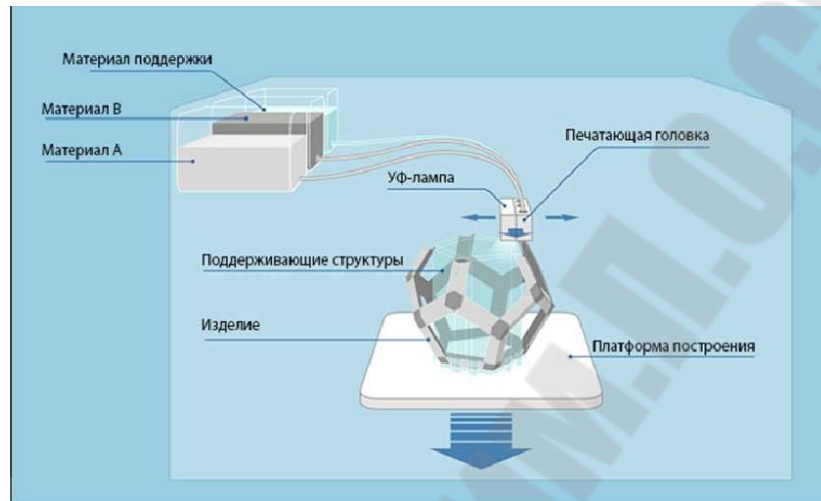


Рис. 1.4. Технология много струйного моделирования

– CJP (Color jet printing) – Цветная струйная печать. Технология подразумевает нанесение тонких слоев порошкообразных расходных материалов, с последующим выборочным нанесением связующего полимера (рис. 1.5).

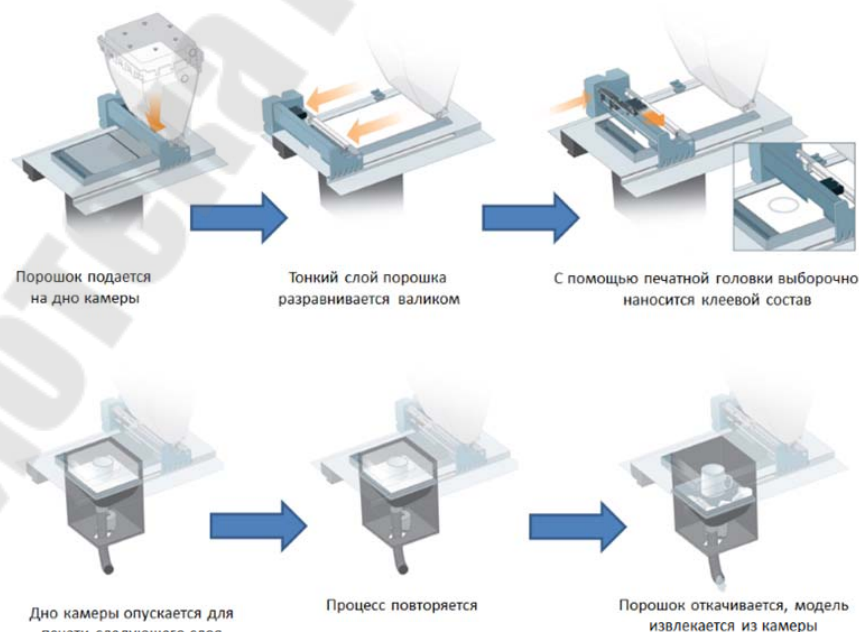


Рис. 1.5. Цветная струйная печать

– FDM (Fused deposition modeling) – Моделирование методом послойного наплавления. Создание трехмерных объектов происходит за счет нанесения последовательных слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели (рис. 1.6).

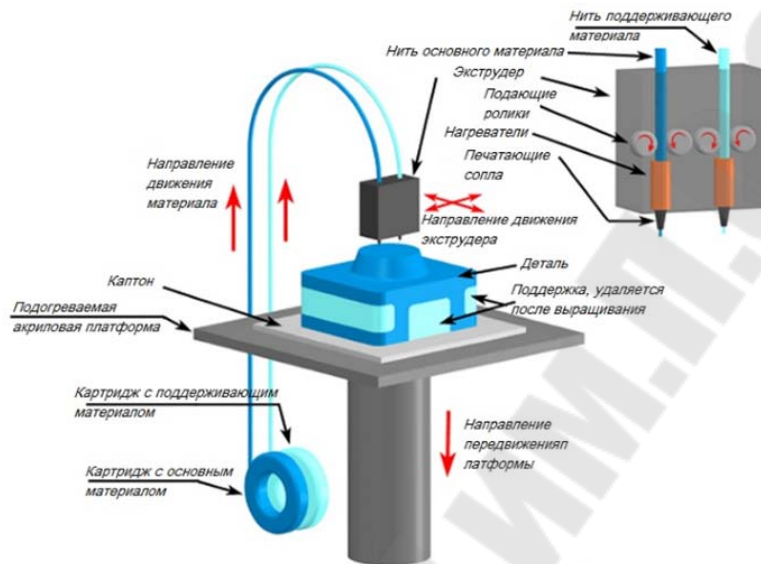


Рис. 1.6. Моделирование методом послойного наплавления.

Роль компьютерного моделирования

Какую же роль играет компьютерное моделирование в аддитивных технологиях. Чтобы это понять, давайте рассмотрим, этапы создания изделия на 3D-принтере (рис. 1.7):

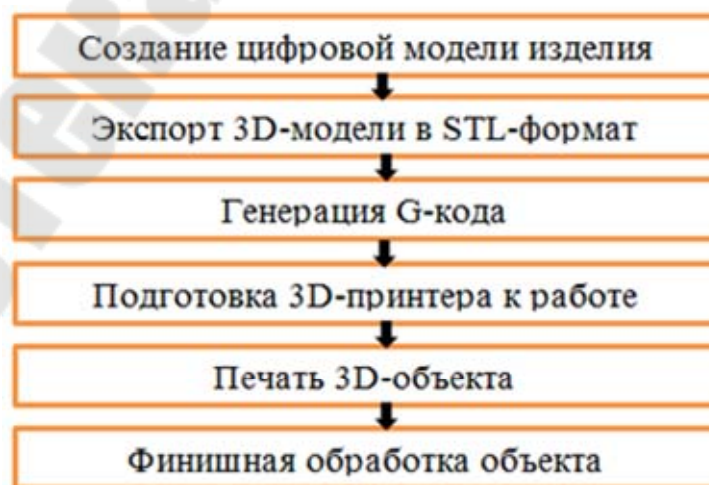


Рис. 1.7. Этапы создания изделия на 3D-принтере

Рассмотрим каждый этап подробнее:

– Создание цифровой модели изделия. На данном этапе при помощи системы трехмерного геометрического моделирования (3D Computer Aided Design (CAD)) создается компьютерная модель будущего изделия. Так же возможно создание компьютерной модели изделия, на основании 3D-скана объекта.

– Экспорт 3D-модели в STL-формат. Это специальный формат, созданный для 3D печати, он описывает треугольники, составляющие контуры любого объекта.

– Генерация G-кода. Создается набор, представляющих собой, нарезку цифровой модели на отдельные слои с преобразованием данных в инструкции для работы принтера.

– Подготовка 3D-принтера к работе. Данный этап может немного отличаться в зависимости от типа печати, но в основном все схоже и представляет собой загрузку материала, калибровку позиционирования печатного сопла.

– Печать 3D-объекта. Непосредственно происходит создание изделия путем послойного синтеза материала.

– Финишная обработка объекта. Полировка, шлифовка объекта. Обычно для этих целей используют автоматический пескоструйный аппарат или ручную обработку наждачной бумагой мелкой зернистости.

Из выше сказанного следует, что одна из основных ролей компьютерного моделирования в аддитивных технологиях является создание геометрической 3D модели будущего изделия при помощи САД пакетов. За счет того, что объект создается путем послойного синтеза, создаваемая 3D модель представляет собой виртуальный прототип будущего изделия. За счет этого всегда есть возможность в быстрой корректировке изделия, а также для будущей модернизации объекта. Благодаря этому открываются широкие возможности в применении аддитивных технологий в различных областях.

Так же одной из важнейших ролей компьютерного моделирования в аддитивных технологиях является компьютерный анализ и оптимизация изготавливаемого объекта, до его физических испытаний. Проведя такой анализ можно минимизировать количество итераций на производстве и испытании изделия. Для такого рода задач используются системы инженерного анализа (Computer-aided engineering (CAE)).

Современные системы анализа позволяют моделировать различные физические процессы, которые могут произойти с изготавливаемым объектом. Наиболее распространенные типы задач, которые анализируют при помощи CAE пакетов:

- Анализ механических свойств (structural analysis): расчет динамических пластических деформаций, при статической и динамической нагрузке, анализ прочности и механической устойчивости изделия.

- Моделирование динамики систем твердых тел (Rigid Body Dynamics): анализируется сложная механическая система с большим количеством элементов, учитывающая деформации различных частей высокой твердости.

- Вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics): расчет потоков газа и жидкости вокруг или через объекты.

- Тепловой анализ (thermal analysis): расчет температурных показателей, процессы диффузии, конвекции и излучения.

- Электромагнитное моделирование (Electromagnetic simulation): моделирование статических и динамических электромагнитных полей.

- Моделирование процессов (Process Simulation): физическое моделирование определенных процессов, штамповка, прокатка.

Для проведения CAE анализа 3D модель изделия импортируется в программу, где она проходит следующие этапы:

- Определение параметров модели. На данном этапе задаются свойства материала, из которого предполагается производство изделия.

- Определение контактных параметров. Указываем точки приложения воздействия (механическое, тепловое и т.д.) на объект.

- Определение кривой нагружения. Задаем тип и время воздействия.

- Определение времени расчета.

- Анализ результатов компьютерного моделирования.

После проведения комплексного анализа при помощи CAE становится понятно, надо ли изменять что-либо в будущем изделии. При условии выявления недочетов в 3D модели она передается на доработку. Если все результаты в допустимых рамках, модель отправляется на печать.

В производстве изделий при помощи аддитивных технологий, роль компьютерного моделирования очень высока. Начиная от перво-

го этапа, на котором создается будущая 3D модель при помощи CAD пакетов, так и при последующем этапе CAE анализе полученной модели. За счет такой взаимосвязи можно получить изделие 3D печати высокого качества

Тема 1.2. Культура моделирования и проектирования изделий

Моделирование в научных исследованиях стало применяться еще в глубокой древности и постепенно захватывало все новые области научных знаний: техническое конструирование, строительство и архитектуру, астрономию, физику, химию, биологию и, наконец, общественные науки. Большие успехи и признание практически во всех отраслях современной науки принес методу моделирования XX в. Однако методология моделирования долгое время развивалась независимо отдельными науками. Отсутствовала единая система понятий, единая терминология. Лишь постепенно стала осознаваться роль моделирования как универсального метода научного познания.

Реальные объекты и процессы бывают столь многогранны и сложны, что лучшим способом их изучения часто является построение модели, отображающей лишь какую-то грань реальности и поэтому многократно более простой, чем эта реальность, и исследование вначале этой модели. Многовековой опыт развития науки доказал на практике плодотворность такого подхода.

С точки зрения информатики, решение любой производственной или научной задачи описывается следующей технологической цепочкой: «реальный объект → модель → алгоритм → программа → результаты → реальный объект». В этой цепочке очень важную роль играет звено «модель», как необходимый, обязательный этап решения этой задачи. Под моделью при этом понимается некоторый мысленный образ реального объекта (системы), отражающий существенные свойства объекта и заменяющий его в процессе решения задачи.

Термин «модель» (от лат. *modulus* – мера, образец) широко используется в различных сферах человеческой деятельности и имеет множество смысловых значений. Модель – некоторый материальный или мысленно представляемый объект или явление, замещающий оригинальный объект или явление, сохраняя только некоторые важные его свойства, например, в процессе познания (созерцания, анализа и синтеза) или конструирования. Другими словами, модель –

это объект или явление, аналогичные, т.е. в достаточной степени повторяющие свойства моделируемого объекта или явления (прототипа), существенные для целей конкретного моделирования, и опускающие несущественные свойства, в которых они могут отличаться от прототипа.

Модель – объект или описание объекта, системы для замещения (при определенных условиях предложениях, гипотезах) одной системы (т.е. оригинала) другой системы для изучения оригинала или воспроизведения его каких-либо свойств.

Основные свойства модели

- **конечность**: модель отображает оригинал лишь в конечном числе его отношений и, кроме того, ресурсы моделирования конечны;
- **упрощенность**: модель отображает только существенные стороны объекта и, кроме того, должна быть проста для исследования или воспроизведения;
- **приблизительность**: действительность отображается моделью грубо, или приблизительно;
- **адекватность** моделируемой системе: модель должна успешно описывать моделируемую систему;
- **наглядность, обозримость** основных свойств и отношений;
- **доступность и технологичность** для исследования или воспроизведения;
- **информативность** – модель должна содержать достаточную информацию о системе (в рамках гипотез, принятых при построении модели) и давать возможность получить новую информацию;
- **сохранение информации**, содержащейся в оригинале (с точностью рассматриваемых при построении модели гипотез);
- **полнота**: в модели должны быть учтены все основные связи и отношения, необходимые для обеспечения цели моделирования;
- **устойчивость**: модель должна описывать и обеспечивать устойчивое поведение системы, если даже та вначале является неустойчивой;
- **замкнутость**: модель учитывает и отображает замкнутую систему необходимых основных гипотез, связей и отношений.

Человек издавна использует моделирование для исследования объектов, процессов, явлений с целью:

- определения и улучшения характеристик реальных объектов и процессов;

– понимания сути явлений и выработки умения приспособляться или управлять ими;

– конструирования новых объектов или модернизация старых. Моделирование помогает человеку принимать обоснованные и продуманные решения, предвидеть последствия своей деятельности.

Есть целый ряд причин, по которым выгоднее исследовать не сам оригинал, а создать его модель.

1. В реальном времени оригинал (прототип) может уже не существовать или его нет в действительности. Для моделирования время не помеха. На основании известных фактов методом гипотез и аналогий можно построить модель событий или природных катаклизмов далекого прошлого. Так, к примеру, родились теории вымирания динозавров. С помощью такого же метода можно заглянуть в будущее. Так, ученые-физики построили теоретическую модель «ядерной зимы», которая начнется на планете в случае атомной войны.

2. Оригиналы могут иметь много свойств и взаимосвязей. Чтобы глубоко изучить какое-то конкретное, интересующее нас свойство, иногда полезно отказаться от менее существенных, вовсе не учитывая их.

3. Исследуемый объект либо очень велик (модель Солнечной системы), либо очень мал (модель атома).

4. Процесс протекает очень быстро (модель двигателя внутреннего сгорания) или очень медленно (геологические модели).

5. Исследование объекта может привести к его разрушению (модель самолета).

Натурные и абстрактные модели

Модель – очень широкое понятие, включающее в себя множество способов представления изучаемой реальности. Различают модели натурные (материальные) и абстрактные (идеальные).

Натурные модели основываются на чем-то объективном, существующем независимо от человеческого сознания (каких-либо телах или процессах). Натурные модели делят на физические (например, авто- и авиамодели) и аналоговые, основанные на процессах, аналогичных в каком-то отношении изучаемому (например, процессы в электрических цепях оказываются аналогичными многим механическим, химическим, биологическим и даже социальным процессам и могут быть использованы для их

моделирования). Границу между физическими и аналоговыми моделями провести можно весьма приблизительно и такая классификация моделей носит условный характер.

Абстрактные модели неразрывным образом связаны с человеческим мышлением, воображением, восприятием. Среди абстрактных моделей можно выделить интуитивные модели, к которым относятся, например, произведения искусства – живопись, скульптура, литература, театр и т.д., но единого подхода к классификации остальных видов идеальных моделей нет. Более продуктивным представляется такой подход к классификации идеальных моделей, при котором различают следующие абстрактные модели:

1) вербальные (текстовые) модели. Эти модели используют последовательности предложений на формализованных диалектах естественного языка для описания той или иной области действительности (примерами такого рода моделей являются правила дорожного движения, учебник);

2) математические модели – очень широкий класс знаковых моделей (основанных на формальных языках над конечными алфавитами), широко использующих те или иные математические методы. Например, можно рассмотреть математическую модель движения некоторого физического тела. Эта модель будет представлять собой систему уравнений. Математической моделью другого рода являются, например, математические соотношения, позволяющие рассчитать оптимальный (наилучший с экономической точки зрения) план работы какого-либо предприятия.

3) информационные модели – класс знаковых моделей, описывающих информационные процессы (возникновение, передачу, преобразование и использование информации) в системах самой разнообразной природы.

Граница между вербальными, математическими и информационными моделями может быть проведена весьма условно; возможно, информационные модели следовало бы считать подклассом математических моделей. Однако, в рамках информатики как самостоятельной науки, отдельной от математики, физики, лингвистики и других наук, выделение класса информационных моделей является целесообразным. Информатика имеет самое непосредственное отношение и к математическим моделям, поскольку они являются основой применения компьютера при решении задач различной природы: математическая модель

исследуемого процесса или явления на определенной стадии исследования преобразуется в компьютерную (вычислительную) модель, которая затем превращается в алгоритм и компьютерную программу.

Под **моделированием** понимается процесс построения, изучения и применения моделей.

Проблема моделирования состоит из трех задач:

1) построение модели (эта задача менее формализуема и конструктивна, в том смысле, что нет алгоритма для построения моделей);

2) исследование модели (эта задача более формализуема, имеются методы исследования различных классов моделей);

3) использование модели (конструктивная и конкретизируемая задача).

Моделирование тесно связано с такими категориями, как абстракция, аналогия, гипотеза и др.

Процесс моделирования обязательно включает и построение абстракций, и умозаключения по аналогии, и конструирование научных гипотез. Главная особенность моделирования в том, что это метод опосредованного познания с помощью объектов-заместителей. Модель выступает как своеобразный инструмент познания, который исследователь ставит между собой и объектом и с помощью которого изучает интересующий его объект. Именно эта особенность метода моделирования определяет специфические формы использования абстракций, аналогий, гипотез, других категорий и методов познания. Возможности моделирования, то есть перенос результатов, полученных в ходе построения и исследования модели, на оригинал основаны на том, что модель в определенном смысле отображает (воспроизводит, моделирует, описывает, имитирует) некоторые интересующие исследователя черты объекта. Моделирование как форма отражения действительности широко распространено, и достаточно полная классификация возможных видов моделирования крайне затруднительна, хотя бы в силу многозначности понятия «модель», широко используемого не только в науке и технике, но и в искусстве, и в повседневной жизни.

Применительно к естественным и техническим наукам принято различать следующие **виды моделирования**:

– *концептуальное моделирование*, при котором совокупность уже известных фактов или представлений относительно исследуемого

объекта или системы истолковывается с помощью некоторых специальных знаков, символов, операций над ними или с помощью естественного или искусственного языков;

– *физическое моделирование*, при котором модель и моделируемый объект представляют собой реальные объекты или процессы единой или различной физической природы, причем между процессами в объекте-оригинале и в модели выполняются некоторые соотношения подобия, вытекающие из схожести физических явлений;

– *структурно-функциональное моделирование*, при котором моделями являются схемы (блок-схемы), графики, чертежи, диаграммы, таблицы, рисунки, дополненные специальными правилами их объединения и преобразования;

– *математическое (логико-математическое) моделирование*, при котором моделирование, включая построение модели, осуществляется средствами математики и логики;

– *имитационное (программное) моделирование*, при котором логико-математическая модель исследуемого объекта представляет собой алгоритм функционирования объекта, реализованный в виде программного комплекса для компьютера.

Разумеется, перечисленные выше виды моделирования не являются взаимоисключающими и могут применяться при исследовании сложных объектов либо одновременно, либо в некоторой комбинации. Кроме того, в некотором смысле концептуальное и, скажем, структурно-функциональное моделирование неразличимы между собой, так как те же блок-схемы, конечно же, являются специальными знаками с установленными операциями над ними.

Компьютерная модель

Традиционно под **моделированием на ЭВМ** понималось лишь имитационное моделирование. Можно, однако, увидеть, что и при других видах моделирования компьютер может быть весьма полезен, за исключением разве физического моделирования, где компьютер вообще-то тоже может использоваться, но, скорее, для целей управления процессом моделирования. Например, при математическом моделировании выполнение одного из основных этапов – построение математических моделей по экспериментальным данным – в настоящее время просто невысказимо без компьютера. В последние годы, благодаря развитию графического интерфейса и графических пакетов, широкое развитие получило компьютерное,

структурно-функциональное моделирование, о котором подробно поговорим ниже. Положено начало использованию компьютера даже при концептуальном моделировании, где он используется, например, при построении систем искусственного интеллекта.

В настоящее время под **компьютерной моделью** понимают:

1) условный образ объекта или некоторой системы объектов (или процессов), описанный с помощью взаимосвязанных компьютерных таблиц, блок-схем, диаграмм, графиков, рисунков, анимационных фрагментов, гипертекстов и т.д. и отображающий структуру и взаимосвязи между элементами объекта. Компьютерные модели такого вида мы будем называть структурно-функциональными;

2) отдельную программу, совокупность программ, программный комплекс, позволяющий с помощью последовательности вычислений и графического отображения их результатов, воспроизводить (имитировать) процессы функционирования объекта, системы объектов при условии воздействия на объект различных, как правило случайных, факторов. Такие модели мы будем далее называть имитационными моделями.

Компьютерное моделирование – метод решения задачи анализа или синтеза сложной системы на основе использования ее компьютерной модели.

Суть компьютерного моделирования заключена в получении количественных и качественных результатов по имеющейся модели. Качественные выводы, получаемые по результатам анализа, позволяют обнаружить неизвестные ранее свойства сложной системы: ее структуру, динамику развития, устойчивость, целостность и др.

Количественные выводы в основном носят характер прогноза некоторых будущих или объяснения прошлых значений переменных, характеризующих систему. Компьютерное моделирование для рождения новой информации использует любую информацию, которую можно актуализировать с помощью ЭВМ.

Основные функции компьютера при моделировании:

- помощь при решении задач, решаемых обычными вычислительными средствами, алгоритмами, технологиями;
- постановка и решение новых задач, не решаемых традиционными средствами, алгоритмами, технологиями;
- конструирование компьютерных обучающе-моделирующих сред;

- моделирование для получения новых знаний;
- «обучение» новых моделей (самообучающиеся модели).

Разновидностью компьютерного моделирования является вычислительный эксперимент. Компьютерное моделирование, вычислительный эксперимент становится новым инструментом, методом научного познания, новой технологией также из-за возрастающей необходимости перехода от исследования линейных математических моделей систем. Предметом компьютерного моделирования могут быть: экономическая деятельность фирмы или банка, промышленное предприятие, информационно-вычислительная сеть, технологический процесс, любой реальный объект или процесс, например, процесс инфляции, и вообще – любая сложная система.

Компьютерная модель сложной системы должна по возможности отображать все основные факторы и взаимосвязи, характеризующие реальные ситуации, критерии и ограничения. Модель должна быть достаточно универсальной, чтобы по возможности описывать близкие по назначению объекты, и в то же время достаточно простой, чтобы позволить выполнить необходимые исследования с разумными затратами. Все это говорит о том, что моделирование, рассматриваемое в целом, представляет собой скорее искусство, чем сформировавшуюся науку с самостоятельным набором средств отображения явлений и процессов реального мира.

Creo является так называемым высокотехнологичным решением: он предлагает интеграцию со всеми видами инструментов, позволяющими контролировать полный маршрут проекта. От эскиза до чертежа, от объекта до производства, расчета, моделирования и контроля качества, все интегрировано в одной линейке ПО (CAD / CAM / CAE / PDM).

Кроме PTC (разработчика ProEngineerWildfire, Creo) есть еще 2 разработчика высокотехнологичных современных решений в области автоматизации проектирования: Siemens (Unigraphics NX) и Dassault Systems (CATIA).

Решения среднего класса включают программное обеспечение Autodesk Inventor, SolidWorks, Solid Edge, Space Designer. В основном они просто предлагают решения для моделирования. Интеграция с другими средствами разработки и проектирования редко включена на этом уровне. Таким образом, для сложных конструкций и крупных промышленных предприятий, эти продукты приводят к неприемлемым компромиссам. Многие из этих продуктов - урезанные версии,

или базовые варианты для дальнейшего усовершенствования на новом уровне (SolidWorks, SolidEdge)

Creo - это система гибридного параметрического моделирования, что означает следующее:

- параметрическое: каждый размер и свойство, заложенные в модель, оказывают влияние на форму и свойства объекта;

- гибридное: каждая твердотельная грань - это NURB-поверхность, и каждая поверхность может быть использована для построения твердых тел;

- основанное на истории: Creo отражает хронологию разработки проекта в дереве модели;

- основанное на использовании фичеров: конструкция построена с использованием элементов форм (экструзия, отверстия, резьба, скругления и т.п.), а не с помощью примитивов (сфера, блок, клин, цилиндры).

Конструкторский пакет Creo Parametric предназначен для трехмерного твердотельного и поверхностного моделирования деталей и конструкций любой сложности и позволяет эффективно автоматизировать процессы конструкторской подготовки производства изделий.

Creo Parametric позволяет разрабатывать модели деталей, которые содержат всю необходимую информацию для ее использования на следующих этапах подготовки производства:

- создания полного комплекта обычной и интерактивной документации в соответствии с современными требованиями и в полном соответствии с ЕСКД;

- анализа и оптимизации разрабатываемых изделий;

- разработки инструмента, оснастки и управляющих программ (УП) для станков с ЧПУ;

- изготовления моделей по технологиям быстрого прототипирования (RP – Rapid Prototyping).

Также в Creo Parametric могут быть разработаны конструкции механизмов с проверкой их движения, модели сварных конструкций, интерактивные руководства и плакаты. Creo Parametric обладает средствами анализа модели, позволяющими автоматически рассчитывать массово-инерционные характеристики.

Пакет Creo представляет собой единую программную среду, объединяющую имеющиеся у РТС технологии и сочетающую в себе два основных подхода к проектированию: параметрическое модели-

рование на базе Creo Parametric и прямое моделирование, реализованное в Creo Direct. Оба инструмента используют общую модель данных, что позволяет работать над проектом с помощью обоих методов. Параметрическое проектирование существенно отличается от обычного двухмерного черчения или трехмерного моделирования. Разработчик в случае параметрического проектирования создает математическую модель объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации детали, взаимные перемещения деталей в сборке и т. п.

Центром всех прикладных разработок в Creo Parametric является математическая модель. Такая система разработки дает возможность установить сквозные цепочки передачи данных и изменений от модели к остальным составляющим проекта. Составляющими проекта в Creo Parametric являются детали, сборочный узел, чертежи, базы данных, содержащие доступные материалы, инструменты и технологии. Зависимость и подчиненность составляющих проекта центральной математической модели предоставляет значительные удобства для организации двунаправленной ассоциативности проектирования. Двунаправленная ассоциативность означает, что любые изменения хотя бы в одном из составляющих объекта Creo автоматически отражаются во всех связанных местах. Например, изменения, сделанные в сборочном чертеже, автоматически отражаются в деталях, чертежи которых изменяются. А измененная деталь приводит к изменениям во всех сборках, где эта деталь присутствует.

Creo Parametric включает в себя полный спектр возможностей совместного со сторонними приложениями использования информации. Главным предназначением системы Windchill PDMLink является управление информацией и облегчение доступа к данным об изделии на протяжении всего его жизненного цикла – Workflow. Это достигается благодаря возможности объединить все данные об изделии в единую логическую систему. В результате такого объединения все, кто принимает участие в разработке изделия, получают распределенный авторизованный доступ к проектной информации и управлению процессами проектирования.

Архитектура системы построена на основе веб-технологий, что позволяет не только динамично развивать систему, но и использовать стандартные веб-инструменты – такой подход существенно упрощает администрирование системы и работу ее пользователей.

Тема 1.3. Настройка САПР. Интерфейс пользователя. Управление файлами

Система автоматизированного проектирования (САПР) – сложный комплекс средств, предназначенный для автоматизации проектирования. Согласно принятым в 1980-х годах стандартам, САПР – это не просто некая программа, установленная на компьютере, это информационный комплекс, состоящий из аппаратного обеспечения (компьютера), программного обеспечения, описания способов и методов работы с системой, правил хранения данных и многого другого.

Однако, с приходом на отечественный рынок иностранных систем, широкое распространение получили аббревиатуры CAD (Computer Aided Design), которую можно перевести, как проектирование с применением компьютера, и CAD-system, которую можно перевести, как система для проектирования с помощью компьютера.

В настоящее время в среде специалистов по САПР многие термины утратили свой первоначальный смысл, а термин САПР теперь обозначает программу для автоматизированного проектирования. Другими словами, то, что раньше называлось ПО САПР или САД-системой, теперь принято называть системой автоматизированного проектирования (САПР). Также можно встретить названия САД-система, КАД-система, система САПР и многие другие, но все они обозначают одно – некую программу для автоматизированного проектирования.

1.3.1. Классификация САПР

САПР классифицируют по следующим принципам:

- по целевому назначению (САПР-Ф функционального проектирования, конструкторские САПР-К, технологические САПР-Т и др.);
- по сфере применения (машиностроительные САПР, САПР для радиоэлектроники, САПР в области архитектуры и строительства и др.);
- по масштабу решаемых задач (САПР на базе машинной графики и геометрического моделирования; комплексы вычисления кинематических ограничений; комплексы анализа прочностных механиче-

ских характеристик; комплексы анализа электронных схем; системы с уникальным программным и техническим обеспечением);

- по характеру базовой подсистемы (системы, в которых главной процедурой является сугубо конструирование, проработка геометрии и пространственных форм изделий; САПР, основной задачей которых является подготовка баз данных и расчет технико-экономических условий; комплексные или же интегрированные САПР, обеспечивающие сопровождение изделия на всем жизненном цикле, который схематично изображен на рисунке 1.8).

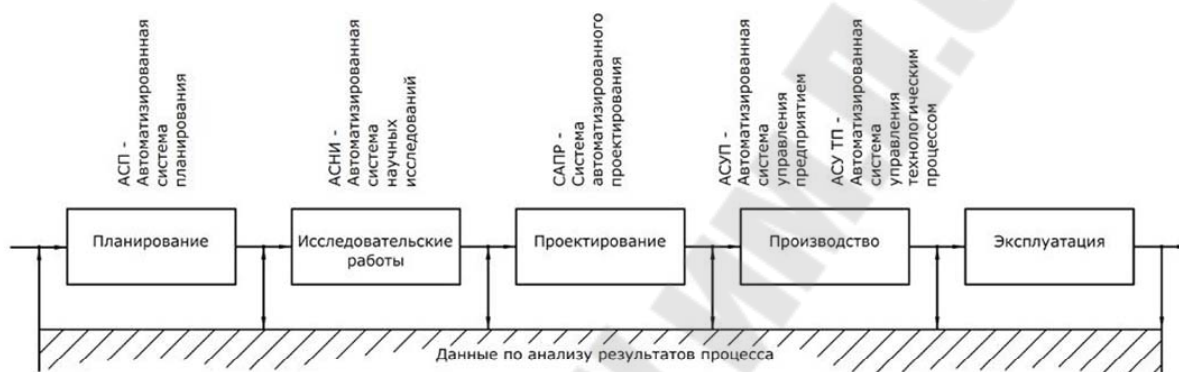


Рис. 1.8. Общая структура жизненного цикла изделия

В САПР, в которых основной процедурой проектирования является конструирование, т. е. определение пространственных форм и взаимного расположения объектов, под базовой подсистемой принято понимать графическое ядро.

С точки зрения программиста геометрическое ядро – это библиотека функций для создания геометрических объектов (точка, отрезок, дуга, кривая, поверхность, твердое тело), изменения их форм на экране и размеров, создания на их основе новых объектов, визуализации модели на компьютере и обмена трехмерными данными с другими программами. К настоящему времени в мире существует несколько десятков сравнительно известных графических ядер. Среди них можно выделить следующих лидеров: Parasolid от EDS; ACIS от Spatial Corp.

1.3.2. Структура САПР

В качестве международного эквивалента понятию САПР можно предложить термин САх-системы (Computer Aided Technologies). Этот термин означает совокупность CAD/CAE/CAM - систем автоматизированного проектирования и в большей степени раскрывает

структуру и взаимосвязь составляющих САПР. Комплексные САХ-системы позволяют не только осуществить проектирование изделия, но произвести на основе компьютерной модели оценку его физических и технологических свойств, а также подготовить необходимый набор инструкций для его автоматизированного изготовления. Составляющими звеньями этой цепочки являются:

- CAD (Computer Aided Design, либо Computer Aided Drafting) – средства автоматизированного проектирования, предназначенные для автоматизации двухмерного или трехмерного геометрического проектирования, создания конструкторской и технологической документации;

- CAE (Computer Aided Engineering) – средства автоматизации инженерных расчетов, анализа и симуляции физических процессов, служащие для динамического моделирования, проверки и оптимизации изделий;

- CAM (Computer Aided Manufacturing) – средства технологической подготовки производства изделий, обеспечивающие трансляцию и компиляцию трехмерной модели изделия в последовательность команд для производственных систем с числовым программным управлением (ЧПУ).

С помощью САД-средств создается геометрическая модель изделия, которая используется в качестве входных данных в системах САМ и на основе которой в системах САЕ формируется требуемая для инженерного анализа модель исследуемого процесса. Многие системы автоматизированного проектирования совмещают в себе решение задач, относящихся к различным аспектам проектирования CAD/CAM, CAD/CAE, CAD/CAE/CAM. Такие системы называют комплексными или интегрированными.

1.3.3. Требования к САПР

При создании САПР и их основных частей принято руководствоваться следующими принципами:

- единства и целостности, системной связанности объекта проектирования и его отдельных элементов;

- совместимости и совместного функционирования отдельных составляющих САПР;

- типизации и унифицирования повторяющихся и похожих элементов;

- возможности развития, пополнения, совершенствования, обновления составных частей САПР, расширения их взаимосвязи с другими системами различного уровня и функционального назначения.

В целом любая система проектирования должна реализовывать следующие функции:

- визуализации двухмерных и трехмерных изображений;
- возможности работы с библиотеками графических объектов; - моделирования и прогнозирования свойств изделия;
- ускорения расчетов и анализа при проектировании;
- подготовки технической документации.

К САПР предъявляются требования, которые могут сильно отличаться в зависимости от области применения, но среди них можно выделить основные:

- открытость системы, т. е. пользователь должен иметь возможность настраивать и дорабатывать конфигурацию в зависимости от собственных нужд;
- поддержка стандартных протоколов обмена и хранения информации;
- функционирование на различных аппаратных и программных платформах (желательно);
- возможность работы в многопользовательском режиме;
- возможность включения САПР в единую систему электронных документов и архива предприятия;
- наличие функции параметрического моделирования (крайне желательно).

1.3.4. История развития САПР

История создания и развития САПР дольше и богаче истории эволюции ЭВМ. Если не принимать во внимание развитие персональных компьютеров, двигателем которого в основном является сфера развлечений, развитие вычислительной техники можно рассматривать именно как развитие средств обеспечения САПР.

I этап развития САПР характеризовался формированием ее теоретических основ. В основу его идеологии легли разнообразные математические модели, такие как метод конечных элементов (МКЭ), теория базисных сплайнов А. Шонберга, кривые Безье, алгоритмы де Кастельжо, триангуляция Делоне. Разработанный в первой половине XX в. математический аппарат позволил процедуру проектирования

рассматривать как создание геометрической модели, а форму любых предметов описывать анализа геометрическими параметрами.

Первые программы автоматизированного проектирования были созданы для нужд электронной и радиотехнической промышленности. В качестве примеров можно привести программы электронных схем Net-1, ЕСАР, программы логического моделирования цифровой аппаратуры С. Крея – Р. Киша. В США в 1961 г. был создан язык АРТ (Automatic Programming Tools), ставший родоначальником многих других языков программирования оборудования с ЧПУ. В БССР для ЭВМ «Минск-22» на языке ЛЯПАС был реализован алгоритм авто-трассировки печатных плат. Также в СССР в первой половине 60-х гг. алгоритм з р ван расчет режимов резания металла, а в 70-е гг. разработаны методы синтеза технологических процессов.

Совмещение логических алгоритмов с визуализацией геометрических форм состоя ось в 1963 г., когда А. Сазерленд на основе дисплея и светового пера создал графическую станцию «Sketchpad», что явилось первым прототипом графического интерфейса.

Завершением этапа становления теоретической и практической базы САПР можно считать основание в 1971 г. доктором П. Хэнретти компании Manufacturing and Consulting Services (MCS), занимающейся разработкой интерактивной графической системы подготовки производства. Идеи MCS составили основу почти 70 % современных САПР.

II этап развития САПР можно рассматривать как реализацию систем инженерных расчетов, основанных на МКЭ, и параллельно с тем развитие средств графопостроения и геометрического моделирования.

В 1965 г. Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства США (NASA) поставило задачу разработки программного пакета для проведения конечно-элементного анализа (МКЭ) изделий. Первый пакет программ был создан в 1970 г. и выпущен под названием NASTRAN (NAsa STRuctural ANalysis). Одной из компаний, участвовавших в разработке этого пакета, была MSC (MacNeal-Schwendler Corporation). Впоследствии до 2003 г. эта компания не прекращала самостоятельно развивать пакет MSC.NASTRAN, ставший мировым лидером в своем классе продуктов.

В 1976 г. Ливерморская национальная лаборатория им. Э. Лоуренса представила программу трехмерного моделирования DYNA3D

ударного воздействия и контактных взаимодействий. В 1989 г. в рамках конверсии лаборатория была реорганизована в акционерное общество Livermore Software Technology Corporation, выпускающее продукт LS-DYNA.

В 1977 г. была создана компания Mechanical Dynamics Inc. (MDI), разработавшая программу Adams (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems), предназначенную для кинематического и динамического анализа механических систем, основанном на решении уравнений движения.

В 70–80-е гг. в МВТУ им. Баумана в программах моделирования ПА6–ПА9 реализованы принципы многоаспектного моделирования аналогий физических величин.

В это же время вместе с развитием аппаратных средств вычислительной техники наблюдалась эволюция и графических средств программного обеспечения. Значительное внимание в 70-х уделялось вопросам стандартизации алгоритмов графических построений. Работы по стандартизации были направлены на расширение функциональности графических языков и систем. Унификация основных операций геометрического моделирования привела к созданию инвариантных (т. е. независимых аппаратных средств) геометрических ядер, предназначенных для применения в разных САПР.

В 1986 г. утверждается ряд стандартов в области компьютерной графики, обеспечивающих различные возможности запоминать графическую информацию в функциях виртуального графического устройства (в терминах примитивов и атрибутов), а также передавать ее между различными системами и интерпретировать для вывода на устройство. В этом же году компания Autodesk выпустила свой первый CAD-продукт AutoCAD.

В 1987 г. был разработан стандарт GSK-3D с ориентацией на 3D-графику.

В 1988 г. было разработано ядро Parasolid, которое впоследствии стало основой системы твердотельного моделирования для CAD/CAM Unigraphics.

На данном этапе развития в САПР появился многоуровневый иерархический метод поэтапного проектирования. Недостатком систем данного поколения являлась их узкая специализация, жесткая связь между программным и информационным обеспечением. Программное обеспечение не являлось универсальным, не было возможности его использования для различных технологических процессов,

часть производителей САПР ориентировалась на архитектуру микропроцессоров Intel x86, часть – на микропроцессоры Motorola.

III этап ознаменовался появлением интегрированных систем проектирования, ориентированных не предприятия среднего бизнеса. До этих пор функциями твердотельного трехмерного моделирования обладали лишь дорогие тяжелые системы, а легкие программы служили для двухмерного черчения. Средние САПР заняли промежуточное положение между тяжелыми и легкими классами, унаследовав от первых трехмерные параметрические возможности, а от вторых – невысокую цену и ориентацию на персональные ЭВМ. Они произвели революционный переворот в мире САПР, открыв небольшим конструкторским организациям путь для перехода от двухмерного проектирования к трехмерному. САПР среднего уровня отличаются гибкостью программного обеспечения, интеграцией решаемых задач и универсальностью, что позволяет применять их практически в любых отраслях промышленности.

В 1993 г. в США создается компания Solidworks Corporation, которая уже через два года представила свой первый пакет твердотельного параметрического моделирования на базе геометрического ядра Parasolid. Эта компания надолго вошла в число ведущих разработчиков систем среднего класса. Ее программные продукты полтора десятка лет оставались ориентирами для разработчиков САПР, совмещающих в себе технологии CAD, CAE и CAM.

Ряд CAD/CAM систем среднего и легкого уровней начали разрабатываться в СССР и продолжили в России. Наибольшее распространение среди них получили система Компас (компания «Аскон»), Кредо (НИЦ АСК), T-Flex (ЗАО «Топ-системы»). К 2000 г. САПР Компас была распространена и на 3D-проектирование с использованием собственного графического ядра.

Именно этот этап развития САПР сопровождался появлением на рынке огромного разнообразия САПР различных классов (таблица 1.1), многие из которых актуальны до сих пор.

Таблица 1.1

Классификация САПР различных классов

Класс САПР	Программный продукт (неполный)	Решаемые задачи	Компания-производитель	Графическое ядро
Тяжелый	UGX NX (Unigraphics)	CAD/CAM/CAE/PDM	Siemens PLM Software (EDS, затем UGS PLM Software), Германия	Parasolid
	Creo (Pro/Engineer)	CAD/CAM/CAE/PDM	PTC, Inc., США	Собственное (GRANITE), ACIS
	CATIA	CAD/CAM/CAE/PDM	Dassault Systèmes, Франция	CNEXT, CGM
Средний	SolidWorks	MCAD	SolidWorks Corporation, Франция	Parasolid и решатель DCM
	SolidEdge	MCAD	Siemens PLM Software, Германия	Parasolid и решатель D-CUBED
	Inventor	MCAD	Autodesk, США	Собственное (ASM), совместимое с ACIS
	Cimatron	CAM	Cimatron Ltd., Израиль	ACIS
	MSC.ADA MS	CAE	MSC Software, США	ACIS и Solver
	ANSYS	CAE	ANSYS Inc., США	ACIS и Parasolid
	Компас-3D	MCAD/PDM	Аскон, Россия	Собственное ядро
	T-Flex	MCAD/PDM	Топ-системы, Россия	Parasolid
Легкий	AutoCAD	CAD	Autodesk, США	Собственное (ASM), совместимое с ACIS
	FreeCAD	CAD	Открытый онлайн-проект	Open CASCADE Technology
	TurboCAD	CAD	IMSI/design, США	ACIS
	TurboCAD	CAD	IMSI/design, США	ACIS
	nanoCAD	CAD	Нанософт, Россия	Собственное ядро

IV этап характеризуется интеграцией CAD/CAE/CAM-систем с системами управления проектными данными, со средствами автоматизированного документооборота (PDM – Product Data Management) и с другими средствами информационной поддержки изделий. Такими возможностями обладают современные САПР тяжелого класса: Unigraphics NX компании EDS, CATIA французской фирмы Dassault Systemes и Creo (в недавнем прошлом – Pro/Engineer) от фирмы Parametric Technology Corp. Главные особенности тяжелых САПР – их обширные функциональные возможности, высокая производительность и стабильность работы. Все – результат длительного развития и тестирования непосредственно в работе.

При этом тяжелые системы стоят значительно дороже средних и легких. Затраты на их приобретение окупаются только в том случае, когда речь идет о сложном и наукоемком производстве: в тяжелом машиностроении, авиационной и середине космической промышленности. По мнению аналитиков, этот сегмент промышленности уже насыщен тяжелыми САПР, в связи с чем разработчики возлагают надежды на предприятия среднего и малого бизнеса. Приблизительно с прошлого десятилетия наметилась перспектива в развитии облегченных САПР, занимающих пограничное положение между средними и тяжелыми классами (рис. 1.9).

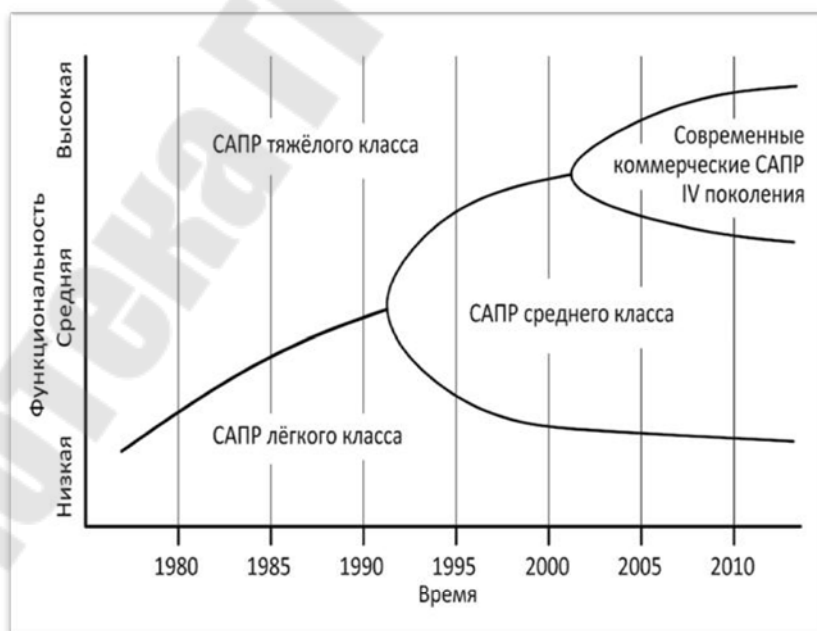


Рисунок 1.9 – Схематическая диаграмма истории развития САПР

Именно этим требованиям соответствуют современные системы CAD/CAE/CAM/PDM: SolidEdge, Autodesk Inventor, SolidWorks, Компас Лоцман PLM. Эти системы при сравнительной дешевизне успешно совмещают в себе возможности трехмерного проектирования механизмов и устройств средней сложности, инженерных расчетов, подготовки производства и управления документооборотом. Для их работы не требуются мощности суперкомпьютеров и громоздких вычислительных станций, для них вполне достаточно ресурса персональных компьютеров.

1.3.5. Концепция интегрированного управления жизненным циклом изделия

Успехи в автоматизации различных областей деятельности производственного предприятия привели ведущих разработчиков САПР к мысли, что системы CAD/CAE/CAM/PDM могут быть связаны в единый комплекс программных решений. Так в начале 2000-х гг. появилась PLM (Product Lifecycle Management) концепция управления жизненным циклом изделия. Суть технологий PLM в том, что вся информация о проектировании, производстве, реализации и эксплуатации изделия до мельчайших подробностей вносится в электронную базу данных. Принципиальным свойством такой информационной системы является возможность описать не только структуру выпускаемого изделия, но все нюансы технологии на любом этапе его изготовления. PLM-стратегия включает в себя следующие подуровни:

- жизненный цикл создания изделия;
- жизненный цикл производства;
- жизненный цикл операционной поддержки.

Эти циклы представляются тремя уровнями. Первичным является жизненный цикл управления интеллектуальными активами, начинающаяся с оценки пользовательских требований, заканчивая поддержкой серийного производства.

Вторичным уровнем является производственный, включающий в себя системы управления ресурсами предприятия, связанными с выпуском и распределением готовой продукции. Внешний операционный уровень поддерживает системы управления финансами и производственными отношениями.

Технология комплексной компьютеризации сфер промышленного производства, предусматривающая хранение, обработку, переда-

чу информации в компьютерных средах, а также оперативный доступ к данным, обеспечивается автоматическими логистическими системами CALS (Computer Acquisition and Lifecycle Support). В основу CALS-технологии положен ряд стандартов:

- STEP (Standard for Exchange of Product model data), позволяющий описать жизненный цикл изделия, включая технологию изготовления и контроль качества продукции;

- SGML (Standard Generalized Markup Language), устанавливающий способы унифицированного оформления документов;

- EDIFACT (Electronic Data Interchange For Administration, Commerce, Transport), регламентирующий способы обмена подобными документами.

Главная задача CALS-технологии – обеспечение единообразного описания и интерпретации данных в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных. Развитие этих технологий способно привести к появлению виртуальных производств, при которых управление производственным технологическим оборудованием может быть распределено во времени и пространстве между многими организационно автономными проектными бюро.

1.3.6. Перспективы развития САПР

Кроме CALS-систем дальнейшее развитие САПР по мнению многих разработчиков должно идти по пути создания вычислительных систем, которые более «дружественны» к пользователю, легко тиражируются и обладают преимуществами удаленного онлайн-подхода. Одна из ключевых тем развития – «облачные» вычисления: удаленная работа с данными, размещенными на серверах, с различных устройств, имеющих выход в Интернет. Возможны два варианта реализации облачных вычислений в САПР. В первом случае в облако переносится вся структура инженерных служб, а необходимость в установке ПО на рабочем месте исчезает. Во втором случае у конструктора по-прежнему остается графическая рабочая станция, а распределенными оказываются вычислительные задачи, требующие больших ресурсов.

Следующая важная тенденция – альтернативные ОС. Сугубо пользовательская ОС Microsoft Windows в большей степени ограничивает возможности САПР, чем способствует их полномасштабной реализации. Среди альтернативных вариантов российскими разработчиками ПО всерьез рассматривается Linux. Серьезные перспективы

возлагаются на Google Chrome OS, не требующую установки приложений на локальном компьютере и способную реализовать облачные технологии.

Неудовлетворенность рынка САПР темпами развития архитектуры микропроцессорной системы Intel спровоцировала развитие ARM. Сейчас ее поддерживают несколько производителей, среди которых одним из самых активных является Nvidia. Основная тенденция заключается в развитии параллельных вычислений, в переносе существенной части вычислений с центрального процессора на графическое ядро.

Набирают популярность интерфейсы, ориентированные на работу с мультитач-экранами. Однако для массового перехода к подобным интерфейсам пока недостаточно существующего на рынке количества крупногабаритных мультитач-панелей с необходимым для САПР разрешением.

Еще один тренд – это рост рынка мобильных устройств. Наибольшее ускорение он получил с появлением iPad. В секторе САПР сегодня многие сотрудники являются мобильными – работают на выезде, на удаленных строительных объектах, перемещаются по стране, трудятся дома. же появились привлекательные для разработчиков мобильные платформы IOS Apple и Android Google, а также существенное количество САПР-приложений под них.

Наконец, в отрасли САПР/PLM ощущаются тенденции использования социальных сетей. Даже появился новый термин – «социальная разработка изделий». Поставщики поддерживают вики, блоги, видеоклипы, Twitter и Facebook, запускают коммуникационные порталы. Результатом станет расширение взаимодействия между разработчиками, привлечение их к участию в проекте на самой ранней стадии, улучшение обратной связи с вендорами и укрепление контактов с потребителями [1].

В общих чертах сегодня на развитие САПР влияют три ключевые тенденции:

- 1) развитие интеллектуальных возможностей;
- 2) реализация SaaS, т.е. САПР как услуга, реализованная веб-сервисом;
- 3) развитие САПР приложений для мобильных устройств.

1.3.7. Состояние САПР в Республике Беларусь

Наша страна также не остается в стороне от разработки и внедрения средств автоматизации производства. Продукты САПР используются для проектирования зданий и сооружений, транспортных систем, систем электро-, тепло- и газоснабжения, в тяжелой и легкой промышленности как на крупных государственных предприятиях (БелАЗ, МАЗ, МТЗ, Гомсельмаш, Строммашина), так и на частных предприятиях малого и среднего бизнеса (ОАО «Амкодор», ООО «ХордаГидравлика»). Широкое использование САПР нашли в текстильной промышленности. Например, НПООО «Лакшми», являясь резидентом Парка высоких технологий, успешно решает проблему автоматизации проектирования одежды и обладает приоритетом в данной области.

Крупнейшее в сфере разработки и производства радиоэлектроники предприятие ОАО «Интеграл» в настоящее время практически полностью автоматизировано. При помощи программного обеспечения от Cadence Design System и корпорации Mentor Graphics это предприятие решает широкий спектр задач создания и анализа аналоговых и цифровых электрических схем, включая частотный анализ помехозащищенности, расчет рабочего диапазона температур, создание и верификацию (DRC-контроль) топологии печатных плат, составление таблиц соответствия электрическим проектным нормам (ERC-контроль), подготовку технической документации для серийного производства. Одним из самых востребованных направлений деятельности на производстве сейчас является разработка собственной библиотеки элементов PDK (Process Design Kit), встраиваемой в САПР в целях учета особенностей конкретных производственных технологий.

На базе университетов, учебных центров, а также Парка высоких технологий открыт ряд представительств ведущих поставщиков современных САПР. Проводятся тематические конференции и семинары. Среди них стоит отметить состоявшийся в 2012 г. IT-семинар, посвященный использованию САПР в учебном процессе, организованный факультетом информационных технологий и робототехники БНТУ совместно с представительством ИООО «Аскон-Бел» при поддержке Министерства образования Республики Беларусь.

В 2006 г. СП ЗАО «Международный деловой альянс» (ИВА) заключило партнерское соглашение с компанией PTC – производителем Steo – о предоставлении прав поставлять лицензии и оказывать услуги по внедрению программных продуктов в области CAD/CAM/CAE-

решений. В сентябре 2010 г. компания IBA получила статус предпочтительного партнера корпорации PTC

по внедрению продуктов Windchill (Windchill Preferred Partner).

Отличительной чертой внедрения решений PTC специалистами IBA является наличие практического опыта интеграции с ERP – системами (1С, Галактика), проведения работ по внедрению, оказанию технической поддержки, разработки дополнительного программного обеспечения с использованием языков программирования (Java, C++), СУБД и веб-технологий. На данный момент компания IBA предлагает системы управления конструкторской подготовкой производства на базе программных продуктов компании PTC: Windchill и Creo.

1.3.8. Возможности конструкторского пакета Creo Parametric в сочетании Windchill PDMLink

Конструкторский пакет Creo Parametric предназначен для трехмерного твердотельного и поверхностного моделирования деталей и конструкций любой сложности и позволяет эффективно автоматизировать процессы конструкторской подготовки производства изделий. Creo Parametric позволяет разрабатывать модели деталей, которые содержат всю необходимую информацию для ее использования на следующих этапах подготовки производства:

- создания полного комплекта обычной и интерактивной документации в соответствии с современными требованиями и в полном соответствии с ЕСКД;
- анализа и оптимизации разрабатываемых изделий;
- разработки инструмента, оснастки и управляющих программ (УП) для станков с ЧПУ;
- изготовления моделей по технологиям быстрого прототипирования (RP – Rapid Prototyping).

Также в Creo Parametric могут быть разработаны конструкции механизмов с проверкой их движения, модели сварных конструкций, интерактивные руководства и плакаты. Creo Parametric обладает средствами анализа модели, позволяющими автоматически рассчитывать массово-инерционные характеристики.

Пакет Creo представляет собой единую программную среду, объединяющую имеющиеся у PTC технологии и сочетающую в себе два основных подхода к проектированию: параметрическое моделирование на базе Creo Parametric и прямое моделирование, реализованное в Creo Direct. Оба инструмента используют общую модель дан-

ных, что позволяет работать над проектом с помощью обоих методов. Параметрическое проектирование существенно отличается от обычного двумерного черчения или трехмерного моделирования. Разработчик в случае параметрического проектирования создает математическую модель отдельных объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации детали, взаимные перемещения деталей в сборке и т. п.

Центром всех прикладных разработок в Creo Parametric является математическая модель. Такая система разработки дает возможность установить сквозные цепочки передачи данных и изменений от модели к остальным составляющим проекта. Составляющими проекта в Creo Parametric являются детали, сборочный чертежи, базы данных, содержащие доступные материалы, инструменты технологии. Зависимость и подчиненность составляющих проекта центральной математической модели предоставляет значительные удобства для организации двунаправленной ассоциативности проектирования. Двунаправленная ассоциативность означает, что любые изменения хотя бы в одном из составляющих объекта Creo автоматически отражаются во всех связанных местах. Например, изменения, сделанные в сборочном чертеже, автоматически отражаются в деталях, чертежи которых изменяются. А измененная деталь приводит к изменениям во всех сборках, где эта деталь присутствует.

Creo Parametric включает в себя полный спектр возможностей совместного со сторонними приложениями использования информации.

Главным предназначением системы Windchill PDMLink является управление информацией и облегчение доступа к данным об изделии на протяжении всего его жизненного цикла – Workflow. Это достигается благодаря возможности объединить все данные об изделии в единую логическую систему. В результате такого объединения все, кто принимает участие в разработке изделия, получают распределенный авторизованный доступ к проектной информации и управлению процессами проектирования.

Архитектура системы построена на основе веб-технологий, что позволяет не только динамично развивать систему, но и использовать стандартные веб-инструменты – такой подход существенно упрощает администрирование системы и работу ее пользователей.

Раздел 2. Базовые инструменты моделирования твердых тел.

Тема 2.1. Моделирование. Объемное моделирование твердого тела. Основные принципы разработки 3D-моделей.

Способы моделирования.

Инженеры и конструкторы имеют дело с математической (прежде всего - геометрической) моделью разрабатываемого изделия. Исторически первым и главным языком их общения (то есть языком описания инженерных моделей) был язык чертежей. Чертеж (и другие подобные графические схемы) широко использовался (и используется до сих пор) не только для описания механического изделия и его частей, но также и для описания электрических схем, архитектурных конструкций, карт местности и т. п. Четкие стандарты (как национальные, так и международные) гарантируют однозначное понимание языка чертежей всеми «читателями» - от инженера - конструктора до токаря, слесаря и фрезеровщика. Однако создание чертежей вручную - чрезвычайно дорогостоящая процедура, доступная только подготовленным специалистам и требующая использования специальной чертежной доски с линейкой - кульмана, а также разных вспомогательных средств (например, лекал для рисования кривых).

Неудивительно, что первые системы автоматизации в этой области были предназначены именно для упрощения и ускорения создания чертежей (подобно другой эпохальной концепции автоматизации с помощью компьютера - текстовым процессорам, предназначенным для упрощения создания текстовых документов и легкого внесения изменений в них). Системы класса computer aided drafting существуют и поныне, самый известный их представитель – AutoCAD. Типичная функциональность таких систем включает в себя средства, необходимые для создания и редактирования чертежей, а процесс работы концептуально не отличается от работы в графическом редакторе (основными понятиями графических моделей таких систем являются графические примитивы с атрибутами, отображаемые уровни, а также различные способы конструирования). В нашем курсе мы не будем рассматривать системы этого класса, так как в настоящее время они стремительно уступают свои позиции системам трехмерного моделирования (даже Autodesk делает основную ставку не на AutoCAD, а на Inventor Series). Дело в том, что с изобретением трехмерной компьютерной графики (возможности реалистического изображения трехмерной сцены на двумерном дисплее компьютера и

ее вращения с помощью манипулятора «мышь» в воображаемом трехмерном пространстве) у инженеров появилась возможность работать напрямую с трехмерной геометрической моделью проектируемого изделия, а не с его двумерными чертежами.

Модель - такое представление данных, которое наиболее адекватно отражает свойства реального объекта, существенные для процесса проектирования.

Геометрические модели описывают объекты, обладающие геометрическими свойствами.

Геометрическое моделирование - моделирование объектов различной природы с помощью геометрических типов данных.

Геометрическое моделирование оказалось настоящим прорывом в конструировании и производстве изделий. Оно не только значительно упрощает процесс проектирования (теперь инженер-конструктор не обязан обладать развитым пространственным мышлением или использовать подручные материалы типа пластилина - он видит проектируемое изделие непосредственно на экране), но снимает многие коммуникативные проблемы. Геометрические модели в САПР используются для решения многих задач. В первую

очередь они предназначены для хранения информации о форме объектов и их взаимном расположении и предоставления ее для обработки в удобном для компьютерной программы виде. В этом ключевое отличие электронной геометрической модели от чертежа, который представляет собой условное символично-графическое изображение, предназначенное для чтения человеком.

Представьте себе ребенка, который лепит что-то из пластилина. Малыш мнет пластилин, а иногда добавляет или отрывает кусочки, и постепенно приближается к конечному результату. Такую деятельность вполне можно назвать процессом проектирования, поскольку налицо детализация формы по мере развития идеи. Ребенок погружается в проектирование, не имея ни малейшего представления о технических чертежах, не умея пользоваться даже ручкой и бумагой. Если ребенок захочет передать результат другим, например, для прототипирования и массового производства, ему достаточно отдать реальный результат своих трудов, из которого можно будет извлечь всю необходимую информацию.

Системы геометрического моделирования были созданы для того, чтобы преодолеть проблемы, связанные с использованием физических моделей в процессе проектирования. Эти системы создают сре-

ду, подобную той, в которой создаются и изменяются физические модели. Другими словами, в системе геометрического моделирования разработчик изменяет форму модели, добавляет и удаляет ее части, детализируя форму визуальной модели таким же образом, как ребенок формирует фигурку из пластилина. Визуальная модель может выглядеть точно так же, как физическая, но она нематериальна. Однако трехмерная визуальная модель хранится в компьютере вместе со своим математическим описанием, благодаря чему устраняется главный недостаток физической модели - необходимость выполнения измерений для последующего прототипирования или серийного производства.

За последние пятьдесят лет было разработано множество способов геометрического моделирования, которые мы разберем детально ниже.

Типы (способы) объемного моделирования

Хронологически различают следующие подходы к геометрическому моделированию:

- каркасное моделирование;
- поверхностное моделирование;
- твердотельное моделирование;
- немногообразное (гибридное) моделирование.

Каркасное моделирование - это исторически первая технология представления объемной геометрии. Она естественным образом развивалась из систем 2D-черчения. Это самый простой способ представления трехмерных моделей - так называемые проволочные каркасы, или просто каркасы, которые дают неоспоримые преимущества по сравнению с моделированием на плоскости. Они помогают более ясно представлять модель и надежно контролировать взаимное расположение составляющих ее элементов. Кроме того, каркасы можно использовать и для создания проекционных видов. Достаточно простые структуры данных и алгоритмы работы с каркасами позволили реализовать их на маломощном оборудовании конца 70-х годов XX века.

В *системах каркасного моделирования (wireframe modeling systems)* форма представляется в виде набора характеризующих ее линий и конечных точек. Линии и точки используются для представления трехмерных объектов на экране, а изменение формы осуществляется путем изменения положения и размеров отрезков и точек. Дру-

гими словами, визуальная модель представляет собой каркасный чертеж формы, а соответствующее математическое описание представляет собой набор уравнений кривых, координат точек и сведений о связности кривых и точек. Сведения о связности описывают принадлежность точек к конкретным кривым, а также пересечение кривых друг с другом. Системы каркасного моделирования были популярны в ту пору, когда геометрическое моделирование только начало зарождаться. Их популярность объяснялась тем, что в системах каркасного моделирования создание форм выполнялось через последовательность простых действий, так что пользователям было достаточно легко создавать формы самостоятельно.

Недостаток каркасного представления моделей состоит в том, что программы не могут отобразить всех особенностей поверхностей, определяемых каркасами, и это делает невозможным построение, например, точных сечений. Визуальное представление достаточно аскетичное и в ряде случаев не дает возможности однозначно интерпретировать увиденное (рисунок 2.1).

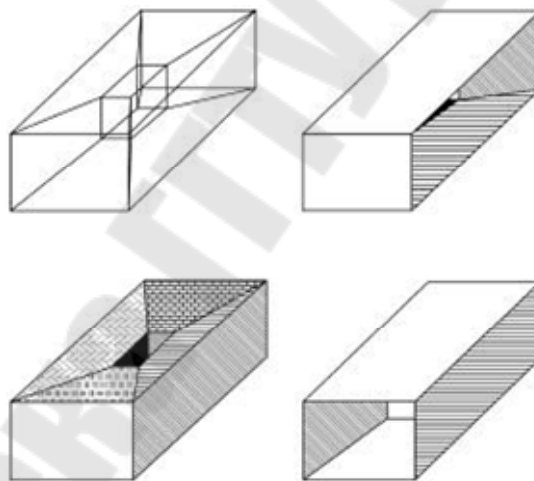


Рис. 2.1. Неоднозначные каркасные модели

Тем не менее даже такая, имеющая множество ограничений технология позволила существенно расширить функциональные возможности САПР по сравнению с 2D -системами. Более того, соответствующее математическое описание не содержит сведений о внутренних и внешних поверхностях моделируемого объекта. Без этих сведений невозможно рассчитать массу объекта, определить траектории перемещения инструмента при обработке объекта или создать сетку для конечно-элементного анализа, несмотря на то что объ-

ект кажется трехмерным. Поскольку эти операции являются неотъемлемой частью процесса проектирования, системы каркасного моделирования были постепенно вытеснены системами поверхностного и твердотельного моделирования.

В настоящее время построение каркасов также используется в геометрическом моделировании САПР, но лишь как вспомогательная система промежуточных построений (рис. 2.2).

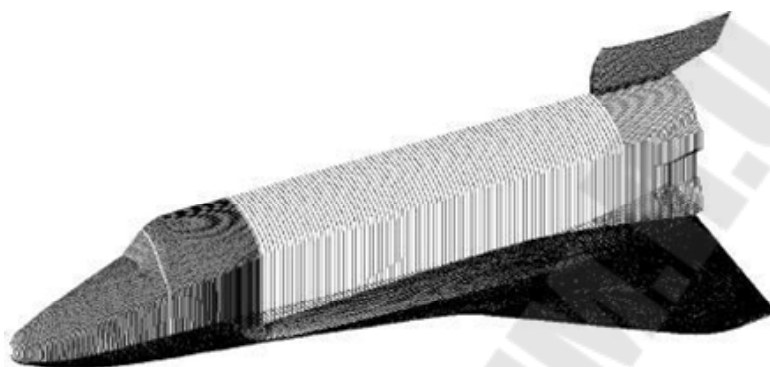


Рис. 2.2. Каркасная модель теоретических обводов космического корабля Буран

Поверхностное моделирование

В отличие от каркасного представления, моделирование при помощи поверхностей имеет существенно меньше ограничений, так как позволяет определить своеобразную «оболочку» трехмерного объекта (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Поверхностная модель теоретических обводов космического корабля Буран

Геометрические модели на основе поверхностного представления обеспечивают качественную визуализацию, более простой переход к построению расчетных сеток для численного моделирования, обеспечивают ряд полезных функций, таких как построение пространственных сопряжений, сечений, определения линии пересечения оболочек, генерацию чертежных проекций.

Поверхностные модели различаются по способу аппроксимации поверхности. Более простой в части структуры данных и используемых для работы с ними алгоритмов является *полигональная* аппроксимация, когда поверхность представляется набором взаимосвязанных плоских граней, на практике чаще всего треугольных. Такая аппроксимация легко строится, для нее разработаны эффективные алгоритмы реалистичной визуализации, она не требует значительных вычислительных ресурсов, хотя может быть и затратной по памяти. Главным ограничением подобной аппроксимации является то, что она имеет фиксированную точность, то есть отклонение положения модельной поверхности от «идеальной» моделируемой. Для достижения высокой точности требуется создание сеток с малым шагом, что ведет к росту требований к вычислительным возможностям системы. Поэтому использование полигональной аппроксимации в САПР на текущий момент ограничено подсистемами визуализации и простейшего 3D-эскизирования.

Этих недостатков лишена технология NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline, неоднородный B-сплайн), сегодня наиболее часто используемая в практике САПР.

Такое описание поверхности обеспечивает определение координат любой ее точки, радиуса кривизны в ней, направления нормали к поверхности с высокой, в общем случае (без учета вычислительных затрат) с любой наперед заданной точностью.

Определенным недостатком такого подхода является сложность алгоритмов работы с NURBS, однако это обстоятельство исторически преодолено исследователями и разработчиками.

В определенной степени NURBS-представление является развитием полигонального, но в отличие от него позволяет описывать не только плоские, но и криволинейные грани и ребра (кромки). Совокупность таких граней с общими ребрами по традиции называют сеткой.

Технология NURBS обеспечивает реализацию ряда функциональных возможностей, недоступных или существенно ограниченных

при использовании каркасного либо полигонального представления: вычисление радиуса кривизны поверхностей, их гладкое сопряжение, построение траекторий на поверхности, что важно для подготовки ЧПУ-программ, получение точных изображений, спроецированных на плоскость, например, для получения чертежных видов и т. д. и т. п.

Поверхностное моделирование играет важную роль при проектировании изделий из листового металла (sheet metal parts), таких как капоты и крылья автомобилей, где форма поверхности важна как для дизайна, так и для аэродинамики изделия (рисунок 2.4).

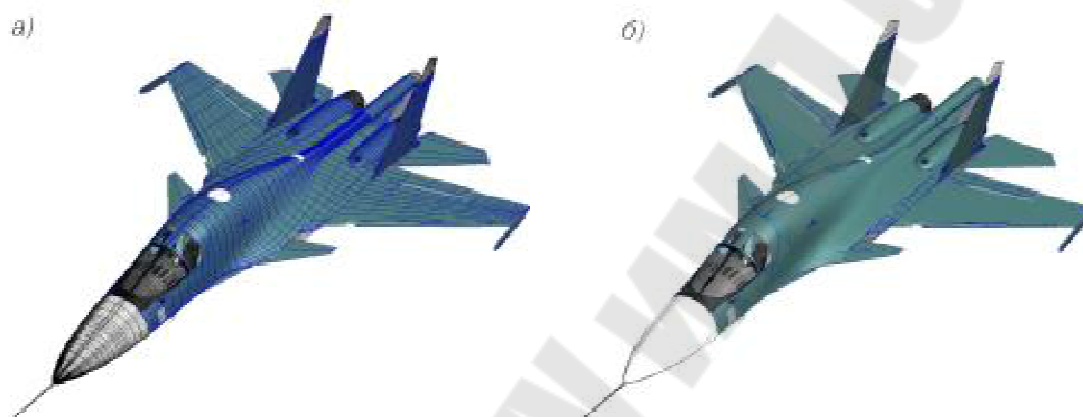


Рисунок 2.4 - Аппроксимация теоретических обводов самолета: а) полигональная и б) NURBS-аппроксимация

Традиционно используются несколько типовых **контекстов создания поверхностей**:

- плоская поверхность - получается заполнением плоского контура (2D-эскиз или набор замкнутых кромок, лежащих в одной плоскости);

- поверхность вытяжки - образуется в результате плоскопараллельного вытягивания замкнутого или разомкнутого 2D/3D-эскиза в направлении, перпендикулярном плоскости эскиза, или под произвольным углом;

- поверхность вращения - получается вращением произвольного профиля (2D -эскиз) относительно оси;

- поверхность по траектории - создается движением 2D/3D эскиза вдоль криволинейной образующей (2D/3D-эскиз, 3D-кривая) и произвольного числа направляющих кривых (2D/3D - эскиз, 3D - кривая), деформирующих исходный контур;

-поверхность по сечениям - аналог поверхности по траектории; отличается тем, что строится не по одному, а по нескольким поперечным сечениям с направляющими кривыми;

-граничная поверхность - аналог поверхности по сечениям; отличается тем, что строится по нескольким произвольно сориентированным в пространстве 3D-кромкам других поверхностей с сохранением касательности к ним и с соблюдением непрерывности по второй производной (гладкая стыковка); при построении могут использоваться направляющие кривые;

-поверхность свободной формы - строится разбиением сетки с управляющими точками на поверхности грани 3D-модели; изменение формы поверхности достигается перетаскиванием контрольных точек;

-эквидистантная поверхность - получается смещением на определенное расстояние от существующих граней или поверхностей;

-поверхность разъема - используется при проектировании литейных форм, а также в качестве вспомогательной геометрии для разделения матрицы и пуансона;

-срединная поверхность - создается на середине (или заданном проценте) толщины тонкостенной детали;

-линейчатая поверхность - строится под углом к выбранной кромке и предназначена для построения граней с уклоном.

В том случае, если установлена программная связь между вспомогательным каркасом и результирующей поверхностью, моделирование становится *ассоциативным*, при этом изменение каркасных элементов ведет к автоматическому изменению геометрии поверхностей, построенных с использованием этого контекста.

В системах поверхностного моделирования (surface modeling systems) математическое описание визуальной модели включает в себя не только сведения о характеристических линиях и их конечных точках, как в каркасном моделировании, но и данные о поверхностях. При работе с отображаемой на экране моделью изменяются уравнения поверхностей, уравнения кривых и координаты конечных точек. Если поверхности не окрашены и не затушеваны, визуальная модель в системе поверхностного моделирования может выглядеть точно так же, как в системе каркасного моделирования.

Математическое описание может включать сведения о связности поверхностей, то есть о том, как поверхности соединяются друг с другом и по каким кривым. В некоторых приложениях эти сведения

оказываются очень полезными. Например, программа для формирования траектории перемещения фрезы с ЧПУ может воспользоваться этой информацией для проверки, не задевает ли фреза поверхности, примыкающие к обрабатываемой.

Существует *три стандартных метода* создания поверхностей в системах поверхностного моделирования.

1. Интерполяция входных точек.
2. Интерполяция криволинейных сеток.
3. Трансляция или вращение заданной кривой.

Способы ввода для каждого метода могут зависеть от конкретной системы поверхностного моделирования. Однако базовый метод ввода для каждой системы легко определить по представлению кривых и плоскостей.

Системы поверхностного моделирования используются для создания моделей со сложными поверхностями, потому что визуальная модель позволяет оценить эстетичность проекта, а математическое описание позволяет построить программу для обработки поверхностей детали на станке с ЧПУ.

Несмотря на достаточно широкие возможности, которые предоставляет поверхностное моделирование, оно имеет ряд существенных ограничений с точки зрения использования в САПР, в частности невозможность вычисления объемов, масс и моментов инерции объектов, ограниченность применения к ним булевых операций (вычитания, объединения, пересечения).

Твердотельное (объемное) моделирование - логическое развитие каркасного и поверхностного. Основным объектом моделирования - трехмерное объемное тело, которое может описываться разными способами: декомпозиционным, конструктивным или граничным. Мы разберем их подробнее ниже. Главным преимуществом твердотельного моделирования перед каркасным и поверхностным является свойство физической корректности - все твердотельные модели имеют аналоги в реальном мире (чего не скажешь о каркасных и поверхностных моделях).

При использовании твердотельного моделирования, ставшего на сегодня стандартом де-факто в 3D CAD/CAM/CAE-системах снимаются ограничения поверхностного моделирования.

Системы твердотельного моделирования (solid modeling systems) предназначены для работы с объектами, состоящими из

замкнутого объема, или *монолита (solid)*. В системах твердотельного моделирования, в отличие от систем каркасного и поверхностного моделирования, не допускается создание наборов поверхностей или характеристических линий, если они не образуют замкнутого объема. Математическое описание объекта, созданного в системе твердотельного моделирования, содержит сведения, по которым система может определить, где находится какая-либо точка: внутри объема, снаружи него или на его границе. По этим сведениям можно получить любую информацию об объеме тела, а значит, могут быть написаны приложения, работающие с объектом на уровне объема, а не на уровне поверхности.

Если бы система твердотельного моделирования требовала ввода всех данных для полного математического описания, она была бы слишком сложной для пользователей, и они отказались бы от нее. Процесс детализации формы не был бы похож на интуитивный процесс физического моделирования, и в результате получилось бы совсем не то, на что рассчитывали создатели систем геометрического моделирования. Поэтому разработчики систем твердотельного моделирования стараются предоставить простые и естественные функции, чтобы пользователи могли работать с объемными формами точно так же, как они работают с физическими моделями, не вдаваясь в подробности математического описания. Функции моделирования, подобные созданию примитивов, булевым операциям, вытягиванию, построению фигуры вращения, повороту и скруглению, требуют от пользователя совсем немного. Обо всех деталях математического описания системы заботятся сами.

Существуют различные алгоритмические методы представления твердотельных моделей:

- декомпозиционные модели;
- конструктивные модели;
- граничные модели

Декомпозиционные модели являются простейшим подходом к твердотельному моделированию, представляя трехмерное тело композицией некоторых простых элементов. Различают следующие декомпозиционные модели:

- воксельное (voxel) представление;
- октантное дерево;
- ячеечное представление.

Воксельное представление - полный трехмерный аналог растрового одноцветного изображения. Тело представляется трехмерным булевым массивом, каждый элемент которого является пространственным кубиком одинакового размера со своими уникальными координатами. Такой кубик называется вокселем (voxel - от VOlume riXEL). Воксели (рисунок 2.5) равномерно покрывают всю область (тор), в которой содержится моделируемое тело. Отметим удобство воксельного представления для реализации на его основе булевых операций твердотельного моделирования. Для этого необходимо построить согласованные воксельные представления двух тел и применить соответствующую операцию к булевым значениям ячеек массива.

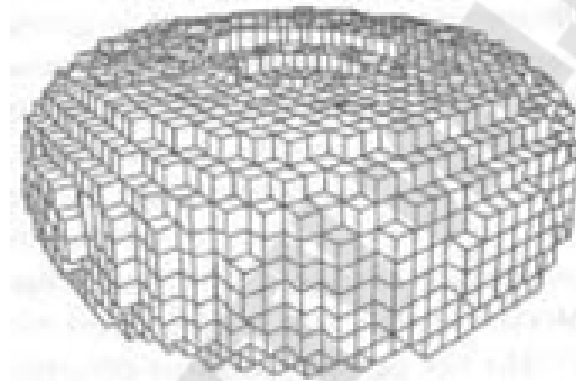


Рис. 2.5. Воксельное представление тора

Сложность такого алгоритма будет прямо зависеть от числа вокселей. На воксельном представлении несложно вычислять объемные параметры тела - достаточно лишь вычислить их аналитически для каждого вокселя и просуммировать.

Октантное дерево является развитием воксельного представления. Каждый узел октантного дерева соответствует некоторому кубу в трехмерном пространстве, который является либо:

- полностью (с заданной точностью) принадлежащим описываемому телу;
- полностью не принадлежащим описываемому телу;
- частично пересекающимся с описываемым телом.

Первые два типа узлов - терминальные (листья в октантном дереве), а каждый узел третьего типа обязательно имеет 8 дочерних узлов, соответствующих геометрическому разбиению его куба на 8 частей (октантов) (рисунок 2.6).

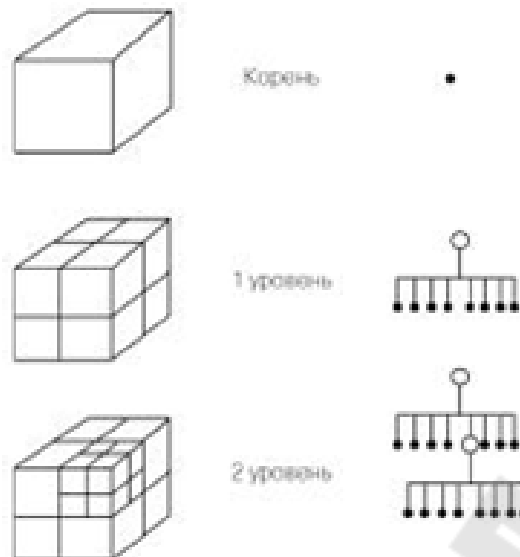


Рис. 2.6. Октантное дерево

Ячеечное представление соответствует разбиению моделируемого тела на произвольные непересекающиеся выпуклые многогранники, полностью (в соответствии с заданной погрешностью) заполняющие его объем.

Конструктивные модели основаны на применении операций твердотельного моделирования. Для создания конструктивной модели, модели CSG (constructive solid geometry) реализуют конструктивный подход в терминах булевых операций над параметрическими твердотельными примитивами (прямоугольный параллелепипед, цилиндр и пр.).

В рамках CSG представления для описания составных твердых тел определены следующие операции (рис. 2.7) над исходными (а) элементарными телами:

-вычитание (б); объединение (в); -пересечение (г).

Таким образом, любое составное тело может быть описано в виде традиционного уравнения из булевых функций, в котором аргументами являются либо элементарные тела, либо другие составные тела. Это представление называют деревом построений (рис. 2.8).

Такое представление, кроме удобства модификации геометрии результирующего тела, позволяет существенно снизить требования к вычислительным ресурсам за счет применения оптимизирующих процедур к дереву построений.

Представление твердых тел в виде дерева построений удобно также и с точки зрения организации пользовательского интерфейса, обеспечивающего наглядный и быстрый доступ к любому элементу,

входящему в описание геометрии тела, его модификацию и получение отчетной информации.

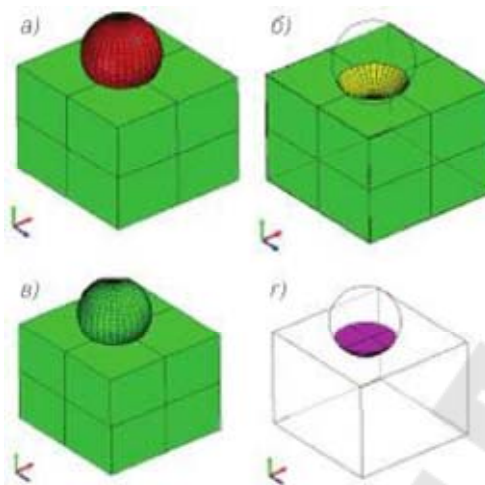


Рис. 2.7. Булевы операции над простыми твердыми телами

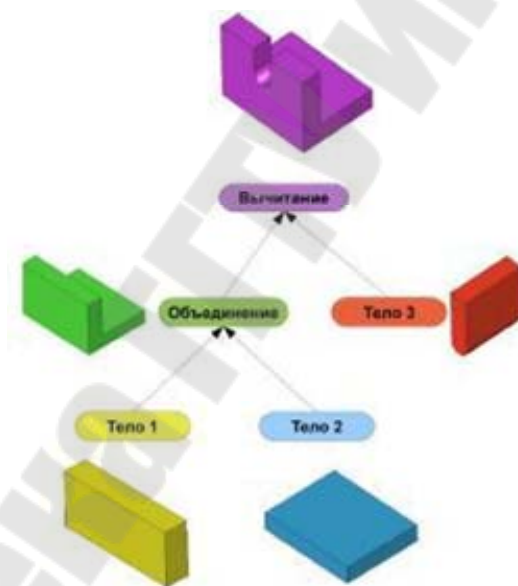


Рис. 2.8. Дерево построения составных твердых тел

Граничные модели

Твердое тело (рис. 2.9) образуется в пространстве одной или несколькими поверхностями, образующими замкнутый объем. Оно включает в себя *грани*, *ребра* (или кромки) и *вершины*. **Грань** – часть граничной поверхности, образующей тело, граница которой состоит из криволинейных сегментов, при пересечении которых происходит существенное изменение вектора нормали к поверхности, т.е. нарушается непрерывность изменения кривизны поверхности (рис. 2.10).

Криволинейные сегменты, ограничивающие грань, называются *ребрами*. Точки, в которых встречаются соседние ребра, называются *вершинами*.

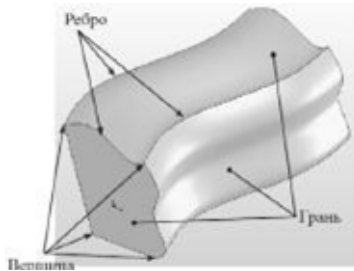


Рис. 2.9 - Твердое тело



Рис. 2.10 - Грани, ребра и нормали к поверхности

Граничные модели хранят информацию о границах тела (гранях, ребрах и вершинах). Для простоты манипулирования эта информация подразделяется на геометрические и топологические данные.

Геометрические данные для каждой граничной сущности свои:

- для вершины - ее координаты;
- для ребра - параметрическое уравнение кривой (прямой);
- для грани - параметрическое уравнение поверхности либо тип и набор параметров в случае канонической поверхности (плоскости, сферы, цилиндра, конуса, тора).

Топологические данные - это информация о смежности вершин и ребер, ребер и граней, а также о внутренних и внешних границах грани. Для удобного манипулирования топологической информацией было предложено несколько структур данных, называемых **BRep** (Boundary Representation):

- многогранные (фасетные) модели;
- вершинные модели;
- полуреберные модели;
- крыльевые реберные модели.

Разберем одну из самых популярных структур – полуреберную, основанную на том простом факте, что каждое ребро границы твердого тела принадлежит ровно двум граням (рис. 2.11).

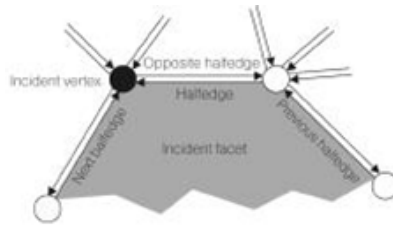


Рис. 2.11. Полуреберная модель

Структура данного представления такова:

- список тел (solid), каждое тело состоит из списка его граней (faces), ребер (edges) и вершин (vertices);
- грань состоит из колец (loop), представляющих собой внешнюю границу грани, а также опциональные внутренние границы;
- кольцо состоит из списка полуребер (halfedges);
- полуребро указывает на начальную вершину и следующее полуребро, а также на свое ребро;
- ребро хранит указатели на два своих полуребра.

Одним из достоинств граничной модели является удобный способ расчета ее объемных параметров.

В практике САПР наиболее широкое применение имеет технология, базирующаяся на граничном представлении элементарных односвязных тел (BRep, Boundary Representation) в совокупности с конструктивной геометрией (CSG, Constructive solid geometry), описывающей операции над телами.

Граничное представление определяет сплошное тело неявно путем описания ограничивающей его поверхности. Суть BRep-представления заключается в том, что твердое тело описывает замкнутая пространственная область, ограниченная набором элементарных тонких поверхностей (граней) с общими образующими контурами (ребрами) на границе поверхностей и признаком внешней или внутренней стороны поверхности (рисунок 2.12), а также обеспечивающим следующий ряд операций, определенных над телами:

- проверка правильности задания, для односвязных тел осуществляется по формуле Эйлера, в наиболее общем виде записываемой как:

$$V-E+F=2,$$

где **V**-количество вершин, **E**- количество ребер, **F** - количество граней;

- вычисление габаритного объема;
- вычисление нормали в точке;
- вычисление кривизны поверхности;
- нахождение точки пересечения с контуром или другой поверхностью;
- определение положения точки относительно поверхности.

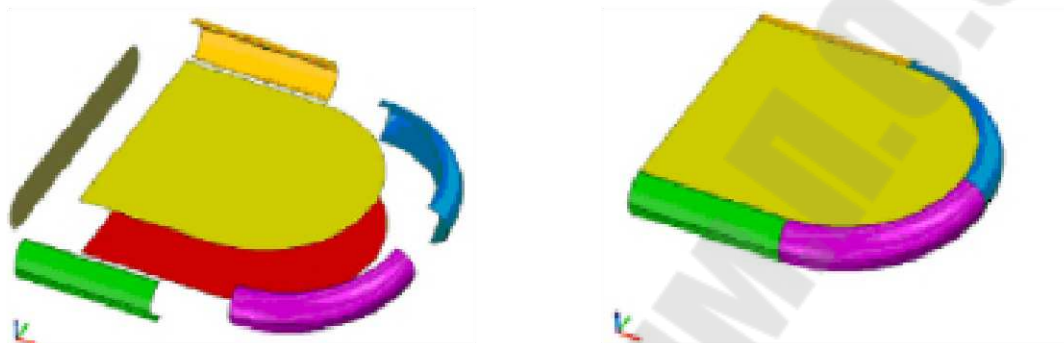


Рис. 2.12. BRep-представление простых твердых тел

Для описания сложных тел, моделирующих объекты реального мира, получаемые обработкой материала или неразъемной сборкой, используется иерархическая структура, описывающая тела как последовательность применения булевых операций над набором элементарных твердых тел - так называемое CSG-дерево (Constructive Solid Geometry tree) (рисунок 2.13, см. также рис. 2.8).

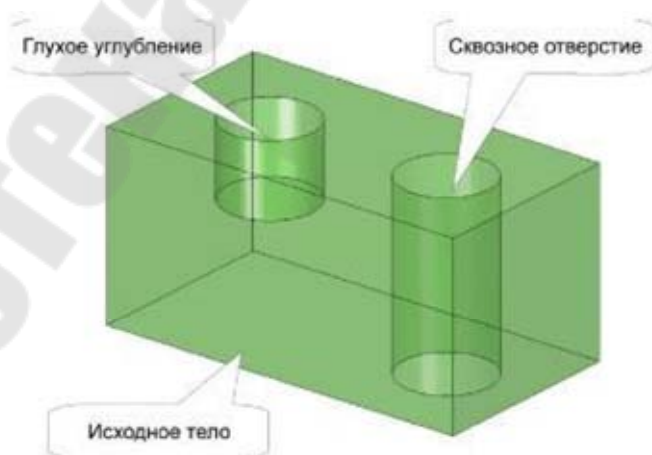


Рис. 2.13. BRep-представление сложных твердых тел

Так же как и для элементарного тела, правильность построения определяется формулой Эйлера, записываемой для многосвязных тел в частном виде:

$$V-E+F-H=2(C-G),$$

где V - количество вершин, E - количество ребер, F - количество граней, H - количество несквозных отверстий, C - количество компонент, G - количество сквозных отверстий.

Немногообразное (гибридное) моделирование снимает ограничения, присущие классическому твердотельному моделированию: с его помощью можно описывать геометрические модели, которые локально могут быть не только многообразиями размерности три (объемными телами), но и размерности два (поверхностями), один (кривыми), нуль (точками), а также участками сопряжения многообразий разной размерности.

Тема 2.2. Создание элементов опорной геометрии

Опорная геометрия позволяет размещать основные объекты модели в трехмерном пространстве. Нередко перед началом создания основной геометрии новой модели необходимо создать опорные элементы, такие как Опорные плоскости, Опорные оси, Опорные точки, Опорные координатные системы и Опорные кривые, которые предоставляют дополнительные возможности для создания и размещения объектов и компонентов.

Доступ к инструментам создания опорных элементов осуществляется с помощью команд в панели *Опорный элемент* на вкладке *Модель* (рис. 2.14).

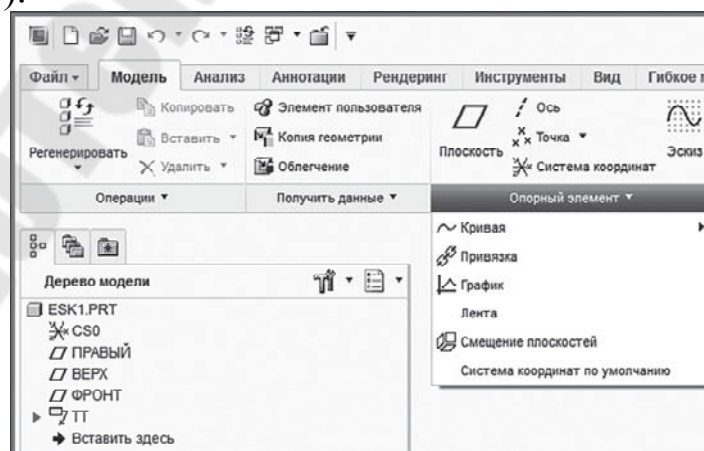


Рис. 2.14. Команды панели *Опорный элемент*

При создании новой детали с использованием шаблонов зачастую создаются опорные плоскости по умолчанию (ФРОНТ, ВЕРХ и ПРАВЫЙ) и опорная система координат. Плоскости – взаимно ортогональные, а начало координат привязано к точке пересечения этих плоскостей.

При создании новых опорных элементов используются привязки к существующим опорным элементам или геометрическим поверхностям, плоскостям, ребрам и т. д. существующих моделей

Основным элементом интерфейса опорных элементов, например, «Опорная плоскость» является диалоговое окно *Опорная плоскость* (рис. 2.15).

Диалоговое окно *Опорная плоскость* содержит следующие вкладки:

- размещение;
- изображение;
- свойства

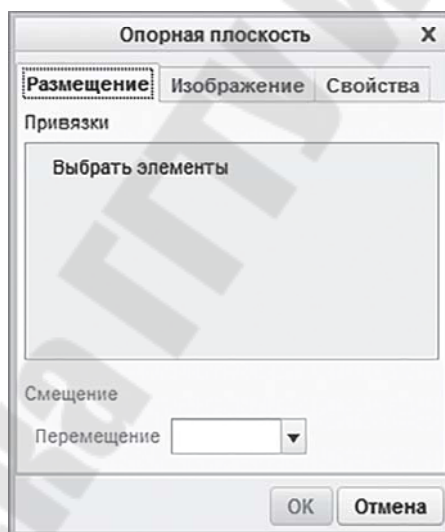


Рис. 2.15. Диалоговое окно *Опорная плоскость*

Вкладка *Размещение* содержит коллектор **Привязки** – они позволяют разместить новую опорную плоскость путем привязки к существующим плоскостям, поверхностям, кромкам, точкам, системам координат, осям, вершинам, элементам на основе эскиза, фаскам граней, фаскам кромок, фаскам вершин, кривым, рисованным опорным кривым и каналам.

Кроме того, можно задать закрепление для каждой из выбранных привязок. В меню опций типов закрепления заданы следующие типы закрепления:

- *смещение* – новая опорная плоскость смещена от выбранной привязки. Это тип закрепления по умолчанию при выборе опорной системы координат в качестве привязки размещения. В зависимости от выбранных привязок можно использовать список **Закрепление**, чтобы ввести значение переходного или вращательного смещения для новой опорной плоскости;

- *параллельный* – помещает новый опорный элемент параллельно к выбранной привязке;

- *нормаль* – помещает новую опорную плоскость по нормали к выбранной привязке;

- *касательная* – помещает новую опорную плоскость касательно к выбранной привязке. Закрепление *касательная* добавляется к вновь созданной опорной плоскости, когда она проходит касательно к нецилиндрической поверхности и проходит сквозь опорную точку, вершину или конечную точку кромки, которая выбирается в качестве привязки.

Вкладка *Изображение* предоставляет возможность зеркально отобразить направление нормали опорной плоскости.

На вкладке *Свойства* можно просмотреть информацию о наименовании опорной плоскости в навигаторе Creo Parametric. Кроме того, можно использовать вкладку *Свойства* для переименования опорного элемента.







Типы опорных элементов

В табл. 2.1 представлены все опорные элементы, имеющиеся в Creo Parametric, и их описания.


Таблица 2.1

Опорные элементы

Наименование опорного элемента	Описание опорного элемента
 Плоскость...	Плоскости
 Смещение плоскостей...	Плоскости, созданные с отступом от координатной системы
 Ось...	Оси
 Точка...	Точки
 Рисованные...	Рисованные точки
 Смещение от системы координат...	Точки, заданные на отступе от выбранной координатной системы

Наименование опорного элемента	Описание опорного элемента
 Точка поля...	Плавающая точка, принадлежащая поверхности или ребру (для модуля Behavioral Modeling)
Координатные системы	
 Система координат...	Координатная система
Система координат по умолчанию	Координатная система, созданная по умолчанию
Кривые	
 Кривая...	Кривые
 Эскиз...	Рисованные кривые
Специальные	
Анализ...	Операции анализа
 Интерфейс компонента...	Интерфейс компонента
 Привязка...	Создание самостоятельных привязок
График...	Операция график измерения параметра
Лента...	Поверхность-лента

Создание опорных плоскостей

Для того чтобы создать опорную плоскость, можно воспользоваться кнопкой **Плоскость**  в панели инструментов *Опорный элемент*.

При создании Опорной плоскости необходима, как минимум, одна ссылка. Например, при создании опорной плоскости смещением доуказать плоскую поверхность или другую опорную плоскость, на расстоянии от которой будет создана новая опорная плоскость. Следует помнить, что при создании опорной плоскости необходимо полностью исключить неопределенность, только после этого можно будет завершить создание плоскости. Ниже приведены пять условий размещения, с помощью которых можно зафиксировать плоскость в пространстве:

Через – размещает плоскость как проходящую через выбранную привязку (кромку, вершину, ось или точку)

- *Смещение* – размещает плоскость на расстоянии от выбранной привязки (плоскости или плоской поверхности);
- *Параллельно* – размещает плоскость параллельно выбранной привязке (плоскости или плоской поверхности);
- *По нормали* – размещает плоскость перпендикулярно выбранной привязке (оси, поверхности или опорной плоскости);
- *Касательно* – размещает плоскость касательно выбранной привязке (кромке или поверхности).


Иногда бывает необходимо обеспечить привязку одновременно с соблюдением нескольких условий размещения. В этом случае выбор нескольких привязок производится при помощи левой кнопки мыши при нажатой клавише **Ctrl**.

Creo Parametric не допускает создания опорной плоскости, если указаны не все необходимые условия ее размещения, поэтому выбрать недопустимую комбинацию условий или некорректную для выбранного условия привязку невозможно. Опорная плоскость по своему определению бесконечна, однако можно установить ее визуальное отображение, подогнав его по детали, конструктивному элементу, поверхности, кромке или радиусу.

Опорные точки, оси, плоскости (включая смещенные плоскости), кривые, ленты и системы координат можно создавать в любое время. Можно создавать эти элементы даже во время создания других элементов и затем использовать их как привязки этого элемента. В любом случае при создании элемента, нанесении размеров или проведении анализа, если базовый элемент необходим, его можно создать.

Создание опорных плоскостей

Создание опорной плоскости со смещением от выбранной привязки

Для создания опорной плоскости со смещением от выбранной привязки необходимо открыть модель **Файл > Открыть > prt_for_base.prt**, далее уже создать плоскость со смещением например на 9 мм от указанной поверхности , как показано на рис. 2.16

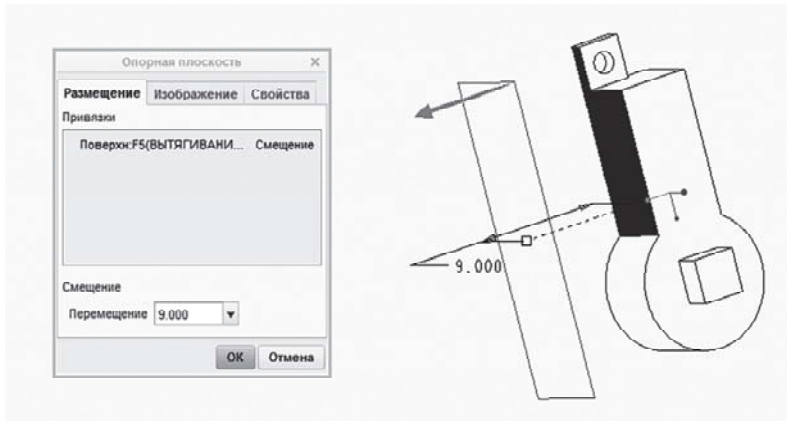


Рис. 2.16. Создание опорной плоскости со смещением

Создание опорной плоскости, параллельной одной и касательной к другой выбранной привязке

Для создания опорной плоскости, параллельной одной и касательной к другой выбранной привязки необходимо открыть модель **Файл > Открыть > prt_for_base.prt**, далее уже создать плоскость, зажав клавишу Ctrl и выбрав две привязки, как показано на рис. 2.17.



Рис. 2.17. Создание опорной плоскости, параллельной плоской грани и касательной цилиндрической грани

Создание опорной плоскости, проходящей через ось параллельно выбранной привязке

Для создания опорной плоскости, проходящей через ось параллельно выбранной привязке, необходимо открыть модель **Файл > Открыть > prt_for_base.prt**, далее уже создать плоскость, зажав клавишу Ctrl и выбрав две привязки, как показано на рис. 2.18.

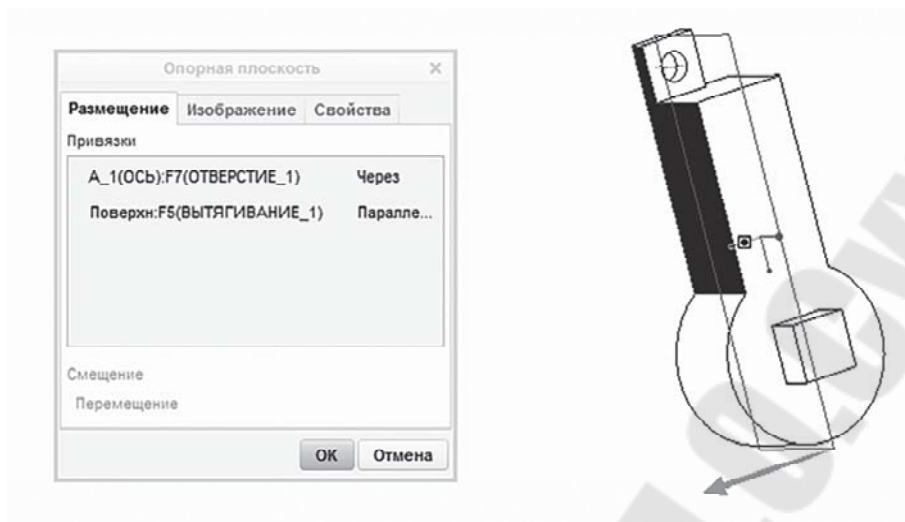


Рис. 2.18. Создание опорной плоскости, проходящей через ось параллельно выбранной привязке

Создание опорной плоскости, проходящей через ось под углом к выбранной привязке

Для создания опорной плоскости, проходящей через ось под углом к выбранной привязке, необходимо открыть модель **Файл > Открыть > prt_for_base.prt**, далее уже создать плоскость, зажав клавишу Ctrl и выбрав две привязки, как показано на рис. 2.19.

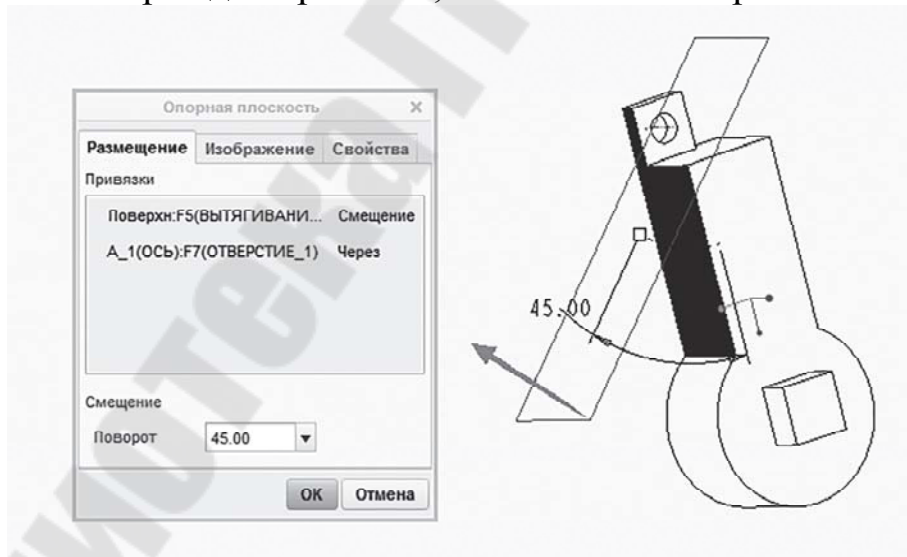


Рис. 2.19. Создание Опорной плоскости, проходящей через ось под углом к выбранной привязке

Создание опорных осей

Для того чтобы создать опорную ось, можно воспользоваться

кнопкой **Ось** () в панели инструментов *Опорный элемент*.

Как и опорные плоскости, опорные оси могут быть использованы в качестве ссылки при создании конструктивных элементов. Опорные оси очень хорошо подходят для создания опорной плоскости, которая должна быть построена под углом к какой-либо поверхности. Также опорная ось может быть использована при создании осового отверстия и быть элементом сопряжения в сборке.

Опорная ось создается способом, напоминающим создание отверстия. Ось можно разместить в модели со ссылкой на две плоские поверхности, от каждой из которых отложена величина смещения. Если необходимо сместить ось, достаточно просто изменить соответствующий размер.

Также опорная ось может быть построена перпендикулярно, касательно к указанным ссылкам либо проходящей через указанные ссылки. Ниже приведены пять условий размещения, с помощью которых можно зафиксировать Опорную ось в пространстве:

- *Через* – размещает ось, проходящую через выбранную привязку;
- *По нормали* – размещает ось перпендикулярно выбранной привязке с заданием величины Смещения от других привязок;
- *Касательно* – размещает ось касательно выбранному ребру или кривой;
- *Смещение* – размещает ось на отступе от выбранной привязки, когда используется условие По нормали;
- *От точки к точке* – размещает ось, как проходящую через две точки (вершины).

Иногда бывает необходимо обеспечить привязку одновременно с соблюдением нескольких условий размещения. В этом случае выбор нескольких привязок производится при помощи левой кнопки мыши при нажатой клавише Ctrl.

Создание опорной оси, проходящей через ребро

Для того чтобы создать опорную ось, проходящей через ребро необходимо выполнить действия в соответствии с рис. 2.20.

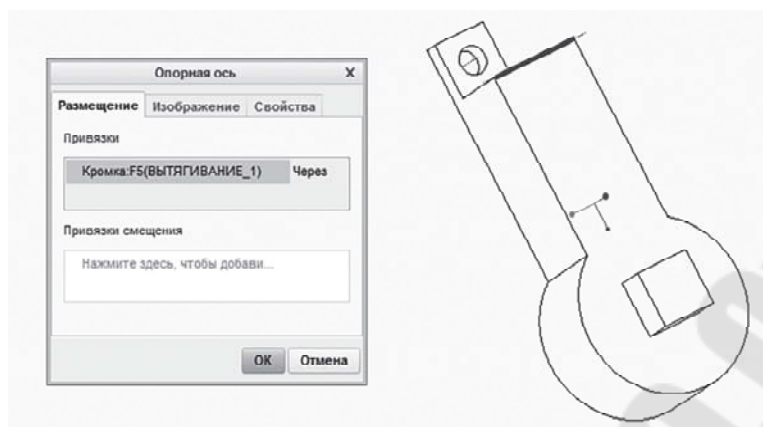


Рис. 2.20. Создание опорной оси, проходящей через ребро

Создание опорной оси, перпендикулярной к плоскости, с заданием отступов от других привязок

Для того чтобы создать опорную ось, перпендикулярную к плоскости, с заданием отступов от других привязок необходимо выполнить действия в соответствии с рис. 2.21.

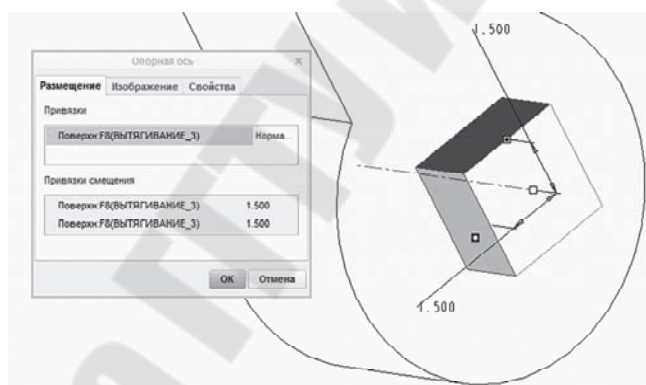


Рис. 2.21. Создание опорной оси, перпендикулярной к плоскости, с заданием отступов от верхней и боковой граней выступ

Создание опорной оси, перпендикулярной к плоскости, с заданием отступов от других привязок

Для создания опорной оси, перпендикулярной к плоскости, с заданием отступов от других привязок необходимо выполнить действия в соответствии с рис. 2.22.

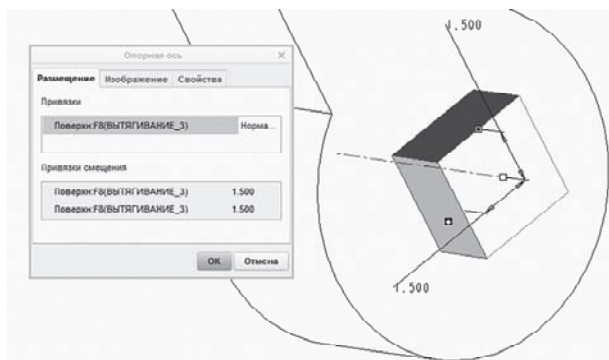


Рис. 2.22. Создание опорной оси, перпендикулярной к плоскости, с заданием отступов от верхней и боковой граней выступа

Создание опорной оси, проходящей через вершину, касательной к криволинейной кромке

Для создания опорной оси, проходящей через вершину, касательной к криволинейной кромке, необходимо выполнить действия в соответствии с рис. 2.23.

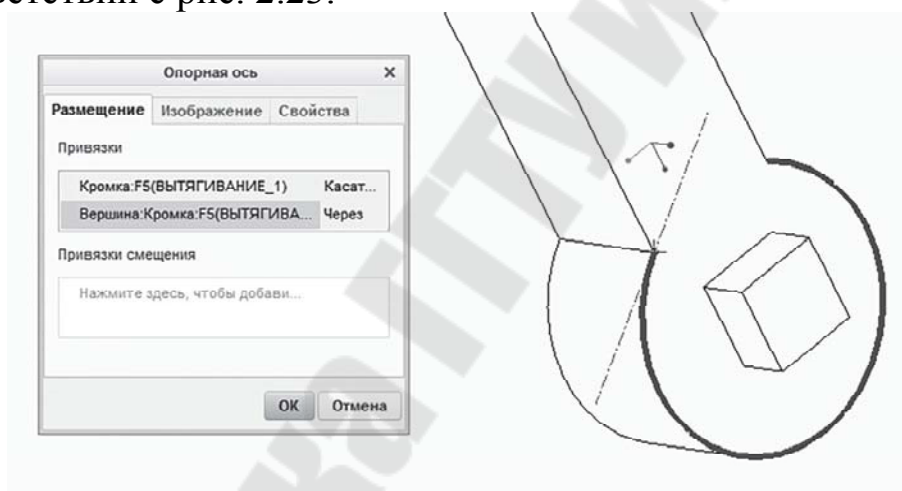


Рис. 2.23. Создание опорной оси, касательной к криволинейной кромке и проходящей через вершину

Создание опорной оси, проходящей через две вершины

Для создания опорной оси, проходящей через две вершины, необходимо выполнить действия с рис. 2.24.

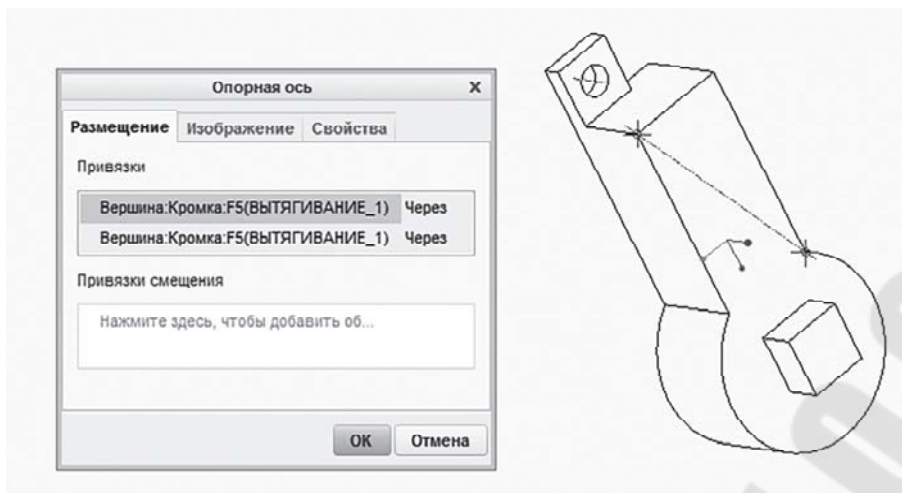


Рис. 2.24. Создание опорной оси, проходящей через две вершин

Создание опорных точек

Опорные точки используются для создания опорной оси, размещения отверстий, создания опорной (в том числе и трехмерной) кривой, а также при сборке компонент. Для того чтобы создать опорную точку, можно воспользоваться кнопкой **Точка** ($\times \times$) в панели инструментов **Опорный элемент**. При размещении базовых точек могут быть использованы геометрические ограничения модели, а также расстояния от начала координатной системы. Ниже приведены основные способы задания условий размещения, с помощью которых можно зафиксировать базовую точку в пространстве:

- указав относительное смещение от начала кривой;
- указав абсолютное смещение от начала кривой;
- на расстоянии от базовой плоскости;
- на вершине;
- в центре окружности или дуги;
- на пересечении базовой плоскости и кривой;
- на расстоянии относительно начала системы координат.

Этот способ используется для создания массива точек, который может быть использован для построения 3D-кривой, которая, в свою очередь, выступает в качестве траектории для соответствующих инструментов. Задаются координаты отступа точек относительно начала указанной координатной системы. Отступ задается в декартовых, сферических или цилиндрических координатах. Координаты также могут быть импортированы из текстового файла.

3D-кривые используются при создании конструктивного элемента инструментом **Протянуть**, а также при создании поверхностей.

При создании опорных точек открывается диалоговое окно *Опорная точка* (рис. 2.25). Один объект может содержать множество опорных точек. Для этого после определения ссылок для базовой точки нужно щелкнуть по курсору.

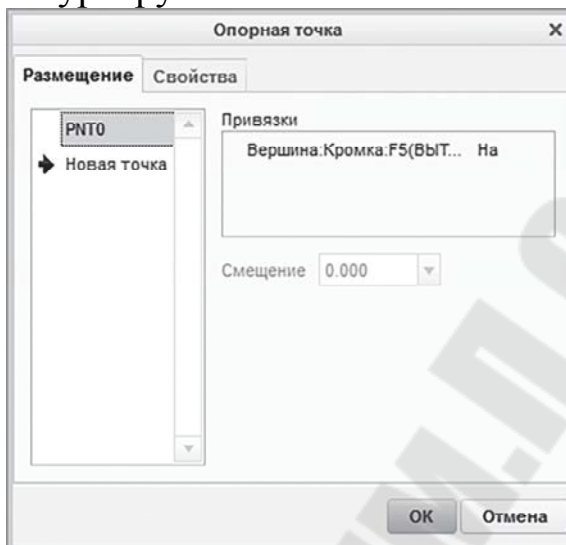


Рис. 2.25. Окно *Опорная точка*

Создание опорной точки на кромке (ребре)

Для создания опорной точки на кромке (ребре), используя инструмент *Точка* $\times \times$, выполняются операции в соответствии с рис. 2.26.

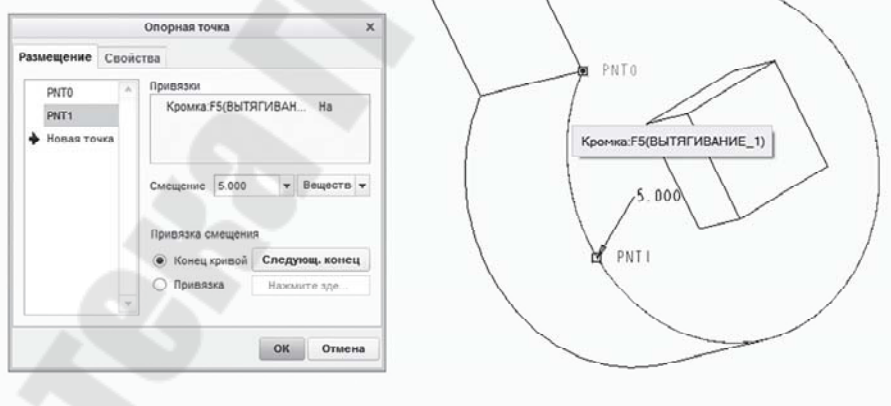


Рис. 2.26. Создание опорной точки на кромке (ребре)

Создание опорной точки в центре эллиптической кривой (окружности)

Для создания опорной точки в центре эллиптической кривой (окружности), используя инструмент *Точка* $\times \times$, выполняются операции в соответствии с рис. 2.27.

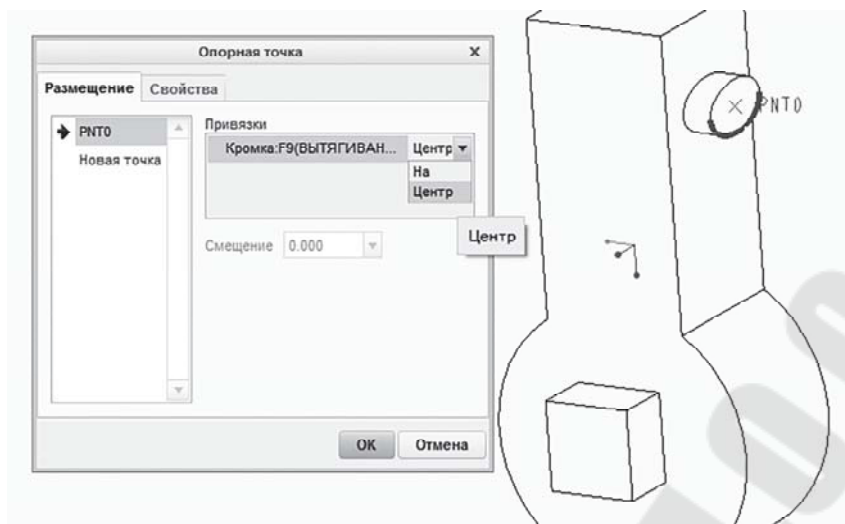


Рис. 2.27. Создание опорной точки в центре эллиптической кривой (окружности)

Создание опорной точки на криволинейной поверхности

Для создания опорной точки на криволинейной поверхности, используя инструмент Точка $\times \times$, выполняются операции в соответствии с рис. 2.28.

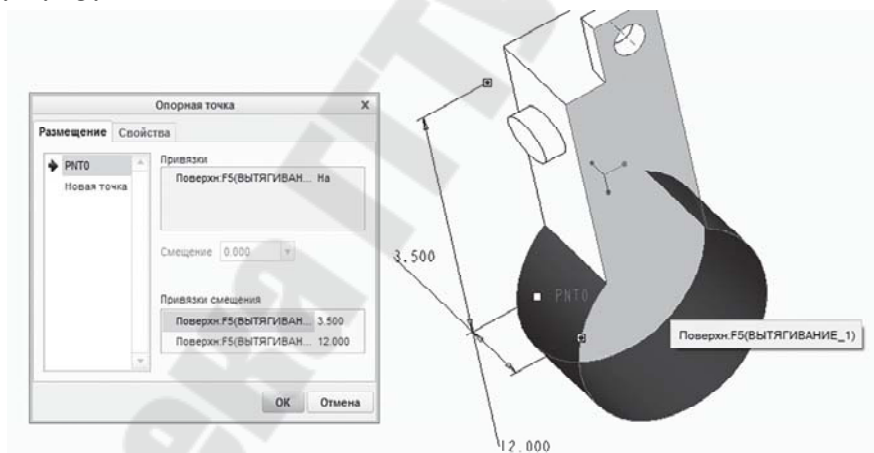


Рис. 2.28. Создание опорной точки на поверхности с отступом от боковой и верхней граней

Создание опорной точки со смещением от криволинейной поверхности

Для создания опорной точки со смещением от криволинейной поверхности, используя инструмент Точка $\times \times$, выполняются операции в соответствии с рис. 2.29.

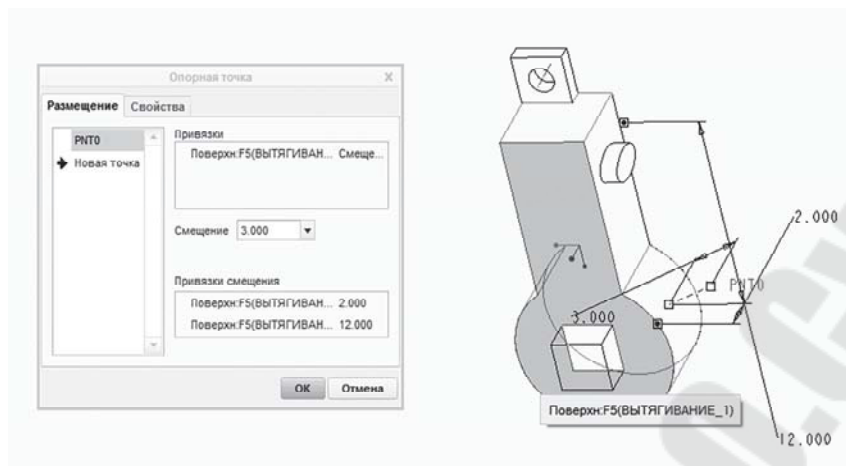


Рис. 2.29. Создание опорной точки со смещением от поверхности с отступом от боковой и верхней граней

Создание опорной точки на вершине

Для создания опорной точки на вершине, используя инструмент Точка $\times \times$, выполняются операции в соответствии с рис. 2.30.

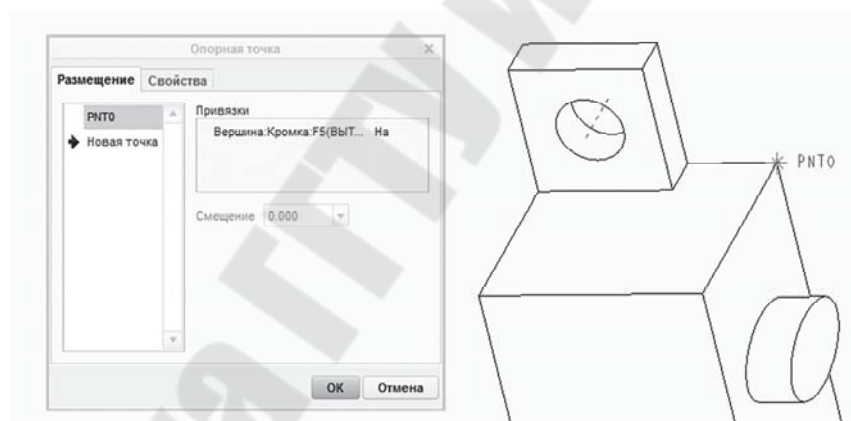


Рис. 2.30. Создание опорной точки на вершине

Создание опорной точки со смещением от вершины

Для создания опорной точки со смещением от вершины, используя инструмент Точка $\times \times$, выполняются операции в соответствии с рис. 2.31.

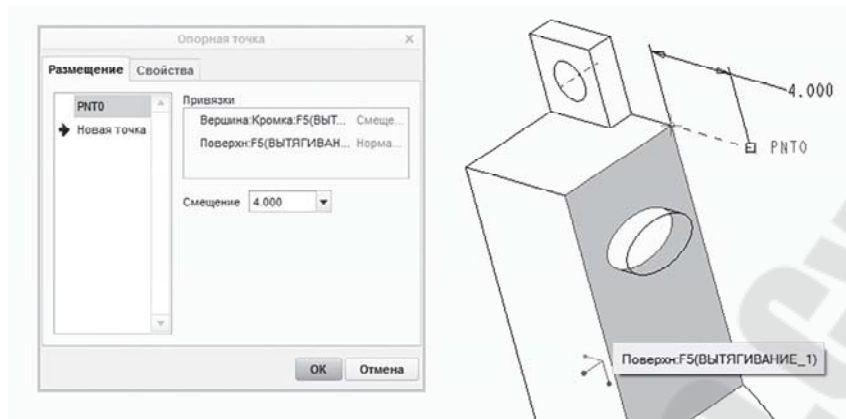


Рис. 2.31. Создание опорной точки со смещением от вершины

Создание опорной точки со смещением от другой точки

Для создания опорной точки со смещением от другой точки, используя инструмент Точка $\times \times$, выполняются операции в соответствии с рис. 2.32.

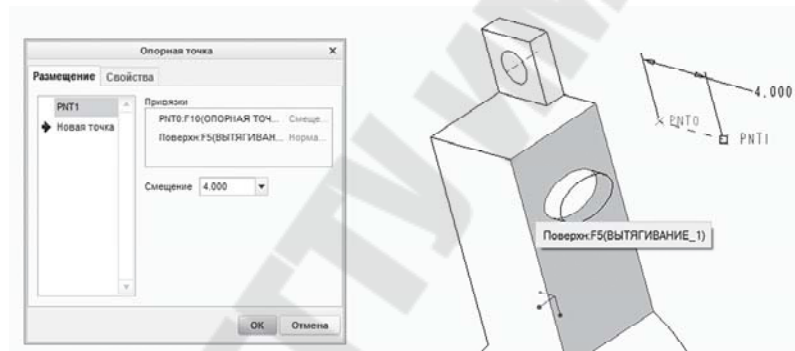


Рис. 2.32. Создание опорной точки со смещением от другой точки

Создание опорной точки на пересечении трех плоскостей

Для создания опорной точки на пересечении трех плоскостей, используя инструмент Точка $\times \times$, выполняются операции в соответствии с рис. 3.33.

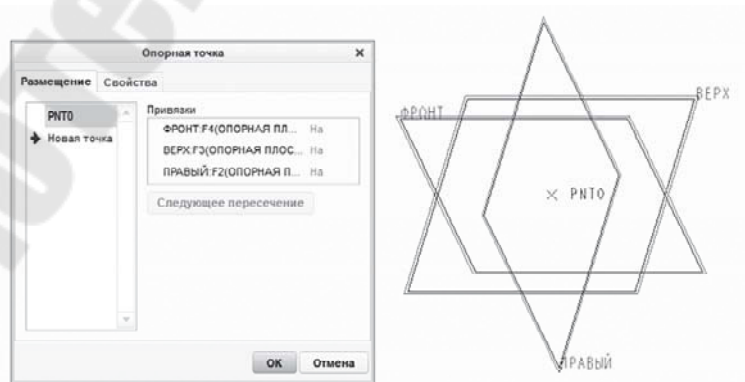


Рис. 2.33. Создание опорной точки на пересечении трех плоскостей

Создание опорной точки на пересечении кривой и поверхности

Для создания опорной точки на пересечении кривой и поверхности, используя инструмент Точка $\times \times$ и файл surf_for_base.prt, выполняются операции в соответствии с рис. 2.34.



Рис. 2.34. Создание опорной точки на пересечении кривой и поверхности

Работа с координатными системами

Использование таких опорных элементов, как оси, точки, координатные системы, позволяет создавать объекты с минимальным количеством отношений Родитель/Потомок, которые могут помешать многократному использованию конструктивных элементов в модели.

Координатная система является вспомогательным элементом, который может быть добавлен в деталь или сборку и служит:

- для подсчета массовых характеристик;
- для сборки компонентов;
- для привязки других операций (других координатных систем, точек, плоскостей, импортированной геометрии и т. д.);
- в ряде случаев для указания направления операции при моделировании.

Для создания системы координат необходимо выбрать геометрические ссылки и ориентировать направление X, Y и Z-осей системы координат. Создаваемая система координат может располагаться на элементе модели или быть смещена относительно нее.

В качестве привязки при построении базовой системы координат могут быть использованы:

- системы координат;
- опорные плоскости;
- опорные точки;

- кромки;
- вершины.

В случае необходимости использования одновременно нескольких условий размещения выбор нескольких привязок производится при помощи левой кнопки мыши при нажатой клавише **Ctrl**.

Следующим этапом создания системы координат является определение направления осей. В качестве осей могут быть использованы кромки, ребра, линии. Creo Parametric поддерживает три типа координатных систем:

- Декартова – координаты интерпретируются как значения a , b , c по взаимно перпендикулярным осям координат X , Y и Z соответственно (рис. 2.35).

- Цилиндрическая – называют трехмерную систему координат, являющуюся расширением полярной системы координат путем добавления третьей координаты (обычно обозначаемой Z). Точка P задается координатами (ρ, φ, z) (см. рис 2.36).

Сферическая – координаты точки P задаются посредством задания трех координат (r, θ, φ) , где r (радиус) – расстояние до начала координат, угол $theta$ (θ) – зенитный угол и угол phi (φ) – азимутальный угол соответственно (см. рис. 2.37).

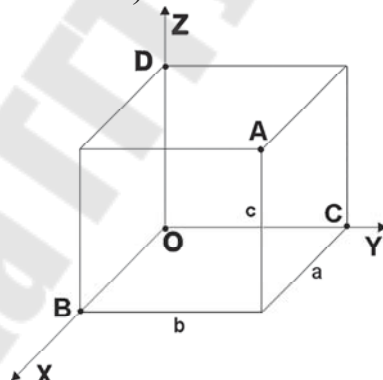


Рис. 2.35. Декартова система координат

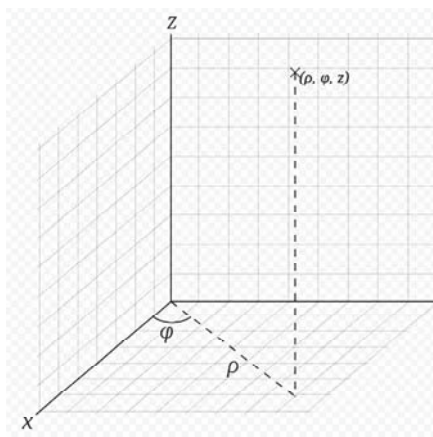


Рис. 2.36. Цилиндрическая система координат

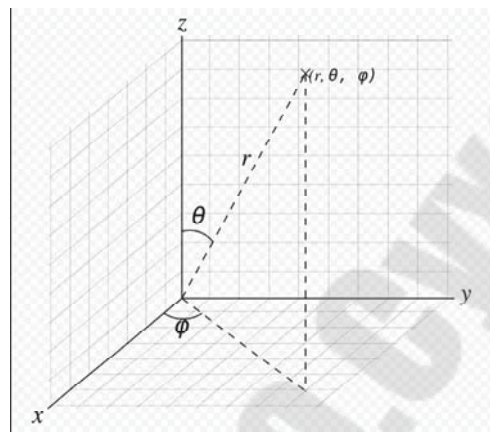


Рис. 2.37. Сферическая система координат

Для того чтобы создать базовую систему координат, можно воспользоваться кнопкой **Система координат** (☒) в панели инструментов *Опорный элемент*.

Создание координатной системы на пересечении двух ребер

Используя инструмент *Система координат* (☒), выполняются операции в соответствии с рис. 2.38. Ребро, выбранное первым, определяет направление оси X, вторым – Y. Направление осей можно изменить в закладке *Ориентация* или в режиме редактирования.

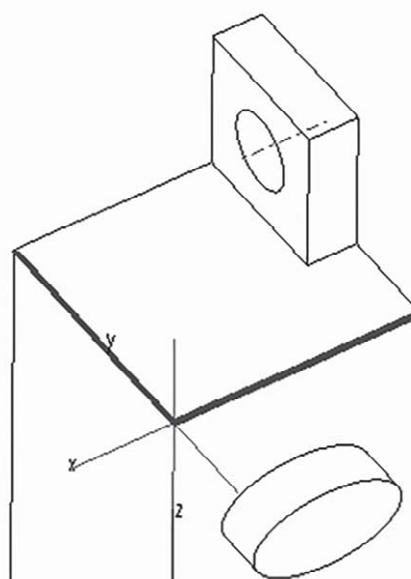
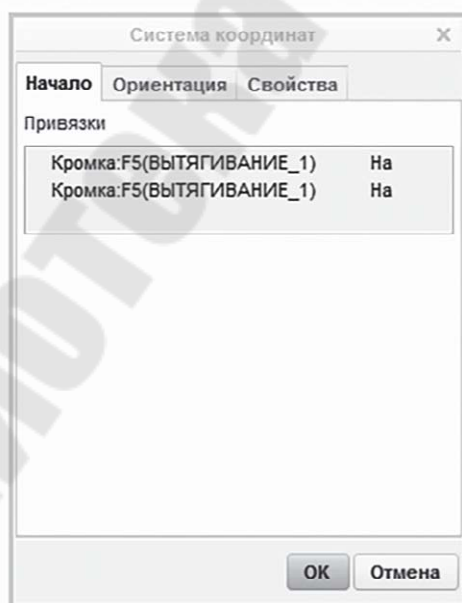



Рис. 2.38. Создание системы координат

Создание координатной системы на отступе от выбранной координатной системы

Используя инструмент *Система координат* () , выполняются операции в соответствии с рис. 2.39.

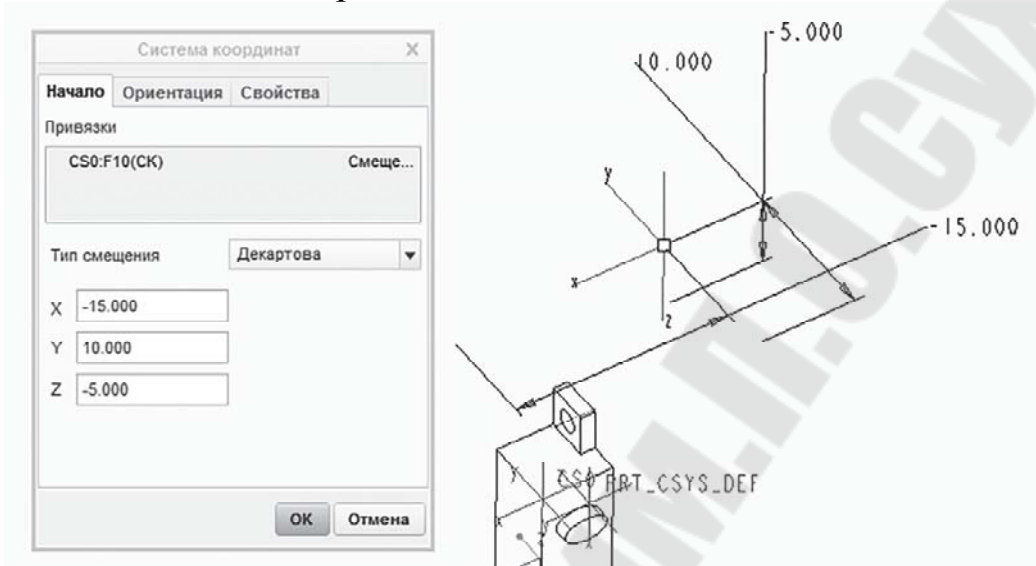



Рис. 2.39. Создание системы координат на отступе от выбранной

Создание координатной системы в вершине и настройка ориентации осей

Используя инструмент *Система координат* () , выполняются операции в соответствии с рис. 2.40. и 2.41.

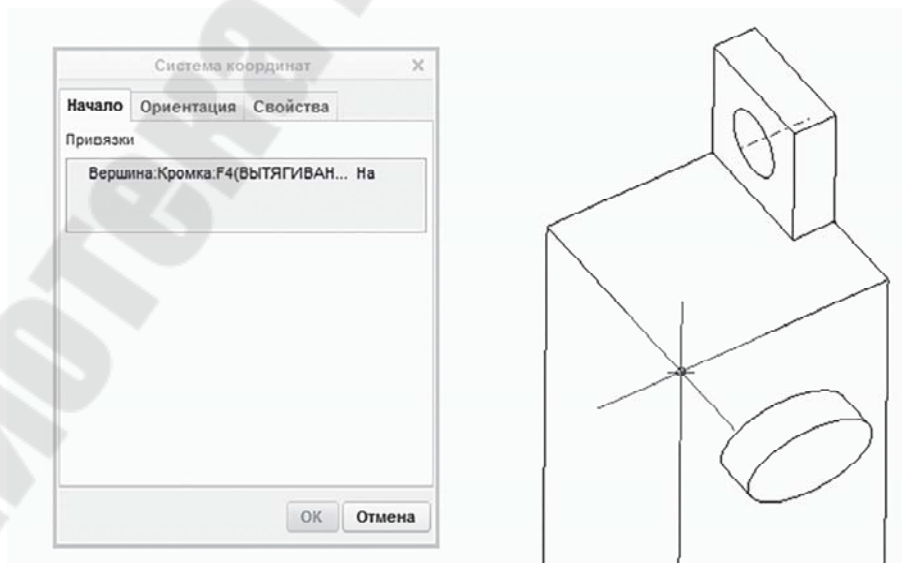


Рис. 2.40. Создание системы координат в вершине

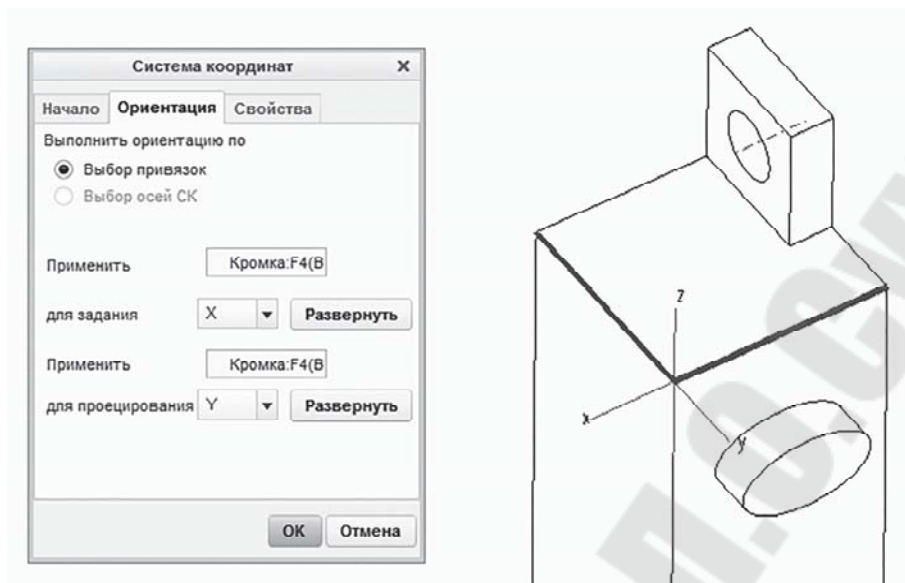


Рис. 2.41. Настройка ориентации осей

Создание точек на отступе от выбранной координатной системы

Используя инструмент *Система координат* (☒) и инструмент **Смещение** от системы координат (рис. 2.42, б), выполняются операции соответствия с рис. 2.28.

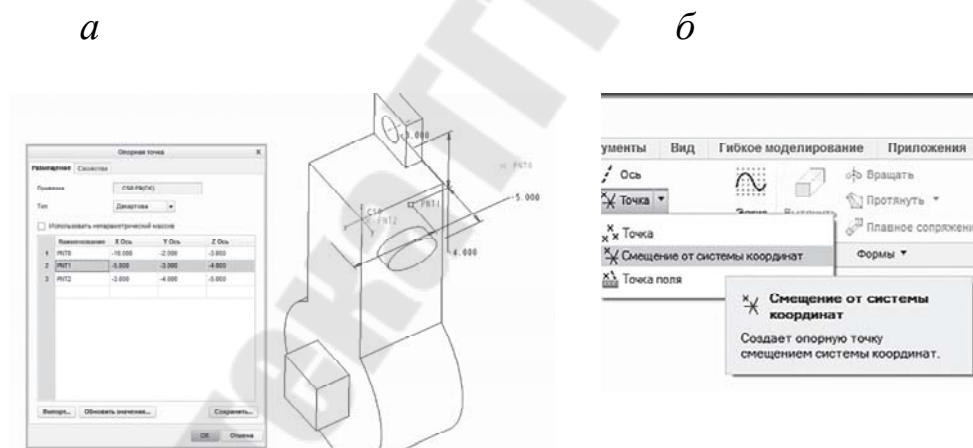


Рис. 2.42. Создание точек на отступе от системы координат (а), используя Смещение от системы координат (б)



Системы координат могут быть добавлены к деталям и сборкам для подсчета массовых свойств, сборки компонентов, размещения закреплений для конечно-элементного анализа и т. д.

Тема 2.3. Создание геометрии эскиза

В основе создания большинства элементов трехмерных моделей лежит процедура создания эскиза. Последующие манипуляции с этим эскизом (перемещение его в пространстве, протаскивание по назначенной траектории, вращение вокруг оси и т. д.) формируют трехмерную геометрию. Процесс создания эскиза включает в себя выбор эскизной плоскости, ориентацию, создание эскизной геометрии, затем простановку размеров и наложение на эту геометрию ограничений (*constrains*). Эскиз, как правило, плоский, и обычно он используется для создания других, более сложных эскизных конструктивных элементов.

В системе Creo Parametric эскизы параметрические, т. е. управляются при помощи размеров, параметров, соотношений и графиков. Инструменты, позволяющие создавать параметрические эскизы, предоставляются при входе в режим *Сечение*.

Существует два пути входа в режим *Сечение*:

- вход непосредственно в режим *Сечение* (Параметрический эскиз) при создании нового объекта . При этом открывается окно *Создать*, в котором следует выбрать тип операции (для эскиза – это *Сечение*) и ввести имя эскиза (см. рис. 2.43);
- при работе в других режимах (*Деталь*, *Сборка* и т. д.) Creo Parametric автоматически переходит в режим *Сечение* после выбора опции *Сечение* или *Эскиз* в диалоговом окне операции (или кнопка  в панели текущей операции), содержащей в своей основе параметрический эскиз (рис. 2.44).

На рис. 2.44 представлены два варианта входа в режим эскиза: *а* – задание плоскости эскиза в режиме *Деталь*, *б* – вход в режим выбора эскиза при редактировании команды **Сопряжение** (выполнение плавного сопряжения двух эскизов: *Сечение 1* и *Сечение 2*).

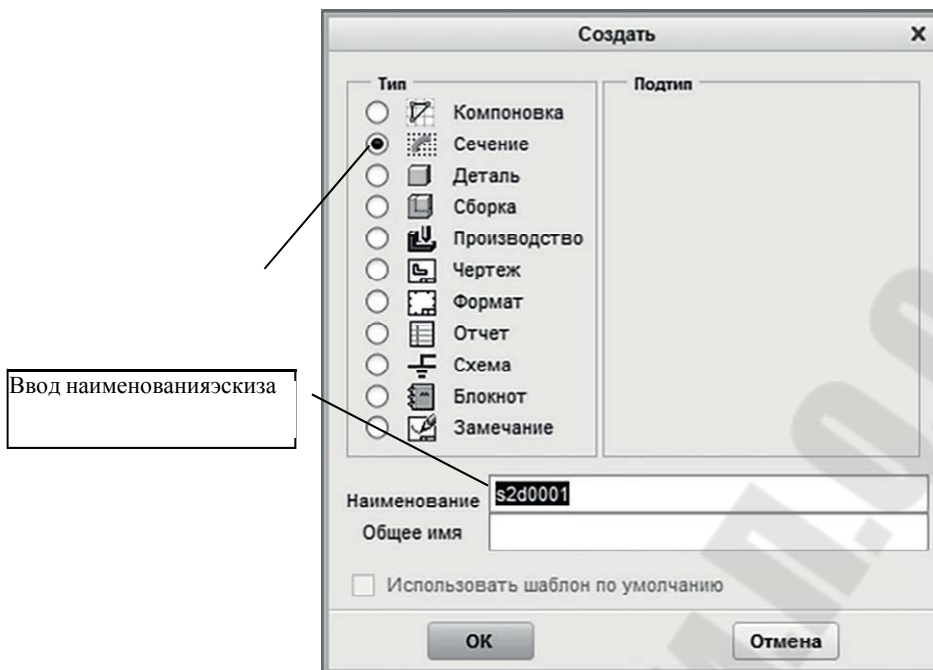
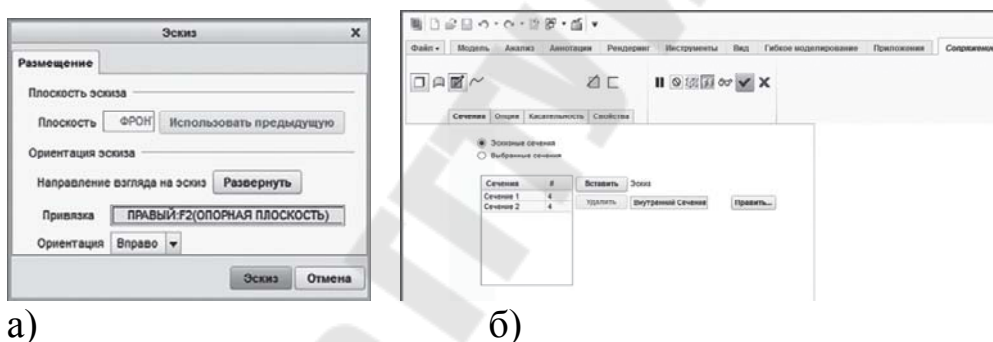


Рис. 2.43. Диалоговое окно *Создать*



а)

б)

Рис. 2.44. Вход в режим *Сечение*

При переходе в режим *Сечение* градиентная заливка рабочего окна меняется на однотонную, появляется координатная сетка (в случае, если это предусмотрено в настройках режима), изменяются панели инструментов и вид ленты (см. рис. 2.45).

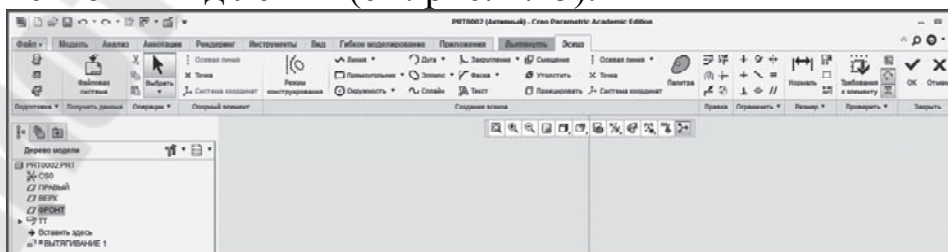





Рис. 2.45. Вид панелей инструментов в режиме *Сечение*

После завершения работы в режиме *Сечение* или при завершении работы с параметрическим эскизом (кнопка ) в других режимах (*Деталь*, *Сборка* и т. д.) создается файл с расширением *#.sec*. Этот файл (как и все предыдущие) находится только в сессии – на диске он (они) автоматически не сохраняется (ются). Все подобные файлы будут иметь имя по умолчанию *S2D###.sec*.

Для вызова ранее созданного (-ых) файла (-ов) эскиза (-ов) необходимо выбрать в панели быстрого доступа кнопку **Открыть** () или команду **Файл > Открыть...** в главном меню. Для сохранения файла на диск необходимо выбрать кнопку **Сохранить** () в панели быстрого доступа или команду **Файл > Сохранить...** в главном меню.

Находясь в режиме *Сечение*, любой эскиз (элементы эскиза) можно вставить в любой другой эскиз с помощью команды **Эскиз > Получить данные > Файловая система...**

В процессе вставки эскиза необходимо выбрать (рис. 2.46):

- элементы эскиза, которые необходимо вставить;
- подтвердить () или отменить – () вставку эскиза.

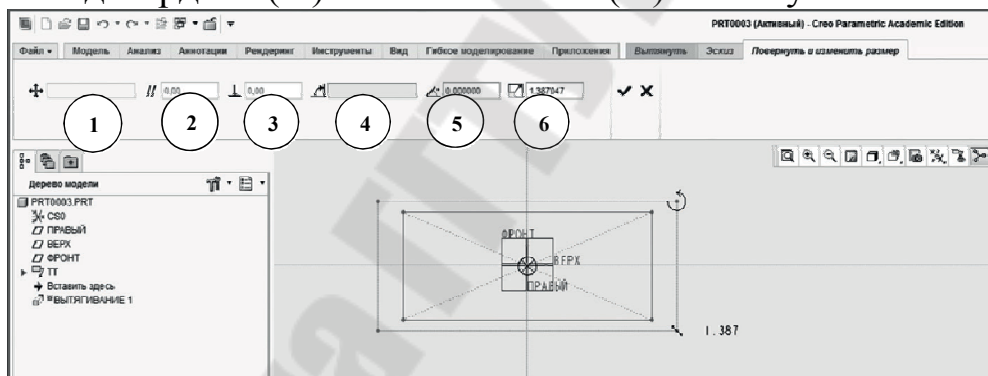


Рис. 2.46. Вставка существующего эскиза в новый эскиз

Используя специальные символы в графическом представлении эскиза-источника (\times , \cup , $^{\circ}\otimes$) или дополнительно указав значения в соответствующем поле (см. рис. 2.46), можно:

- ввести привязку для перемещения объекта (поле 1);
- ввести новое значение горизонтального размера (поле 2);
- ввести новое значение вертикального размера (поле 3);
- ввести привязку, чтобы повернуть объект (поле 4);
- ввести угол вращения (значение или выражение) (поле 5);
- ввести коэффициент масштабирования (значение или выражение) (поле 6).

Аналогичным способом можно импортировать 2D-геометрию,

существующую в формате IGES, или геометрию с поля чертежа, созданного в Creo Parametric.

При необходимости пользователь может изменять стандартные настройки режима *Сечение*.

Выбрав в главном меню **Файл > Опции > Среда эскиза**, в окне *Параметры Creo Parametric* можно изменить настройки (рис. 2.47):

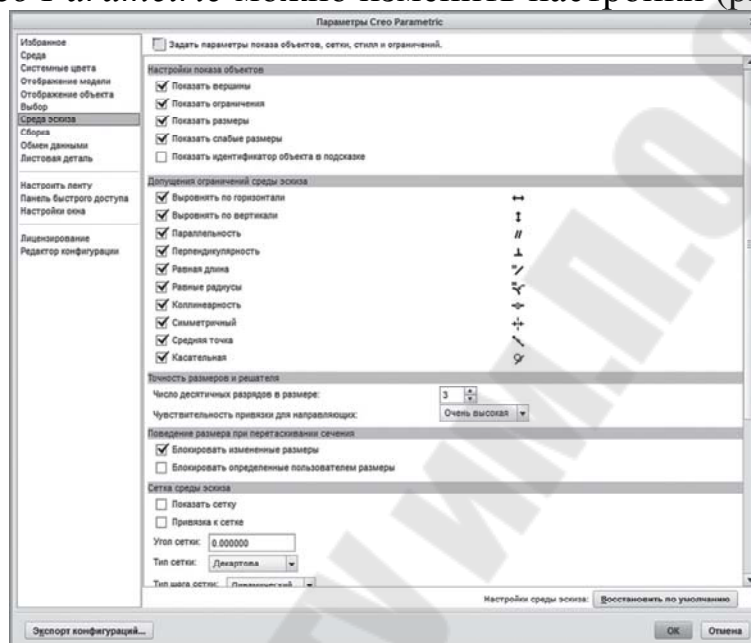


Рис. 2.47. Окно настройки среды эскиза

Наличие значка ✓ слева от опции означает, что данная опция включена. В зависимости от потребности пользователь может включать или выключать эти опции в любой момент работы над эскизом. В нижней части этого же окна (см. рис. 2.47), для перемещения в котором нужно использовать ползунок указателя прокрутки вдоль правой границы окна, можно изменить настройку сетки. Часто необходимые настройки вынесены на графическую панель (рис. 2.48).

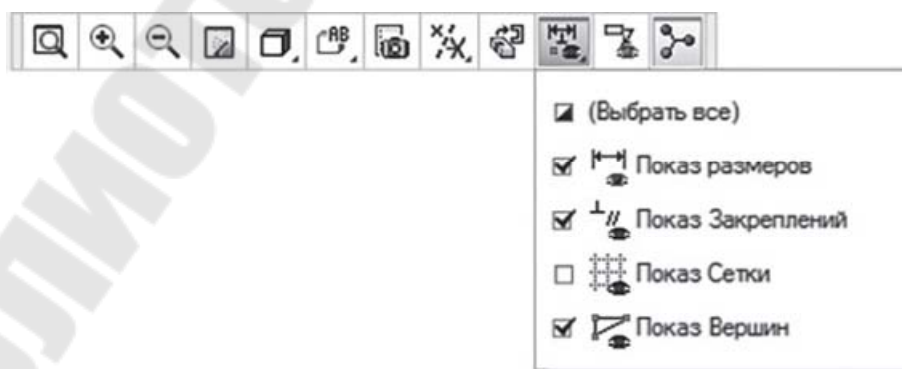


Рис. 2.48. Инструмент настройки интерфейса режима *Сечение*

Чтобы создать любой элемент эскиза (линию, дугу, сплайн и т. д.), необходимо:

- выбрать инструмент рисования;
- совершить манипуляции на экране.

Выбор инструментов рисования может осуществляться в панели *Создание эскиза* инструментальной ленты режима *Сечение* (см. рис. 2.2, рис. 2.49).

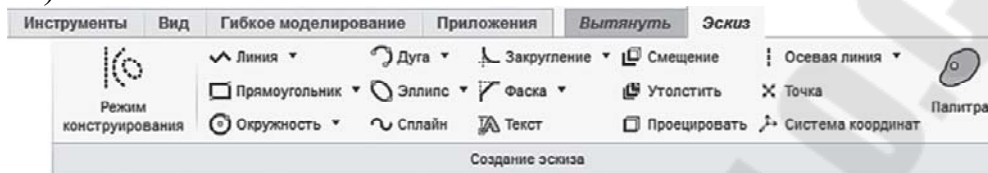


Рис. 2.49. Инструменты создания эскиза

Наличие в некоторых кнопках панели инструментов маленького треугольника черного цвета означает, что эта команда имеет несколько вариантов, которые открываются после ее выбора.


Использование мыши и клавиатуры в среде эскиза


Для построения эскиза с помощью панели инструментов следует запустить команду, затем выполнить требуемые для этого инструмента действия на экране с помощью левой кнопки мыши. Для того чтобы прервать текущую операцию, следует нажать среднюю кнопку мыши или клавишу **ESC**. Чтобы завершить выполняемую команду, следует нажать еще раз среднюю кнопку мыши или клавишу **ESC**.

При построении эскиза Creo Parametric предлагает использовать ограничения (constraints). Щелчок правой кнопки мыши обеспечивает блокирование предлагаемого ограничения при построении. Повторный щелчок правой кнопкой мыши – отключение ограничения, а тройной щелчок правой конкой мыши – его повторное включение.

Щелчок правой кнопкой мыши 4 в окне эскиза – отображение контекстного меню. При выборе объекта набор команд в контекстном меню меняется.

Режим конструирования

При создании эскиза конструктор нередко прибегает к использованию вспомогательных построений. Для создания вспомогательных объектов в панели *Создание эскиза* инструментальной ленты режима *Сечение (Эскиз)* нужно выбрать команду  **Режим конструирования** (см. рис. 249). При включенном режиме конструирования все объекты, создаваемые в эскизе, являются вспомогательными и отображаются пунктирными линиями.

Для выхода из режима конструирования следует повторно выбрать команду  **Режим конструирования** (см. рис. 2.49).

Преобразовать геометрические объекты во вспомогательные и обратно можно с помощью команд контекстного меню *Геометрия* и *Вспомогательный*. Пример преобразования окружности во вспомогательный объект приведен на рис. 2.50, а. После преобразования вспомогательная окружность изображена на рис. 2.50, б. На рис. 2.50, в показан обратный процесс преобразования вспомогательного объекта в геометрический. После преобразования окружность снова выглядит так, как показано на рис. 2.50, а.

Для точек, осевых линий и систем координат предусмотрены отдельные инструменты для создания опорных и вспомогательных экземпляров. Подробнее об этом изложено в § 2.2.

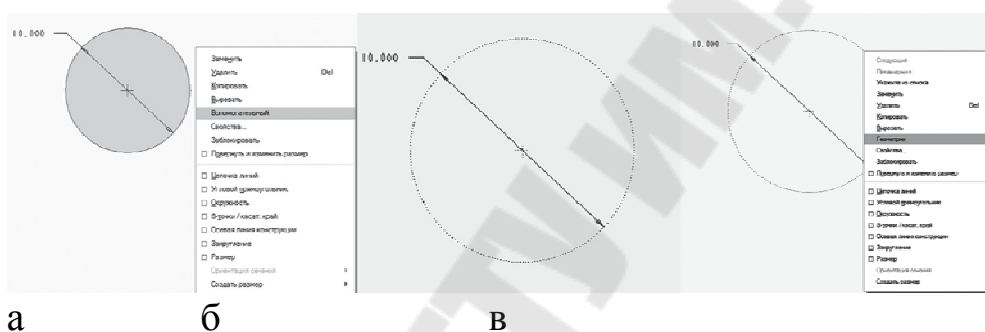


Рис. 2.50. Преобразование (а) геометрического объекта во вспомогательный (б) и обратно (в)

Инструмент Линия

Инструмент **Линия** предоставляет возможность построить несколько вариантов линий:

- цепочка линий – совокупность отрезков, проходящих между двумя точками;
- касательная линия – прямая линия, касательная к двум криволинейным элементам (окружность и/или дуга).

Для построения отрезка между двумя точками необходимо указать две точки на экране – начальную и конечную вершины отрезка; если продолжить построение отрезков, то конечная точка первого отрезка становится начальной точкой второго отрезка цепочки линий и так далее. Для завершения построения цепочки линии следует нажать среднюю кнопку мыши, после чего можно продолжить построение новой цепочки. Повторное нажатие средней кнопки мыши завершает команду.

Для создания линии, касательной к двум элементам, необходимо указать две дуги (или окружности) на экране, касательно к которым должна быть создаваемая линия.

Инструмент Прямоугольник

Для создания прямоугольника можно воспользоваться соответствующей кнопкой в панели *Создание эскиза* (см. рис. 2.51).

Для создания углового прямоугольника необходимо указать две точки на экране – местоположение противоположных вершин. После создания прямоугольника его четыре стороны становятся независимыми. Их можно изменять и перетаскивать по отдельности.

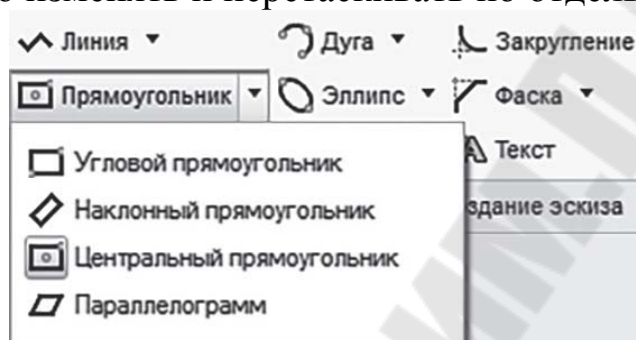


Рис. 2.51. Построение прямоугольника

Инструмент **Угловой прямоугольник** позволяет создавать прямоугольники только с горизонтальными и вертикальными сторонами. Для создания прямоугольников с другой ориентацией следует использовать инструмент **Наклонный прямоугольник**.

Для создания наклонного прямоугольника или параллелограмма необходимо указать две точки на экране, которые ограничивают одно из ребер прямоугольника, а затем, перемещая мышью, указать положение противоположной стороны. Наклонный прямоугольник, таким образом, является частным случаем параллелограмма.

Инструмент Окружность

Инструмент **Окружность** предоставляет возможность построить окружности и эллипсы несколькими способами:

- создать окружность, указывая центр и точку на окружности;
- создать концентричную окружность;
- создать окружность, проходящую через три точки;
- создать окружность, касательную к трем объектам.

Все эти способы доступны в панели *Создание эскиза* (рис. 2.52).

Для создания окружности указанием центра и точки на окружности необходимо указать на экране две точки – центр окружности и

точку на окружности.

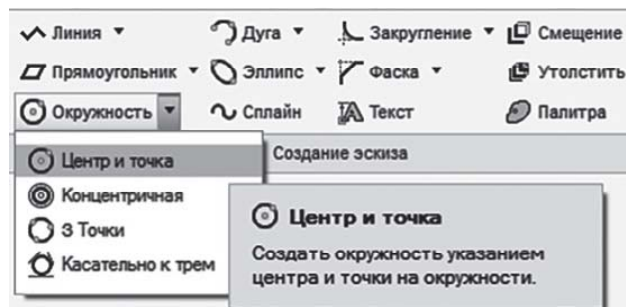


Рис. 2.52. Построение окружности

Для создания концентричной окружности необходимо указать окружность или дугу, к которой создаваемая окружность будет концентрична (указывать можно как точку, лежащую на дуге или окружности, так и их центры), и точку на создаваемой окружности.

Для создания окружности, проходящей через три точки, необходимо последовательно указать их на экране.

Для создания окружности, касательной к трем объектам, необходимо последовательно указать на экране три элемента, к которым окружность должна быть касательной.

Инструмент Дуга

Инструмент **Дуга** позволяет построить дугу как часть окружности несколькими способами:

- создать дугу по трем точкам или касательно к объекту в его последней точке;
- создать дугу, указывая ее центр и две крайние точки;
- создать дугу, касательную трем объектам;
- создать концентричную дугу;
- создать эллиптическую дугу как часть эллипса 5.

Все эти способы доступны из панели *Создание эскиза* (рис. 2.53)

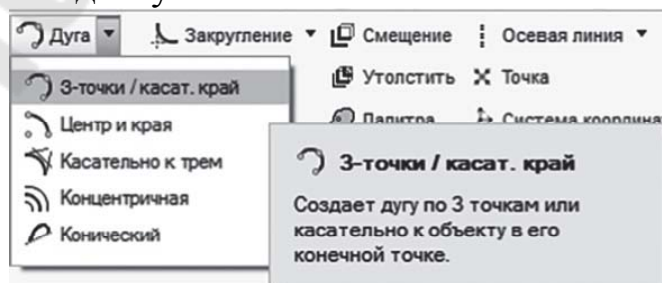


Рис. 2.53. Построение дуги

Для создания дуги по трем точкам или конической (эллиптической) дуги необходимо указать местоположение концов и промежуточной точки. Для создания концентричной дуги необходимо указать окружность (дугу), к которой создаваемая дуга должна быть концентрична, а затем – начальную и конечную точки дуги.

Для создания дуги по центру и двум точкам необходимо указать местоположение центра дуги и ее концов.

Для создания касательной дуги необходимо последовательно указать на экране три элемента, к которым дуга должна быть касательной.

Когда вершина привязки выбрана, то в вершине появляется знак, крупно показанный на рис. 2.54.

Различные зоны этого знака имеют следующее назначение:

- вершина привязки;
- существующая геометрия;
- квадранты для создания дуг по трем точкам (с одним концом в вершине привязки);
- квадранты для создания касательных дуг (нужно указать вершину привязки, затем расположить курсор в квадранте 4 и затем указать конечную точку дуги).

Все точки на экране указываются курсором и выбираются нажатием левой кнопки мыши.

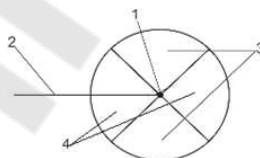


Рис. 2.54. Знак привязки к вершине

Инструмент Эллипс

Эллипс является одним из трех типов конических сечений или коник (коническое сечение или коника есть пересечение плоскости с круговым конусом; три главных типа коник – эллипс, гипербола и парабола). Эллипс в Creo Parametric обладает следующими свойствами:

- точка центра, поведение которой аналогично центру круга. Это конструктивный объект, и для него можно наносить размеры и задавать закрепления;
- два перпендикулярных радиуса с любой ориентацией. Они, как и точка центра, являются конструктивными объектами, и для них можно наносить размеры, задавать закрепления и выполнять перетаскивание.

Инструмент **Эллипс** предоставляет возможность построить эллипсы несколькими способами

- создать эллипс путем определения оси и конечных точек;
- создать эллипс путем определения центра и оси.

Все эти способы доступны в панели *Создание эскиза* (рис. 2.55).

Для создания эллипса, используя команду **Эллипс концов оси**, необходимо щелкнуть в выбранной точке для расположения первой точки оси. Перемещая мышью, определить нужную для нее длину и ориентацию, а затем выбрать вторую конечную точку оси. В середине отрезка определяется центр эллипса и перпендикулярно первой оси создается вторая ось. Перемещая указатель мыши, нужно определить размер второй оси. Он может быть как больше, так и меньше размера первой оси.

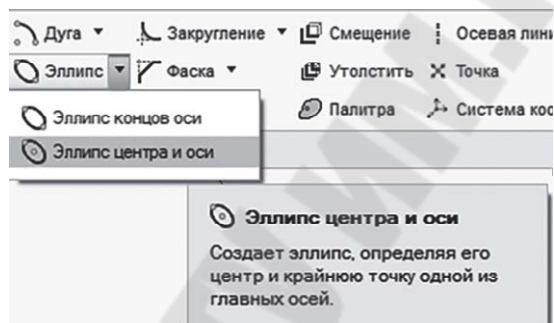


Рис. 2.55. Построение эллипса

Для создания эллипса, используя команду **Эллипс центра и оси**, необходимо щелкнуть в точке, выбранной в качестве центра эллипса. Создается первая ось. Перемещая мышью, необходимо определиться с направлением и размером первой оси и создать конечную точку первой оси щелчком мыши. В центре эллипса и перпендикулярно первой оси создается вторая ось. Перемещая указатель мыши, нужно определить размер второй оси. Как и в предыдущей команде, он может быть как больше, так и меньше размера первой оси.

Центр и оси эллипса являются конструктивными элементами и изображаются в графическом окне эскиза пунктирными линиями. Удаление эллипса приводит к удалению конструктивных элементов. Удаление любого из конструктивных элементов эллипса приводит к удалению самого эллипса.

Инструмент Сплайн

Инструмент **Сплайн** используется для построения гладкой кривой, проходящей через заданный набор точек. Для построения сплай-

на необходимо выбрать инструмент **Сплайн** из панели *Создание эскиза* (см. рис. 2.56).

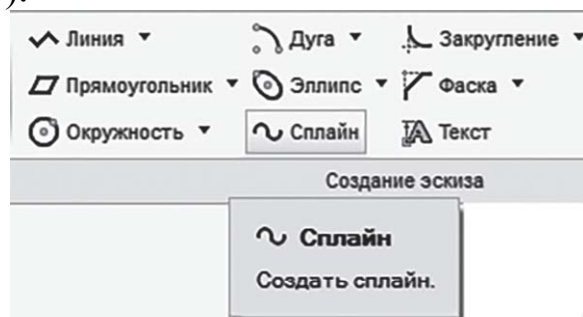


Рис. 2.56. Построение сплайна

После запуска инструмента **Сплайн** нужно щелкнуть левой кнопкой мыши в эскизном окне для указания начальной точки сплайна. Перемещая мышью, можно убедиться, что курсор мыши соединен с начальной точкой «резиновой нитью». Щелчки левой кнопкой мыши в эскизном окне добавляют последующие точки сплайна. Щелчок средней кнопкой мыши завершит создание сплайна.

Инструмент **Закругление**

Инструмент **Закругление** используется для создания плавного сопряжения между двумя элементами эскиза (линий, дуг) круговой или эллиптической дугой. Для построения сопрягающей дуги необходимо выбрать этот инструмент из панели инструментов (рис. 2.57).

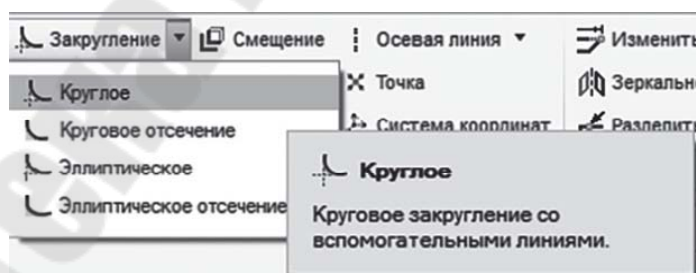


Рис. 2.57. Построение закруглений

После выбора инструмента **Закругление > Круглое** и появления на экране окна-подсказки *Выберите два объекта* необходимо указать два существующих элемента эскиза для сопряжения (радиус сопряжения затем можно изменить в режиме редактирования размеров). Между выбранными точками создается закругление, а линии отсекаются. Вспомогательные линии удлиняются до точки пересечения.

После выбора инструмента **Закругление > Круговое отсечение** и появления на экране окна-подсказки *Выберите два объекта* необходимо указать два существующих элемента эскиза для сопряжения (радиус сопряжения затем можно изменить в режиме редактирования размеров). Между выбранными точками создается закругление, а линии отсекаются. Вспомогательные линии отсутствуют.

Аналогично работают команды **Закругление > Эллиптическое** и **Закругление > Эллиптическое отсечение**.

Инструмент Фаска

Инструмент **Фаска** используется для соединения непараллельных линий или комбинаций линий, дуг и сплайнов. Фаска создается между двумя точками. Размер и расположение фаски зависят от выбора двух точек для ее размещения. Сделать эскиз фаски можно также с помощью инструментов, удлиняющих вспомогательные линии до точек пересечения. Для построения фаски необходимо выбрать этот инструмент из панели инструментов (рис. 2.58).

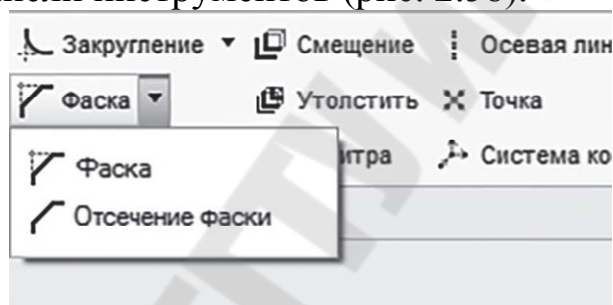


Рис. 2.58. Построение фаски

Существует два режима работы с фаской. Инструмент **Фаска > Фаска** соединяет фаской два объекта. Вспомогательные линии при использовании этого инструмента удлиняются до точки пересечения (рис. 2.59, а). При использовании инструмента **Фаска > Отсечение фаски** объекты соединяются фаской, вспомогательные линии отсекаются (рис. 2.59, б).

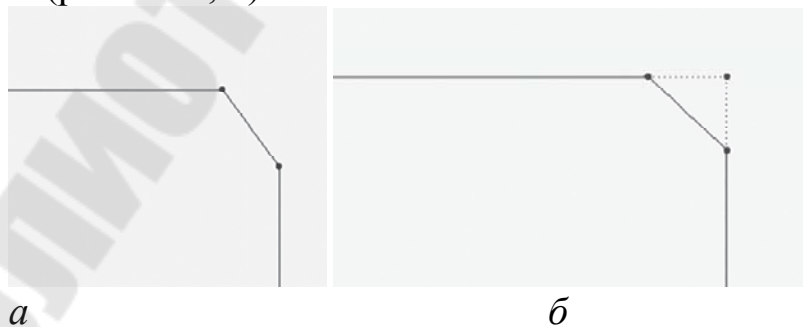


Рис. 2.59. Использование инструментов **Отсечения фаски (а)** и **Фаски(б)**

Для создания фаски после запуска необходимого инструмента (см. рис. 2.59) следует выбрать первую линию в точке, где требуется разместить фаску, а затем выбрать вторую линию в точке, где требуется разместить второй конец фаски. В последующем можно уточнить расположение фаски в режиме редактирования.

Инструменты копирования геометрии

К инструментам копирования геометрии относятся два инструмента: **Смещение** и **Утолстить**. Они доступны в панели инструментов *Создание эскиза* вкладки *Эскиз* инструментальной ленты (рис. 2.60, *а* и *б*). Эти инструменты позволяют создать новые элементы эскиза, используя уже существующие. Можно создать новые конструктивные элементы, сдвигая кромки, представленные линиями, дугами или сплайнами. При создании новых конструктивных элементов таким способом каждая точка оригинальных линий, дуг или сплайнов проецируется на плоскость построения эскиза с заданным расстоянием (инструмент **Смещение**) или нулевым (инструмент **Утолстить**). Например, создание дуги инструментом **Смещение** приведет в результате к созданию концентрической дуги другого диаметра.

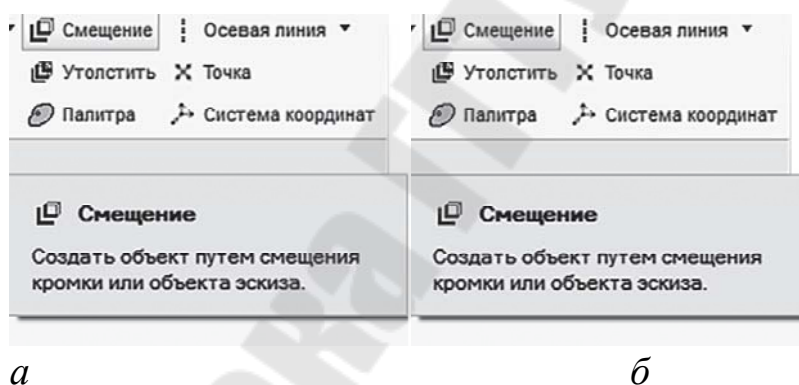


Рис. 2.60. Инструменты копирования геометрии: Сместить (*а*) и Утолстить (*б*)

Новые конструктивные элементы методом **Копирования геометрии** могут быть созданы от **одиночного ребра** (кривой), **цепочки ребер** (кривых) и **контура** (выбирается в окне **Тип** – см. рис. 2.60, *а*).

При введении величины смещения (см. рис. 2.61, *б*) следует учитывать направление стрелки на эскизе (см. рис. 2.61, *в*). Если необходимо смещение в направлении, противоположном направлению стрелки, следует ввести отрицательное значение смещения.

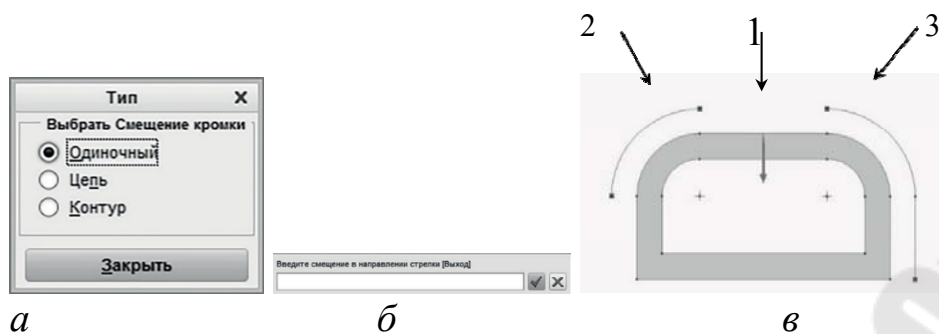


Рис. 2.61. Инструмент Смещение: выбор типа кромки (а), задание величины смещения (б) и пример применения инструмента Смещение (в) для одиночного ребра (1), цепи (2) и контура (3)

Инструмент **Утолстить** создает утолщенные объекты – объекты с двойным смещением, компоненты которого разнесены на определенное пользователем расстояние. При создании утолщенной кромки можно добавить заглушку с плоским или круглым концом, чтобы соединить между собой два смещенных объекта или оставить эти объекты разъединенными. В зависимости от введенного значения смещения и толщины возможны два варианта: утолщение проходит с двух сторон от кромки привязки или оба объекта смещения находятся с одной стороны. На рис. 2.62 приведены окно *Type* при использовании инструмента **Утолстить** (см. рис. 2.62, а) и пример использования инструмента для цепи из двух элементов – прямой и дуги (рис. 2.62, б).



Рис. 2.62. Инструмент Утолстить: выбор типа кромки (а) и пример применения инструмента Утолстить для цепи с круговой конечной заглушкой (б)

Палитра эскизов

При создании эскиза в панели инструментов *Создание эскиза* доступен инструмент вставки внешних данных в активный объект (**Палитра эскизов**), представленный на рис. 2.63.

Палитра эскизов позволяет вставлять параметризированные эскизы из имеющейся библиотеки. Впоследствии эту библиотеку можно дополнить своими эскизами. Для вставки выбранного эскиза нужно дважды щелкнуть левой клавишей мыши (рис. 2.63) и указать нужное место установки. После этого система предложит задать масштаб эскиза и угол его поворота.

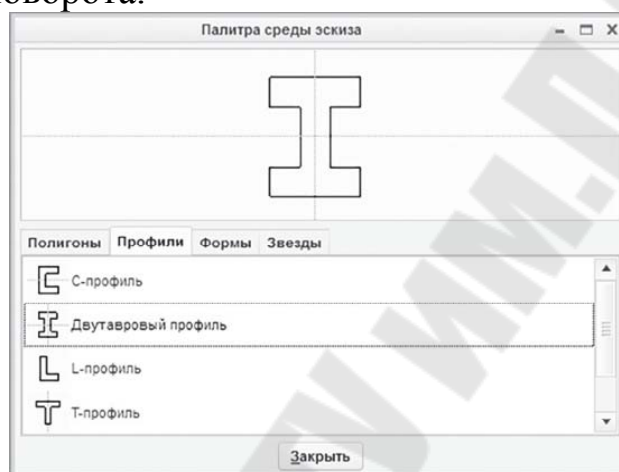


Рис. 2.63. Инструмент Палитра

По умолчанию в палитре эскизов содержатся эскизы правильных многоугольников (полигонов), различные профили, фигуры и звезды.

Библиотека эскизов в палитре может быть дополнена, изменена или заменена на собственную. Для этого необходимо создать эскизы и поместить их в папку для эскизов палитры, имя которой хранится в системной переменной `sketcher_palette_path`. При работе в среде PDM-системы (например, Windchill) в качестве пути к папке форм среды эскиза можно использовать расположение PDM-системы (для доступа к вкладкам и формам у пользователя должны быть соответствующие права доступа к расположению PDM-системы).

Все эскизы, размещенные в рабочей папке, также доступны в палитре и могут быть использованы.

Вспомогательные элементы

Инструмент **Точка** используется для построения в эскизе точки как вспомогательного элемента. Например, точка может быть исполь-

зована для создания оси, нормальной к плоскости эскиза. Построенную точку можно использовать в качестве ссылки при создании конструктивных элементов, например оси и привязки при создании размеров в эскизе и в других модулях Creo Parametric.

Для построения точки необходимо выбрать инструмент **Точка** из панели инструментов **Создание эскиза** (рис. 2.64, а). В панели инструментов наряду с точкой в этом пункте доступен инструмент создания вспомогательной системы координат (рис. 2.64, в), которая также может быть использована в качестве ссылки при создании конструктивных элементов и привязки при создании размеров как в эскизе, так и в других модулях Creo Parametric (система координат, привязанная к начальной точке сплайна, позволяет редактировать сплайн, задавая в явном виде координаты (X, Y и Z) точек сплайна).

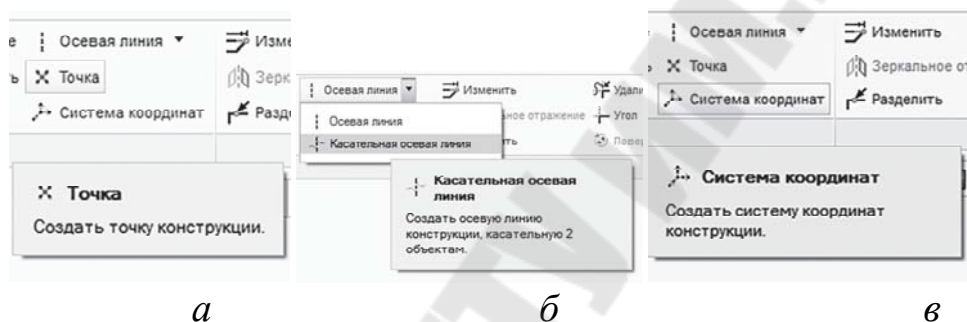


Рис. 2.64. Создание вспомогательных элементов: точки (а), осевой линии (б) и системы координат (в)

После запуска инструмента **Точка (Система координат)** нужно щелкнуть левой кнопкой мыши в эскизном окне для указания положения точки. Щелчки левой кнопкой мыши в эскизном окне добавляют последующие точки (системы координат). Щелчок средней кнопкой мыши завершит создание точек (систем координат).

Еще один вспомогательный элемент, который часто используется при построении эскиза – осевая линия (см. рис. 2.64, б). Частным случаем осевой линии является касательная осевая линия. Для создания осевой линии нужно выбрать первую точку. Будет создана осевая линия, которая эластично соединяется с указателем. Далее следует выбрать вторую точку на осевой линии. Бесконечная осевая линия, проходящая через две указанные точки, будет создана.

Закрепления (геометрические связи)

На вкладке *Эскиз* доступна панель инструментов *Ограничения* (рис. 2.65), в которой можно выбрать необходимый тип. Перечень типов закреплений (ограничений):

Типы закреплений

Обозначение закрепления	Описание закрепления
	Вершины лежат на одной вертикальной линии, линия вертикальна
	Вершины лежат на одной горизонтальной линии, линия горизонтальна
	Элементы перпендикулярны друг другу
	Элементы касательные (тангенциальные) друг другу
	Вершина лежит на середине элемента
	Вершины/точки совпадают; вершина/точка лежит на элементе или его мнимом продолжении
	Вершины симметричны относительно осевой линии
	Длины/радиусы элементов равны
	Элементы параллельны друг другу

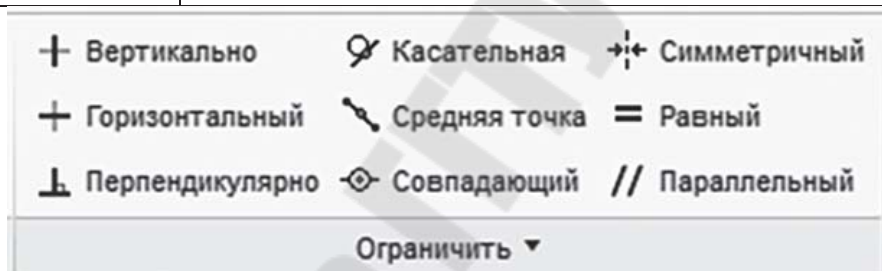


Рис. 2.65. Панель инструментов. Ограничения

Во время создания любого элемента эскиза система проверяет, насколько он ей понятен. При этом система делает ряд допущений (аппроксимаций). Вот, например, некоторые приближения, которые может делать система. Система считает:

- приблизительно перпендикулярные и параллельные линии таковыми;
- приблизительно касательные – касательными;
- дуги приблизительно в 90, 180 и 270° точно такими;
- приблизительно коллинеарные объекты коллинеарными;
- приблизительно равные отрезки равными;
- точки, приблизительно лежащие на одной горизонтали или вертикали, таковыми.

В тот момент, когда создаваемый элемент попадает в зону допущения, система высвечивает специальный знак – *Закрепление*, а элемент как бы «залипает» в том или ином положении. Если пользователь желает исключить данное приближение, то он должен вывести создаваемый элемент из зоны допущения (до исчезновения значка закрепления), т. е. сделать различие между элементами ощутимым. Бывает необходимо создать элемент приблизительно равный, но все-таки отличный от другого. Для того чтобы система не использовала свой аппарат аппроксимации, необходимо нажать правую кнопку мыши. Тогда значок закрепления будет высвеченным и заключен в круг зеленого цвета (рис. 2.65, а).

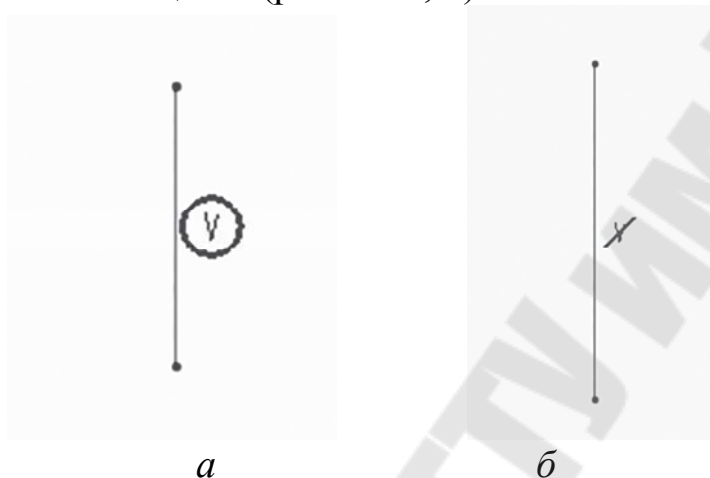



Рис. 2.65. Первое (а) и второе (б) нажатие правой клавиши мыши при создании эскиза

Повторное нажатие правой кнопки мыши перечеркивает символ ограничения (см. рис. 2.66, б). В этом случае он не будет работать и после завершения создания элемента исчезнет. Если в момент завершения создания элемента закрепление еще высвечено и элемент не будет заключен в круг красного цвета, то он будет принят системой к исполнению. Созданные закрепления можно выбрать с помощью указателя  и кнопки **Удалить**.

При необходимости можно назначить нужные закрепления, выбрав соответствующую пиктограмму в панели инструментов или команду **Эскиз > Ограничить** через главное меню. Для назначения закрепления необходимо выбрать его тип в панели *Ограничить* и затем указать элементы, для которых закрепление назначается. Завершить команду можно, нажав среднюю клавишу мыши.

Пользователь может активизировать или останавливать действие закрепления через раздел **Среда эскиза** окна Параметры Creo Parametric, доступного через **Файл > Опции** (рис. 2.67).

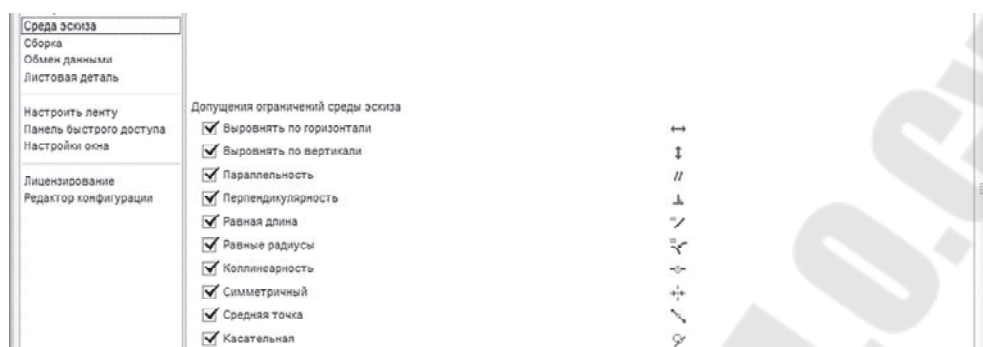


Рис. 2.67. Перечень допущений ограничений среды эскиза

После назначения закрепления оно становится управляющим, т. е. приоритетным по отношению к закреплениям управляемым (тем, которые система расставляет автоматически). При необходимости выбранное управляемое закрепление можно перевести в управляющее, используя комбинацию **Ctrl+T**.

При возникновении противоречий управляемые закрепления отменяются автоматически. При конфликте управляющих закреплений появляется окно **Исправить эскиз** для разрешения конфликтной ситуации (см. рис. 2.68). Можно отменить последнее назначение или удалить устаревшее, выделив его в окне и нажав кнопку **Удалить**.

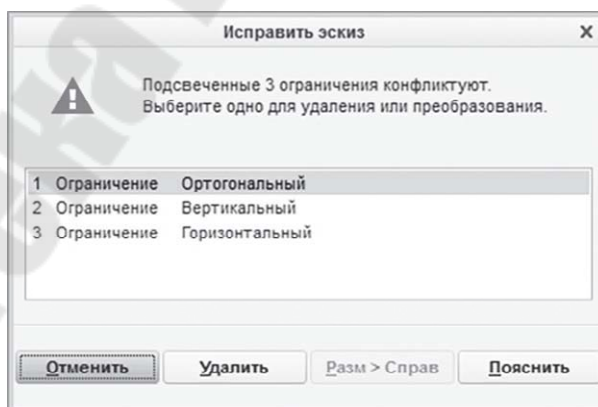


Рис. 2.68. Диалоговое окно *Исправить эскиз*

Выделенное в окне закрепление выделяется рамкой на эскизе. Каждый тип закрепления на эскизе отмечается специальным символом (рис. 2.69).

Примечание. При создании эскиза необходимо добиться: во-первых – соответствия конфигурации эскиза общему замыслу; во-вторых – соответствия назначенных закреплений идеологии дальнейших изменений эскиза при последующих модификациях изделия в целом.

Ограничение	Символ
Средняя точка	M
Совпадающие точки	\ominus
Горизонтальные объекты	H
Вертикальные объекты	V
Точка на объекте	\odot
Касательные объекты	T
Перпендикулярные объекты	\perp
Параллельные линии	\parallel_1
Равные радиусы	R с нижним индексом (например, R ₁)
Сегменты линии равной длины	L с нижним индексом
Симметрия	$\rightarrow \leftarrow$
Горизонтальное или вертикальное выравнивание	--
Использование кромки	~
Смещение кромки	
Равная кривизна	C
Равные размеры	E с нижним индексом

Рис. 2.69. Обозначения ограничений в эскизе

Инструменты редактирования эскиза

Инструменты редактирования (кнопки редактирования представлены на рис. 2.71) позволяют:

- разделять один геометрический элемент эскиза на несколько;
- подрезать выступающие концы геометрических элементов эскиза;
- динамически подрезать элементы эскиза;
- перемещать, поворачивать, масштабировать элементы эскиза;
- копировать элементы эскиза;
- создавать зеркальные копии геометрических элементов эскиза относительно осевой линии.

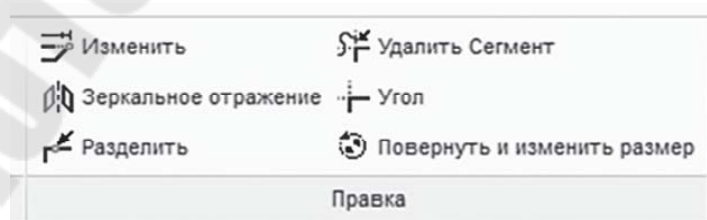


Рис. 2.70. Панель *Правка* вкладки *Эскиз*

В панели *Правка* (см. рис. 2.70) доступна команда **Изменить**, позволяющая изменить размер (размеры) элемента эскиза. После за-

пуска команды необходимо указать левой кнопкой мыши изменяемый размер и в появившемся окне *Изменить размеры* (рис. 2.71, а) произвести необходимые изменения. Если перед запуском команды выделить несколько размеров (например, рамкой), то в окне *Изменить размеры* (см. рис. 2.71, б) можно изменить несколько размеров.

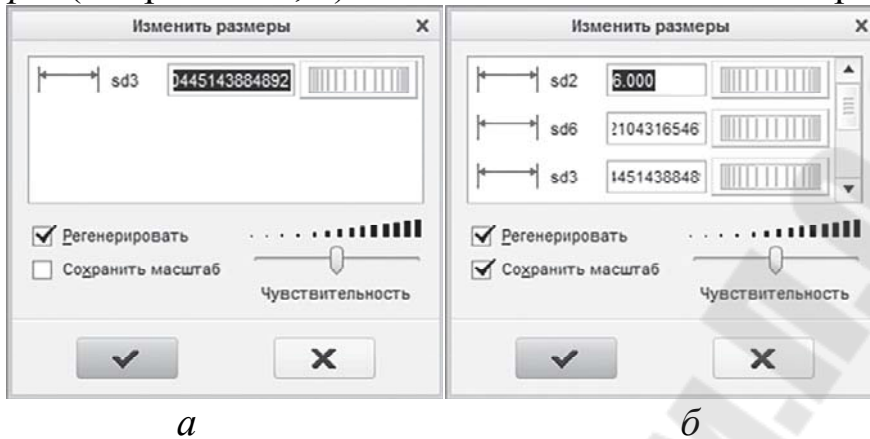


Рис. 2.71. Изменение размера (а) и группы размеров (б)

Если в окне *Изменить размеры* установить флажок в поле *Сохранить масштаб* (как показано на рис. 2.71, б), то при внесении изменений в каждый размер Creo Parametric будет изменять и смежные размеры, сохраняя масштаб всего эскиза. Завершение внесения изменений в размеры осуществляется кнопкой.

Используя команду **Зеркальное отражение** (см. рис. 2.70), можно создать копии геометрических элементов эскиза, сделав их зеркальное отражение относительно осевой линии б. После запуск команды **Зеркальное отражение** в строке состояния появляется подсказка: Выберите осевую линию. При выборе линии объекта зеркальная копия будет создана напротив оригинала на равном расстоянии от осевой линии.

Объект сечения можно разделить на два и более объектов. Если для объекта задан размер, удалите его перед использованием команды **Разделить** (см. рис. 2.70). Для использования команды **Разделить** нужно запустить команду, а затем щелкнуть объект в местах, где должно быть выполнено деление. Объект будет разделен в указанном месте.

Команды **Удалить сегмент** и **Угол** (см. рис. 2.70) позволяют удалять части объектов, используя точки их пересечений. Главное различие этих команд заключается в том, что команда **Удалить сегмент** удаляет отмеченные фрагменты, а команда **Угол** оставляет в эскизе отмеченные объекты. Команда **Удалить сегмент** обладает функ-

цией динамической подрезки. Для этого после ее запуска следует провести мышью при нажатой левой кнопке на тех фрагментах, которые следует удалить. При этом траектория движения мыши показывается красным цветом. После того, как кнопка будет отжата, фрагменты, которые пересекла траектория движения мыши, будут удалены. На рис. 2.72 показана эта процедура.

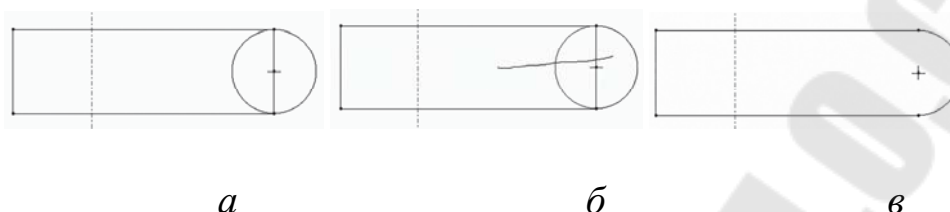


Рис. 2.72. Эскиз до (а), во время (б) и после (в) выполнения операции Удалить сегмент в режиме Динамической подрезки

Команда **Угол**, имеющая опцию отрезания выступающих концов геометрических элементов, выполняет также функцию удлинения геометрического элемента до выбранного конструктивного элемента, если они не пересекаются. Для этого необходимо держать нажатой клавишу **Ctrl**. Манипуляции по масштабированию, повороту геометрических элементов эскиза производятся с помощью специальных меток, показанных на рис. 2.73. Перед запуском команды **Повернуть и изменить размер** следует любым способом выделить элементы эскиза, подлежащие повороту и масштабированию. Данная команда открывает новую вкладку, на которой, помимо динамических операций с использованием специальных

меток, поясненных на рисунке надписями, можно ввести:

- привязку для перемещения объекта (поле 1);
- новое значение горизонтального размера (поле 2);
- новое значение вертикального размера (поле 3);
- привязку, чтобы повернуть объект (поле 4);
- угол вращения (значение или выражение) (поле 5);
- коэффициент масштабирования (значение или выражение) (поле 6).

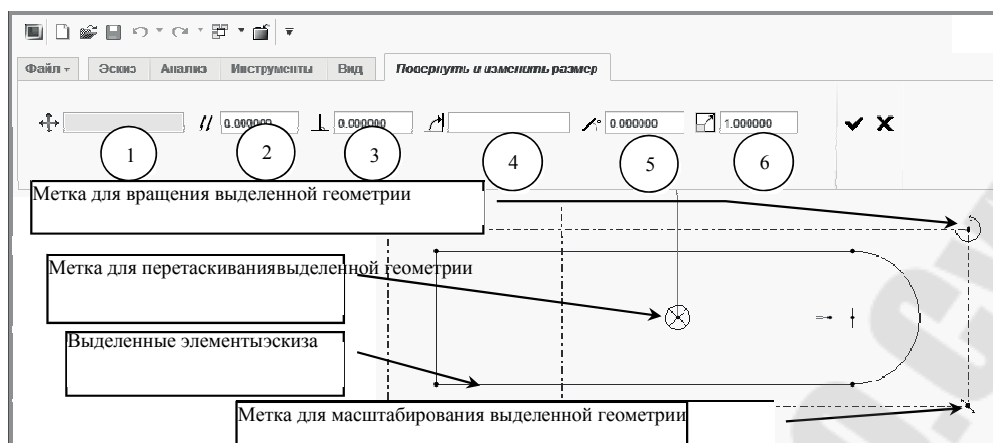



Рис. 2.73. Метки для манипуляции геометрическими элементами эскиза

Завершить манипуляции с элементами эскиза можно с помощью кнопок **Завершить/Отменить** (✓ ✕).

Инструменты **Переместить и изменить размер** и **Зеркальное отражение** становятся доступны только после выбора геометрических элементов эскиза с помощью указателя . Для создания зеркального отражения могут быть использованы только геометрические элементы. Нельзя создать зеркальные отражения для размеров, осевых линий, текстов или ссылочных элементов. Закрепления (ограничения) отражаются одновременно с геометрическими элементами. Для создания зеркального отражения необходимо построение осевой линии, относительно которой оно и будет создано

Простановка размеров эскиза в режиме Сечение

Во время создания эскиза размеры проставляются автоматически. Размеры проставляются, исключая размерные петли, дублирования с другими размерами и закономерностями, наложенными закреплениями. Например, если две линии имеют закрепление **перпендикулярность** (\perp) или **параллельность** ($=$), то угол между ними не проставляется. Размеры по умолчанию являются управляемыми и имеют серый цвет. Управляющие размеры эскиза создаются пользователем или конвертируются из управляемых с помощью комбинации клавиш **Ctrl+T**.

Линейные размеры

Линейные размеры показывают длину отрезка или расстояние между объектами.

На рис. 2.74 показан пример простановки линейного размера: левой кнопкой мыши выбираются вершины/точки/объекты (1, 2),

средней – место расположения символа размера (3, 4, 5).

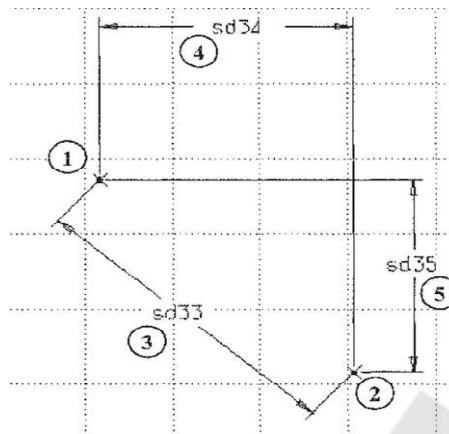


Рис. 2.74. Первый пример простановки линейных размеров

На рис. 2.75 – второй пример простановки линейного размера: левой кнопкой мыши выбирается отрезок (7), средней – место расположения символа размера (6)

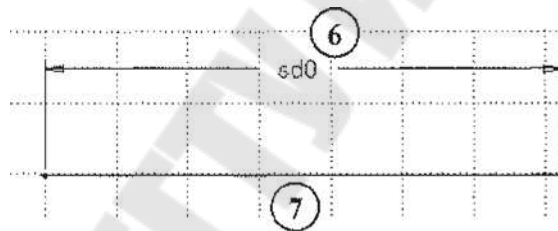


Рис. 2.75. Второй пример простановки линейных размеров

На рис. 2.76 – третий пример простановки линейного размера: левой кнопкой мыши выбираются параллельные линии (8), средней – место расположения символа размера (9).

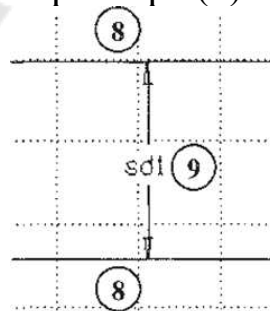


Рис. 2.76. Третий пример простановки линейных размеров

На рис. 2.77 – четвертый пример простановки линейного размера: левой кнопкой мыши выбирается отрезок (10), вершина (11), средней – место расположения символа размера (12).

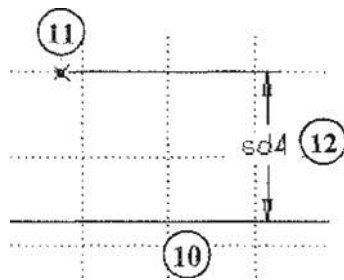


Рис. 2.77. Четвертый пример простановки линейных размеров

На рис. 2.78 – пятый пример простановки линейного размера: левой кнопкой мыши выбирается отрезок (13), дуга/окружность (12), средней – место расположения символа размера (14).

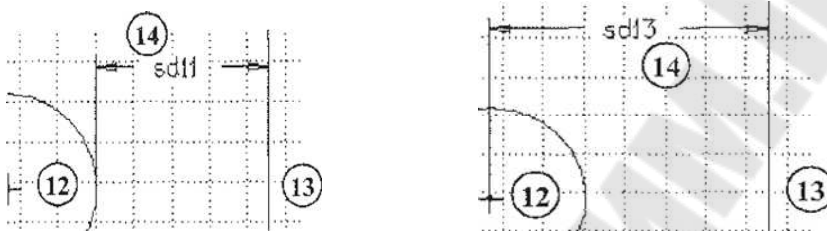


Рис. 2.78. Пятый пример простановки линейных размеров

Диаметральные и радиальные размеры дуг и окружностей

На рис. 2.79 показан пример простановки диаметрального размера: левой кнопкой мыши дважды (двойной щелчок) выбирается дуга/окружность (1), средней – место расположения символа размера диаметра (2).

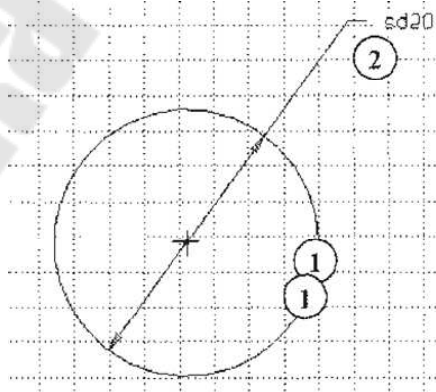


Рис. 2.79. Простановка диаметрального размера

На рис. 2.80 показан пример простановки радиального размера: левой кнопкой мыши выбирается дуга/окружность (3), средней – место расположения символа размера радиуса (4).

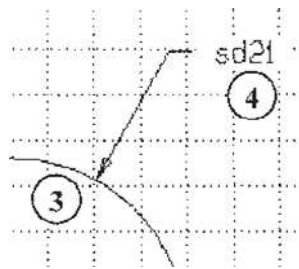
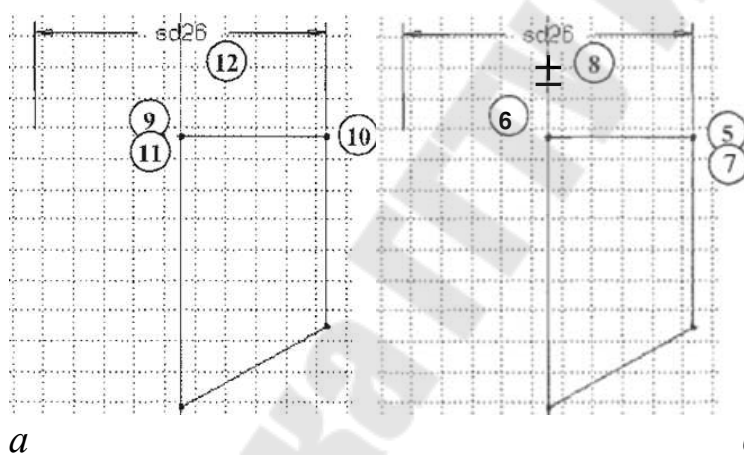


Рис. 2.80. Простановка радиального размера

Диаметральные размеры относительно оси вращения

Для простановки диаметрального размера относительно оси вращения существует два равноценных способа, показанные на рис. 2.81: в первом варианте (а) левой кнопкой мыши выбираются объект (5), ось вращения (6), повторно тот же объект (7), средней – место расположения символа размера диаметра (8).

Во втором варианте (б) левой кнопкой мыши выбираются ось вращения (9), объект (10), повторно – ось вращения (11), средней – место расположения символа размера диаметра (12).



а

б

Рис. 2.81. Простановка диаметрального размера относительно оси вращения

Объектами при простановке размеров могут являться точки, вершины, отрезки, дуги и окружности.

Угловые размеры

При простановке угловых размеров (рис. 2.82) левой кнопкой мыши выбираются линии (12, 13), средней – место расположения символа углового размера (14, 15, 16, 17).

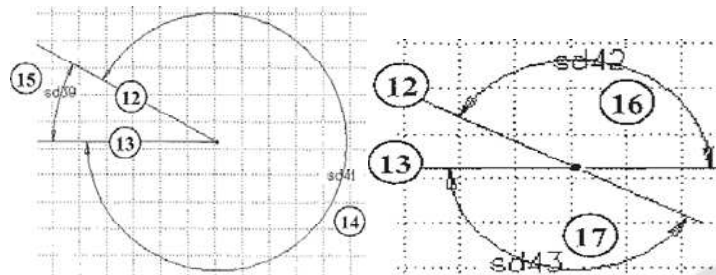


Рис. 2.82. Простановка угловых размеров

На рис. 2.83 показан еще один вариант простановки угловых размеров: левой кнопкой мыши выбираются концы дуги (1, 2), сама дуга (3) и средней – место расположения символа углового размера (4).

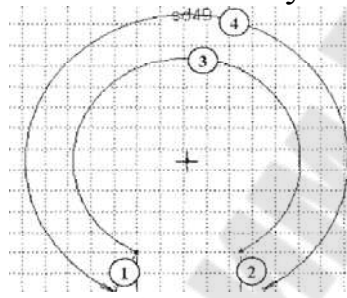


Рис. 2.83. Второй вариант простановки углового размера

Основные правила при создании эскизов в режиме Сечение

При создании эскизов в режиме *Сечение* следует помнить несколько правил:

- делайте эскиз простым;
- создавайте эскиз поэтапно;
- рисуйте каждый объект эскиза в крупном масштабе;
- используйте открытые и закрытые сечения соответствующим образом;
 - избегайте использовать без лишней необходимости: рисованные фаски; вписанные дуги; рисованные отверстия; рисованные массивы элементов;
 - пытайтесь добиться принципиального соответствия эскиза замыслу, в первую очередь, назначая закрепления, а уже затем – точные размеры;
 - эффективно используйте настройки среды в режиме *Сечение*;
 - избегайте в эскизах соседства несопоставимых размеров (например, 3000 мм и 0,3 мм);
 - рационально используйте точность представления размеров в режиме *Сечение*;
 - используйте такую размерную схему эскиза, какую желаете в

дальнейшем видеть в чертеже;

- используйте вспомогательные (конструктивные) элементы эскиза (осевые линии $\dot{}$, точки \times , вспомогательные дуги и окружности) для получения желаемой размерной схемы;
- используйте кнопки возврата для редактирования эскиза;
- при необходимости сохраняйте промежуточные варианты эскиза на диск.

Раздел 3. Операции построения твердых тел. Трехмерное моделирование (3D). Функции твердотельного моделирования

Функции моделирования, поддерживаемые большинством систем твердотельного моделирования, могут быть разделены на пять основных групп.

В *первую группу* входят функции, используемые для создания простых форм на основе объемных заготовок, имеющихся в программе, - так называемые *функции создания примитивов (primitive creation functions)*. К этой же группе относятся функции добавления и вычитания объема - *булевы операторы (Boolean operations)*. Функции моделирования из первой группы позволяют проектировщику быстро создать форму, близкую к окончательной форме детали, подобно тому, как ребенок сминает пластилин и создает из него приблизительную физическую модель.

К *второй группе* относятся функции создания объемных тел путем перемещения поверхности. Функция *заметания (sweeping)* позволяет создавать объемное тело трансляцией или вращением области, заданной на плоскости. Построение тела вращения из плоской кривой называется также *качанием* или *вращательным заметанием (swinging)*. Задавая замкнутую плоскую область, пользователь может указывать геометрические ограничения или вводить данные о размерах, а не рисовать форму вручную. Здесь под геометрическими ограничениями понимаются соотношения между элементами рисунка (перпендикулярность отрезков, касание дуги окружности отрезком и т. д.). В этом случае система построит точную форму, удовлетворяющую ограничениям, самостоятельно. Изменение геометрических ограничений или размеров даст другую плоскую область и другое объемное тело. Такой подход называется параметрическим моделированием, поскольку изменение параметров позволяет получить разные объекты. Параметрами могут быть постоянные, входящие в геометрические ограничения, а также размеры. Функция *скиннинга (skinning)* создает объемное тело, натягивая поверхность на заданные поперечные сечения. Функции второй группы позволяют проектировщику начать моделирование с формы, весьма близкой к конечному результату, поскольку одних поперечных сечений вполне достаточно для точного описания конечного объемного тела.

В *третью группу* входят функции моделирования, предназначенные главным образом для изменения существующей формы. Типичными примерами являются функции *скругления* или *плавного сопряжения* (*rounding, blending*) и *поднятия* (*lifting*).

К *четвертой группе* относятся функции, позволяющие непосредственно манипулировать составляющими объемных тел, то есть вершинами, ребрами и гранями. Работа с этими функциями (аналогичными функциям систем поверхностного моделирования) называется *моделированием границ* (*boundary modeling*).

В *пятую группу* входят функции, используя которые проектировщик может моделировать твердое тело при помощи свободных форм. Например, он может давать системе команды типа «сделать отверстие такого-то размера в таком-то месте» или «сделать фаску такого-то размера в таком-то месте». Работа с такими функциями называется *объектноориентированным моделированием* (*feature-based modeling*). В последнее время функциям пятой группы уделяется особое внимание, поскольку модель, построенная с их помощью, содержит информацию о процессе создания, без которой невозможно автоматическое формирование плана технологического процесса для детали. Заметьте, что модель, созданная другими средствами, содержит только элементарные геометрические сведения о вершинах, ребрах и гранях.

Тема 3.1. Принципы создания объемных тел. Классификация объектов моделирования. Функции создания примитивов.

Функции создания примитивов позволяют выбирать и создавать простейшие объекты, заранее определенные авторами системы моделирования. Размер примитива задается пользователем. Примитивы, поддерживаемые большинством систем твердотельного моделирования, показаны на рисунке 3.1. Размеры, указанные на этом рисунке, могут устанавливаться пользователем.

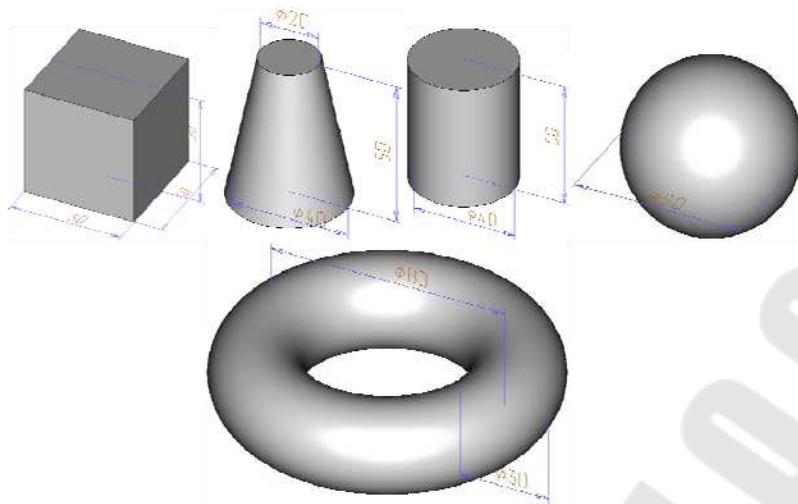


Рис. 3.1. Типичные примитивы

Примитивы сохраняются в базе данных процедурой, осуществляющей их создание, а параметры примитивов передаются этой процедуре в качестве аргументов.

Булевы операции. Если бы в списке примитивов можно было найти любое объемное тело, это было бы замечательно. Однако из-за разнообразия возможных применений систем геометрического моделирования сохранить заранее все мыслимые формы невозможно. Гораздо проще приблизиться к решению, предоставив пользователю средства для комбинирования примитивов. В качестве метода комбинирования в твердотельном моделировании применяются булевы операции теории множеств. Другими словами, каждое примитивное объемное тело считается множеством точек, к множествам применяются булевы операции, а в результате получается объемное тело, состоящее из точек, полученных после преобразований.

Большинством систем твердотельного моделирования поддерживаются следующие булевы операции: объединение, пересечение и разность (рис. 3.2, 3.3 и 3.4 соответственно). До применения булевых операций необходимо определить относительное положение и ориентацию примитивов. Булевы операции могут применяться не только к примитивам, хотя на рисунках в качестве примеров изображены именно примитивы.

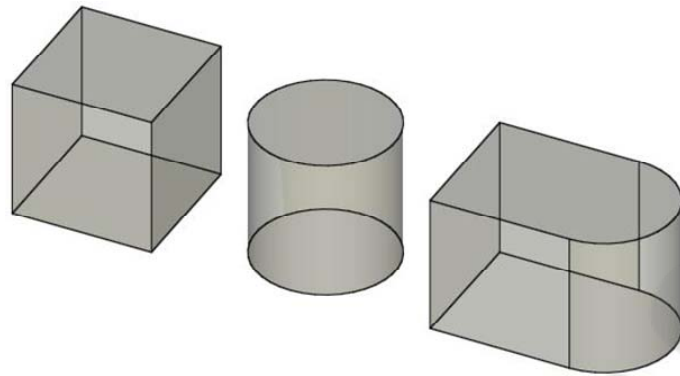


Рис. 3.2. Объединение примитивов

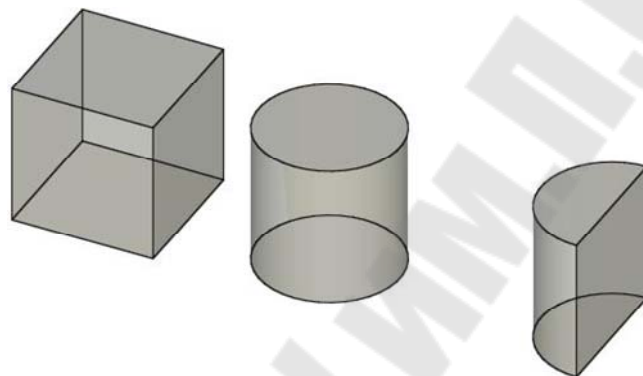


Рис. 3.3. Пересечение примитивов

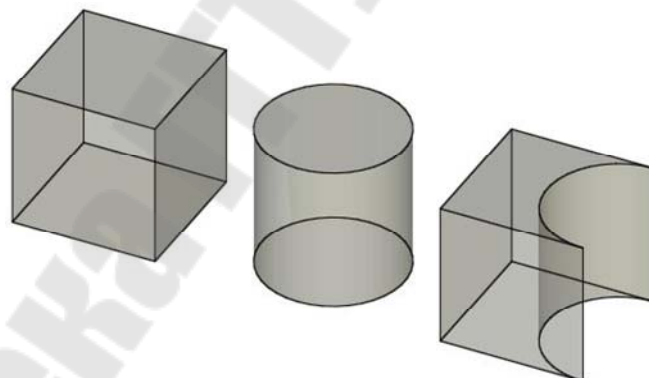


Рис. 3.4. Разность примитивов

Еще одна функция моделирования реализуется подобно булевым операциям, это функция разрезания объемного тела плоскостью, после применения которой случается тело из двух частей. Того же результата можно достичь, применив операцию вычитания к объемному телу, которое должно быть разрезано, и кубу, одной из граней которого является секущая плоскость. По этой причине функция разрезания также может быть отнесена к булевым операциям.

При использовании булевых операций следует быть внимательным, чтобы не получить в результате тело, не являющееся объемным

(рис. 3.5). Некоторые системы выдают предупреждение о возможности получения некорректного результата, другие могут просто завершить работу с сообщением об ошибке. Системы гибридного (немногообразного) моделирования способны обрабатывать и такие специфические ситуации, поскольку они работают не только с объемными телами, но и с поверхностями и каркасами.

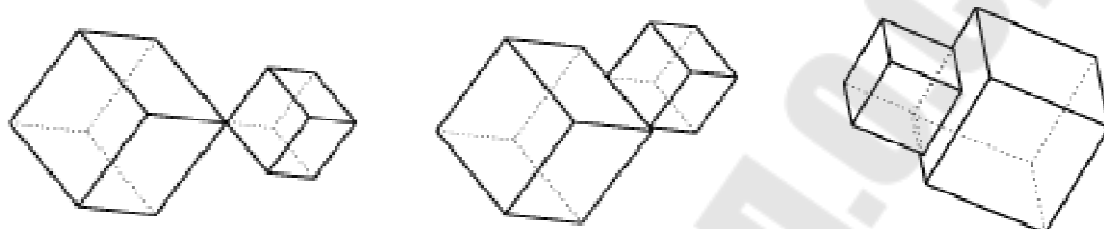


Рис. 3.5. Некорректная булева операция

Заметание

Функция **заметания** (*sweeping*) формирует объемное тело трансляцией или вращением замкнутой плоской фигуры. В первом случае процесс формирования называется **заметанием при трансляции** (*translational sweeping*), во втором случае – **построением фигуры вращения** (*swinging, rotational sweeping*). Если плоская фигура будет незамкнутой, в результате заметания получится не объемное тело, а поверхность. Такой вариант заметания поддерживается системами поверхностного моделирования.

Заметание при трансляции и вращении представлено на рис. 3.6 и 3.7 соответственно. Хотя рис. 3.7 демонстрирует вращение на 360° , большинство систем твердотельного моделирования позволяют поворачивать фигуру на произвольный угол.

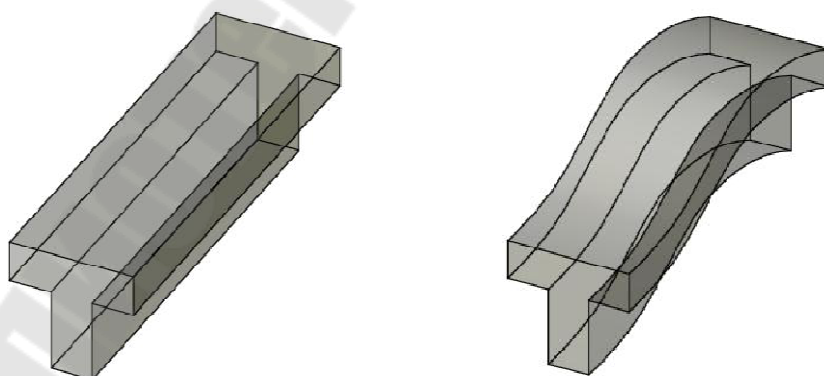


Рис. 3.6. Заметание при трансляции

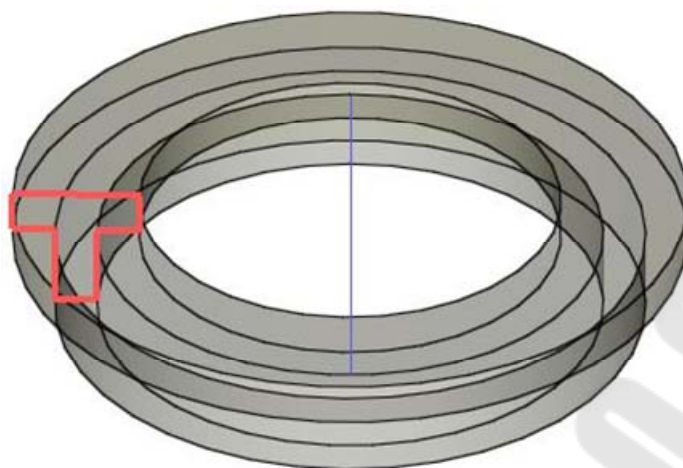


Рис. 3.7.- Заметание при вращении

Скиннинг.

Функция *скиннинга* (*skinning*) формирует замкнутый объем, натягивая поверхность на заданные плоские поперечные сечения тела (рис. 3.8). Можно представить себе, что на каркас фигуры, образованный границами поперечных сечений, натягивается ткань или винил. Если к натянутой поверхности не добавить конечные грани (два крайних сечения), в результате получится поверхность, а не замкнутый объем. В таком варианте функция скиннинга представлена в системах поверхностного моделирования.

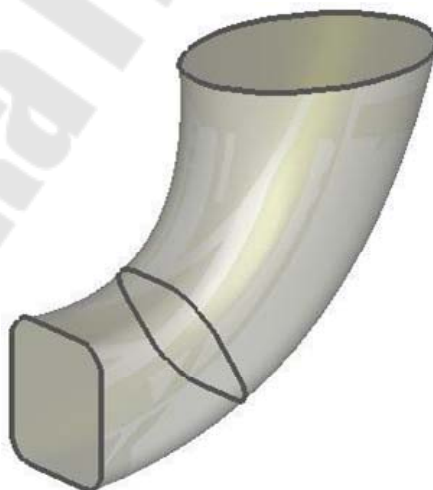


Рис. 3.8. Создание объемного тела методом скиннинга

Скругление или плавное сопряжение.

Скругление (*rounding*), или плавное сопряжение (*blending*), используется для модифицирования существующей модели, состоящего

в замене острого ребра или вершины гладкой криволинейной поверхностью, векторы нормали к которой непрерывно продолжают векторы нормали поверхностей, сходящихся у исходного ребра или вершины. Замена острого прямого ребра цилиндрической поверхностью демонстрирует рис. 3.9, а. Векторы нормали к цилиндрической поверхности продолжаются векторами соседних плоских граней. Замена острой вершины сферической поверхностью показана на рис. 3.10. Здесь также обеспечивается непрерывность векторов нормали. Частный случай скругления с добавлением, а не удалением материала показан на рис. 3.9, б. Такая процедура называется выкружкой (filleting).

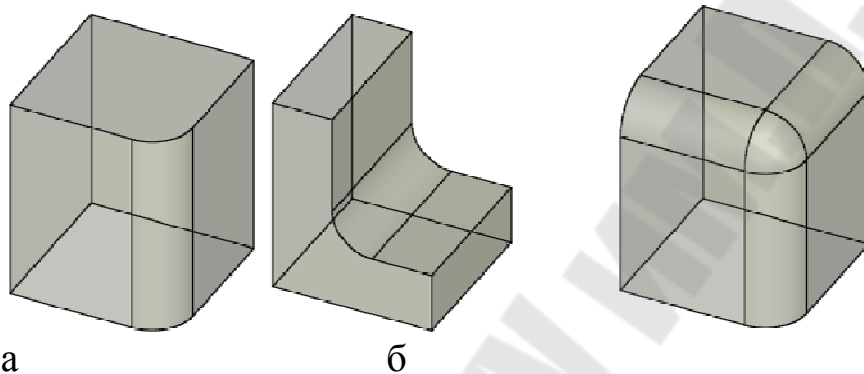


Рис. 3.9. Скругление ребер

Рис. 3.10. Скругление вершин

Поднятие. Поднятием (*lifting*) называется перемещение всей грани объемного тела или ее части в заданном направлении с одновременным удлинением тела в этом направлении (рисунок 3.11, а). Если нужно поднять только часть грани (рис. 3.11, б), эту грань необходимо заранее разделить.

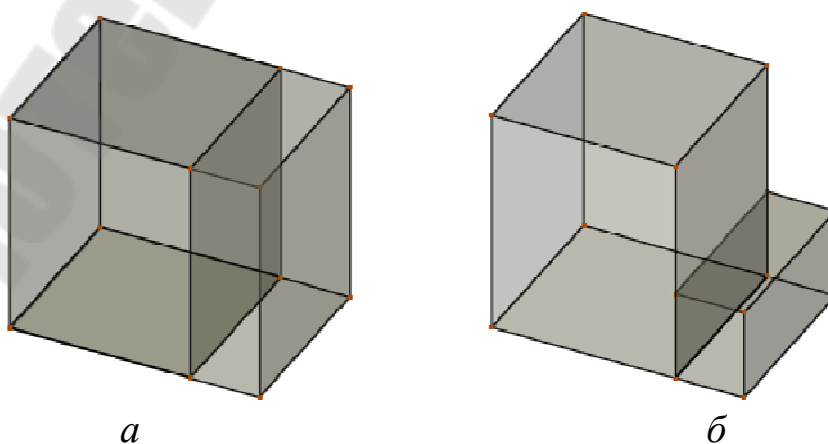


Рис. 3.11. Поднятие грани и ее части

Для этого достаточно добавить ребро, которое будет разбивать грань на нужные части. Но внутри системы при этом будут произведены некоторые дополнительные действия, результатом которых станет деление грани. Обычно при этом обновляются сведения о связности поверхности. Внутри системы подобные действия выполняются при помощи операторов Эйлера. Чтобы добавленная часть тела не пересекалась с исходной (рис. 3.12) при работе с функцией поднятия необходимо правильно указывать направление и величину поднятия. Пересечение не вызовет проблем, если функция поднятия реализована так, что при пересечении выполняется объединение добавленной части с исходным телом. Однако изначально функция поднятия разрабатывалась для небольших местных изменений, поэтому ситуация, показанная на рис. 3.12, дает некорректное объемное тело.

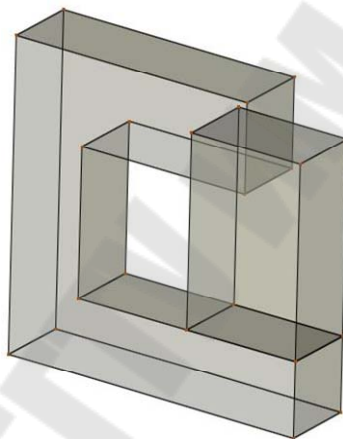


Рис. 3.12. Самопересечение в результате поднятия

Моделирование грани

Функции *моделирования грани* используются для добавления, удаления и изменения элементов объемного тела - его вершин, ребер и граней. Следовательно, процедура, использующая функции моделирования грани, будет выглядеть точно так же, как в системах поверхностного моделирования. Другими словами, вначале создаются точки, затем создаются ребра, соединяющие эти точки, и наконец, граничные ребра определяют поверхность. Однако в системах твердотельного моделирования, в отличие от систем поверхностного моделирования, нужно определить все поверхности таким образом, чтобы образовался замкнутый объем. Создание клина при помощи функций моделирования грани иллюстрирует рис. 3.13. Процедура включает создание точек, ребер, граней и поверхностей.

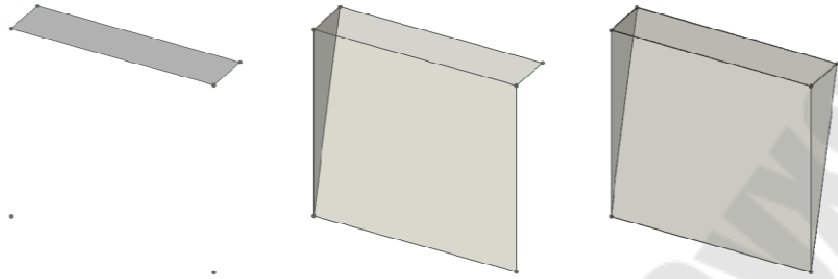


Рис. 3.13. Создание тела при помощи функций моделирования границ

Создавать объемное тело исключительно при помощи функций моделирования границ очень утомительно. Эти функции используются главным образом для создания плоских фигур, которые затем служат сечениями объемным телам, образуемым заметанием или скиннингом. Однако функции моделирования границ удобно применять для изменения формы уже существующего тела. Вершину можно передвинуть в новое положение, изменив соответствующим образом соседние ребра и грани (рис. 3.14). Прямое ребро можно заменить криволинейным, в результате чего изменятся связанные грани и вершины (рис. 3.15). Плоскую поверхность можно заменить на криволинейную с модификацией ребер и вершин (рис. 3.16). Иногда плоскую поверхность можно заменять криволинейной, импортированной из системы поверхностного моделирования. Перечисленные функции моделирования называются *функциями тонкого редактирования (tweaking functions)*. Они используются для моделирования тел, ограниченных криволинейными поверхностями, поскольку такие поверхности легко получать из плоских граней многогранника.

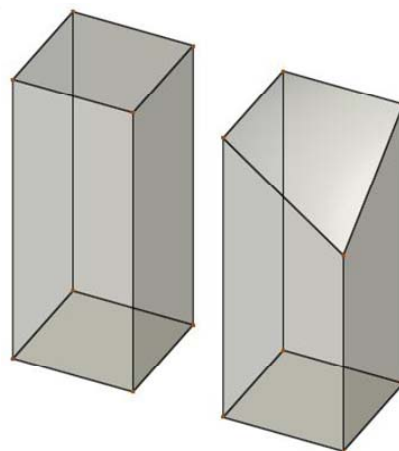


Рис. 3.14. Модификация объекта перемещением вершины

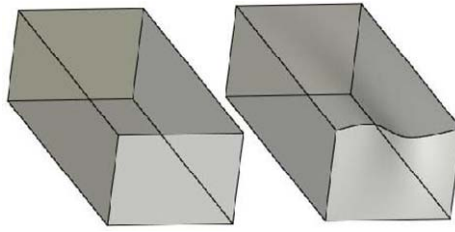


Рис. 3.15. Модификация объекта заменой ребра

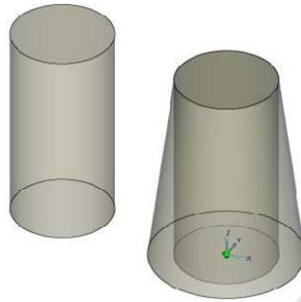


Рис. 3.16. Модификация объекта заменой поверхности

Тема 3.2. Базовые операции трехмерного моделирования. Объектно-ориентированное моделирование

Объектно-ориентированное моделирование (feature-based modeling) позволяет конструктору создавать объемные тела, используя привычные *элементы форм [features]*. Созданное тело несет в себе информацию об этих элементах в дополнение к информации об обычных геометрических элементах (вершинах, ребрах, гранях и др.). Например, конструктор может давать команды типа «сделать отверстие такого-то размера в таком-то месте» или «сделать фаску такого-то размера в таком-то месте», и получившаяся фигура будет содержать сведения о наличии в конкретном месте отверстия (или фаски) конкретного размера. Набор доступных в конкретной программе элементов формы зависит от спектра применения этой программы.

Большинством систем объектно-ориентированного моделирования поддерживаются такие элементы, которые используются при изготовлении деталей: фаски, отверстия, скругления, пазы, выемки и т. д. Такие элементы называются *производственными*, поскольку каждый из них может быть получен в результате конкретного процесса производства. Например, отверстие создается сверлением, а выемка – фрезерованием. Следовательно, на основании сведений о наличии, размере и расположении производственных элементов можно попытаться автоматически сформировать план технологического

процесса. Автоматическое планирование технологического процесса, если оно будет разработано на практическом уровне, перебросит мост между CAD и CAM, которые сейчас существуют отдельно друг от друга. Таким образом, в настоящий момент лучше моделировать объекты, подобные изображенному на рис. 3.17, с использованием команд объектно-ориентированного моделирования «Паз» и «Отверстие», а не просто булевых операций. Модель, созданная при помощи таких команд, облегчит планирование технологического процесса, если не сделает его полностью автоматическим. Использование производственных элементов в моделировании иллюстрирует рис. 3.18.

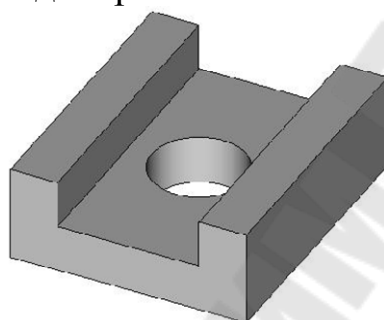


Рис. 3.17. Модель, созданная командами "Паз" и "Отверстие"

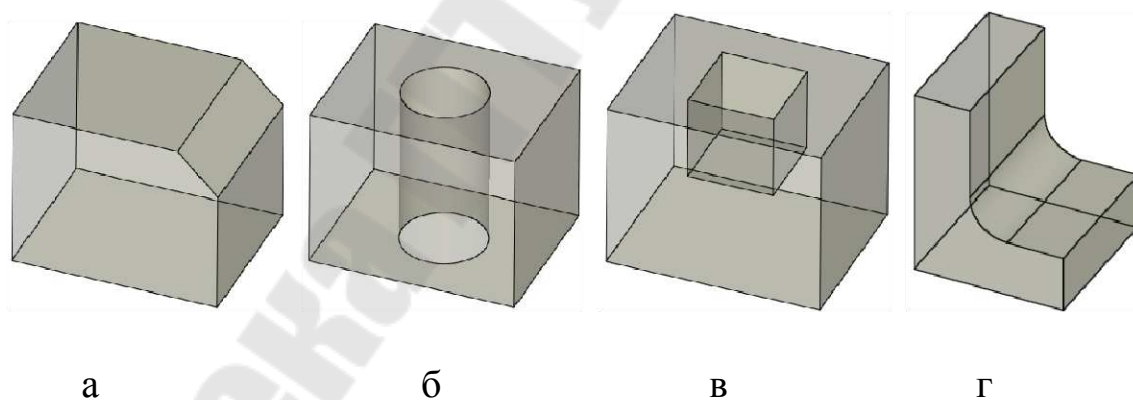


Рис. 3.18. Производственные элементы: а – фаска; б – отверстие; в – колодец; г – скругление

Один из недостатков объектно-ориентированного моделирования заключается в том, что система не может предоставить все элементы, нужные для всех возможных приложений. Для каждой задачи может потребоваться свой набор элементов. Чтобы исключить этот недостаток, большинство систем объектно-ориентированного моделирования поддерживают какой-либо язык, на котором пользователь при необходимости может определять свои собственные элементы.

После определения элемента необходимо задать параметры, указывающие его размер. Элементы, как и примитивы, могут быть разного размера, а задаются размеры параметрами в момент создания элемента. Создание элементов разного размера путем присваивания различных значений соответствующим параметрам является разновидностью параметрического моделирования.

В основе **Creo Parametric** лежит работа с трехмерными твердотельными моделями, вокруг которых выстраиваются все основные функциональные возможности системы. Полученные трехмерные модели деталей впоследствии можно объединять в сборки. Трехмерная геометрия деталей и сборок может проецироваться на поле чертежа для формирования чертежных видов.

Твердотельные модели деталей – геометрические модели, которые обладают массовыми характеристиками, такими как объем, площадь поверхности и моменты инерции.

Основной путь входа в режим *Деталь* – это вход непосредственно в режим *Деталь* при создании нового объекта (рис. 3.19) по команде **Создать**.

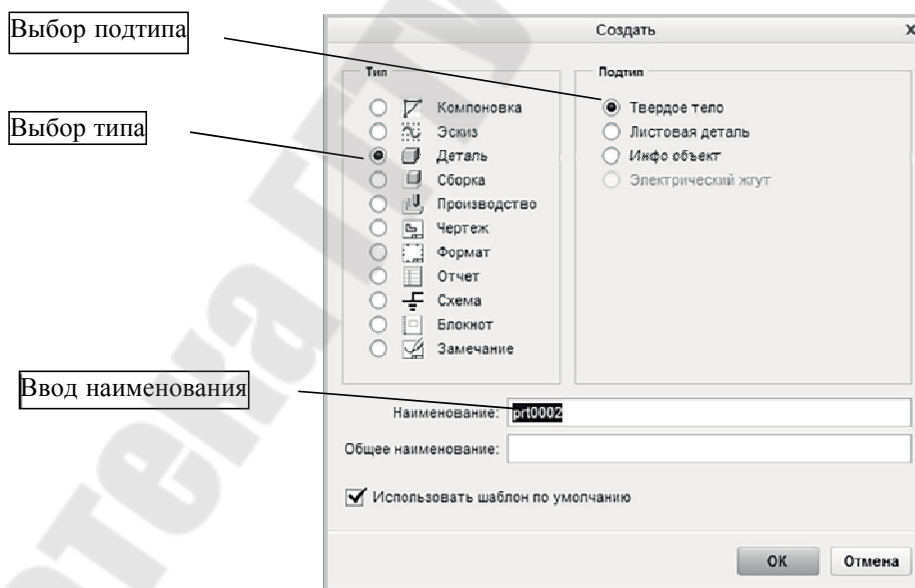


Рис. 3.19. Вход в режим *Деталь* при создании нового объекта

При создании модели детали могут быть использованы заданные по умолчанию шаблоны. Шаблоны содержат в себе общие для всех деталей элементы, такие как: опорные плоскости, набор слоев, сохраненные виды, параметры, единицы измерения и т. д. Если использовать один из имеющихся шаблонов, то настройки шаблона ста-

нут настройками для новой детали. Используя шаблон, в дальнейшем можно избежать многих проблем, связанных с соответствием детали корпоративным стандартам. Стандартный шаблон позволит всем инженерам предприятия создавать модели от общей «отправной точки» и гарантирует наличие всех требуемых параметров в каждой модели, созданной на предприятии.

При работе в других режимах (сборка, производство и т. д.) Creo Parametric предоставляет возможность доступа (через опцию *Активировать* в контекстном меню дерева модели) к функциям режима *Деталь* в фоновом режиме, не выходя из текущего режима (рис. 3.20):

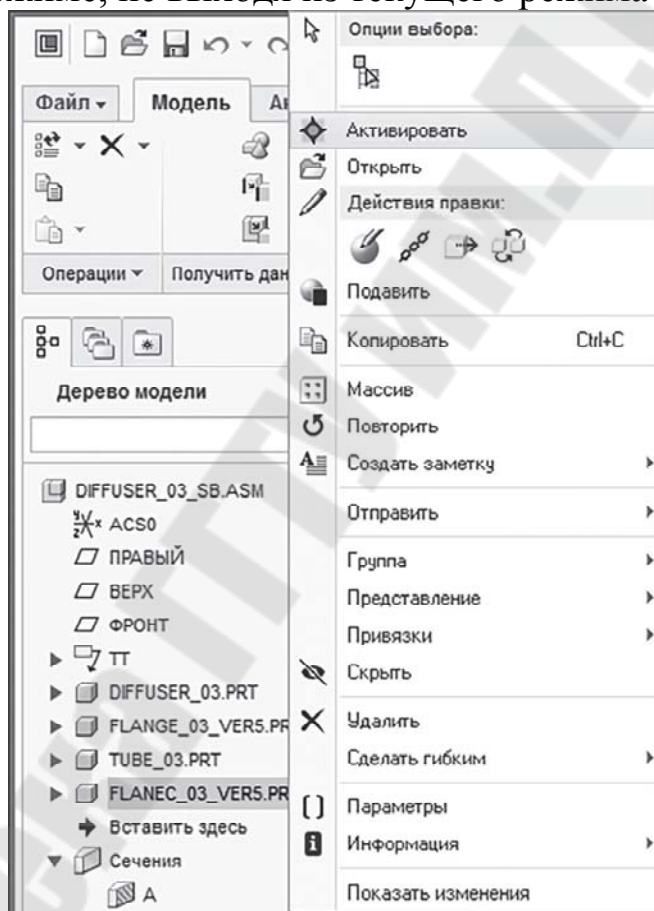


Рис. 3.20. Доступ к режиму *Деталь* из режима *Сборка*

При вызове объекта *.PRT с помощью команды **Открыть** также осуществляется переход в режим *Деталь*. При этом можно использовать опцию предварительного просмотра (рис. 3.21).

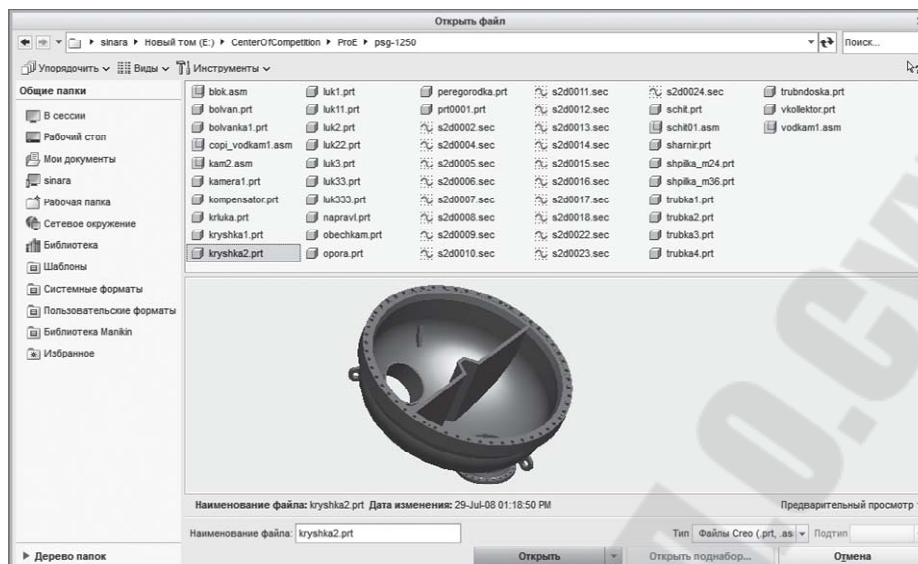


Рис. 3.21. Открытие модели детали с функцией предварительного просмотра

Геометрия модели формируется, как правило, путем создания серии последовательных конструктивных элементов (операций). Процедура создания того или иного конструктивного элемента (операции) сводится:

- к выбору типа операции (например: *Фаска*, *Отверстие* и т. д.);
- выбору привязок, т. е. элементов уже существующей геометрии, относительно которых создаваемый конструкторский элемент будет определять свое местоположение в пространстве (или конфигурацию);
- назначению всех необходимых для данной операции характеристик – атрибутов;
- заданию значений управляющих размеров – численных параметров, определяющих габариты конструктивного элемента;
- прорисовке (в ряде случаев) эскиза (ов) сечения (й), формирующего трехмерную геометрию, при перемещении в пространстве.

Интерфейс режима *Деталь* (см. рис. 3.22) имеет отличия от режима *Эскиз*. Назначение атрибутов происходит в режиме диалога (вопрос-ответ) с диалоговым окном.

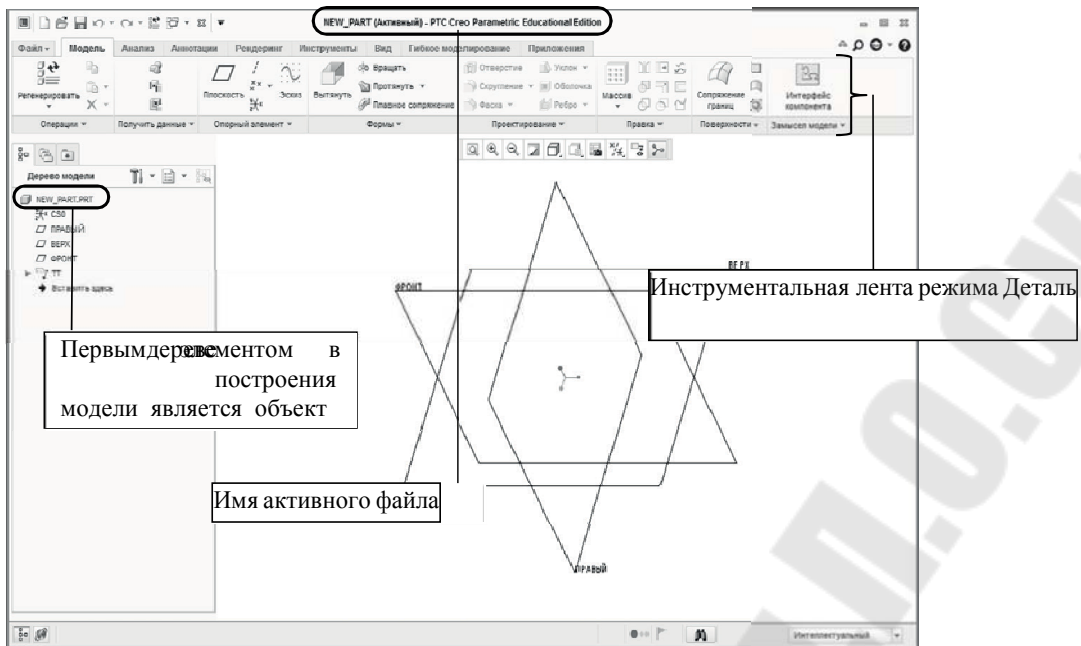


Рис. 3.22. Интерфейс режима *Деталь*

Примеры диалоговых окон приведены на рис. 3.23. В ряде случаев открываются еще и диалоговые панели.

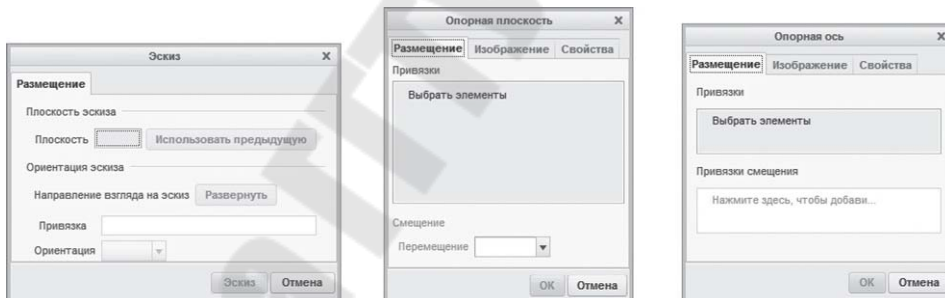


Рис. 3.23. Примеры диалоговых окон

Пример диалоговой панели приведен на рис. 3.24.

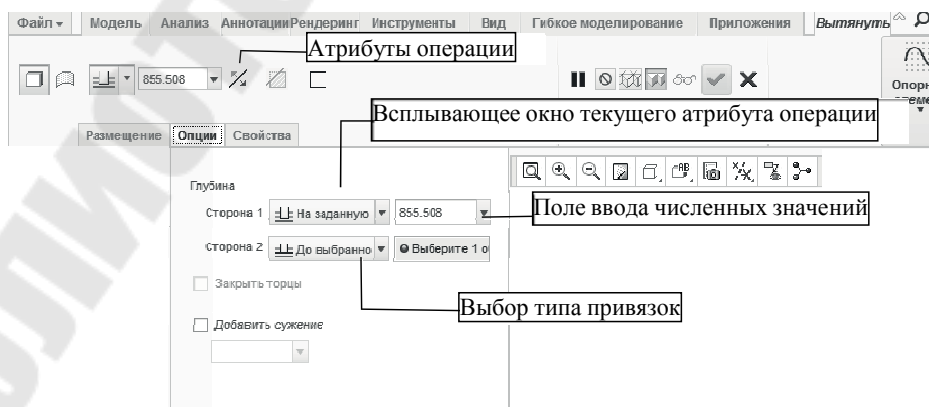



Рис. 3.24. Диалоговая панель операции *Вытянуть*

Ответы – это выбор опций в выпадающих меню, выбор геометрии с экрана курсором мыши и ввод численных значений в соответствующие поля. Диалоговый режим зачастую требует от пользователя обязательного ответа на заданный вопрос, не пуская дальше, к другим атрибутам. Диалоговые окна и диалоговые панели операций могут иметь различный вид, но, как правило, диалог с системой заканчивается нажатием кнопки **Ок** или \checkmark . Если все атрибуты операции назначены (корректно), то операция будет выполнена. В этом случае операция будет визуально представлена в модели и отражена в дереве в виде одного из соответствующих значков (например, ) . Если операция недоопределена, значок будет иметь специальную метку и ее геометрия не будет представлена в модели.

Геометрия операции полностью соответствует управляющим размерам и атрибутам. Легкий доступ к управляющим размерам и атрибутам с разных уровней Creo Parametric и возможность глобально управлять ими определяют гибкость и параметризацию модели.

Операции отображаются в дереве модели (см. рис. 3.25) в порядке последовательности их создания. Геометрия предыдущей операции может быть использована при создании последующих операций (таких как плоскость для рисования, ребро, привязки, размер и т. д.). В этом случае операция, на которую ссылаются другие операции, называется Родитель, а те, которые ссылаются – Потомок. Соответственно ассоциативная взаимосвязь между ними называется связью Родитель-Потомок.

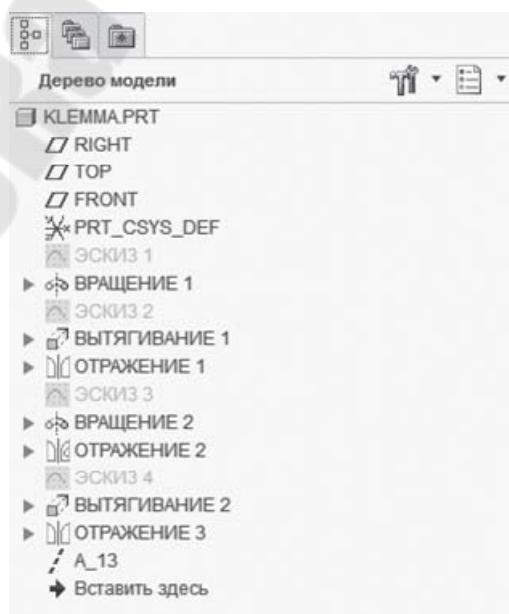


Рис. 3.25. Дерево модели

Все изменения, происходящие в родителях, распространяются и на потомков, так как потомки всегда ссылаются на своих родителей. Это позволяет системе контролировать процесс построения модели, отслеживая все происходящие изменения. Результаты изменений можно оценить после пересчета модели (кнопка **Регенерировать**).

Действия с конструктивными элементами (операциями)

Действия с операциями осуществляются выбором процедуры в панели *Операции* вкладки *Модель* инструментальной ленты (см. рис. 3.26) и выбора соответствующего объекта в графическом окне или в дереве модели. Быстрый доступ к процедурам можно получить нажатием правой кнопки мыши (открывается контекстное меню – см. рис. 3.27) на выбранном в дереве модели объекте.

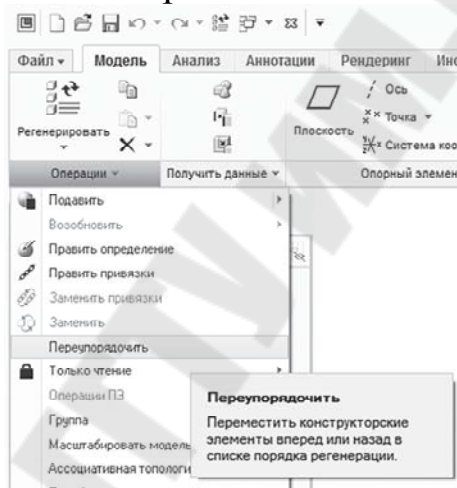


Рис. 3.26. Действия с операциями

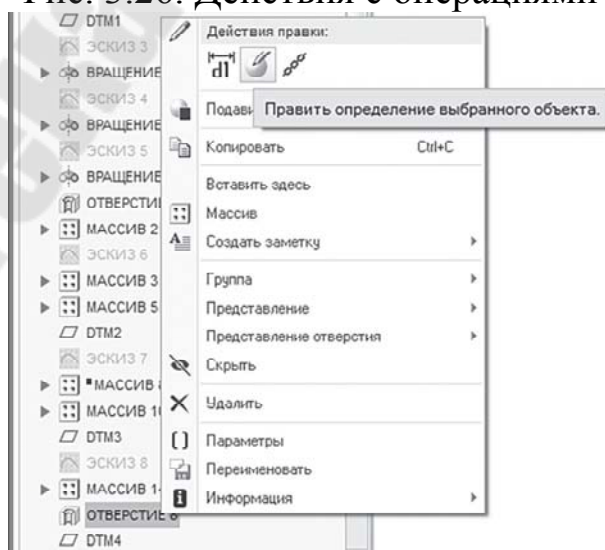





Рис. 3.27. Контекстное меню действий с конструктивными элементами в дереве модели

С конструктивными элементами (операциями) можно осуществлять следующие действия.

1. Удалить. При этом операции – *потомки*, ссылающиеся на эту (-и) операцию (-и) – также будут удалены.

2. Подавить с возможностью последующего их восстановления. При этом все последующие операции – *потомки*, ссылающиеся на эту (-и) операцию (-и) – также будут подавлены. В зависимости от установок фильтров дерева модели, доступ к которым осуществляется по кнопке , расположенной в верхней части дерева (см. рис. 4.7), подавленные операции в дереве модели отмечаются значком или не показываются вовсе.

3. Восстановить подавленную (-ые) операцию (-ии). В дереве модели восстановленные операции отмечаются значком . Выполнить операцию восстановления возможно, если подавленная операция отображается в модели. Если в фильтре дерева, доступном по кнопке , показ подавленных элементов выключен, то для их восстановления следует предварительно включить отображение подавленных элементов. Пункт *Восстановить* отображается в контекстном меню в том случае, если в дереве имеются подавленные конструктивные элементы.

4. Переименовать операцию (-ии).

5. Править управляющие размеры и параметры.

6. Править определения операции.


7. Править привязки базовой (опорной) геометрии для операции.

8. Создать управляющий размер элемента аннотации – представление на модели управляющего (-их) размера (-ов) в виде 3D-аннотаций.


На рис. 3.28 показаны управляющие размеры фаски и диаметра цилиндра, представленные в виде 3D-аннотаций.



Рис. 3.28. Управляющие размеры, представляемые в виде аннотаций


9. Создавать управляемые **Массивы** операций. В дереве модели массивы отмечаются значком  Эта возможность появляется после выделения какого-либо элемента, который может быть использован в качестве основы для массива.

10. Скрыть из видимости **Опорные элементы** геометрии (оси, плоскости, кривые, поверхности). Скрытые элементы показываются в дереве модели бледными символами, например – скрытая **Опорная плоскость**.

11. Создавать зависимые и независимые **Копии** операции (-ий). В дереве модели копии отмечаются значком .

12. Объединять операции в **Группы** для последующих действий. В дереве модели группы операций отмечаются значком .

13. Изменять последовательность операций.

Если связь Потомок-Родитель позволяет изменить порядок, то это можно выполнить простым перетаскиванием (режим DRAG&DROP) операции. Место возможной вставки подсвечивается значком .

На рис. 3.29 эта операция показана на примере перетаскивания **Фаски**, располагавшейся поначалу до операции **Вращение** (рис. 3.29, а) в позицию после **Вращения** (см. рис. 3.29, б).



Рис. 3.29. Изменение порядка операций методом перетаскивания (DRAG&DROP)

Если возникла необходимость вставить операцию не в конец списка дерева модели, а в конкретное место дерева модели, для этой цели существует режим вставки **Вставить здесь**. Для этого необходимо перетащить локатор вставки в то место, где необходимо вста-

вить операцию (рис. 3.30), или через **Править > Действия с Элементами > Режим вставки** указать операцию, после которой необходимо вставить будущую операцию. Место будущей операции будет определяться положением значка.

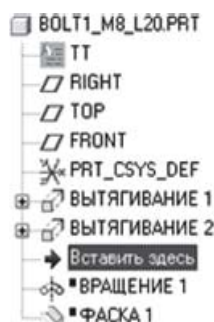


Рис. 3.30. Вставка операции в дерево модели

Некоторые из перечисленных выше действий осуществляются выбором процедуры в *Менеджере меню*, который появляется по команде **Операции с элементами** в панели *Операции* вкладки *Модель* инструментальной ленты и выбора соответствующего объекта с экрана или дерева. Большая часть действий доступна также из контекстного меню, открывающегося нажатием правой кнопки мыши на выбранном в дереве модели объекте.




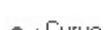

Классификация конструктивных элементов (операций)

Самым главным действием с элементами является процедура их формирования. Перед созданием конструктивного элемента (операции) конструктор должен ясно представить будущий результат и выбрать тот тип операции, который уместен в данном конкретном случае. Для этого нужна полная ясность, к какому результату приведет тот или иной тип, атрибут и другие свойства элемента.

Элементы (операции) можно разделить на классы по типу получаемой геометрии.













Опорные

Эти операции образуют бестелесную вспомогательную геометрию.

Обозначение	Наименование
 DTM	Опорные плоскости
 A_	Опорные оси
 PNT	Опорные точки
 Curve	Опорные кривые
 CS	Координатные системы

Твердотельные






Эти операции формируют конструктивные элементы в виде телесных (полнообъемных) геометрических тел. К твердотельным элементам (операциям) относятся следующие:

Обозначение	Наименование
 ВЫТЯГИВАНИЕ	Добавление к телу модели нового объема выдавливанием сечения/удаление объема от тела модели выдавливанием сечения
 ВРАЩЕНИЕ	Добавление к телу модели нового объема вращением сечения/удаление объема от тела модели вращением сечения
 ВЫСТУП	Добавление к модели объема путем протягивания сечения по траектории
 ВЫРЕЗ	Удаление объема от тела модели путем протягивания сечения по траектории
 ВЫСТУП	Добавление к телу модели объема при помощи перехода между сечениями
 ВЫРЕЗ	Удаление объема от тела модели при помощи перехода между сечениями
 ОБОЛОЧКА	Создание телесной оболочки
 УКЛОН	Создание литейного уклона
 СКРУГЛЕНИЕ	Создание скругления на ребре
 ФАСКА	Создание фаски на ребре
 ОТВЕРСТИЕ	Создание отверстия в теле модели
 РЕБРО	Создание ребер

и т.д.

Поверхностные

Эти операции формируют бестелесные поверхности/оболочки, которые используются для последующего создания твердотельных конструктивных элементов (операций):



Обозначение	Наименование
 ВЫТЯГИВАНИЕ	Создание новой поверхности вытягиванием сечения
 ВРАЩЕНИЕ	Создание новой поверхности вращением сечения
 ПОВЕРХНОСТЬ	Создание новой поверхности путем протягивания сечения по траектории
 ПОВЕРХНОСТЬ	Создание новой поверхности при помощи перехода между сечениями
 СМЕЩЕНИЕ 1	Копирование поверхности детали
 ЗАПОЛНЕНИЕ	Создание новой поверхности по рисованному контуру сечения
 ОТРАЖЕНИЕ	Копирование выбранных поверхностей
 ОБЪЕДИНЕНИЕ	Объединение нескольких поверхностей в одну

и т. д.

Тема 3.3. Вспомогательные операции трехмерного моделирования, редактирование геометрии объемных тел.

Оформительские

Оформительские операции формируют геометрию для особых вспомогательных визуальных эффектов в теле модели:

Обозначение	Наименование
 ОФОРМЛЕНИЕ	Обозначение резьбы
 ОФОРМЛЕНИЕ	Отображение рисованных элементов (надписей и т. п.)

и т. д.

В свою очередь **Твердотельные** операции делятся на базовые и конструктивные:

- **базовые** операции формируют некую черновую «заготовку» будущей трехмерной модели (пример – рис. 3.31, *а*);
- **конструктивные** операции, доводящие форму модели до конечного результата (пример – рис. 3.30, *б*). Как правило, это такие операции, как отверстия, скругления, проточки, пазы и т. д. Конструктивные операции базируются на базовых операциях и без них невозможны.

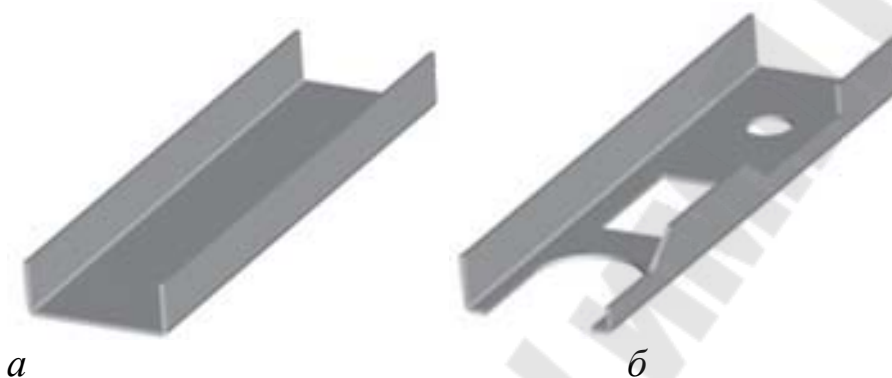


Рис. 3.31. Создание базовой заготовки (*а*) и окончательный вид модели (*б*)

По способу построения геометрии операции делятся на **рисованные** и операции, размещаемые в модели по привязке «укажи и размести».

Рисованные операции формируют геометрию путем перемещения в пространстве сечения по определенному закону, либо замыкая одно сечение с другим. На рис. 3.31 показан эскиз сечения, на рис. 3.32 – четыре твердотельные модели, полученные преобразованием этого сечения с помощью различных инструментов: **Вытянуть** (*а*), **Протянуть** (*б*), **Вращать** (*в*) и **Плавное сопряжение** (*г*).

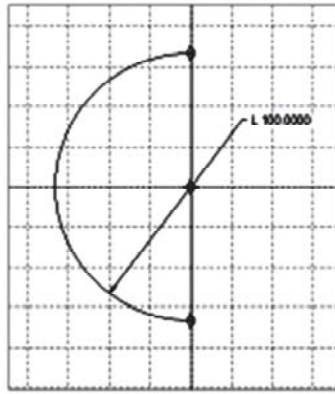


Рис. 3.32. Эскиз модели

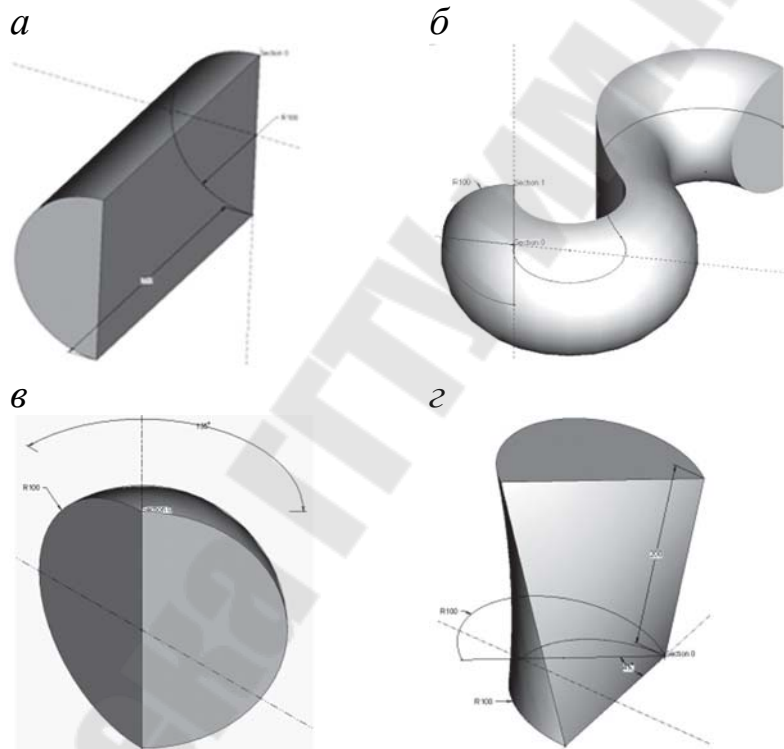


Рис. 3.33. Твёрдотельные модели, полученные вытягиванием (а), протягиванием сечения по траектории (б), вращением (в) и сопряжением сечений (г)

Операции, размещаемые в модели по привязке «укажи и размести», – это стандартные операции, форма сечений которых определена и не требует прорисовки. Для построения таких операций достаточно назначения необходимых привязок, определяющих их местоположение. К таким операциям относятся **Отверстие, Фаска, Скругление** и т. д.

По способу использования сечения при создании геометрии рисованные операции можно разделить на типы (рис. 3.34):

- **твердотельная** операция добавляет (или удаляет) замкнутый телесный объем, заполняя все пространство внутри сечения;
- **твердотельная-Тонкостенная** операция добавляет (или удаляет) тонкостенный телесный объем (оболочку), располагая его с равномерным отступом от элементов сечения;
- **поверхность/оболочка** – операция добавляет бестелесную поверхность/оболочку.

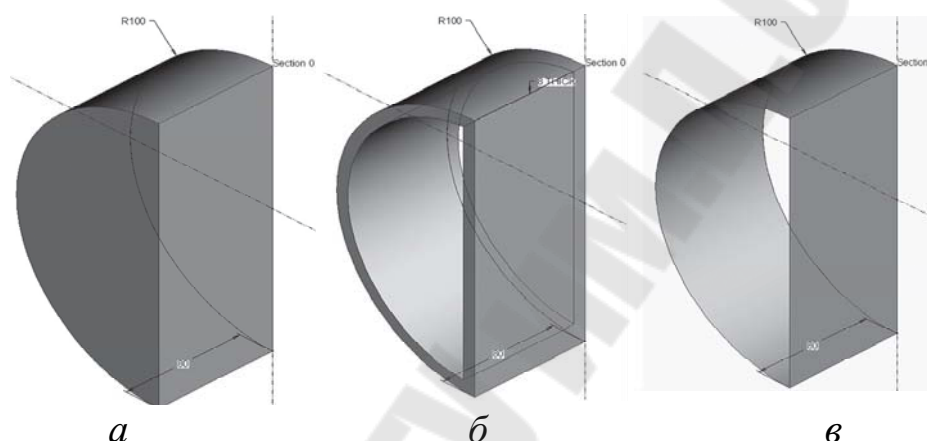


Рис. 3.34. Различные типы рисованных операций: твердотельная (а), твердотельная-тонкостенная (б) и поверхность/оболочка (в)

При работе с инструментами **Вытянуть** или **Вращать** можно прямо в панели текущей операции переключаться между типами операций, т. е. менять **Твердотельная** на **Твердотельная-Тонкостенная** или **Поверхность/оболочка** (см. рис. 3.35).

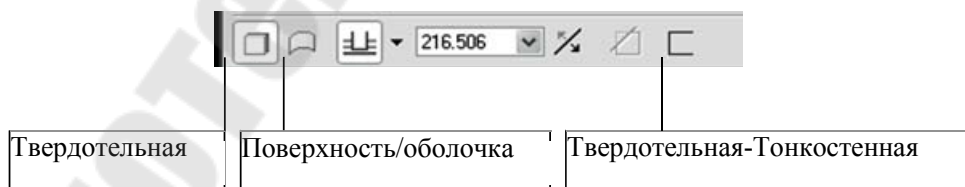















Рис. 3.35. Диалоговая панель инструмента Вытянуть



В табл. 3.1 представлены варианты использования различных типов операции.

Таблица 3.1

Преимственность типов операций при работе с панелью текущей операции


Инструменты	Операция	Типы моделей		
		Твердотельная	Твердотельная-Тонкостенная	Поверхность/оболочка
 Вытягивание	 ВЫТЯГИВАНИЕ  ВРАЩЕНИЕ (добавление материала)			
 Вращение	 Вырез Вырез (удаление материала)	 + 	 + 	 -




Атрибуты операций

Классы, типы и подтипы, перечисленные выше, выбираются перед началом создания операции (например, **Твердотельное > Выдавливание > Прямое > Тонкостенное**). Класс, тип и подтип не могут быть изменены, т. е. **Базовый элемент** нельзя изменить на **Поверхность**, **Вращение** на **Прямое вытягивание**, **Твердотельное** построение на **Тонкостенное** (за исключением работы  **Вытянуть** или  **Вращать**) и т. д. При необходимости подобных изменений операцию можно только удалить и создать заново. В отличие от типа операции, атрибуты операции можно гибко менять.

Атрибуты операции назначаются при работе с диалоговым окном или диалоговой панелью текущей операции. Операция, как правило, имеет несколько атрибутов, некоторые из них уникальные для конкретной операции.

Ниже представлены принципы работы нескольких наиболее типовых атрибутов рисованных операций:

- параметр **Изменить направление глубины...**  определяет направление распространения операции относительно плоскости рисования (**Повернуть**). Различия показаны на рис. 3.36.

- параметр **Изменить направление выдавливания материала...**  определяет направление удаления  +  материала (см. табл. 3.1) относительно геометрических элементов эскиза. Различия показаны на рис. 3.37.

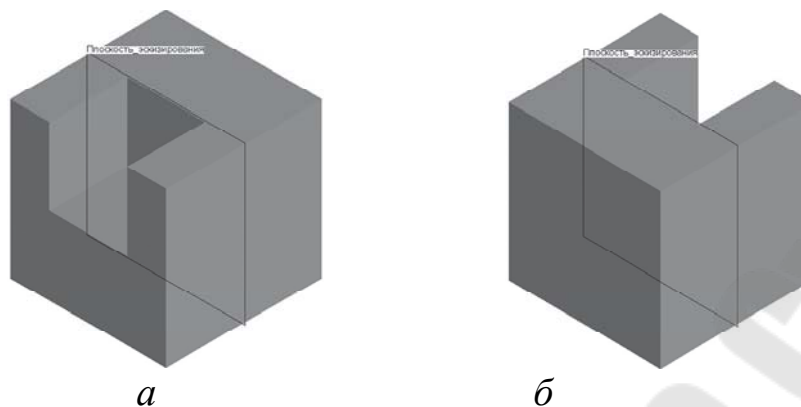


Рис. 3.36. Влияние изменения направления распространения операции

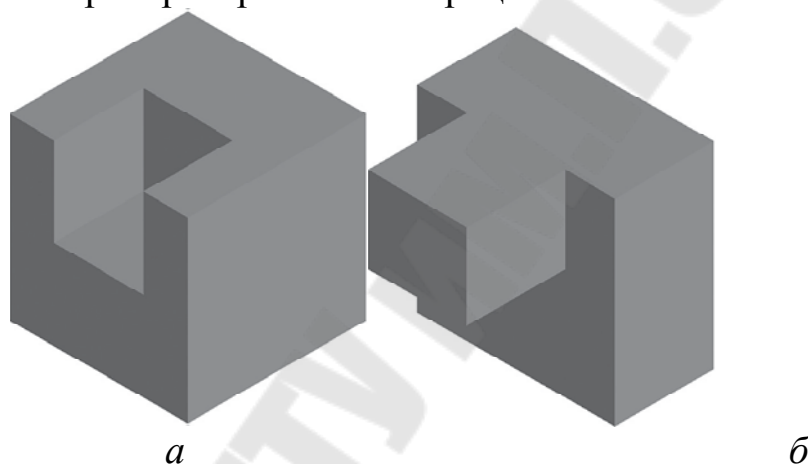






Рис. 3.37. Влияние изменения направления выдавливания материала

Глубина определяет глубину распространения операции относительно плоскости рисования. Варианты глубины распространения операции и их условные обозначения представлены в табл. 3.2, примеры показаны на рис. 3.38 и 3.39 соответственно.

Таблица 3.2

Варианты глубины распространения операции при добавлении или удалении материала путем выдавливания

	– в <i>одном</i> направлении от плоскости эскиза на заданную глубину
	– в обе стороны от плоскости эскиза на половину заданной глубины
	– до следующей поверхности
	– до пересечения со всеми поверхностями
	– до выбранной поверхности

	– до выбранной точки, кривой, поверхности или плоскости
При добавлении (Вращать) или удалении (Вырез) материала путем вращения:	
	– в одном направлении от плоскости эскиза на заданный угол
	– в обе стороны от плоскости эскиза на половину указанного угла в каждом направлении
	– до выбранной точки, плоскости или поверхности

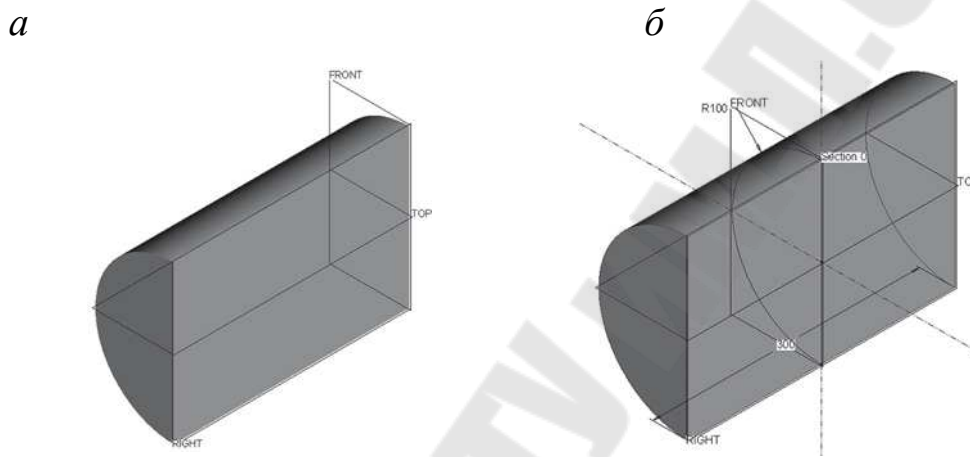


Рис. 3.38. Вытягивание на заданную величину в одном (а) и в двух (б) направлениях от плоскости построения эскиза – плоскости FRONT

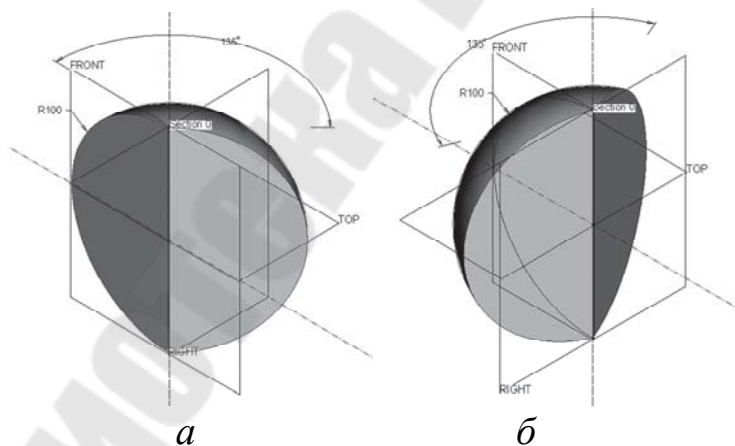


Рис. 3.38. Вращение на заданный угол в одном (а) и в двух (б) направлениях от плоскости построения эскиза – плоскости FRONT

Часто необходимость в тех или иных атрибутах определяется другими, уже назначенными атрибутами.

Параметры **Заккрыть торцы**, **Объединить концы** назначаются только для *открытых траекторий* в операциях **Протянуть**. Различия в этих атрибутах наглядно представлены на рис. 3.40.

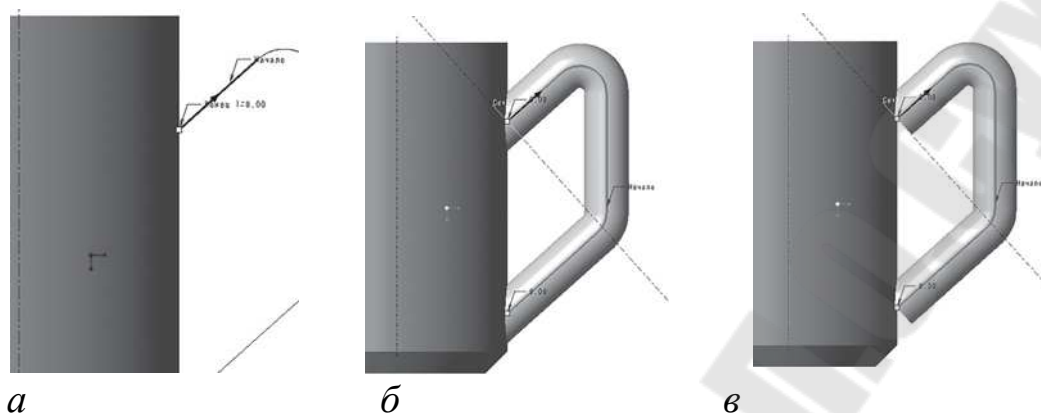


Рис. 3.40. Эскиз траектории (а) и различия атрибутов Объединить концы (Вкл) (б) и Объединить концы (Выкл) (в) операции Протянуть

Особенности работы с эскизом в режиме Деталь

При создании рисованных операций система автоматически переключается на режим *Эскиз*. При этом предоставляется доступ ко всем функциональным возможностям режима *Эскиз*. В то же время работа с эскизами в режиме *Деталь* имеет ряд существенных отличий:

- Обязательно назначение плоскости (грани) для рисования эскиза (**Плоскости эскиза**). На рис. 3.41, б показано, как следует выбрать плоскость эскиза на модели и ее отражение в окне *Эскиз*. Стрелка вблизи плоскости эскиза показывает направление взгляда на эскиз (рис. 3.41, б). Изменить направление взгляда на противоположный можно, щелкнув по кнопке **Развернуть** в окне *Эскиз*.

- Обязательно назначение **ссылочной плоскости** (грани), перпендикулярной к плоскости рисования. Это необходимо, так как после того, как эскизная плоскость будет установлена параллельно экрану, у модели останется еще одна степень свободы – вращение вокруг оси, перпендикулярной плоскости эскизирования. На рис. 3.41, в показано, как производится выбор ссылочной плоскости и ориентация ссылочной плоскости.

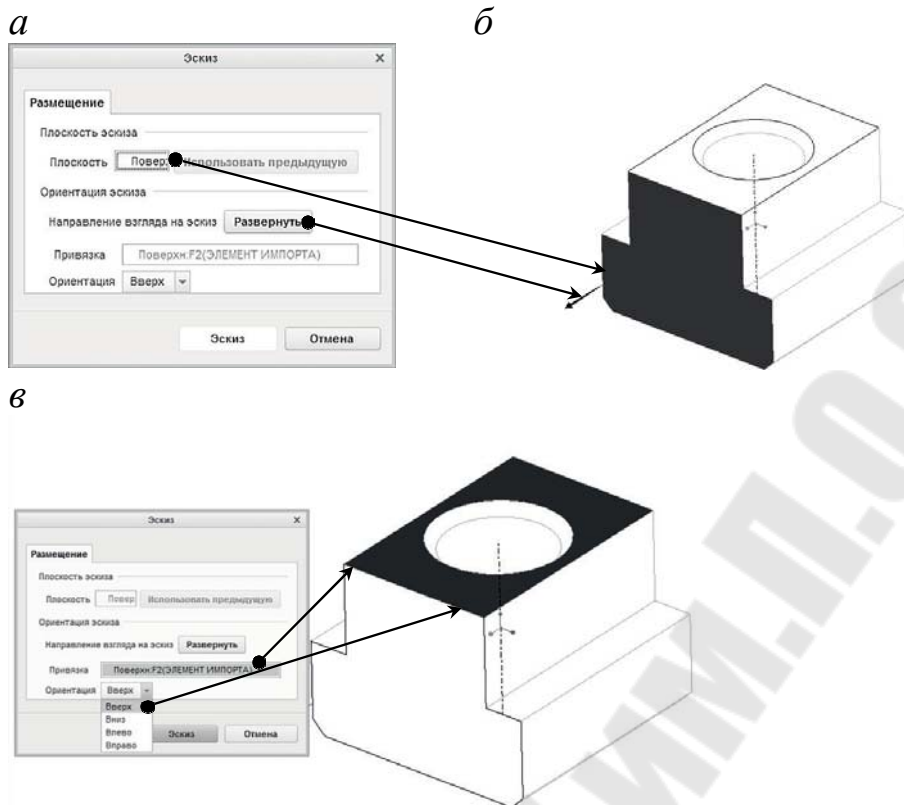


Рис. 3.41. Назначение эскизной плоскости в диалоговом окне *Эскиз* (а) и на модели (б); назначение ссылочной плоскости (в)

На рис. 3.42 показан пример назначения привязок. В качестве привязок на этом рисунке выбраны верхняя грань детали (она же является ссылочной плоскостью); опорная ось (совпадает с осью отверстия детали); боковые грани верхней части детали (в количестве двух штук) и грань, проходящая по середине детали параллельно ссылочной плоскости. Все элементы, выбранные в качестве привязок, обозначаются в среде эскиза пунктирными линиями.

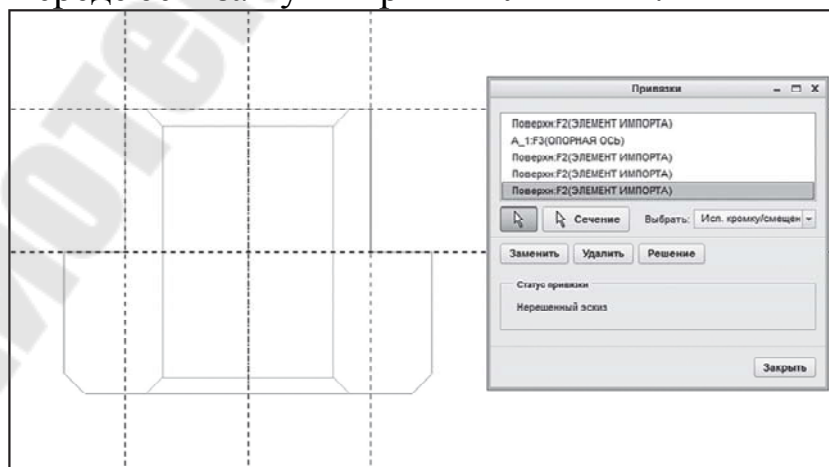







Рис. 3.42. Назначение привязок для указания размеров эскиза

В качестве геометрических элементов эскиза можно использовать элементы ранее созданных операций (ребра, кривые). Для этого необходимо:

- либо скопировать их геометрию командой  **Проецировать** (создает объекты, проецируя кривые или кромки на плоскость эскиза);
- либо скопировать геометрию с отступом командой  **Смещение** (создает объект путем смещения кромки или эскизного объекта).

Кнопки команд  **Проецировать** и  **Смещение** находятся в панели *Создание эскиза* вкладки *Эскиз*.

В процессе создания эскиза можно менять угол зрения на эскиз в пространстве при помощи мыши. Для возвращения эскиза в 2D-ориентацию используется команда **Ориентировать плоскость эскиза параллельно экрану** (**Эскиз > Подготовка > Вид эскиза**) или  пиктограмма

Вид эскиза в графической панели. Пример операции представлен на рис. 3.43.

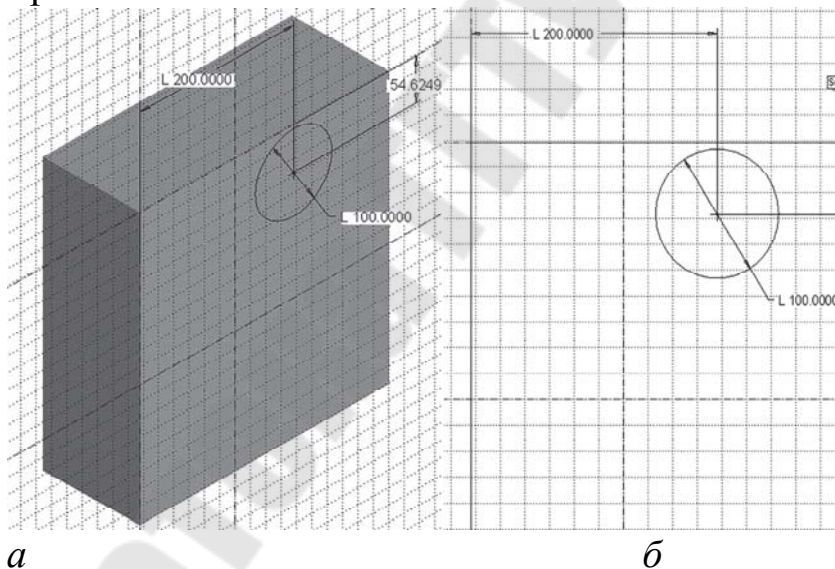



Рис. 3.43. Изменение точки зрения на эскиз с помощью мыши (*а*) и возврат в 2D-ориентацию (*б*)

Для ряда операций необходимо назначать стартовую точку – выбрать указателем  вершину (**Эскиз > Инструменты > Начальная точка** или при помощи мыши выбрать в контекстном меню **Начальная точка**). В частности, к таким операциям относится операция

прорисовки траектории для последующего создания модели методом *Протягивания*, как показано на рис. 3.44.

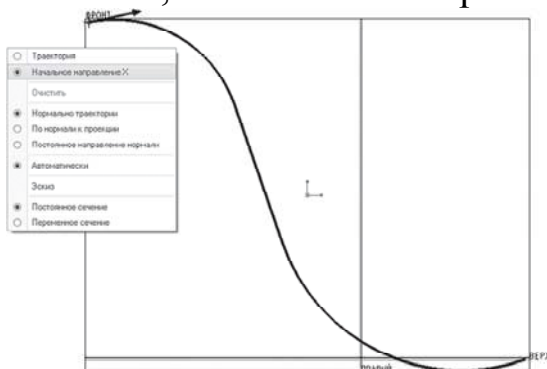



Рис. 3.44. Назначение стартовой точки

Для перехода от одного сечения к другому при создании параллельного сопряжения путем рисования сечений (операция *Сопряжение*) ( **Сопряжение**) необходимо открыть вкладку *Сечения* и щелкнуть **Вставить**. Далее следует задать величину смещения второго сечения от первого и щелкнуть **Эскиз** для рисования эскиза второго сечения (рис. 3.45).

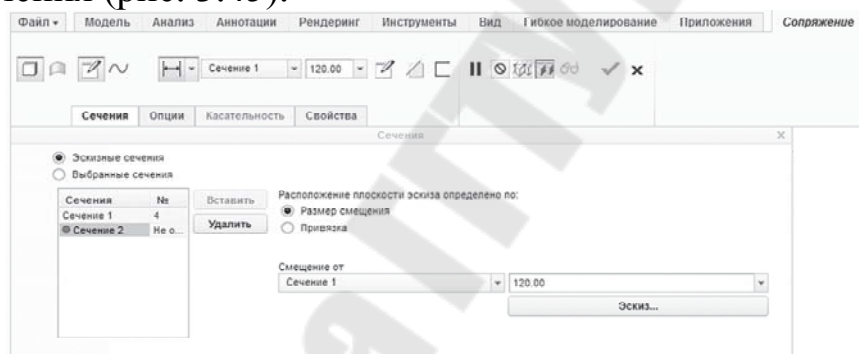


Рис. 3.45. Создание второго сечения в операции *Сопряжение*

При создании сопряжения параллельных сечений количество вершин в эскизах должно оставаться неизменным. Однако иногда необходимо выполнить сопряжение двух эскизов с разным количеством вершин (например, выполнить сопряжение прямоугольника (четыре вершины) и треугольник, имеющий три вершины). В этом случае одно из ребер сводится в точку, а в эскизе треугольника необходимо добавить вершину. Для добавления объекта-местозаменителя вершины следует выделить вершину треугольника, в которую должно спроецироваться ребро, а затем щелкнуть команду **Эскиз > Подготовка > Инструменты констр. элемента > Вершина сопряжения**, как показано на рис. 3.46.

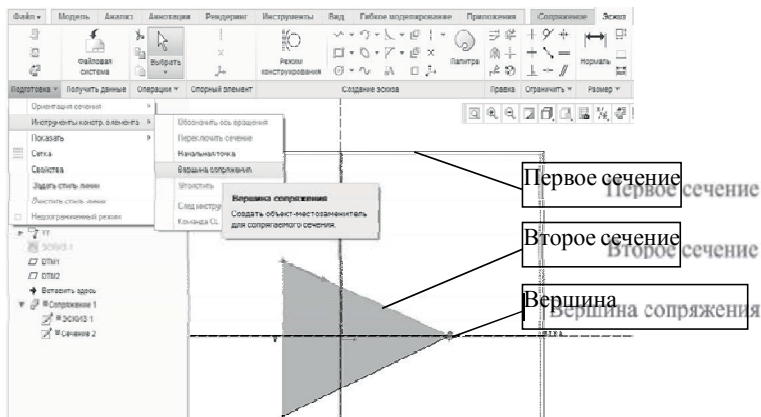


Рис. 3.46. Добавление вершины сопряжения

На рис. 3.47 продемонстрирован процесс проецирования ребра в вершину сопряжения.

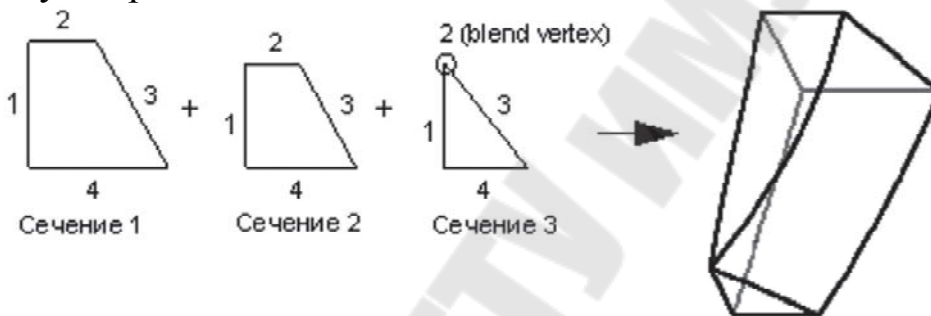






Рис. 3.47. Проецирование ребра в вершину сопряжения




Тема 3.4. Операции копирования твердых элементов



Импортирование геометрии поверхности

Для удобства передачи геометрии в другую модель создается элемент **Общая геометрия** с помощью одноименной команды в меню **Инструменты** или в меню **Модель** > в выпадающем списке **Замысел модели**. В окне **Общая геометрия** выбирается список **Наборы поверхностей**. В графическом окне на любой из поверхностей модели производится долгое нажатие правой кнопкой мыши - появится контекстное меню, в котором выбирают команду **Выбрать из списка**. В появившемся окне выбирают, например, **АдаптПоверхн: F5** (адаптивная поверхность с номером 5 по списку дерева модели). Нажмем **ОК** и на вкладке **Свойства** окна **Общая геометрия** вводится наименование элемента модели. Нажимаем **ОК**. Таким образом создан элемент общей геометрии, который содержит все поверхности

модели. Подобных элементов **Общая геометрия** можно создавать несколько, для передачи их в разные модели.


Далее необходимо создать новую твердотельную деталь с именем, например Деталь1. Вставляем в нее новоиспеченную общую геометрию с помощью команды меню **Модель > Копия геометрия** . В опциях команды по умолчанию включена кнопка **Только общая геометрия** , что нам и требуется. Раскрываем вкладку **Привязки** и в группе **Ссылочная модель** нажимаем кнопку **Указать модель**  и выбираем модель деталь.prt (выбрать можно в Сессии, чтобы долго не искать на диске). Creo Parametric предложит указать размещение новой геометрии в появившемся диалоговом окне: выберем **По умолчанию** и нажмем **ОК**. Теперь в группе **Общая геометрия** нажмем на поле с красной точкой и в появившемся окне выберем подсвечивающуюся геометрию детали Закончим с переносом общей геометрии .


Включаем фильтр **Геометрия** и выбираем в графическом окне правую половину элемента детали. В меню **Модель** выбираем команду **Копировать**  (CTRL+C), затем сразу команду **Вставить**  (CTRL+V), и **Применить** . Таким образом получаем копию половинки элемента детали, для того, чтобы не работать со скопированной общей геометрией (общая геометрия нужна как образец)

Теперь скрываем общую геометрию: перейдем в дерево слоев (команда **Показать**  в дереве) и выберем слой **External**. В контекстном меню выберем команду **Скрыть**. Слой External появился автоматически при вставке общей геометрии из модели Деталь. Т.к. общая геометрия является внешней по отношению в модели Деталь1, то сработало правило из файла конфигурации EXTERNAL (т.е. внешняя геометрия должна автоматически заноситься в слой External). Еще раз вызываем контекстное меню в дереве слоев и выбираем команду **Сохранить статус**, для сохранения состояния скрытия слоя External. Перейдем обратно в дерево модели (команда **Показать**  в дереве).


Простое удаление поверхностей



Посмотрим на оставшуюся половинку элемента детали и удалим часть ее поверхности. Опять выберем фильтр **Геометрия** и нажимая правой кнопкой мыши выберем в графическом окне одну из внутрен-


них поверхностей элемента. В меню **Модель** в выпадающем списке **Правка** выполним команду **Удалить** .


В опциях команды **Удалить** на вкладке **Привязка** нажмем **Подробно**. С помощью клавиши CTRL, выбираем все поверхности (даже самые мелкие), показанные красным цветом. В окне **Наборы поверхностей** можно увидеть, как в списке появились новые поверхности, выбранные нами. Нажмем **ОК** для подтверждения выбора в окне **Наборы поверхностей**. В опциях команды **Удалить** поставим галочку **Оставить открытым** и применим команду .



Построение кривой для отсечения поверхности по этой кривой

Будем строить две кривые и отрезать по ним части поверхности детали. Для построения кривой необходимо как минимум 2 точки. Запустим инструмент **Точка**  в меню **Модель**. Появится окно **Опорная точка**, в котором Creo Parametric ожидает указания построения новой точки. Выберем место на верхней кромке детали для точки PNT0. В окне **Опорная точка** появится относительное расстояние до этой точки, на что указывает выпадающее меню в графе **Смещение** (выбрано значение **Отношение**). Зададим значение 0,05 передвигая указатель точки в графическом окне или введя значение в графе **Смещение** окна **Опорная точка**. Значение 0,05 означает смещение на 5% относительно подсвеченного конца кромки. Т.к. у кромки всегда 2 конца, то можно переключать подсвеченный конец кромки с помощью кнопки **Следующий конец**.

Отлично, первая точка поставлена (для первой кривой), теперь сразу сделаем еще одну точку (для второй кривой). Выберем **Новая точка** в окне **Опорная точка** и укажем размещение точки PNT1 на нижней кромке элемента детали. Введем значение относительного смещения 0,5. Можно нажимать **ОК** для завершения построения точек. Включим отображение точек в графическом окне командами меню **Вид > Показ точек**  и **Вид > Показ тегов точек**  (для отображения имен точек).


Теперь построим верхнюю кривую. Перед этим снимем выделение геометрии (щелчок по фону). В меню **Модель** выберем **Опорный элемент > Кривая > Кривая по точкам** . В графическом окне выберем точку PNT0 и указанную точку. Затем в опциях перейдем на вкладку **Размещение**, поставим галочку **Разместить кривую на поверхности** и выберем в графическом окне поверхность элемента детали.

В опциях построения кривой перейдем на вкладку **Прекращает условие** и выберем в списке **Конечная точка** для задания условий стыковки кривой со смежной геометрией в конечной точке. В выпадающем списке **Конечное условие** укажем **Касательная** и в графическом окне выберем кромку, подсвечивающуюся красным цветом. Судя по крутому изгибу нашей кривой в месте стыковки с выбранной кромкой направление касательности требуется изменить. Для этого нажмем кнопку **Развернуть** на вкладке **Прекращает условие**. При этом можно заметить, как изменилась стыковка геометрии в конечной точке. Первая кривая построена, нажмем  и попробуем обрезать с помощью нее ненужную геометрию.

Опять снимаем выделение в графическом окне и выберем поверхность всей детали - активируется доступ к инструментам работы с поверхностями. Выберем команду **Отсечь**  и затем в графическом окне выберем построенную нами кривую (в опциях команды при этом появится название этой кривой). Обращаем внимание на стрелку в графическом окне: она показывает на ту геометрию, которая останется после обрезки. В нашем случае направление верное, поэтому нажмем .

Снимаем выделение и аналогичным образом построим вторую кривую через точку PNT1 и указанную вершину. При выборе кромки для условий касательности второй кривой нужно не забыть развернуть направление касательности, т.к. при приближении к точке стыковки второй кривой и выбранной кромки видно, как незаметно обозначен крутой изгиб в графической области. Не забудем расположить новую кривую на поверхности.


Сопряжение двух поверхностей по границам



Выбираем поверхность всей детали и производим очередное отсечение поверхности по второй кривой. Убеждаемся, что после всего этого форма элемента детали стала ровной, без резких изломов. Таким образом, произошла подготовка геометрии к сопряжению. В меню **Модель** вызываем инструмент **Сопряжение границ** .

В опциях раскроем вкладку **Кривые** и выбираем в графическом окне первую (верхнюю) кривую, построенную нами. Нажимаем кнопку **Подробно** и при нажатой клавише CTRL, дополним эту кривую продолжающейся кромкой - до основания элемента детали.

В списке **Первое направление** появится вторая цепь граничных кривых. Выберем ее в списке и нажмем кнопку **Подробно**. Появится

окно **Цепь** и при нажатой клавише CTRL, дополним вторую кривую продолжающейся кромкой - до основания элемента детали. В окне **Цепь** можно также увидеть и предыдущую сделанную цепь и отредактировать ее, но нам это не требуется. Нажмем **ОК** для закрытия окна **Цепь**.

Теперь можно увидеть предварительный просмотр результата сопряжения выбранных границ (цепей). Трещин нигде не видно, поэтому нажмем . Теперь нужно объединить (сделать одним целым) поверхность построенного сопряжения и поверхность детали.

Выберем при нажатой клавише CTRL, поверхность построенного сопряжения и поверхность детали. В меню **Модель** выберем команду **Объединить** . Как видно, в текущем случае никакие опции, связанные с направлением действия команды нам недоступны, поэтому смело нажимаем . Поверхность детали становится монолитной.

Раздел 4. Моделирование кривых линий и поверхностей

Тема 4.1. Моделирование кривых

Все не прямые и не ломаные линии называются кривыми. Кривые линии разделяются на два вида:

-плоские кривые, т.е. такие, все точки которых располагаются в одной плоскости;

-пространственные кривые (линии двойкой кривизны), т. е. такие, точки которых не принадлежат одной плоскости.

Если закон перемещения точки может быть выражен аналитически в виде уравнения, то образующая при этом линия называется закономерной, в противном случае - не закономерной, или графической. Закономерные кривые линии делятся на алгебраические, определяемые алгебраическими уравнениями (эллипс, парабола, гипербола и др.), и трансцендентные, определяемые трансцендентными уравнениями (синусоида, циклоида, спираль Архимеда и др.). Важной характеристикой алгебраической кривой является ее порядок (трансцендентные кривые порядка не имеют). С алгебраической точки зрения порядок кривой линии равен степени ее уравнения, с геометрической - наибольшему числу точек пересечения кривой с прямой линией для плоских кривых и с произвольной плоскостью для пространственных. В число точек пересечения включаются как действительные точки, так и совпавшие, и мнимые. Например, прямую линию, имеющую уравнение первой степени $ax+by+c=0$ (с произвольной прямой пересекается в одной точке), можно рассматривать как линию первого порядка, эллипс - кривая второго порядка, имеет уравнение $x^2/a^2+y^2/b^2=1$ второй степени, пересекается с прямой максимум в двух точках. Кривыми второго порядка являются также окружность, парабола, гипербола. Примерами кривых третьего порядка могут служить строфоида, Декартов лист, циссоида; четвертого - лемниската Бернулли, кардиоида, улитка Паскаля.

Прямая, пересекающая кривую линию в одной, двух и более точках, называется секущей (прямая **m**) (рисунок 4.1). Касательной прямой **t** в данной точке **A** линии **I** называется предел, к которому стремится секущая (AB), когда точка **B**, оставаясь на линии **I**, стремится к точке **A**. Касательная к прямой линии согласно этому определению есть сама прямая. Нормалью к кривой **I** называется прямая **n**, перпендикулярная к **I** и проходящая через точку касания **A**.

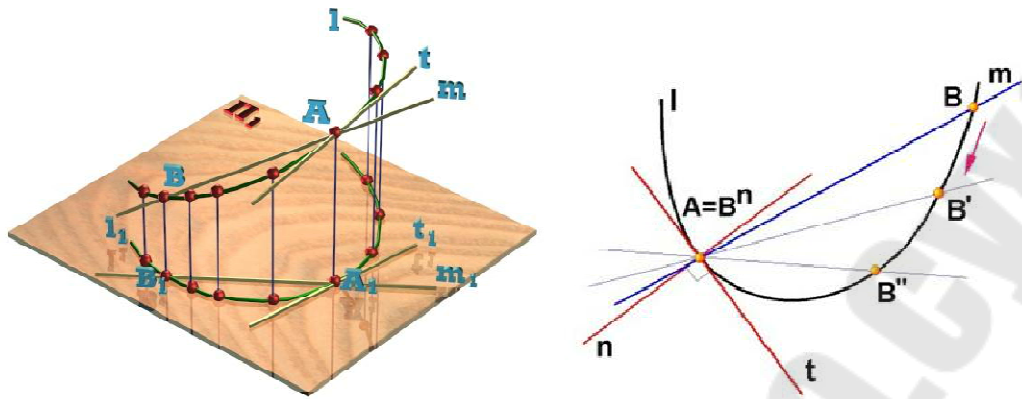


Рис. 4.1. Кривая линия

Кривая второго порядка имеет уравнение второй степени в декартовой системе координат. С прямой линией пересекается в двух точках (действительных, совпавших или мнимых).

Эллипс - геометрическое место точек, сумма расстояний которых до двух заданных точек (фокусов) - величина постоянная, равная $2|a|$ (длине большой оси эллипса). Эллипс не имеет несобственных точек.

Парабола - геометрическое место точек, равноудаленных от данной точки F (фокуса) и данной прямой d (директрисы). Парабола имеет одну несобственную точку.

Гипербола - геометрическое место точек, разность расстояний которых до двух заданных точек (фокусов) - величина постоянная, равная $2|a|$ (расстоянию между вершинами гиперболы). Гипербола имеет две несобственные точки, по одной на каждой асимптоте.

Кривые второго порядка - эллипс, окружность, парабола и гипербола - могут быть получены при пересечении конуса плоскостью и поэтому называются **коническими сечениями**.

Из закономерных пространственных кривых наибольшее практическое применение находят винтовые линии, в частности, цилиндрическая винтовая линия (рис. 4.2).

Цилиндрическая винтовая линия представляет собой пространственную кривую, описываемую точкой, совершающей равномерно-поступательное движение по образующей цилиндра вращения, которая в свою очередь вращается вокруг оси цилиндра с постоянной угловой скоростью. Величина P , на которую поднимается точка за один оборот образующей, называется шагом винтовой линии. Горизонтальная проекция винтовой линии является окружностью, а фронтальная - синусоидой. На развертке цилиндрической поверхности

винтовая линия изобразится в виде прямой. Угол подъема винтовой линии равен углу наклона касательной t в любой точке винтовой линии к плоскости, перпендикулярной ее оси.

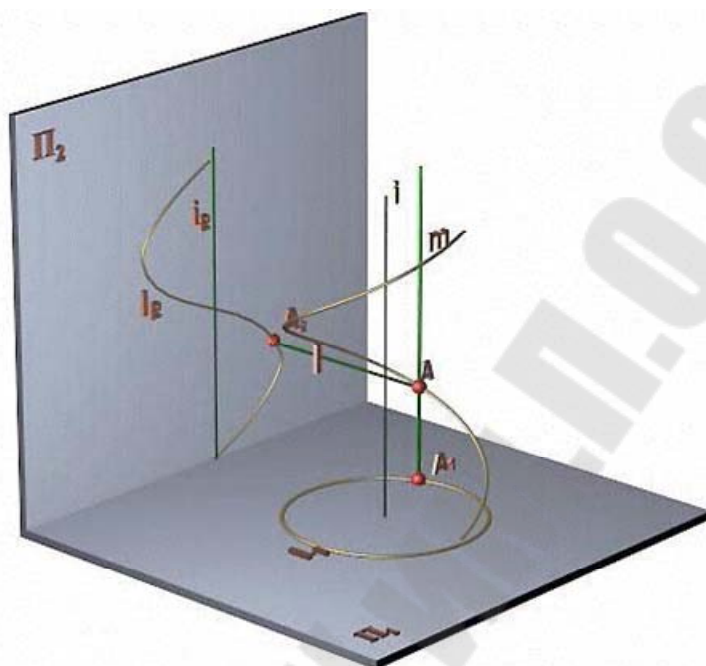


Рис. 4.2. Винтовая линия

Цилиндрическая винтовая линия, подобно прямой и окружности, обладает свойством сдвигаемости. Свойство сдвигаемости состоит в том, что каждый отрезок линии может сдвигаться вдоль нее, не подвергаясь деформации. Это свойство винтовой линии лежит в основе работы винтовых пар (винт-гайка). Винтовая линия является геодезической на цилиндрической поверхности. *Геодезической* называется линия, принадлежащая поверхности и кратчайшая из всех линий, которые можно провести между двумя точками поверхности. Кроме цилиндрической винтовой линии, геодезическими линиями также являются прямая на плоскости, окружность большого круга на сфере и др. Геодезическая линия изображается на развертке поверхности в виде прямой линии.

В большинстве случаев с помощью тел и поверхностей, называемых аналитическими, нельзя описать реальные геометрические объекты. На протяжении долгого времени выход из этого положения заключался в представлении объекта с помощью произвольно проведенных линий, взаимное сопряжение которых осуществлялось специалистами очень высокой квалификации: модельщиками, литейщиками, изготовителями штампов. Решение этой задачи вразных

областях техники характеризовалось общим свойством - отсутствием какого бы то ни было предварительного математического определения, даже частичного, в результате чего решение задачи начиналось с выполнения последовательных шагов аппроксимации и заканчивалось вручную. Каждый шаг подгонки основывался на результатах экспериментов или просто на указаниях дизайнера. Из-за недостатка информации такие зависимости часто назывались экспериментальными.

В инженерной геометрии существует большое количество отработанных графических способов построения плавных кривых - обводов. Они традиционно применялись при проектировании таких объектов, как корпус корабля, кузов автомобиля, фюзеляж и крыло самолета и многих других (рисунок 4.3).

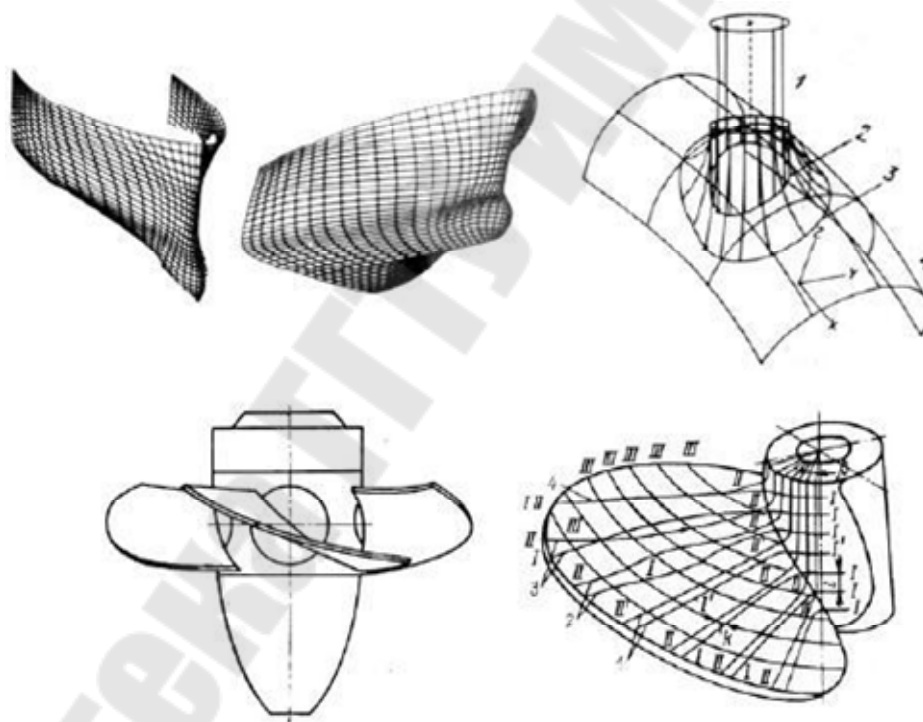


Рис. 4.3 - Примеры кривых поверхностей в технике

В результате форма тела задается при помощи набора очень точно изготовленных сечений - плазов. Кроме перечисленных примеров сложную форму поверхности имеют лопасти гидравлических и паровых турбин, гребные винты, лопатки авиационных двигателей, крыльчатки и др., т. е. объекты, функциональные требования к которым связаны с омыванием какой-либо средой.

Тема 4.2. Моделирование, анализ и области применения поверхностей

Кроме функциональных требований к изделиям предъявляются и эстетические. В этом случае также решаются задачи проектирования кривых линий и поверхностей произвольной формы.

Появление ЭВМ позволило перейти от «ручных» графических способов моделирования к более эффективному способу задания кривых и поверхностей. Процесс проектирования происходит следующим образом: задают координаты сравнительно небольшого числа опорных точек (например, расчетных или полученных в результате эксперимента), лежащих на искомой линии или поверхности, и через эти точки проводят плавные кривые линии. Такое конструирование носит итерационный характер.

Модель (аналитическое описание), полученную на некотором шаге итерации, модифицируют и улучшают до тех пор, пока не будет достигнута желаемая форма кривой или поверхности. Проблема состоит в математически точном воспроизведении формы изделия, исходя из координат точек, расположенных на его поверхности.

При моделировании кривых линий и поверхностей, их машинного представления возникают задачи аппроксимации, интерполяции и сглаживания исходных данных (рис. 4.4).

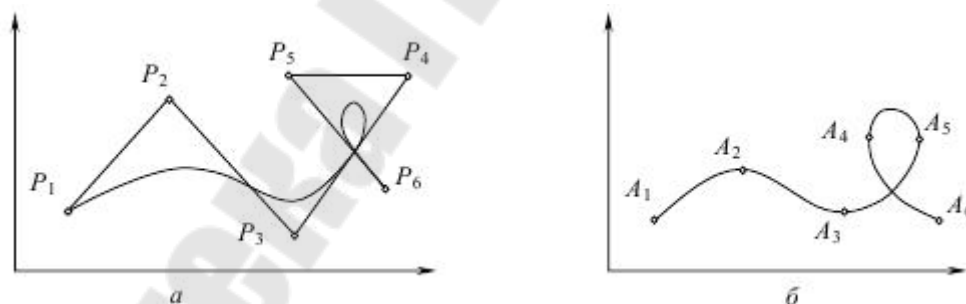


Рис. 4.4. Аппроксимация (а) и интерполяция (б) кривых

Задачи аппроксимации (приближенного представления) возникают при замене кривой или поверхности, описываемых сложными функциями, другими функциями, описываемыми более простыми уравнениями, без потери необходимой точности.

Задачи интерполяции (приближенного восстановления) связаны с поиском гладких кривых или поверхностей, проходящих через множество заданных точек.

Задачи сглаживания возникают, когда необходимо, чтобы искомая кривая или поверхность описывались функцией, обеспечивающей, например, необходимую степень дифференцирования.

Таким образом, при моделировании кривых линий и поверхностей решается следующая задача: по заданному массиву точек на плоскости или в пространстве строится кривая, проходящая через все эти точки (задача интерполяции) либо проходящая вблизи от этих точек (задача сглаживания).

Обратимся для определенности к задаче интерполяции и начнем рассмотрение с обсуждения правил выбора класса кривых.

Полином Лагранжа

Пусть на плоскости задан набор точек (x_i, y_i) , $i = 0, 1, \dots, n$, таких, что $x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n$ (рис. 4.5).

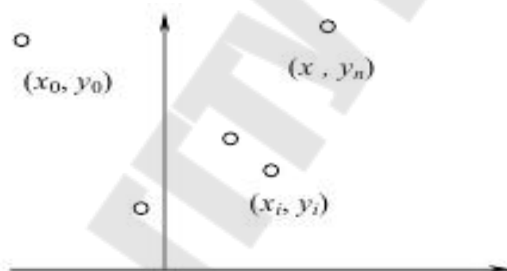


Рис. 4.5 Набор точек

То обстоятельство, что точки заданного набора пронумерованы в порядке возрастания их абсцисс, позволяет искать кривую в классе графиков функций. Можно описать основные проблемы сглаживания этого дискретного набора, ограничившись случаем многочлена.

Из курса математического анализа известно, что существует интерполяционный многочлен Лагранжа

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n y_i \frac{\omega_n(x)}{(x - x_i)\omega_n'(x_i)}$$

где $\omega_n(x) = \prod_{j=0}^n (x - x_j)$ график которого проходит через все заданные точки (x_i, y_i) , $i = 0, 1, \dots, n$.

Это обстоятельство и простота описания (заметим, что многочлен однозначно определяется набором своих коэффициентов; в данном случае их число совпадает с количеством точек в заданном наборе) являются несомненными преимуществами построенного интерполяционного многочлена.

Однако данный подход имеет и некоторые недостатки.

1. Степень многочлена Лагранжа на единицу меньше числа заданных точек. Поэтому чем больше точек задано, тем выше степень такого многочлена. И, хотя график интерполяционного многочлена Лагранжа всегда будет проходить через все точки массива, его уклонение (от ожидаемого) может оказаться довольно значительным (рис. 4.6).

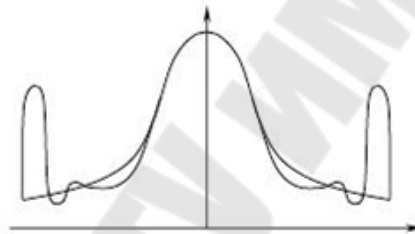


Рис. 4.6. Интерполяция полиномом Лагранжа

Кроме этого повышение степени многочлена приводит к нежелательным осцилляциям.

2. Изменение одной точки (ситуация, довольно часто встречающаяся на практике) требует полного пересчета коэффициентов интерполяционного многочлена и к тому же может существенно повлиять на вид задаваемой кривой.

Приближающую кривую можно построить и совсем просто: если последовательно соединить точки заданного набора прямолинейными отрезками, то в результате получится ломаная (рис. 4.7).

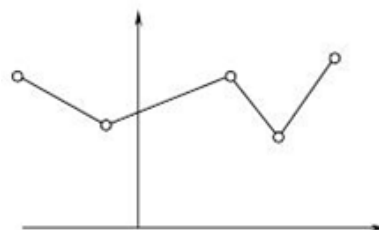


Рис. 4.7. Кусочно-линейная интерполяция

При такой кусочно-линейной интерполяции требуется найти всего $2n$ чисел (каждый прямолинейный отрезок определяется ровно двумя коэффициентами), но построенная таким образом аппроксимирующая кусочно-линейная функция не обладает нужной гладкостью: уже первая производная этой функции терпит разрывы в узлах интерполяции.

Рассмотрев эти две крайние ситуации, найдем класс функций, которые в основном сохранили бы перечисленные выше преимущества обоих подходов и одновременно были бы в известной степени свободны от их недостатков.

Для этого поступим так: будем использовать многочлены (как и в первом случае) и строить их последовательно, звено за звеном (как во втором случае). В результате получится, так называемый, полиномиальный многозвенник. При подобном подходе важно правильно выбрать степени привлекаемых многочленов, а для плавного изменения результирующей кривой необходимо еще тщательно подобрать коэффициенты многочленов (из условий гладкого сопряжения соседних звеньев). То, что получится в результате описанной схемы построения, называют сплайн-функциями или сплайнами.

Форма математического сплайна повторяет контур физического сплайна - гибкой металлической линейки, которыми издревле пользовались чертежники и слесари-лекальщики (рис. 4.8).

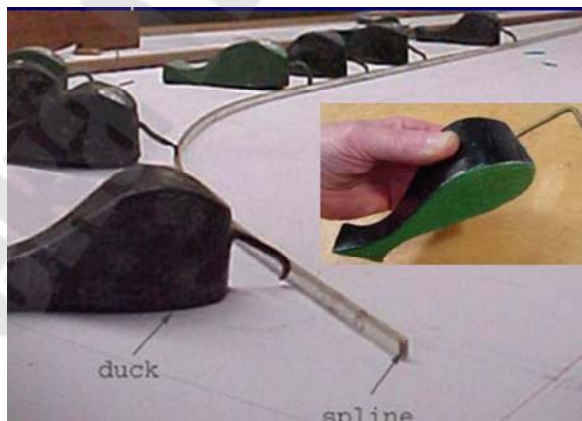


Рис. 4.8. Физический сплайн

Для изменения формы линейки используются точечные крепления и концевые заделки. Меняя количество и расположение этих произвольно расположенных базовых точек, кривую можно выгнуть произвольным образом. Кривая всегда остается гладкой (не имеет разрывов и переломов) (рис. 4.9).

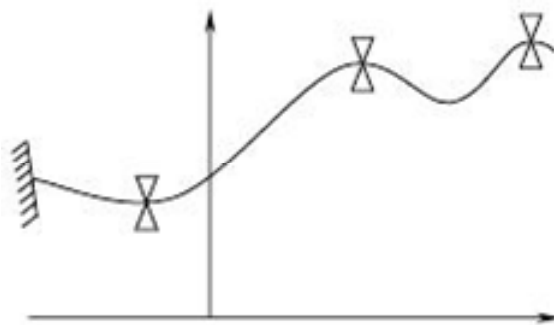


Рис. 4.9. Сплайн

Задачи аппроксимации и интерполяции (интерполяция является частным случаем аппроксимации) при конструировании кривых линий и поверхностей могут быть решены с использованием различных вычислительных методов. При этом сегменты пространственных кривых аппроксимируются отрезками, дугами окружности, парабололами и кривыми более высоких порядков.

Методы конструирования кривых линий и поверхностей: метод Эрмита, метод Безье, метод аппроксимации с помощью кубических В-сплайнов, метод Кунса и др. используют одинаковый подход: разбиение пространственной кривой на отдельные сегменты - элементарные куски. Описание этих сегментов полигонами третьей степени, определенные условия соединения элементарных кусков в составные кривые. Такие кривые в литературе обобщенно называют *сплайновыми кривыми*.

Сравнение форм Эрмита, Безье и В-сплайнов

Каждое из этих представлений оказывается полезным в разных ситуациях. Форма Эрмита пригодна для аппроксимации уже имеющихся поверхностей, когда необходимо добиться как соответствия точек, так и соответствия касательных векторов, в то время как представление в виде В-сплайнов удобно для аппроксимации точек.

Формы Безье и В-сплайнов пригодны для работы в интерактивном режиме, так как их геометрические векторы состоят из одних только точек. Обе эти формы обладают свойством выпуклой оболочки, которое оказывается полезным при изображении кривых. Отметим, что кривую, первоначально заданную в одной форме, можно преобразовать в другую форму.

На рис. 4.10 и 4.11 показано различие в поведении кривых, построенных разными методами на основе одного и того же точечного базиса.

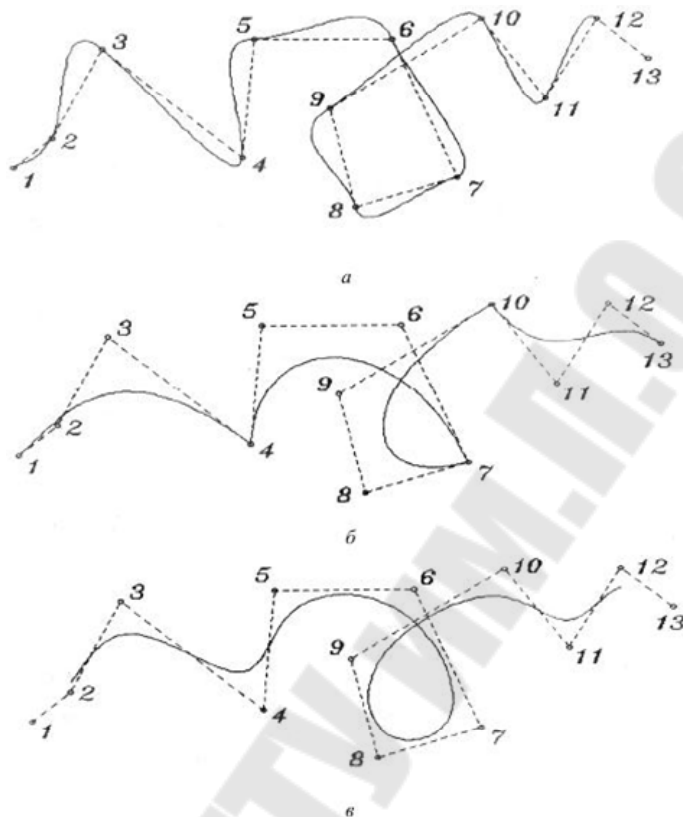


Рис. 4.10. Три формы построения кривых: а – форма Эрмита; б – форма Безье; в – форма В-сплайна

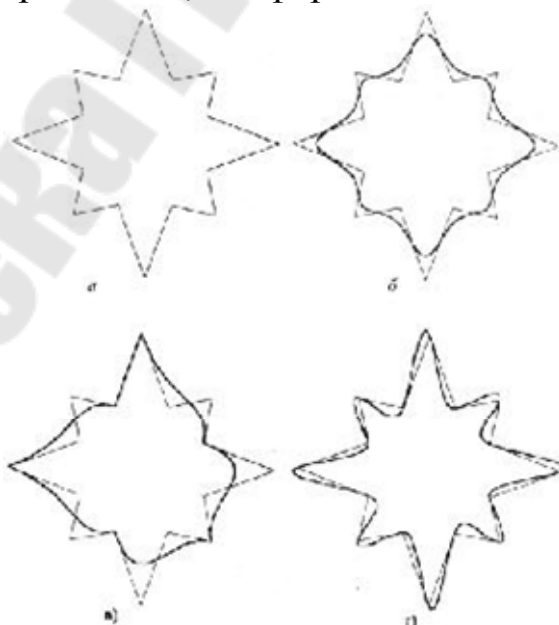


Рис. 4.11. Сглаживание фигуры: а – исходная фигура; б – форма В-сплайна; в – форма Безье; г – форма Эрмита

Одними из самых популярных сплайнов, применяемых в компьютерном моделировании, являются "кривые Безье" и NURBS-кривые (Non-Uniform Rational B-Spline - неоднородный рациональный фундаментальный сплайн). Эти сплайны обладают высокой степенью гладкости, легко вычисляются и управляются.

Кривая (сплайн) Безье задается вершинами многоугольника и в общем случае не проходит через базовые точки (рис. 4.12).

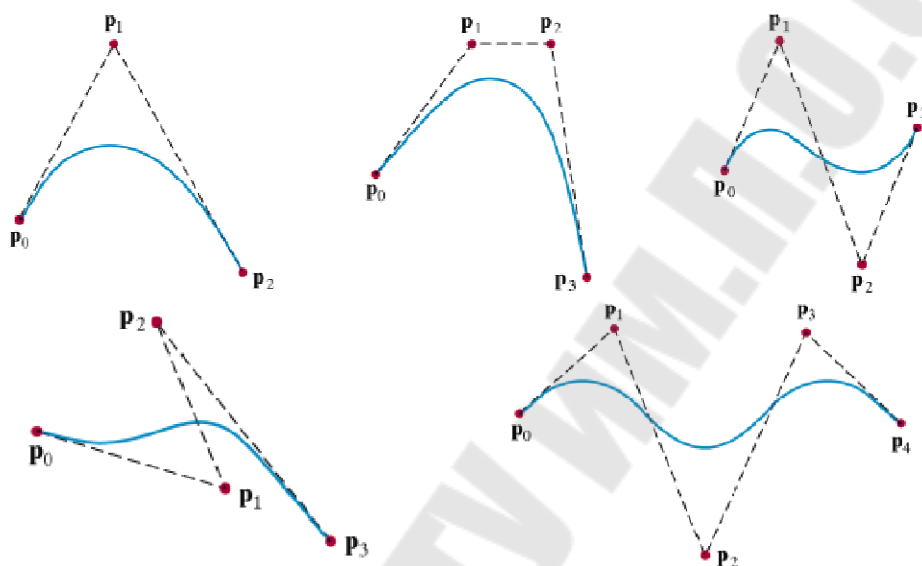


Рис. 4.12. Сплайны Безье

Для получения кривой, проходящей через заданные точки применяются составные кривые Безье, которые также можно использовать для задач интерполяции.

Неоднородный рациональный B-сплайн или NURBS подобен обычному кубическому B-сплайну.

NURBS-кривые не проходят через базовые точки, а усредняют - аппроксимируют их, причем узловые точки могут быть расставлены неравномерно. Такие линии называются неоднородными, а каждый такой узел, имеющий свой вес (коэффициент, определяющий влияние данной точки на кривизну линии), - рациональным. Перемещая узловые точки, можно управлять формой кривой (рис. 4.13).

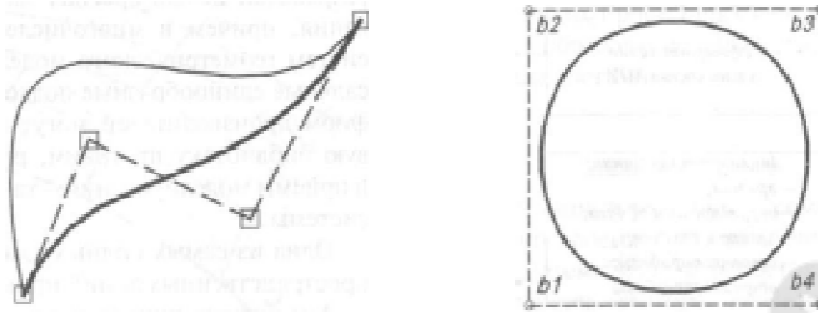


Рис. 4.13. Интерактивное управление формой гладких NURBS-кривых

NURBS позволяет точно воспроизвести все конические сечения - окружность (см. рис. 4.13 справа), эллипс, параболу и гиперболу. В NURBS - представлении можно работать не только с коническими сечениями, но с кривыми Безье, рациональными кривыми Безье и В-сплайнами. Преобразование всех этих кривых к NURBS может значительно сократить объем программирования.

Поверхности Безье используются при интерактивном проектировании по тем же причинам, что и кривые Безье: управляющие точки позволяют легко изменять форму куска поверхности. Поверхности Безье так же, как и кривые Безье, обладают свойством выпуклой оболочки. Геометрическая матрица состоит из 16 управляющих точек (рис. 4.14).

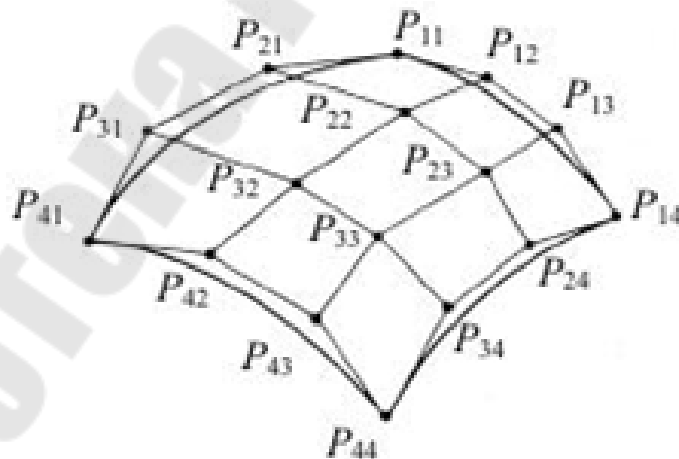


Рис. 4.14. Шестнадцать управляющих точек бикубического куска Безье

Для достижения непрерывности в поперечном направлении относительно ребер кусков необходимо равенство четырех управляю-

щих точек, принадлежащих общим ребрам соседних кусков. Для непрерывности касательного вектора требуется, чтобы две четверки управляющих точек по обеим сторонам общего ребра были коллинеарны другим ребрам. Коллинеарными будут следующие совокупности управляющих точек: (P_{13}, P_{14}, P_{15}) , (P_{23}, P_{24}, P_{25}) , (P_{33}, P_{34}, P_{35}) , (P_{43}, P_{44}, P_{45}) . Отношения длин коллинеарных отрезков должны быть постоянными (рис. 4.15).

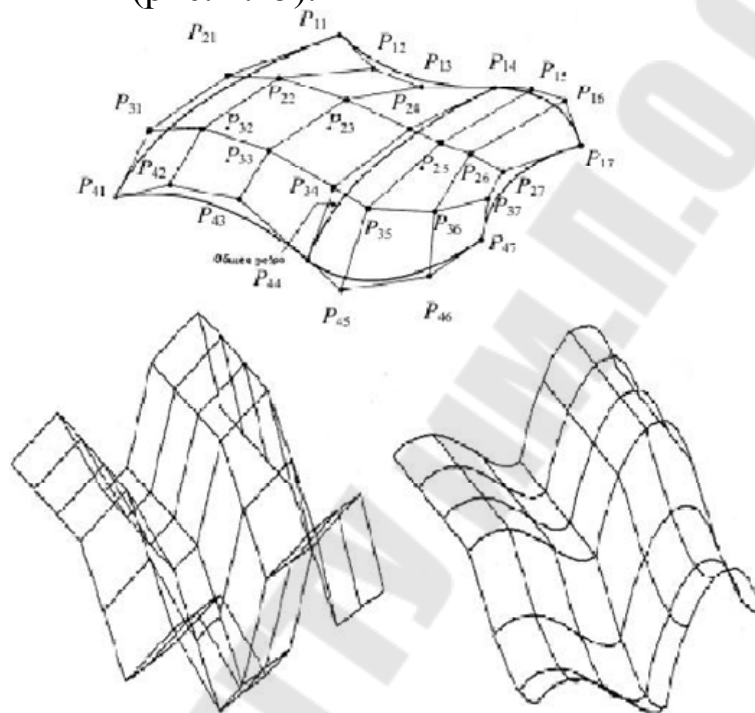


Рис. 4.15. Составные поверхности Безье

На рис. 4.16 и 4.17 приведены примеры В-сплайновых поверхностей.

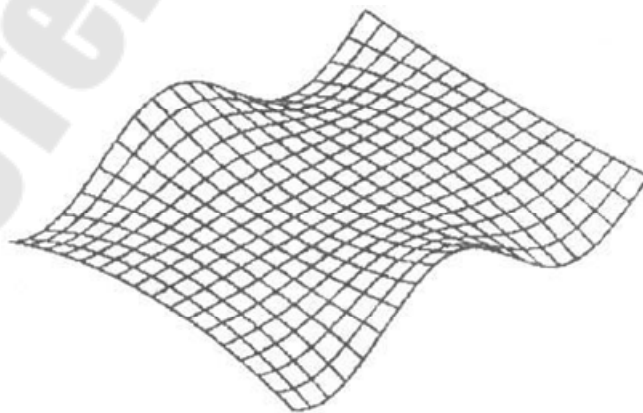


Рис. 4.16. Пример В-сплайновой поверхности

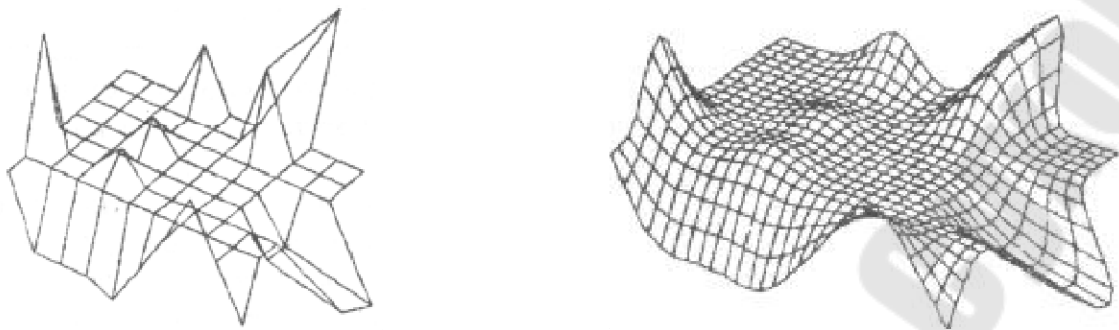


Рис. 4.17. Каркас и В-сплайновая поверхность

На рис. 4.18 показана NURBS-поверхность третьего порядка по каждому из двух направлений. Характеристический многогранник изображен тонкими линиями.

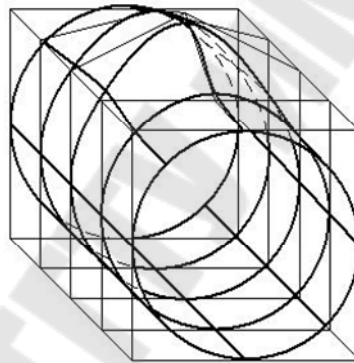


Рис. 4.18. NURBS-поверхность

Раздел 5. Моделирование сборок. Сборочные единицы (3D)

Тема 5.1 Основные инструменты ориентации, закрепления и соединения компонентов в сборке.

Технология проектирования в среде PTC Creo Parametric.

В качестве первого знакомства с технологией проектирования с продуктом PTC Creo Parametric рассмотрим проектирование небольшого изделия, состоящего из двух простых деталей (рис. 5.1).

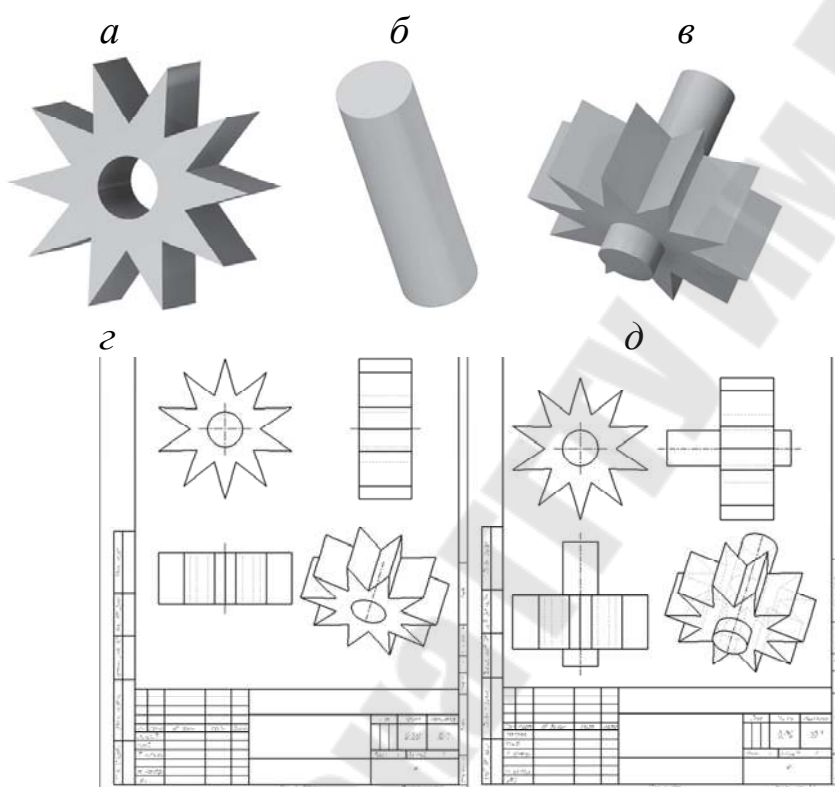


Рис. 5.1. Проектирование в Creo Parametric: модель звезды (а), модель оси (б), модель сборки (в), чертеж звезды (г) и чертеж сборки (д)

В процессе проектирования мы познакомимся с основными этапами проектирования изделий:

- разработка твердотельных моделей двух деталей;
- создание сборочного изделия, состоящего из этих двух деталей, модели которых были разработаны на предыдущем этапе;
- разработка рабочего чертежа одной из деталей;
- создание чертежа сборки.

Обзор технологии проектирования. Создание детали Shaft (ось)

Большинство команд и действий иллюстрируются рисунками или диалоговыми окнами, которые открываются при выполнении команд.

Шаг 1. Запускаем программу PTC Creo Parametric, используя одноименную пиктограмму, расположенную на рабочем столе.

Шаг 2. Выбираем **Рабочую папку** (это директория, в которой будет выполняться текущий сеанс работы в PTC Creo Parametric; эта папка должна быть создана заранее, и вам должны быть доступны все действия с файлами: создание, чтение, редактирование, запись, вывод на печать, удаление. Кнопка выбора рабочей папки находится во вкладке *Начало ленты* Creo Parametric (рис. 5.2).

В открывшемся окне выберите нужную папку (рис. 5.3) и нажмите кнопку **ОК** (имя папки, которая будет выбрана, может быть иным).

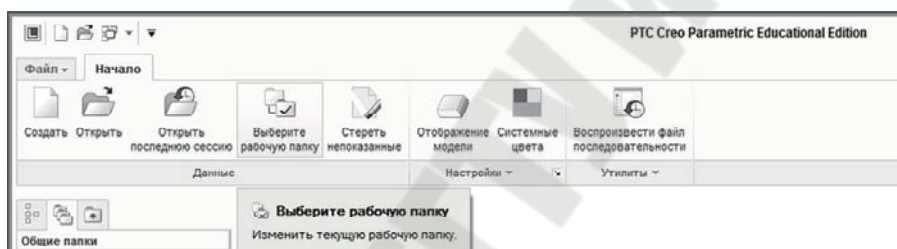


Рис. 5.2. Выбор рабочей папки

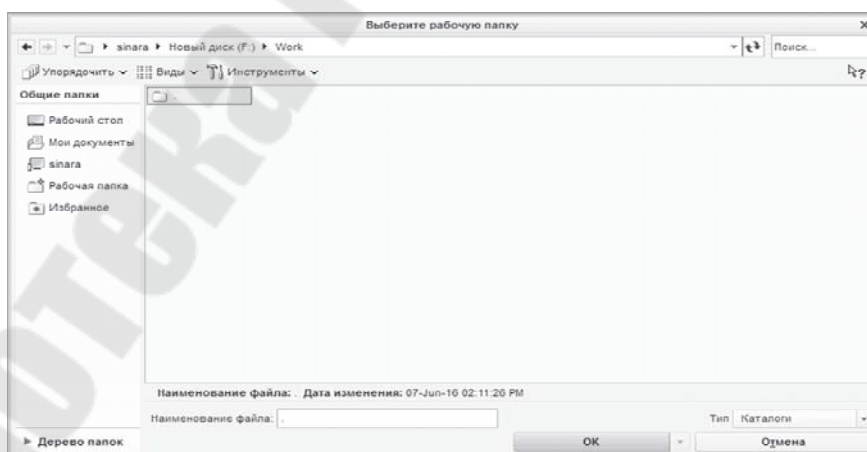



Рис. 5.3. Окно Выберите рабочую папку

Шаг 3. Создаем новую деталь **Shaft (ось)** с помощью кнопки  в панели быстрого доступа или аналогичной кнопки, расположенной в левой части панели *Начало*. Открывшееся окно *Создать* представлено на рис. 5.4.

Указываем атрибуты операции: тип – Деталь; подтип – Твердое тело; имя – **shaft**; триггер *Использовать шаблон по умолчанию* – включен ()

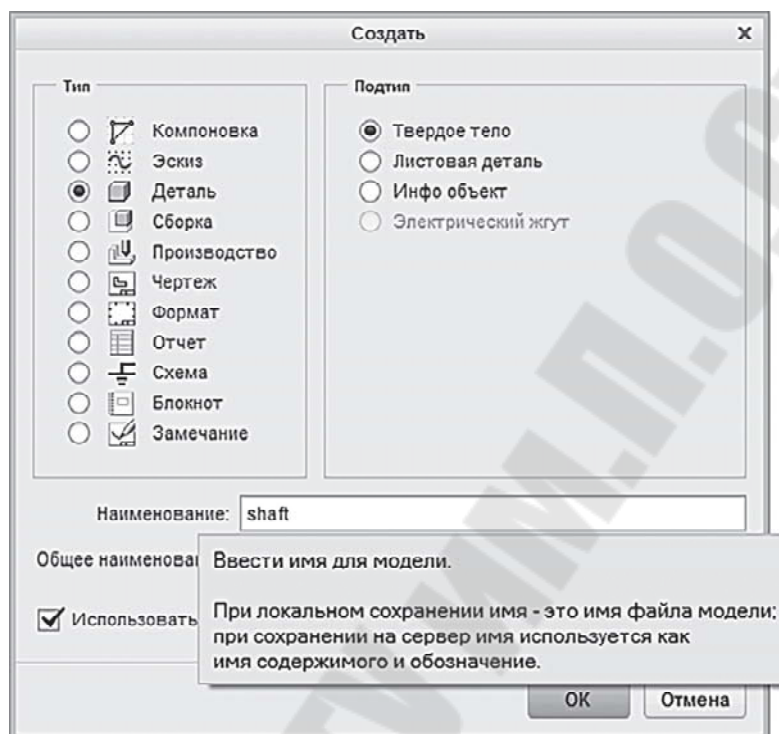


Рис. 5.4. Окно Создать

Результат представлен на рис. 5.5: созданы дерево модели и геометрические объекты по умолчанию опорные плоскости ФРОНТ, ВЕРХ И ПРАВЫЙ, а также система координат CS0.

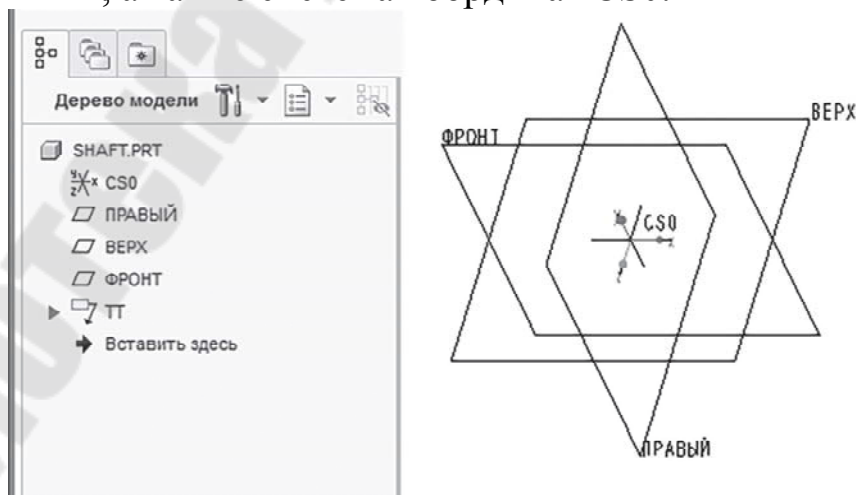



Рис. 5.5. Дерево модели и графическое окно

Шаг 4. Сохраняем созданный файл комбинацией **Ctrl+S**. Постарайтесь, чтобы это действие стало привычкой – после каждой новой операции сохранять изменения.

Шаг 5. Создаем базовый элемент детали **Shaft (ось)** командой

Вытянуть (кнопка  находится в панели *Формы* вкладки *Модель* ленты PTC Creo Parametric). Команда **Вытянуть** открывает диалоговую панель *Вытянуть* – рис. 5.6. Открываем вкладку *Размещение* в диалоговой панели *Вытянуть* (на рис. 5.6 показана стрелкой)

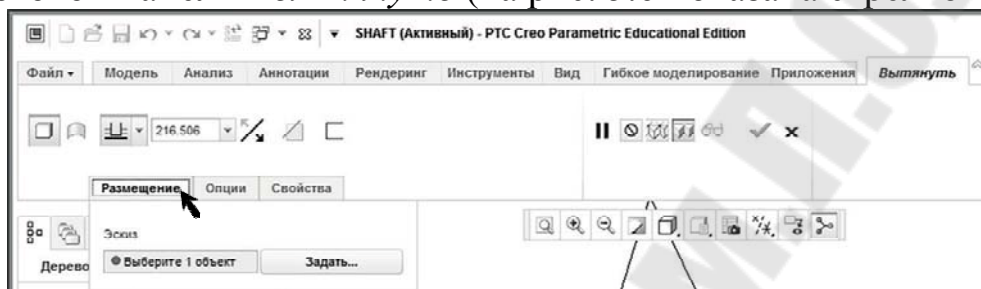


Рис. 5.6. Диалоговая панель *Вытянуть*

Для построения базового элемента будем использовать внутренний эскиз, созданный внутри операции *Вытянуть*. Для выбора этой функции щелкните по кнопке *Задать*, как показано на рис. 5.7

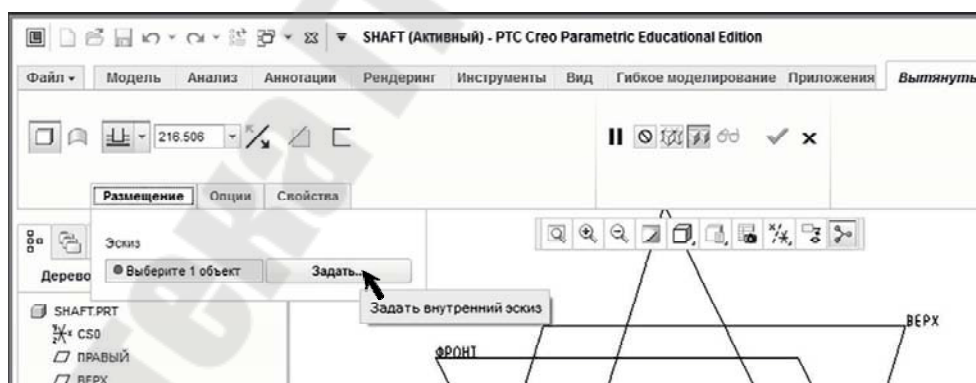


Рис. 5.7. Задаем внутренний эскиз

В графическом окне открывается диалоговое окно *Эскиз*.

Шаг 6. Выбираем опорную плоскость *Фронт* в качестве плоскости эскиза (рис. 5.8), указав мышью непосредственно на плоскость *Фронт* в графическом окне или указав на нее в дереве модели.

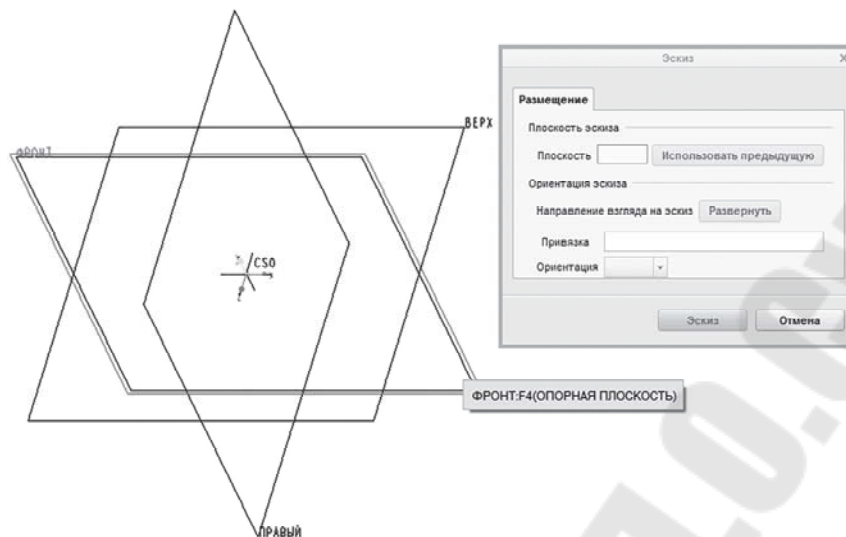


Рис. 5.8. Выбор плоскости эскиза

Наименование плоскости ФРОНТ появилось в окне *Плоскость* диалогового окна *Эскиз*. Автоматически в окне *Привязка* диалогового окна *Эскиз* появилась запись **Правый: F2 (опорная плоскость)**, а в окне **Ориентация** – надпись **Вправо**. Это означает, что Creo Parametric предлагает использовать в качестве привязки опорную плоскость ПРАВЫЙ, с ориентацией **Вправо**, как показано на рис. 5.9. Согласитесь с предложением по умолчанию, нажав кнопку **Эскиз**.

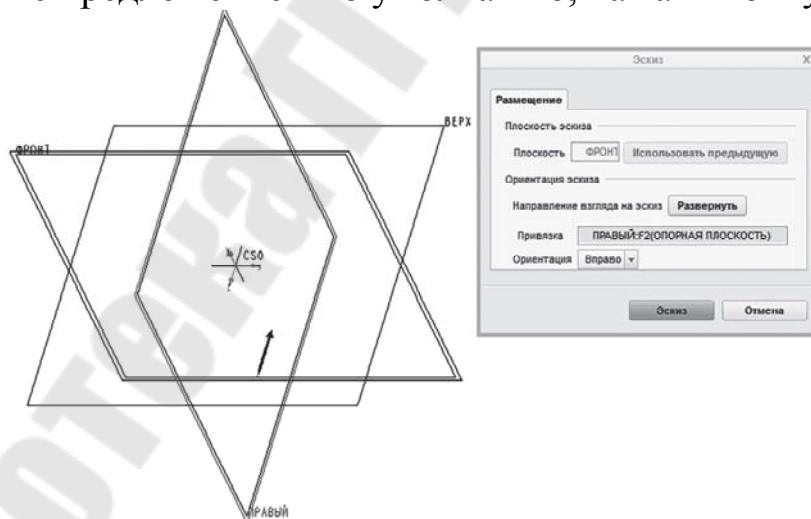


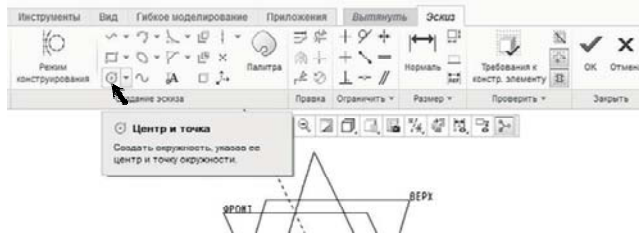
Рис. 5.9. Выбор привязки

Шаг 7. Создаем эскиз операции, создав окружность с центром в точке пересечения опорных плоскостей. Для этого:

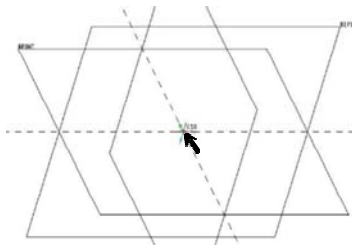
- используем команду **Центр и точка**, как показано на рис. 5.10, а;

- затем указываем центр окружности в созданной по умолчанию системе координат (см. рис. 5.10, б);
- перемещаем мышь в сторону до появления окружности (см. рис. 5.10, в) и щелкните левой кнопкой мыши;

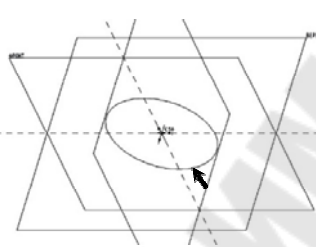
а



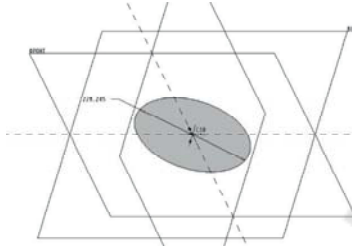
б



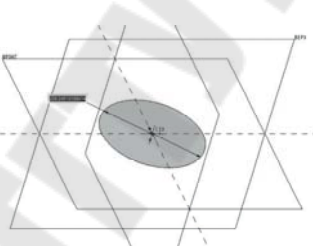
в



г



д



е

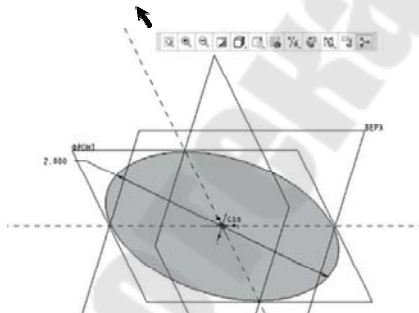



Рис. 5.10. Построение окружности

- завершаем построение окружности нажатием на среднюю кнопку мыши (колесико). На эскизе окружности появился размер, как показано на рис. 5.10, е (у вас, вероятнее всего, будет другая величина);

- активизируем получившееся значение двойным щелчком мыши (см. рис. 5.10, *d*);
- введите «правильный» размер (число 2) и нажмите **Enter**. Построение окружности диаметром 2 завершено (см. рис. 5.10, *e*).

Если изображение эскиза получилось слишком мелким, скорректируйте изображение, используя команду **Вписать** (кнопка запуска команды **Вписать** на рис. 5.10, *e* указана стрелкой).

Шаг 8. Щелкаем по кнопке  – **Сохранить сечение и выйти** (кнопка расположена в правой части диалоговой панели *Эскиз* на ленте *Creo Parametric*).

После возвращения в диалоговую панель *Вытянуть* (рис. 5.11) необходимо скорректировать величину вытягивания построенного эскиза. Для этого следует двойным щелчком активизировать значение в окне ввода глубины вытягивания (на рис. 5.11 оно показано стрелкой) и ввести «правильное» значение длины – величину 7, нажать **Enter**. Завершив операцию *Вытянуть* кнопкой , завершаем построение детали **Shaft** (ось).

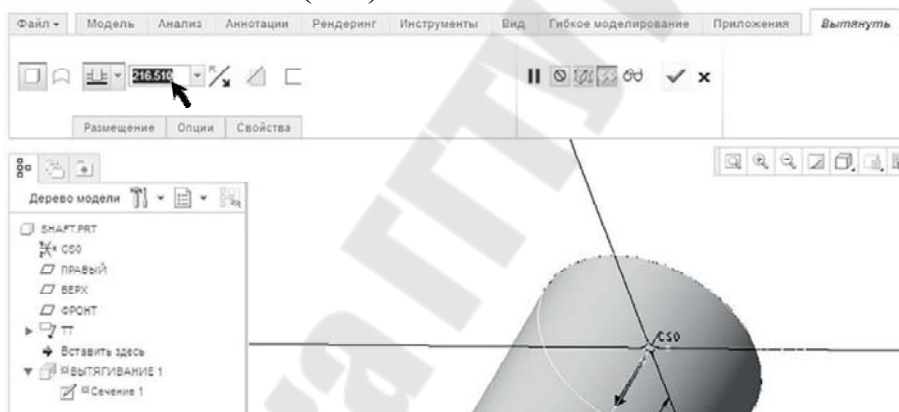


Рис. 5.11. Продолжение операции *Вытянуть*

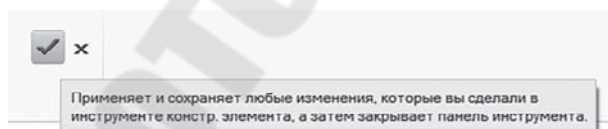



Рис. 5.12. Кнопка завершения операции *Вытянуть*

Если размер модели детали и масштаб графического окна не соответствуют правильному представлению, используйте кнопку **Вписать** графической панели, как показано на рис. 5.13 (упомянутая кнопка показана стрелкой).

Шаг 9. Сохраняем выполненную работу командой **Файл > Сохранить** (или используйте комбинацию **Ctrl+S**). Затем закройте файл командой **Заккрыть** в панели быстрого доступа.

Кнопка  (**Заккрыть**) закрывает файл в графическом окне, но это не означает исчезновение его из сессии, поэтому в дальнейшем мы можем оперативно открыть его в этой сессии, а также использовать при создании сборки. Аналогичные действия можно реализовать командой **Файл > Заккрыть**.

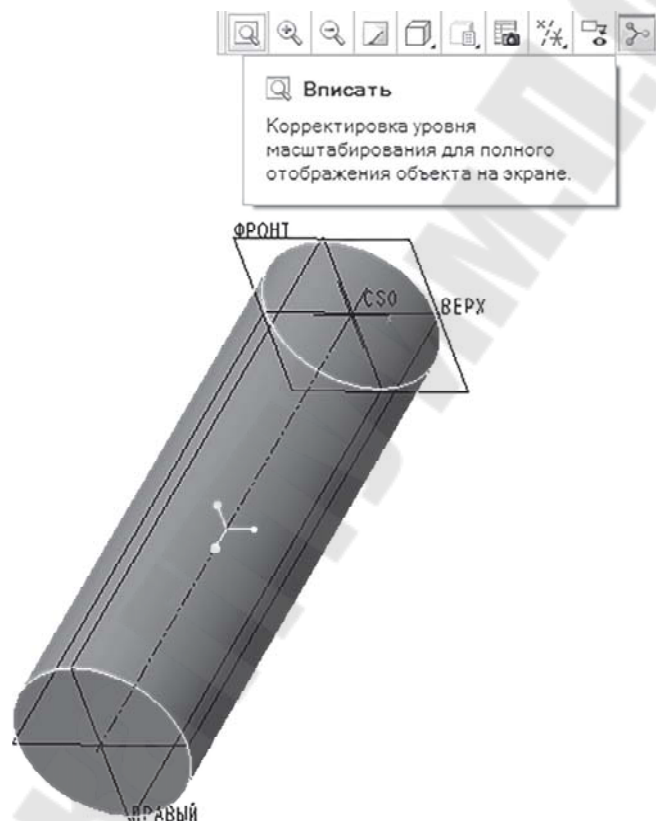


Рис. 5.13. Корректировка масштаба представления модели

На этом завершается проектирование первого элемента в среде PTC Creo Parametric.


Создание детали Star (звездочка)

При создании второй детали (рис. 5.14) будут использованы новые команды наряду с теми, которые использовались ранее.

На протяжении всего учебного пособия в каждом упражнении используются как уже известные команды (для того чтобы закрепить

уже познанное), так и добавляются новые с иными возможности для приобретения опыта работы с продуктом Creo. Поскольку, как правило, существует от 3 до 4 способов выполнения почти каждой команды, в учебном пособии представлены альтернативные способы выполнения разных команд. Например, чтобы закончить команду, такую как **Вынуть**, можно нажать галочку на приборной панели, нажать **Enter** на клавиатуре или среднюю кнопку мыши (колесико).

Шаг 1. Выберите **Рабочую папку**. Правильнее будет, если это та же рабочая папка, что показана на рис 5.3.

Шаг 2. Создайте новую деталь **Star (звездочка)** с помощью кнопки . Открывшееся окно *Создать* представлено на рис. 1.14. Атрибуты операции: тип – **Деталь**; подтип – **Твердое тело**; имя – **star**; триггер *Использовать шаблон по умолчанию* – включен (). Нажмите **СКМ** (Среднюю Кнопку Мыши) или нажмите **Enter**, или щелкните кнопку **ОК** (рис. 5.14).

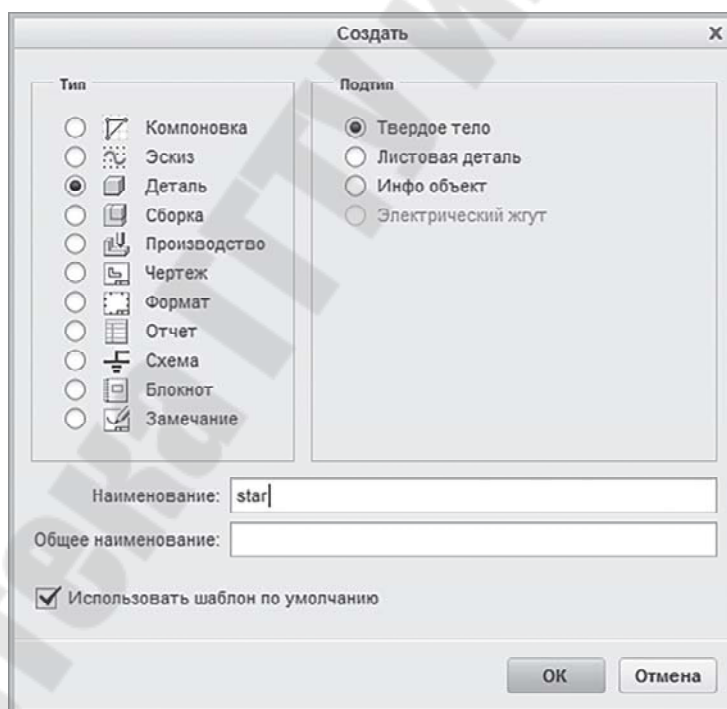



Рис. 5.14. Окно *Создать*

Сохраняем файл (кнопка **Сохранить**  в панели быстрого доступа). РТС Creo Parametric не сохраняет файлы автоматически – необходимо вручную сохранять все значимые изменения файлов.

Шаг 3. Нужно произвести дополнительные настройки среды эскиза. Запустить команду **Файл > Опции** (рис. 5.15, а). Включить оп-

ции *Показать сетку* и *Привязка к тексту* в разделе *Среда эскиза* окна *Опции PTC Creo Parametric* (см. рис. 5.15, б).




Рис. 5.15. Настройка среды эскиза

Завершить настройку среды эскиза кнопкой **ОК**. На запрос о сохранении внесенных изменений в файле конфигурации ответить **Нет**.

Шаг 4. Выделить в дереве модели опорную плоскость **ФРОНТ** и

запустить команду .

Если ориентация плоскости эскиза параллельно экрану не произошла автоматически, щелкните по кнопке **Вид эскиза**  в графической панели (см. рис. 5.16, а) или в панели *Подготовка* вкладки *Эскиз* (см. рис. 5.16, б).

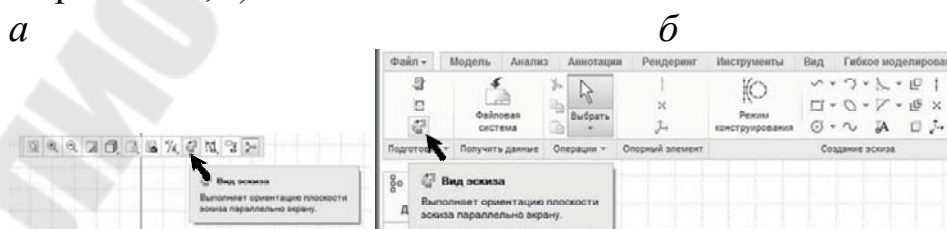


Рис. 5.16. Настройка ориентации эскиза в графической панели (а) и в ленте Creo Parametric (б)

Шаг 5. Устанавливаем видимость в графическом окне всех ти-

пов опорных элементов и их тэгов (тэг – англ. *tag* – именованная метка). Для этого включить во вкладке *Вид*, на панели *Показать* переключатели видимости опорных плоскостей, осей, точек, координатной систем и центра вращения (верхний ряд) и их тегов (нижний ряд), как показано на рис. 5.17.

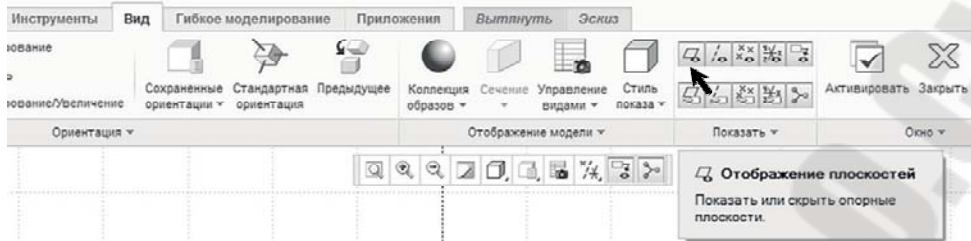


Рис. 5.17. Настройка видимости опорных элементов и их тегов

Переключиться в панель *Эскиз*, запустить команду **Палитра** (рис. 5.18).

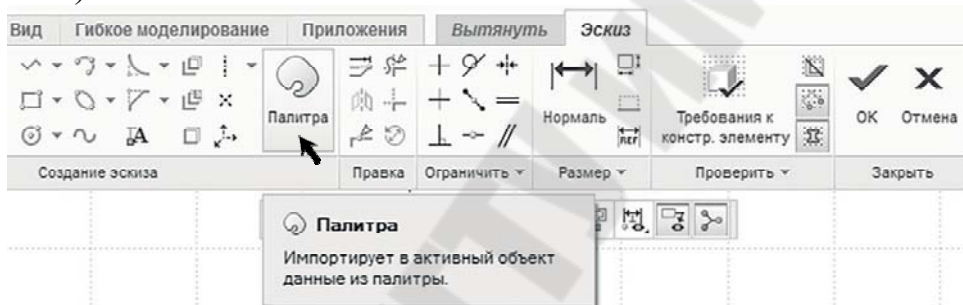


Рис. 5.18. Команда **Палитра** панели *Эскиз*

Шаг 6. Находим в палитре (окно *Палитра* среды эскиза представлено на рис. 5.19, а) элемент – 10-конечная звезда, расположенный во вкладке *Звезда*. Двойным щелчком ЛКМ (Левой Кнопки Мыши) выбрать его и щелкнуть ЛКМ вблизи точки пересечения опорных плоскостей в графическом окне (см. рис. 5.19, б).

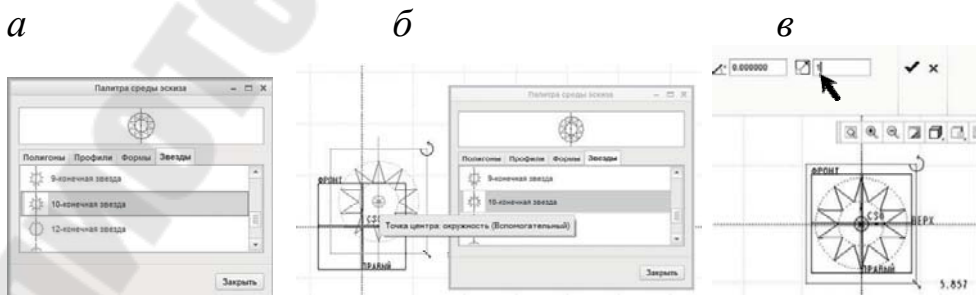




Рис. 5.19. Построение эскиза звезды

Щелкнув ЛКМ в центре эскиза, привязать к нему центр звезды.

Введите коэффициент масштабирования, равный 1, в предназначенном для него поле (см. рис. 1.19, в). Завершите масштабирование звезды кнопкой , закройте окно *Палитра среды эскиза* кнопкой *Заккрыть*, щелкните кнопку **Вписать**  в графической панели для полного отображения звезды на экране. Результат на рис. 5.20.

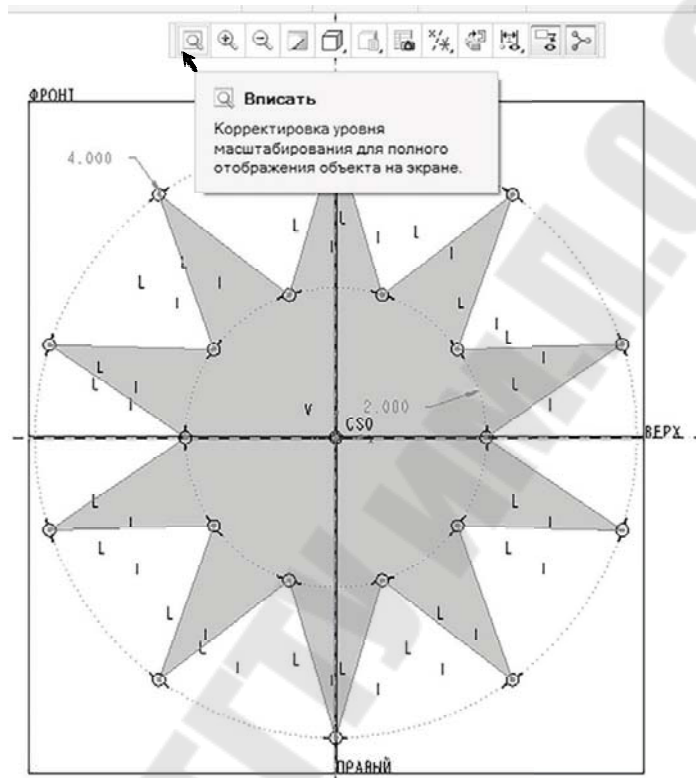


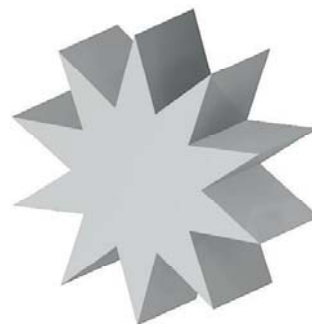
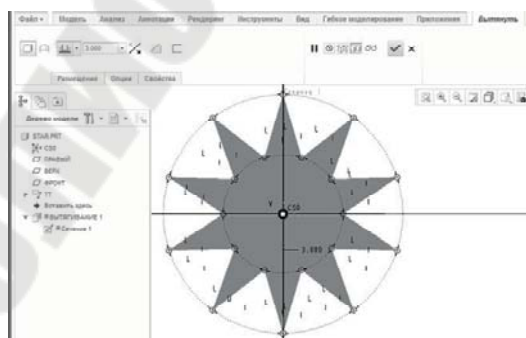


Рис. 5.20. Завершение построения эскиза звезды

Завершаем создание эскиза кнопкой . Базовый эскиз детали завершен.


Шаг 7. Вернувшись по завершении эскиза в панель *Вытянуть* (рис. 5.21), вводим глубину вытягивания, равную 3, как показано на рис. 5.21, а. Завершаем операцию вытягивания кнопкой . Результат операции показан на рис. 5.21, б.



а б
Рис. 5.21. Назначение глубины вытягивания (а) и
результат операции (б)

Щелкаем по кнопке **Вписать** (☐) в графической панели, затем перейдите в *Стандартную ориентацию*. Это можно сделать тремя путями:

- команда **Вид > Ориентация > Стандартная ориентация**;
- команда **Графическая панель > Сохраненные ориентации > Стандартная ориентация**;
- комбинация клавиш **Ctrl+D**.

Шаг 8. Создание отверстия. Запустите команду **Отверстие** кнопкой , расположенной на панели *Проектирование* вкладки *Модель*. Укажите поверхность детали **Star**, на которой должно расположиться отверстие. На рис. 5.22, а эта поверхность показана стрелкой и называется **Поверхн: F6 (ВЫТЯГИВАНИЕ_1)**.

После указания поверхности на модели появляется виртуальное отверстие с двумя характерными зелеными маркерами, показанными на рис. 5.22, б длинными стрелками.

Находясь в графическом окне, нажимаем и удерживаем **ПКМ** (**Правую Клавишу Мыши**). В появившемся окне, как показано на рис. 5.23, а, выбираем триггер *Коллектор привязок смещения* и щелкаем на нем ЛКМ. Нажимаем и удерживаем клавишу **Ctrl** на клавиатуре, выбираем опорную плоскость **ПРАВЫЙ** в дереве модели; продолжая удерживать клавишу **Ctrl**, выбираем опорную плоскость **ВЕРХ** в дереве модели. Выбранные плоскости стали выделенными и на модели (рис. 5.23, б). Отпустите клавишу **Ctrl**

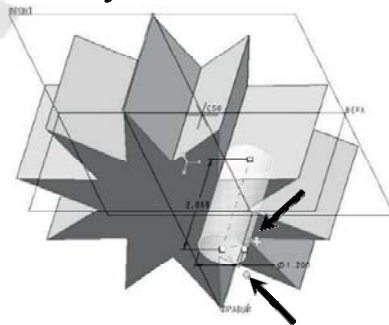


Рис. 5.22. Создание отверстия. Начало

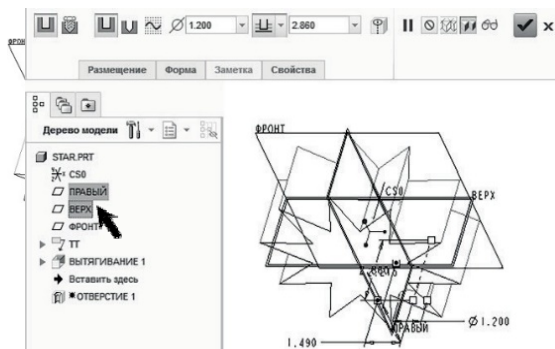
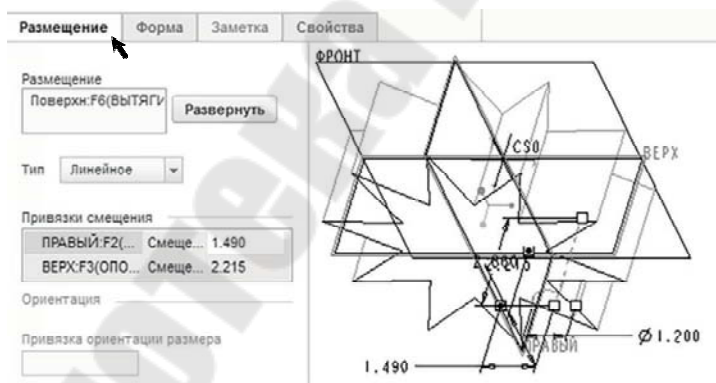


Рис. 5.23. Создание отверстия. Продолжение

Открываем вкладку *Размещение* в диалоговой панели *Отверстие*, как показано на рис. 5.24, а.

В области *Привязки смещения* указаны выбранные опорные плоскости ПРАВЫЙ и ВЕРХ, а также указана величина смещения оси отверстия от выбранных плоскостей. Ваши значения, скорее всего, имеют другую величину, поскольку они зависят от координат точки на плоскости, которую указали.



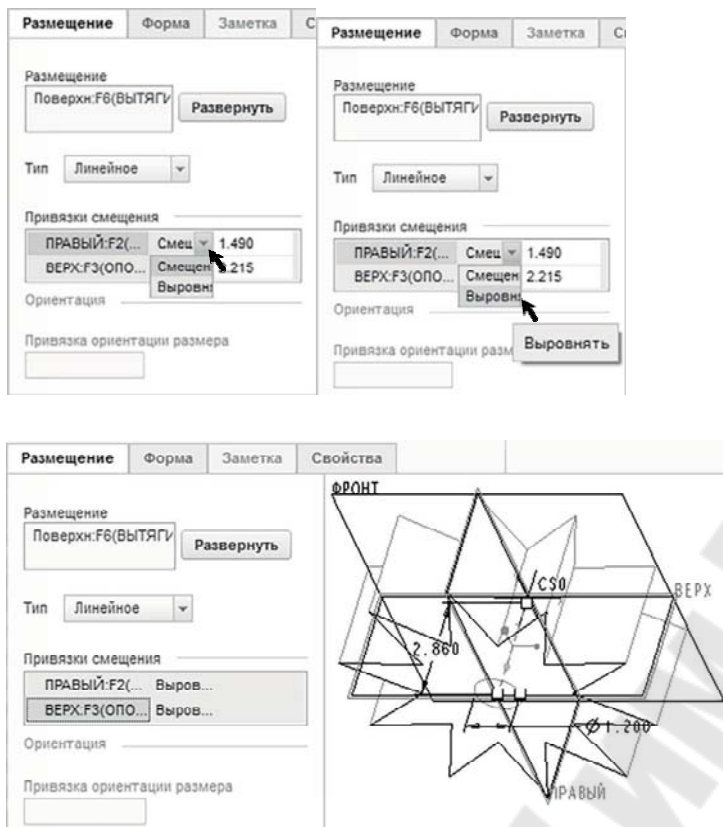


Рис. 5.24. Назначение положения оси отверстия

Щелкните по *Коллектору привязки смещения* от плоскости ПРАВЫЙ, как показано на рис. 5.22, б, и смените значение коллектора с *Смещение* на *Выровнять*, как показано на рис. 5.24, в.

Затем то же самое следует произвести с коллектором привязки плоскости ВЕРХ. В результате смены привязок должна быть картина, представленная на рис. 5.24, г. Коллекторы привязок теперь не смещены от плоскостей ПРАВЫЙ и ВЕРХ на определенные величины, а выровнены, то есть совпадают с этими плоскостями. (Аналогичного результата можно добиться, если оставить значения коллекторов в состоянии *Смещение* и ввести значение смещения, равное 0.0.)

Шаг 9. Назначение атрибутов отверстия. Введите атрибуты отверстия, как показано на рис. 1.25: диаметр отверстия – 2; глубина – сверлить до пересечения со всеми поверхностями. Завершите команду кнопкой ✓.

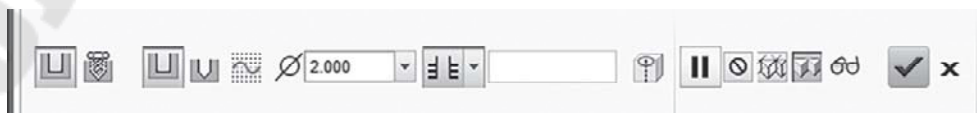


Рис. 5.25. Атрибуты отверстия

Установите стиль отображения в графической панели *Закраска с кромками*, нажмите ЛКМ для отмены выделения отверстия и сохраните модель (**Ctrl+S**).

Шаг 10. Изменение внешнего представления. Для изменения представления используем команду **Вид > Отображение модели > Коллекция образов**. Выберите в коллекции образов **ptc-std-gold-polished**, как показано на рис. 5.26 (или любой другой образ). Щелкните указателем мыши, который предстал в образе кисточки, по названию модели в дереве модели (STAR. PRT), затем по кнопке **ОК** в окне *Выбрать* в верхнем правом углу экрана.

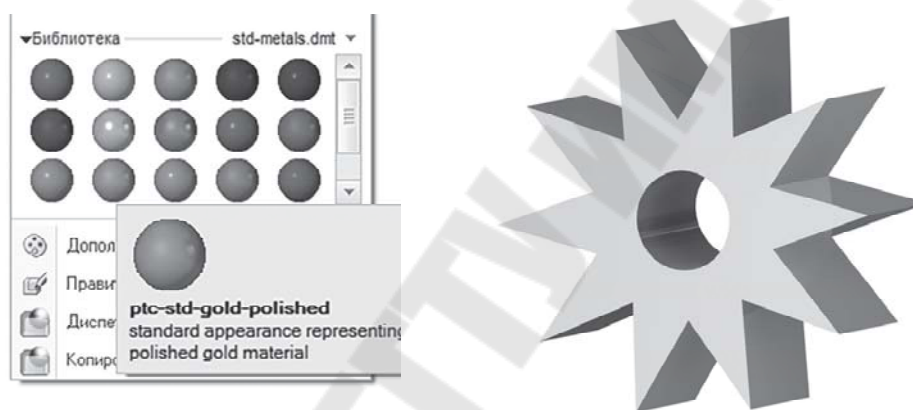


Рис. 5.26. Смена представления (а) и результат (б)

Завершите упражнение, сохранив изменения (**Ctrl+S**). Для освобождения графического экрана используйте команду **Файл > Управление сессией > Стереть текущий**. Подтвердите решение ответом **Да**. Файл закрыт, но остался в сессии и с ним можно продолжить работу.


Создание второй детали завершено. Далее объединим две созданные детали в сборку.

Создание сборки

На данном этапе будет создана модель сборки с использованием двух деталей, смоделированных на предыдущих этапах. Сборка создается путем объединения отдельных деталей по аналогии с тем, как деталь создается объединением отдельных конструкторских элемен-

тов. Для создания сборки из отдельных деталей и подборок в PTC Creo Parametric существует режим сборки.

Так же, как и при создании детали, как правило, вначале создается набор опорных плоскостей и система координат. В дальнейшем, при необходимости, могут быть созданы дополнительные опорные элементы и дополнительные компоненты сборки.

Шаг 1. *Создание новой модели.* Создайте модель кнопкой . В диалоговом окне *Создать* (рис. 5.27) следует выбрать атрибуты операции: тип – **Сборка**; подтип – **Конструкция**; имя – **gear (механизм)**; триггер *Использовать шаблон по умолчанию* – **включен** ().

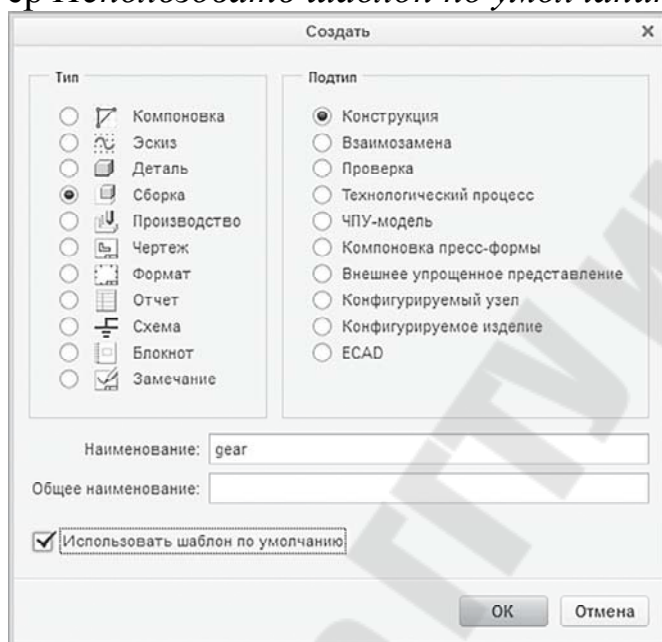

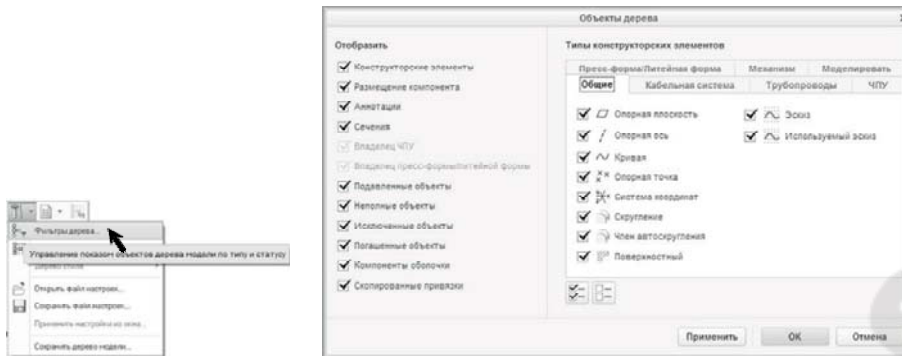


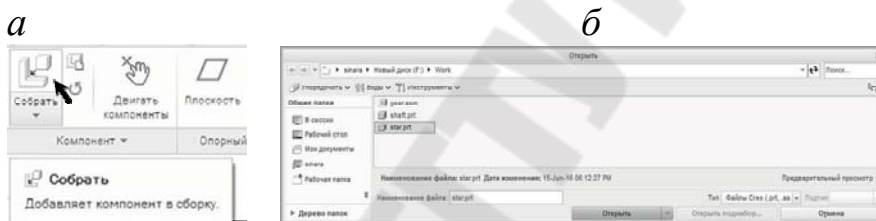
Рис. 5.27. Окно *Создать* при создании *Сборки*

Включить видимость опорных элементов и их тегов во вкладке *Вид* на панели *Показать* (). Откройте фильтр дерева модели в кнопке **Настройки** в *Навигаторе* (рис. 5.28, а) и убедитесь, что все опции находятся в режиме **Вкл** (рис. 5.28, б). Нажмите **ОК**, затем **Файл > Сохранить > ОК**



а б
Рис. 5.28. Включение (а) и настройка фильтров (б) дерева модели

Шаг 2. *Включение в сборку первого компонента.* Запустить команду **Собрать** в панели *Компонент* вкладки *Модель* (рис. 5.29, а). В окне *Открыть* выбрать в рабочей папке (открывается по умолчанию) первый компонент сборки – деталь **Star.prt** (см. рис. 5.29, б) и нажать кнопку **Открыть**.



а б
Рис. 5.29. Инициализация (а) включения первого компонента (б) в сборку

Для обеспечения полного отображения объекта на экране щелкнуть по кнопке **Вписать** (□) в графической панели графического окна или **Ctrl+D**. Результат на рис. 1.30, а. В выпадающем списке *Задать тип от-ношения* задайте ограничение *По умолчанию* (см. рис. 5.30, б).

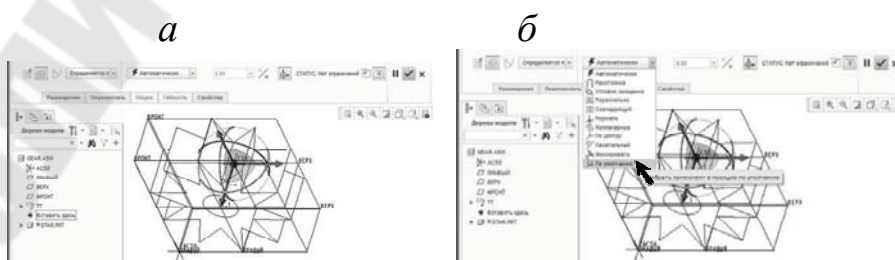


Рис. 5.30. Добавление в сборку первого компонента (а) и его ориентация (б) в сборке

Завершите **Ctrl+D** (Вписать) и **Ctrl+S** (Сохранить).

В результате размещения компонента **Star** в сборке и установки ограничений по умолчанию опорные плоскости ПРАВЫЙ, ВЕРХ и ФРОНТ компонента **Star** совпадают (рис. 5.31) с одноименными опорными плоскостями сборки GEAR, система координат компонента **Star** CS0 совпадает с системой координат ACS0 сборки GEAR (обратите внимание, что прочесть наименование систем координат весьма трудно из-за того, что в пространстве они совпадают, поэтому их теги «наезжают» друг на друга).

Выключите отображение тегов во вкладке вид

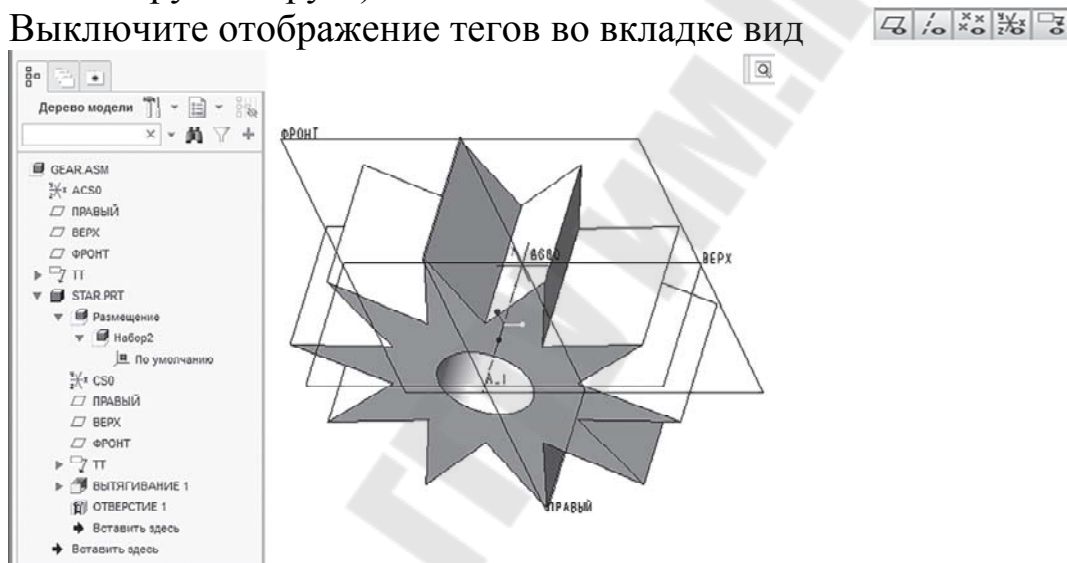




Рис. 5.31. Завершение размещения компонента Star в сборке

Шаг 3. Включение в сборку второго компонента. Запустить команду **Собрать** . В окне *Открыть* выбрать в рабочей папке второй компонент сборки – деталь **Shaft.prt** (рис. 5.32, а) и нажать кнопку **Открыть**.

В результате второй компонент **Shaft** разместился в сборке (см. рис. 5.32, б), но, поскольку никаких ограничений на него пока не наложено, он размещается сбоку, не контактируя с первым компонен-

том. Внешний вид 3-D перетаскивателя  показывает, что у компонента все степени свободы активны (см. рис. 5.32, б).

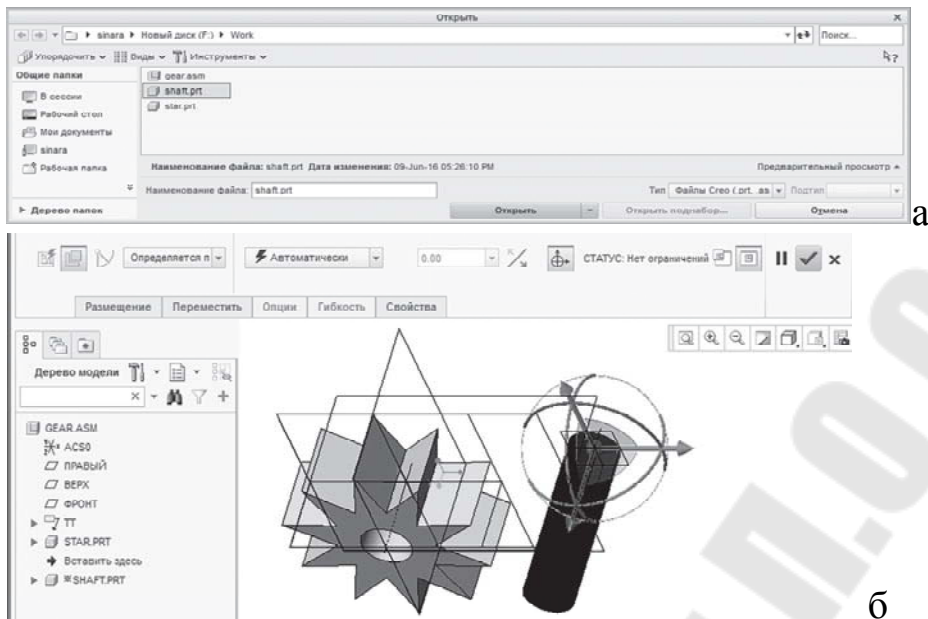


Рис. 5.32. Выбор (а) и включение (б) второго компонента в сборку

Прежде чем наложить ограничения на компонент **Shaft** для его размещения в сборке, нужно выключить (для удобства восприятия) отображения опорных плоскостей и 3-D перетаскивателя. Для отключения отображения опорных плоскостей следует открыть падающий список *Фильтры показа опорных элементов* в графической панели, щелкнуть по триггеру *Выбрать все*, а затем щелкнуть ЛКМ в любой точке графического окна (рис. 5.33, а).

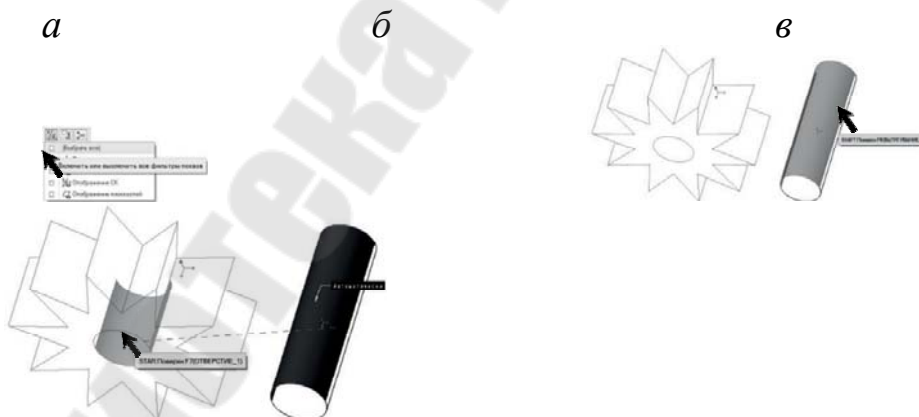



Рис. 5.33. Наложение первого ограничения на компонент Shaft в сборке

Для выключения отображения 3-D перетаскивателя следует щелкнуть по кнопке  **Скрыть 3-D перетаскиватель** в панели *Размещение компонента*.

Выбрать ЛКМ цилиндрическую поверхность компонента **Shaft** (см. рис. 5.33, б), затем цилиндрическую поверхность отверстия у компонента **Star** (см. рис. 5.33, в). **Первое ограничение наложено!**

На рис. 5.34 виден результат наложения ограничения. Следует заметить, что тип ограничения – *Совпадающий* – Creo Parametric наложил самостоятельно. Система анализа намерений конструктора в Creo Parametric весьма совершенна и при выборе ограничений сборки Creo Parametric ошибается редко.

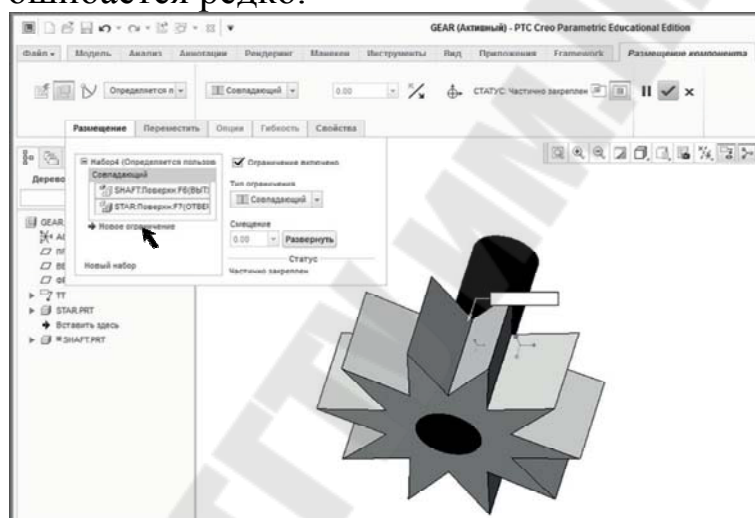


Рис. 5.34. Результат наложения первого ограничения в сборке

Откройте вкладку *Размещение* графической панели *Размещение компонента* (см. рис. 5.34) и запустите опцию *Новое ограничение* (на рис. 5.34 показана стрелкой).

Щелкните ЛКМ на поверхности компонента **Star** (рис. 5.35, а), а затем на торцевой поверхности компонента **Shaft** (см. рис. 5.35, б).

Creo Parametric наложил ограничение *Совпадающий*, как и в первом случае (см. рис. 5.36, а). Изменим данное ограничение на *Расстояние*. Для этого в группе **Тип ограничения** нужно открыть выпадающий список и вы брать в нем другой тип – *Расстояние* (рис. 5.36, а), а затем ввести значение **1.0** в поле *Смещение* (рис. 5.36, б).

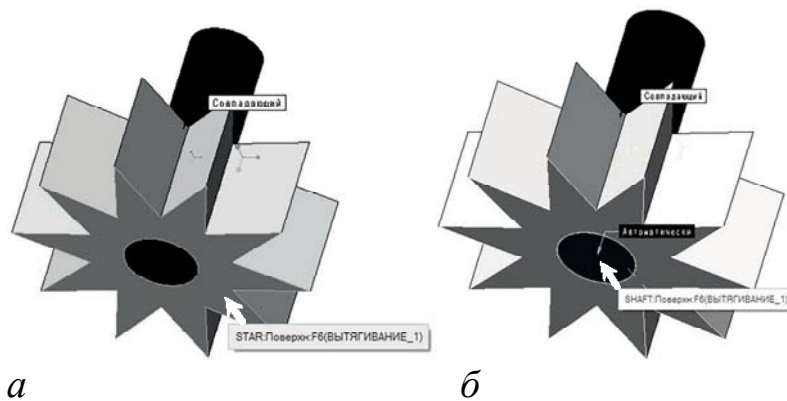


Рис. 5.35. Наложение второго ограничения в сборке

Обратите внимание на изменение статуса сборки – он приобрел значение **Полностью закрепленный** (рис. 5.36, б).

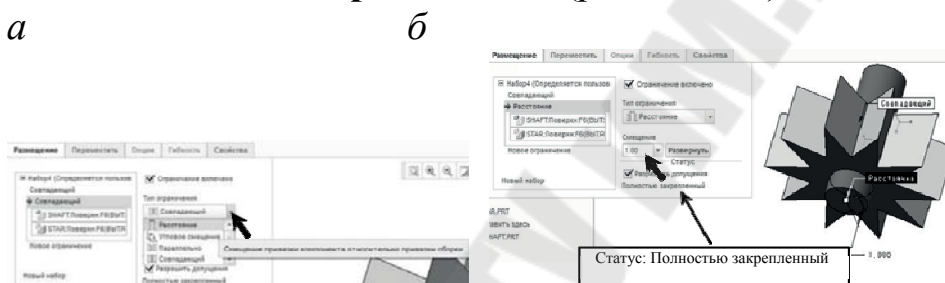




Рис. 5.36. Изменение типа ограничения

Завершите операцию кнопкой . Включите отображение опорных плоскостей в падающем списке *Фильтры показа опорных элементов* в графической панели (см. рис. 1.33, а), щелкнув по триггеру (*Выбрать все*), а затем щелкните ЛКМ в любой точке графического окна (см. рис. 1.33, а).

Скорректируйте масштаб представления сборки для полного отображения на экране (кнопка **Вписать**  в графической панели или **Ctrl+D**), сохраните сборку (**Ctrl+S**).

Выключите видимость всех опорных элементов и их тегов во вкладке *Вид*, на панели *Показать* ()

Выберите в списке **Стиль показа** (в графической панели) опцию *Закраска с отражением* (рис. 5.37, а) – результат на рис. 5.37, б.

a

б

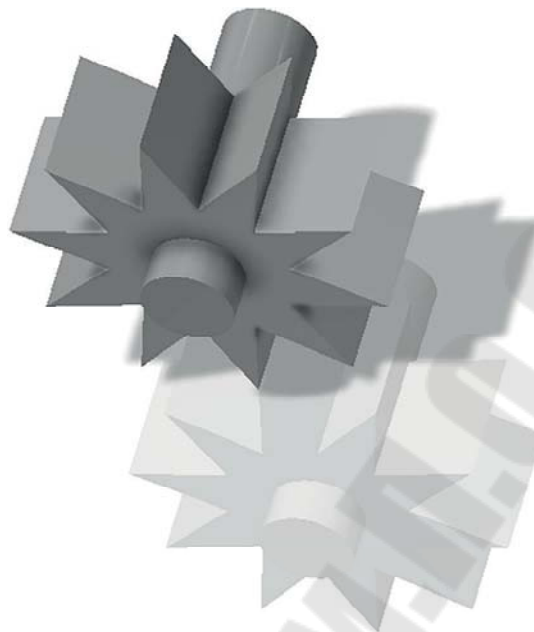
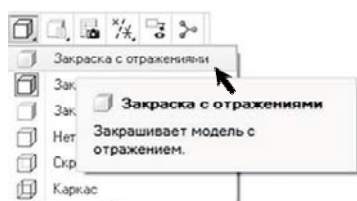
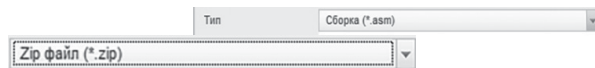


Рис. 5.37. Изменение стиля показа (*a*) и результат (*б*)

Заключительные операции:

- команда **Файл > Управление файлом > Удалить старые версии ... Да-**
- команда **Файл > Сохранить;**
- команда **Файл > Сохранить как >**
- > **Zip File (*.zip) > ОК;**
- команда **Файл > Заккрыть.**




На этом создание сборки завершено. Далее будут созданы чертежи сборки **Gear** (Механизм) и детали **Star** (Звезда).

Тема 5.2. Создание видов разнесенной сборки

Используя модели деталей и сборки, которые были созданы на предыдущих этапах, здесь будут разработаны сборочный чертеж Механизма (**Gear**) и чертеж детали Звездочка (**Star**).

Режим *Чертеж* в PTC Creo Parametric предоставляет возможности создания и редактирования конструкторской документации, используя 3D-модели деталей и сборок. Размеры, аннотации и другие элементы моделей конструкции, представленные на различных видах чертежа, опираются на эти же элементы в 3D – моделях.

Шаг 1. Создание чертежа. Создайте чертеж кнопкой . В диалоговом окне *Создать* (рис. 5.39, а) следует выбрать атрибуты операции: тип – **Чертеж**; имя – **gear** (механизм); триггер *Использовать шаблон по умолчанию* – включен (); кнопка **ОК**.

В новом диалоговом окне *Новый чертеж* убедиться (рис. 5.38, б), что в поле *Модель по умолчанию* – имя файла сборки gear.asm (если это не так, нужно найти этот файл, используя кнопку **Обзор**, расположенную справа от этого поля). В списке шаблонов выбрать шаблон **pro_technologies** и нажать кнопку **ОК** (рис. 5.38, б).

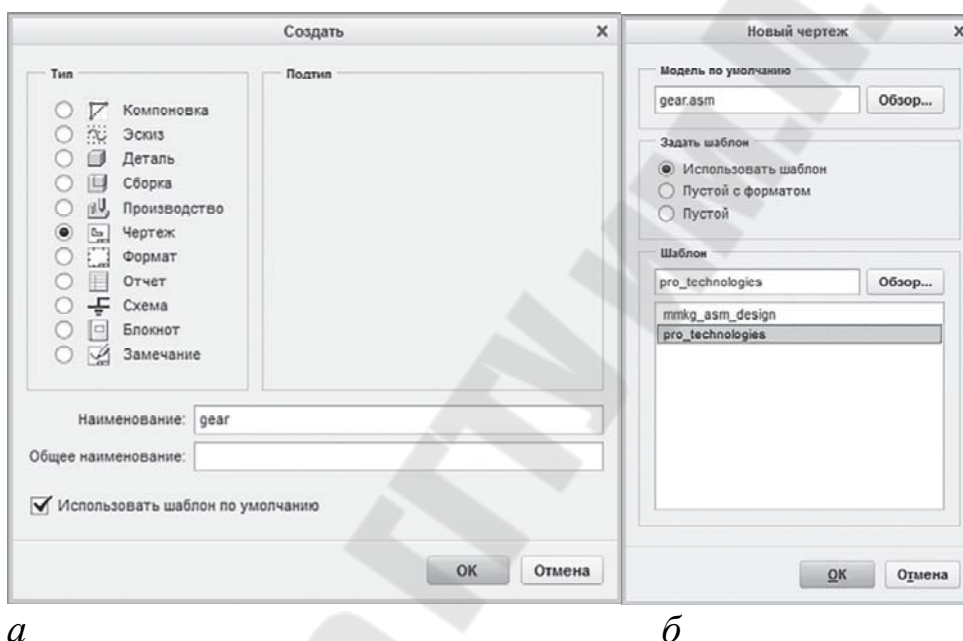




Рис. 5.38. Создание чертежа

В ленте Creo Parametric произошло переключение на вкладку *Компоновка*, а в графическом окне открылся основной вид (в центре) и два вспомогательных (слева и внизу от основного). Назначение вспомогательных видов разберем позже, а начнем работу с основным видом, расположенном в центре (см. рис. 5.49, а).

Нажав ПКМ вызовем контекстное меню и выберем в нем опцию *Настройка листа* (см. рис. 5.39, а). В диалоговом окне *Настройка листа* откройте прокручивающийся список **Формат** и выберите опцию *Обзор...*, расположенную внизу списка. В диалоговом окне *Открыть* (см. рис. 5.49, в) выберите формат **a2.frm** (**Пользовательские форматы > ФОРМАТЫ > A2 > a2.frm**) и нажмите кнопку *Открыть*.

В диалоговом окне *Настройка листа* нажать **ОК**, подтверждая выбор, а затем на запрос  нажать кнопку , оставив пустым поле для текста.

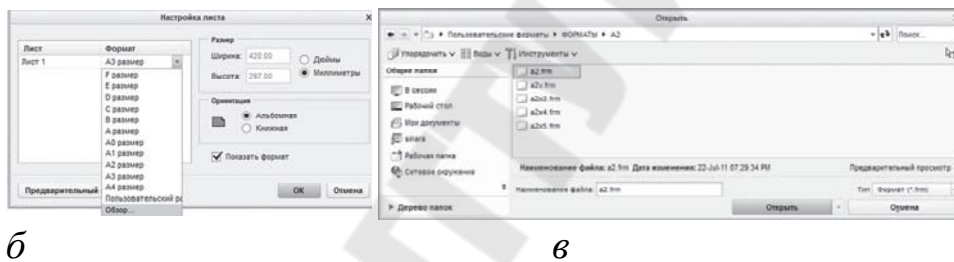
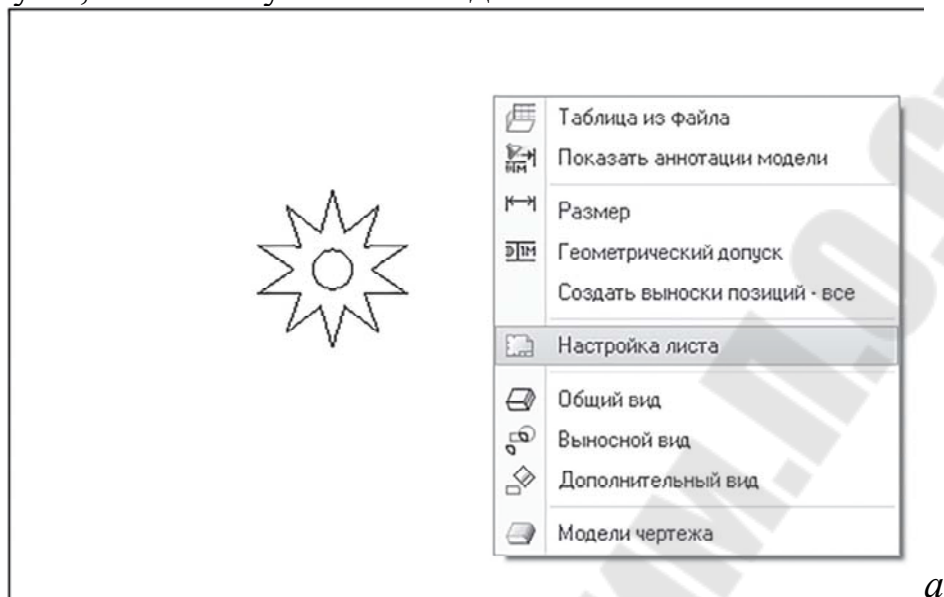


Рис. 5.39. Настройка пространства чертежа

В результате описанных действий основной вид дополнился рам-кой и штампом чертежа, выполненными в соответствии с ГОСТ 2.104– 2006 ЕСКД. На рис. 5.40 представлен фрагмент чертежа.

					Верх		
					С.Е.Р.		
					Лит.	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		0,00	6:1
Разраб.							
Проб.					Лист 1	Листов 1	
Т. контр.					*		
Н. контр.							
Утв.							
Копировал:					Формат: А2		
					Мин. лобовая		

Рис. 5.40. Фрагмент оформления чертежа по ГОСТ 2.104–2006 ЕСКД

Шаг 2. Изменение настроек чертежа. В левой нижней части центрального вида в графическом окне имеется строка настроек чертежа (рис. 5.42). В ней содержится информация об используемом в чертеже масштабе (на рис. 5.41 – масштаб 6:1, который не соответствует требованиям ЕСКД), типе чертежа (в нашем случае – сборочный чертеж), наименование чертежа (GEAR) и используемый формат (размер: А2). Строка настроек не является чисто информативной, а позволяет менять настройки при необходимости.

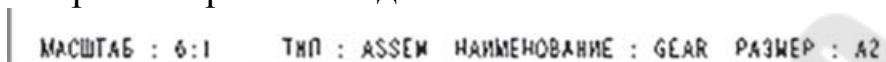


Рис. 5.41. Настройки чертежа

Двойной щелчок ЛКМ по надписи МАСШТАБ позволит изменить принятый по умолчанию масштаб чертежа (рис. 5.42).



Рис. 5.42. Изменение масштаба чертежа

Вводим вместо 6/1 новое значение 20/1 (в обозначении масштаба здесь вместо двоеточия используется косая черта – «слэш»), как показано на рис. 5.42, и завершите изменение кнопкой ✓. Результат на рис. 5.43. Основной вид чертежа может располагаться не в той позиции, которая показана на рис. 5.43. Для приведения своего чертежа в соответствие с рис. можно выделить основной вид (как показано на рис. 5.43) и переместить его в нужное положение, используя технологию DRAG&DROP (перетаскивания: нажать в центре ЛКМ и, не отпуская ее, переместить мышь в нужное место).

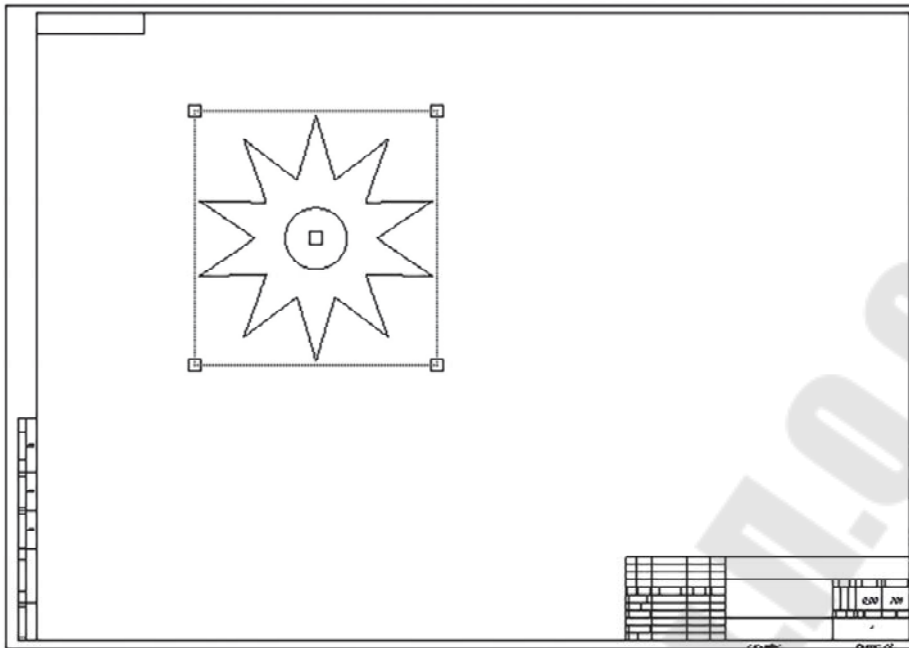


Рис. 5.43. Чертеж с измененными настройками

Шаг 3. Добавление видов. При выделенном виде нажать ПКМ и выбрать в контекстном меню опцию *Вид проекции* (рис. 5.45, а). Щелкнуть ЛКМ ниже существующего вида.

Вновь выделить первоначальный вид, открыть контекстное меню и создать вид справа от существующего. В результате на поле чертежа должны появиться основной вид, вид сверху и вид слева, как показано на рис. 5.44, б.

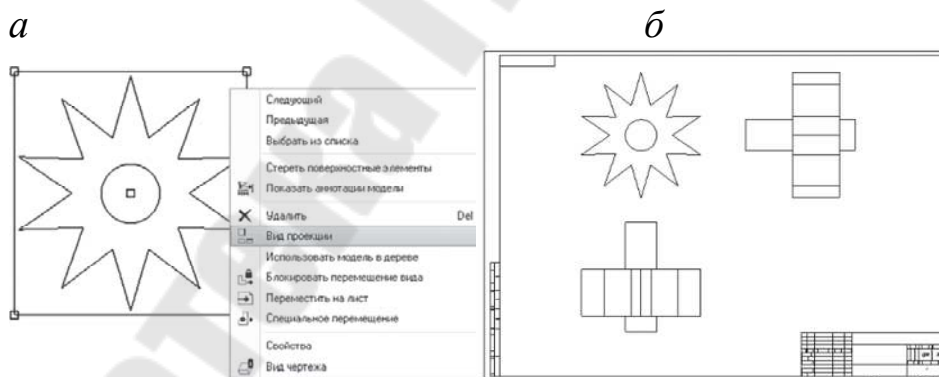
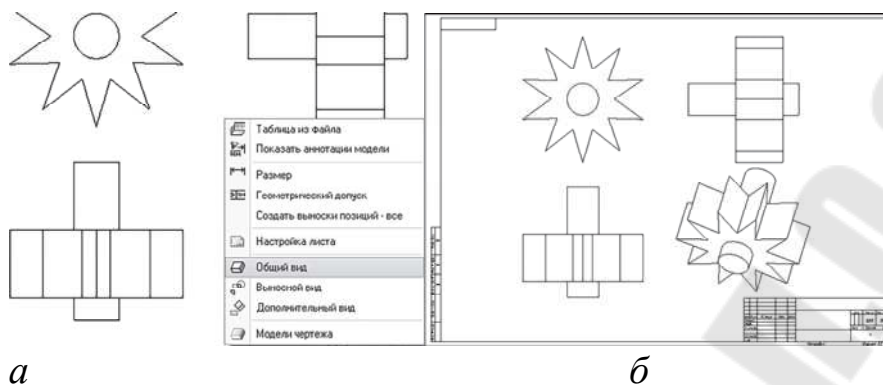


Рис. 5.44. Добавление видов

При необходимости скорректируйте положение видов, используя технологию DRAG&DROP (перетаскивание).

Шаг 4. Добавление изометрического вида. Откройте ПКМ контекстное меню и запустите исполнение команды **Общий**. На утверждение «Нет комбинированного состояния» ответьте **ОК**. Укажите

центральную точку для чертежной проекции и нажмите кнопку **ОК**. Чертеж принял вид, представленный на рис. 5.45, б (при необходимости редактируйте положение видов, используя технологию DRAG&DROP).



а б
Рис. 5.45. Добавление изометрического вида

Шаг 5. Изменение представления видов. На видах сверху и слева добавим невидимые линии. Выделите двойным щелчком ЛКМ необходимый вид. В окне *Вид чертежа* (рис. 5.46) в категории *Показ вида* измените *Стиль показа* на **Скрытые**. Завершите кнопкой **ОК**.

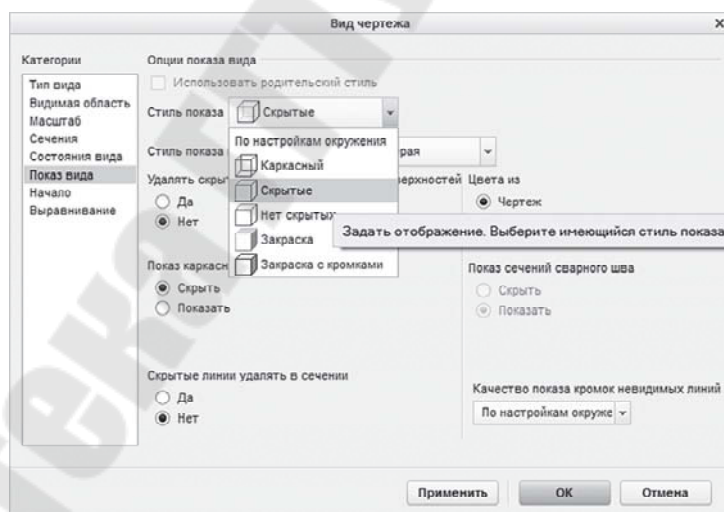


Рис. 5.46. Добавление скрытых линий.

Выполнить указанную процедуру на втором виде. Результат на рис. 5.47. При выводе чертежа на плоттер невидимые линии (показаны на рис. 5.47 серым цветом) будут изображены на бумаге пунктирными линиями в соответствии с ГОСТ 2.303–68 ЕСКД.

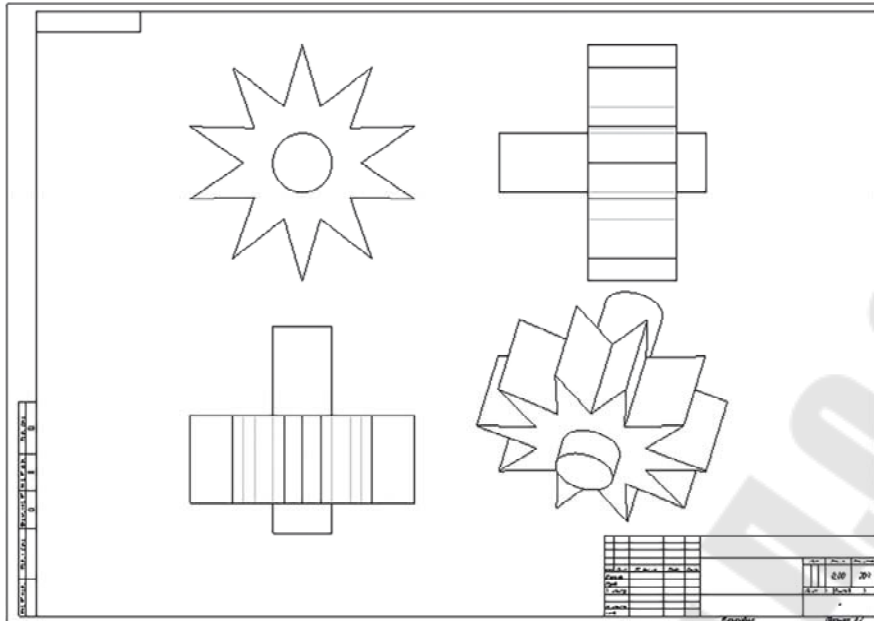



Рис. 5.47. Чертеж с добавленными скрытыми (невидимыми) линиями

Шаг 6. Завершение работы с чертежом. Сохраните файл (**Файл > Сохранить > ОК**). Сохраните файл в формате PDF (**Файл > Сохранить как > Быстрый экспорт (*.pdf) > ОК**). Сохраните файл в формате ZIP (**Файл > Сохранить как > Сохранить копию > Переключитесь в окне *Сохранить копию* на Тип: Zip файл (*.zip) > ОК**). Закройте файл (**Файл > Закрывать**).

Шаг 7. Создание чертежа детали. Начало. Создайте чертеж (). В диалоговом окне *Создать* (см. рис. 5.49, а) следует выбрать атрибуты операции: тип – **Чертеж**; имя – **star (звездочка)**; триггер *Использовать шаблон по умолчанию* – **включен** (); кнопка **ОК**.

В новом диалоговом окне *Новый чертеж* убедиться, что в поле *Модель по умолчанию* – имя файла сборки **srat.prt** (если это не так, нужно найти этот файл, используя кнопку **Обзор**, расположенную справа от этого поля). В списке шаблонов выбрать шаблон **pro_technologies** и нажать кнопку **ОК**.

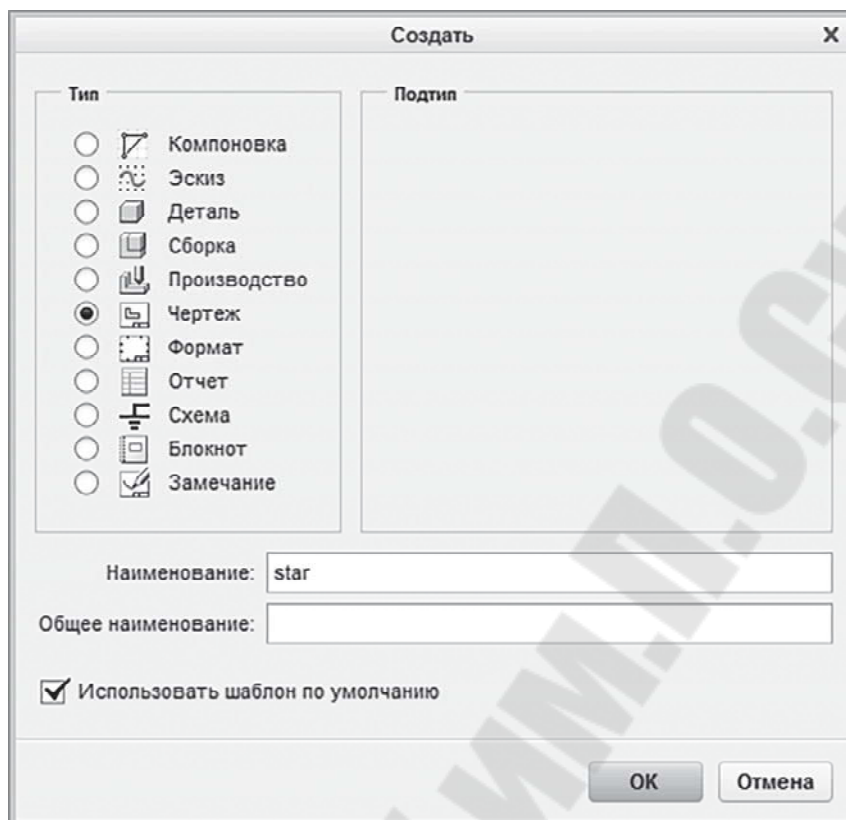



Рис. 5.48. Создание чертежа детали Star

Шаг 8. Настройка листа. Нажав ПКМ, вызовем контекстное меню и выберем в нем опцию *Настройка листа* (см. рис. 5.39, а). В диалоговом окне *Настройка листа* откройте прокручивающийся список *Формат* и выберите опцию *Обзор...*, расположенную внизу списка. В диалоговом окне *Открыть* выбрать формат a4.frm (Пользовательские форматы > ФОРМАТЫ > А4 > a4.frm) и нажать кнопку **Открыть**.

В диалоговом окне *Настройка листа* нажать **ОК**, подтверждая выбор, а затем на запрос  нажать кнопку, оставив пустым поле для текста. На рис. 5.49, б показан результат настройки листа.

Измените масштаб на 10:1 по аналогии с шагом 2 настоящего упражнения, где производилась замена масштаба по умолчанию на масштаб 20:1.

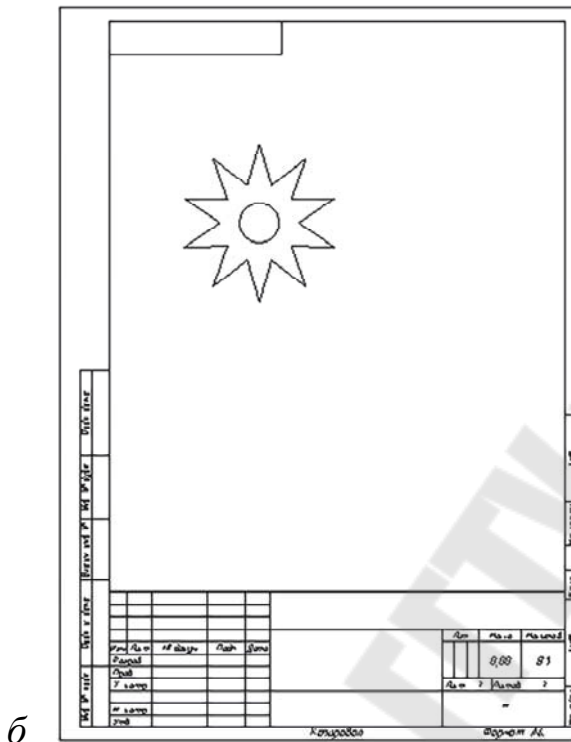
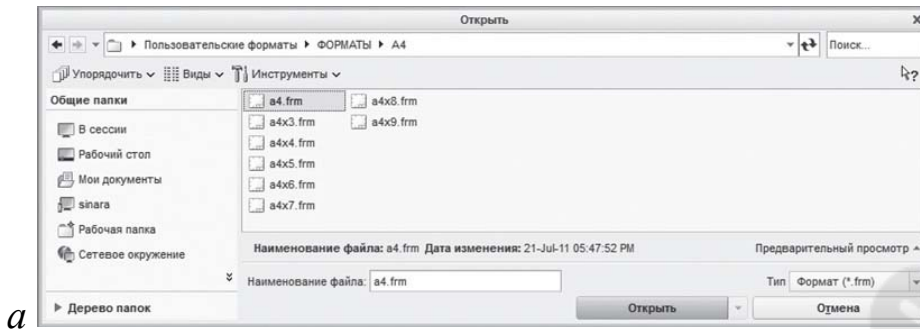


Рис. 5.49. Настройка листа чертежа детали Star

Шаг 9. Добавление видов. При выделенном виде нажать ПКМ и выбрать в контекстном меню опцию *Вид проекции* (рис. 5.50, *а*). Щелкнуть ЛКМ ниже существующего вида.

Вновь выделить первоначальный вид, открыть контекстное меню и создать вид справа от существующего. В результате на поле чертежа должны появиться основной вид, вид сверху и вид слева.

Откройте ПКМ контекстное меню и запустите исполнение команды *Общий вид* (см. рис. 5.45, *а*). На утверждение «Нет комбинированного состояния» ответьте **ОК**. Укажите центральную точку для чертежной проекции и нажмите кнопку **ОК**. Чертеж принял вид, представленный на рис. 5.50, *б*.

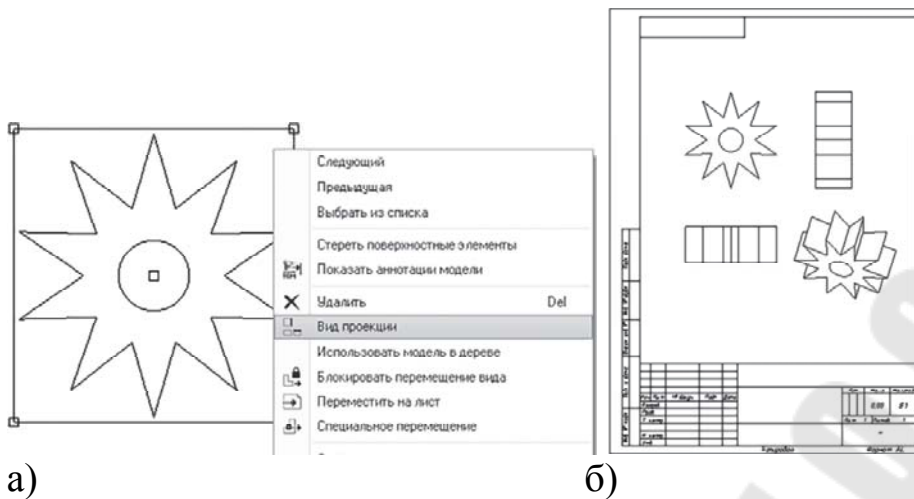


Рис. 5.50. Добавление видов

Шаг 10. Изменение представления видов. Выполните изменение видов по аналогии с шагом 5 настоящего упражнения. Окончательный чертеж детали на рис. 5.51.

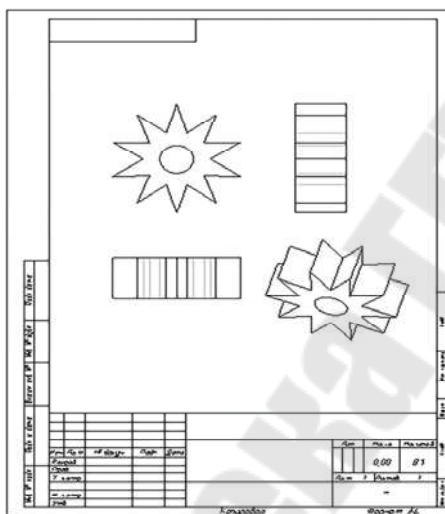


Рис. 5.51. Чертеж детали Star

Шаг 11. Завершение работы с чертежом. Сохраните файл (**Файл > Сохранить > ОК**).

Сохраните файл в формате PDF (**Файл > Сохранить как > Быстрый экспорт (*.pdf) > ОК**).

Сохраните файл в формате ZIP (**Файл > Сохранить как > Сохранить копию > Переключиться в окне Сохранить копию на Тип: Zip файл (*.zip) > ОК**).

Закройте файл (**Файл > Закроить**).

Раздел 6. Параметризация и управление конструкторско-инженерным замыслом

Тема 6.1. Параметризация элементов модели и уравнения

Когда в 1985г. Семен Гейзберг, эмигрант из СССР, бывший доцент Ленинградского университета, основал в США компанию Parametric Technology Corporation (PTC) для разработки машиностроительной CAD (MCAD) - системы Pro/Engineer, он не предполагал, что положенная в ее основу технология параметрического моделирования на основе конструктивных элементов (*parametric feature-based modeling*) будет доминировать на протяжении четверти века и что все ведущие MCAD-системы (CATIA, NX, а также SolidWorks, Inventor и Solid Edge) станут идейными наследниками Pro/Engineer. Мог ли он догадаться, что добившись небывалого коммерческого успеха, PTC неожиданно для всех примет решение принести в жертву святая святых - сам бренд Pro/Engineer.

Аналитики небезосновательно полагают, что это решение PTC прямо связано с недавним поглощением компании CoCreate, являющейся пионером альтернативного подхода - прямого моделирования. Новый бренд (Creo) и новые приложения, разделяющие общий формат данных (Creo Parametric и Creo Direct), теперь отражают видение PTC современного состояния MCAD-рынка - доминирующей технологии на нем больше нет, а значит и «забронзовевший» бренд (Pro/Engineer) уже не нужен.

Самими названиями своих новых приложений PTC подчеркнула наличие двух подходов к твердотельному моделированию - параметрического и прямого, у каждого из которых имеется своя ниша применения. В появлении второго подхода просматривается прямая заслуга CoCreate.

Мало кто слышал о компании CoCreate до того, как в 2007 г. ее приобрела корпорация PTC. К тому времени CoCreate обслуживала потребности пяти тысяч клиентов (среди которых фигурировали такие громкие имена как Fujitsu, HP, Liebherr, NEC, Panasonic, Epson). Компания CoCreate в то время имела за плечами славную историю, уходящую корнями в Отдел механического проектирования (Mechanical Design Division) корпорации Hewlett-Packard. Именно в этом отделе в 1992 г. была разработана система трехмерного моделирования SolidDesigner. В отличие от других известных MCAD-систем

того времени, SolidDesigner (рисунок 7.1) опиралась на технологию динамического моделирования - как альтернативу моделированию на основе истории.

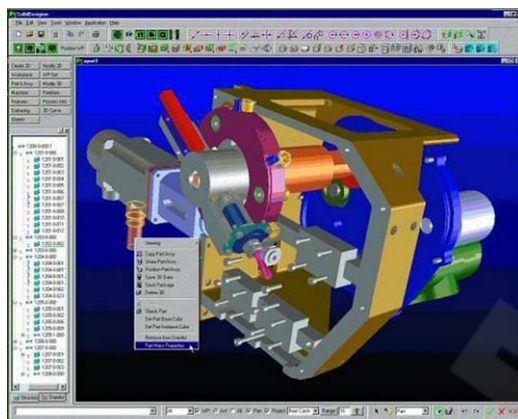


Рис. 6.1. - MCAD-система HP Precision Engineering SolidDesigner – пионер рынка прямого моделирования

Здесь необходимо сделать технологическое отступление, чтобы внести терминологическую ясность, т.к. ранее мы уже использовали четыре термина, относящихся к геометрическому твердотельному моделированию: параметрическое моделирование, прямое моделирование, динамическое моделирование и моделирование на основе истории.

Под *параметрической моделью* логично понимать геометрическую модель с параметрами, изменяя значения которых, можно получать разные варианты модели. Параметрическое моделирование - это фундаментальная концепция САПР, позволяющая существенно сократить затраты на внесение изменений в проект, создание новых модификаций изделий и т.п.

Однако, в силу того, что первые реализации параметрических моделей были основаны на истории построения геометрии, между этими двумя совершенно разными понятиями возникла устойчивая связь. Действительно, *историю построения модели* (т.е. последовательность операций, которые были использованы для создания геометрической формы тела с нуля) легко превратить в параметрическую модель, если с каждой операцией ассоциировать набор параметров. Координаты и типы элементов плоского контура, высота его «смещения», диаметр и форма отверстия являются примерами таких параметров. Изменив их значения и заново «проиграв» (регенерировав) историю построения, можно получить другую геометрию. Парамет-

рические конструктивные элементы Семена Гейзберга в системе Pro/Engineer образовывали дерево, которое автоматически строилось в соответствии с историей создания модели и отражало взаимосвязи между элементами. Позднее такой способ был повторен почти во всех MCAD-системах.

Данный способ параметризации - при всей его простоте и универсальности - имеет серьезные недостатки. Ключевой из них - сложность и непрозрачность для пользователя. Чтобы изменить геометрическую форму, требуется найти в дереве построения нужный конструктивный элемент и понять, значение какого параметра необходимо изменить. При таком подходе не работает фундаментальный принцип пользовательского интерфейса *WYSIWYG* (*What You See Is What You Get* - вы видите ровно то, что получаете в результате), редактируется текстовое или численное значение параметра элемента, а в результате меняется геометрическая форма тела.

Хорошо известно, что для моделей со сложной геометрией история построения может быть весьма длинной, а процесс ее регенерации может занять длительное время, поставив пользователя MCAD в положение ожидающего и заставив его напрасно тратить свое время и нервные клетки. Например, медленная регенерация дерева построения в системе SolidWorks вынуждает пользователей прибегать к ухищрениям - типа «заморозки» регенерации отдельных элементов - с целью ускорения общего процесса.

Другой известный недостаток параметризации на основе истории состоит в том, что решение о том, какие параметры модели можно менять, принимается в процессе ее создания. Если потом вам вдруг потребуется поменять какой-то параметр, который отсутствует в дереве построения, то решение для вас будет непростым - либо перестроить модель с нуля, либо применять сложные оптимизационные алгоритмы, которые путем варьирования значений определяющих параметров пытаются подобрать желаемое значение требуемого параметра.

Этот недостаток отражает общую проблему **процедурного подхода** к параметризации, разновидностью которого является метод регенерации истории построения. Процедурный подход предполагает, что вы заранее делите все параметры модели на входные и выходные. Изменять можно только значения параметров первой группы, а значения выходных рассчитываются в соответствии с predeterminedными процедурами, формулами, историей построения и т.п.

Наконец, еще одной ключевой проблемой параметризации на основе истории построений является невозможность применения этой технологии при работе с разнородными (*multi-CAD*) унаследованными (*legacy*) данными. Дело в том, что при трансляции модели из одного формата в другой история построения обычно теряется - транслируется только сама геометрия, которая в таком случае называется «немой» (*dumb*). Некоторые дорогостоящие трансляторы способны конвертировать конструктивные элементы из одной системы в другую, но они не являются панацеей, т.к. номенклатура конструктивных элементов в каждой системе своя, и трансляция один-в-один невозможна в принципе. То же самое можно сказать и о методах автоматического распознавания конструктивных элементов (*automated feature recognition*) в «немой» геометрии: они работают лишь в простейших случаях, и общей проблемы не решают.

Все отмеченные выше недостатки параметризации на основе истории построений были успешно преодолены в системе динамического моделирования Solid Designer, которая впервые дала пользователю средства прямой манипуляции элементами геометрической модели в трехмерном пространстве. Это стало возможным в первую очередь благодаря ядру твердотельного моделирования ACIS, которое первым лицензировала у Spatial Tehnology в 1989 г. как раз HP.

Ядро ACIS моделирует геометрию твердого тела посредством *граничного представления* (BRep) и реализует булевы операции между телами (которые служат основой для процедурных конструктивных элементов). Булевы операции глобальны в том смысле, что объединение, пересечение или разность двух тел требует трудоемких действий над их полными граничными структурами (собственно, в этом-то и кроется проблема с производительностью параметрических систем на основе истории построения). Однако, Spatial Tehnology в своем ядре реализовала также так называемые *локальные операции*, для выполнения которых достаточно работать лишь с некоторой окрестностью границы тела (рис. 6.2).

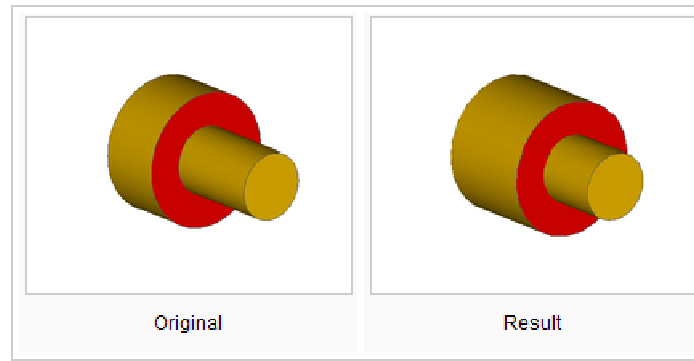


Рис. 6.2.- Локальные операции в ACIS – основа для эффективной реализации прямого моделирования

Во многих случаях локальные операции не требуют изменения топологии модели (числа и связности ее граней, ребер и вершин), а значит, могут выполняться весьма эффективно.

Динамическое моделирование позволяет пользователю выбрать в модели одну или несколько граней и перенести или повернуть их. Система SolidDesigner помогала пользователю автоматизировать выбор смежных граней, образующих один конструктивный элемент (карман, выступ или отверстие). Система позволяла также скопировать конструктивный элемент с одной грани тела на другую.

Параметрический контроль над геометрией осуществлялся с помощью, так называемых, *управляющих значений*. Пользователь мог задать в модели одну или несколько *3D-меток*, специфицирующих требуемые расстояния и углы между гранями, а система автоматически выполняла соответствующие локальные операции, чтобы удовлетворить эти метки по очереди.

В 1996 г. HP под напором своих заказчиков, многие из которых разрабатывали собственные MCAD-системы, выделила свой отдел механического проектирования в отдельную компанию CoCreate, в 2000 продала ее инвестиционным фондам, а семь лет спустя она попала под контроль PTC (прямой наследник продукта SolidDesigner теперь известен под именем Creo Elements/Direct, а наработанные идеи реализуются в новом продукте Creo Direct, являющимся - как и Creo Parametric - ничем иным, как реинкарнацией Pro/Engineer).

Подход, предложенный компанией CoCreate, получил название *прямое моделирование* (термин динамическое моделирование так и не прижился). Прямое моделирование геометрии позволяет модифицировать ее независимо от истории построения. При этом не стоит

путать способ моделирования геометрии (с деревом построения или без такового) и способ ее редактирования.

Прямое редактирование - это и есть перенос/вращение/копирование/удаление одной или нескольких граней тела (например, образующих один конструктивный элемент). А вот использование управляющих размеров или конструктивных элементов - это уже косвенное редактирование. Прямое редактирование типично для систем прямого моделирования, косвенное - для систем на основе истории построения. Однако в том же SolidDesigner присутствовали оба вида редактирования.

А разработчики IRONCAD впервые показали прямое редактирование в рамках моделирования на основе истории построения.

Повторное открытие прямого моделирования

Все изменилось в 2007 г. В декабре того года PTC объявила о своей сделке с CoCreate, а в апреле вышла первая версия абсолютно новой системы прямого моделирования SpaceClaim (рис. 6.3). Одноименная компания, созданная бывшими сотрудниками PTC Блейком Куртером и Дэвидом Тейлором, громко прозвучала на рынке, когда ее директором был назначен легенда отрасли Майкл Пейн. Сооснователь PTC и SolidWorks, он помог новой компании привлечь внимание серьезных инвесторов и набрать солидный портфель клиентов. Настоящим успехом стало заключение соглашений с крупнейшим в мире производителем металлорежущих станков TRUMPF и ведущим поставщиком ПО для инженерного анализа ANSYS. Тем самым SpaceClaim четко обозначила две ниши, где прямое моделирование может приносить существенную пользу: подготовка геометрических моделей для CAM и CAE. Третьей нишей стало концептуальное проектирование. В принципе, SpaceClaim не предложил ничего нового, чего не было бы в SolidDesigner: то же ядро (ACIS), та же концепция «умного выбора» граней (smart selection), те же операции прямого и косвенного моделирования. Однако, поскольку система была с нуля разработана для платформы Windows, она выглядела не в пример современнее CoCreate, а маркетингового шума произвела больше в разы: каждый год компания SpaceClaim рапортовала о трехкратном росте клиентской базы (не раскрывая, впрочем, абсолютных показателей).

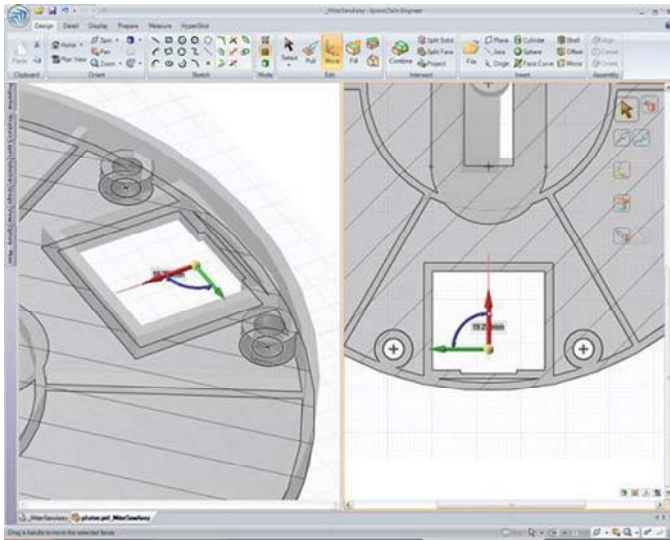


Рис. 6.3. Катализатор современного прямого моделирования – система SpaceClaim

Год спустя Siemens PLM Software объявила о своей синхронной технологии (признавшись, что она разрабатывалась еще в те времена, когда компания носила имя Unigraphics).

Синхронная технология - метод трехмерного параметрического моделирования, анонсированный компанией Siemens PLM Software в 2008 г. Синхронная технология комбинирует возможности параметрического моделирования на основе конструктивных элементов со средствами прямого редактирования элементов геометрической формы. Синхронная технология возможна благодаря использованию вариационного подхода к проектированию изделия, состоящего в связывании граничных элементов геометрической модели логическими и параметрическими ограничениями - как заданными пользователем, так и автоматически распознанными системой CAD.

Синхронная технология основана на возможностях ядра геометрического моделирования Parasolid и вариационного геометрического решателя DCM и воплощена в последних версиях продуктов Solid Edge и NX. В 2009 г. Dassault Systemes выпустила CATIA V6 LiveShape, а Autodesk - Inventor Fusion.

Это были приложения для прямого моделирования, совместимые по формату данных с системами на основе истории построения.

Поскольку LiveShape толком никто не видел (на просторах интернета нет ни одного сколь-нибудь исчерпывающего обзора возможностей этого приложения), то будем говорить далее лишь о подходах Siemens и Autodesk.

Вариационное прямое моделирование

Когда мы говорим о недостатках процедурного подхода к параметризации (который состоит в априорном разделе параметров на входные и выходные), мы забываем сказать о давно известной альтернативе, называемой ***вариационным моделированием***. В рамках вариационного моделирования параметрические связи в модели задаются декларативно - перечислением ограничений, связывающих ее элементы. При этом ограничения (в отличие от процедур, формул и истории построения) не являются направленными - они не определяют, какие из связанных параметров являются входными, а какие выходными. Тем самым ограничения легко могут образовывать циклические зависимости между параметрами (например, $x=2*y$ и $y=x/2$), а, значит, требуется специальный итеративный решатель, который возьмет и решит скопом все заданные ограничения, вычислив новые значения для всех входящих в них параметров.

Подобные решатели хорошо известны. Одними из первых коммерческих продуктов стали решатели 2D/3D DCM, разрабатываемые компанией D-Cubed (ныне часть Siemens PLM Software) с конца 1980-х г.г. Сейчас они конкурируют на рынке с компонентами LGS 2D/3D, разрабатываемыми в российской компании ЛЕДАС с 2001г.

Традиционными областями применений таких решателей были подсистемы двумерного параметрического черчения и трехмерного проектирования сборок. Однако, решатели - в комбинации с эффективным ядром твердотельного моделирования - могут работать и с BRep-структурами, открывая возможность параметрического контроля твердотельной геометрии.

К 2008 г. компания ЛЕДАС выпустила первую, ограниченную в возможностях реализацию вариационного прямого моделирования для системы Google SketchUp, в 2009 начала более продвинутую разработку для Rhino (первая коммерческая версия выпущена в апреле 2011 г. под названием RhinoWorks), а в 2010-2011 г. заключила контракты на разработку аналогичной функциональности в Bricscad и КОМПАС-3D.

Самую эффективную на сегодняшний момент реализацию технологии вариационного прямого моделирования можно наблюдать в Bricscad (рис. 6.4), и немалая заслуга здесь принадлежит ядру ACIS – тому самому, что было положено в основу SolidDesigner и SpaceClaim.

Важной частью предложенной технологии является возможность избежать ручной спецификации большого количества ограничений, которые гарантировали бы сохранение *конструктивной концепции (design intent)* проектируемого изделия. В системах прямого моделирования эту концепцию легко потерять. Например, если вы возьметесь редактировать модель стола путем вращения верхней грани его столешницы (чтобы сделать столешницу наклонной к уровню пола), то, скорее всего, будете неприятно удивлены результатом.

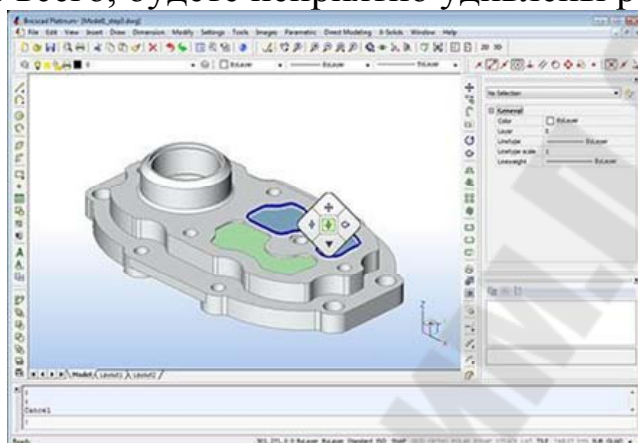


Рис. 6.4. Вариационное прямое моделирование в Bricscad V12

Для корректной модификации такой модели требуется одновременно вращать не только верхнюю, но и нижнюю, и боковые грани столешницы, чтобы сохранить их взаимную параллельность и перпендикулярность соответственно. В системах SolidDesigner и SpaceClaim такой функционал обеспечивается за счет применения шаблонов, позволяющих выбрать сразу несколько граней в модели (а в системе TopSolid грани приходится выбирать вручную, что существенно усложняет выполнение операций прямого редактирования). Однако мульти-выбор для сложных моделей может оказаться неэффективным и несравнимым по мощи с распознаванием геометрических ограничений.

Тема 6.2. Создание и управление слоями

Синхронная технология

То, что компания Siemens PLM Software явила миру под названием синхронной технологии, на самом деле было известно специалистам и раньше. В книге «Parametric and Feature-Based CAD/CAM» Джамии Шах и Марти Мянтыля описывают два подхода к определе-

нию конструктивных элементов - *процедурный* и *декларативный*. В рамках *процедурного* подхода задается процедура построения конструктивного элемента – эта же процедура работает и при изменении пользователем значений его параметров - элемент просто строится заново с помощью булевых операций внутри геометрического ядра.

Декларативный подход предполагает отдельные спецификации для создания и редактирования элемента. Если создание по-прежнему выполняется с помощью глобальных функций ядра, то редактирование происходит путем локального изменения границы тела после решения геометрических и размерных ограничений, определяющих конструктивный элемент.

Например, элемент «вытянутый профиль» можно определить заданием ограничений перпендикулярности между плоскостью профиля и боковыми гранями, образованными в результате его вытягивания, а также ограничением расстояния между плоскостью профиля и вытянутой гранью. Такая декларативная спецификация конструктивных элементов позволяет применить к модели операции прямого редактирования, т.е. трансформации граней тела. В этом случае каждая трансформация выполняется динамически с одновременным удовлетворением всех определяющих модель ограничений. В результате после каждой трансформации все ограничения остаются удовлетворенными, а это значит, что элементы модели сохранили свою конструктивную концепцию.

Комбинируя возможности ядра геометрического моделирования Parasolid и решателя геометрических ограничений 3D DCM, специалисты компании Siemens PLM Software реализовали в Solid Edge (рис. 6.5) так называемые синхронные (декларативно заданные с помощью ограничений) конструктивные элементы, предоставив своим пользователям выбор: либо сразу проектировать свои модели с использованием синхронных элементов, или строить гибридные модели с деревом построения, включающим как классические процедурные (*упорядоченные* в терминологии Siemens), так и новые синхронные элементы.

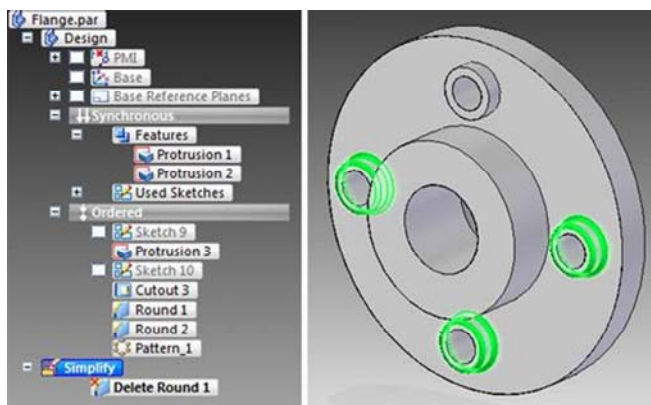


Рис. 6.5. Синхронная технология в Solid Edge

Комбинация прямого моделирования с деревом построения

Компании Autodesk и PTC предложили своим пользователям другой подход, состоящий в том, что прямое моделирование геометрии осуществляется в отдельных приложениях (Inventor Fusion и Creo Direct соответственно), где пользователи применяют к модели операции прямого и косвенного (с помощью управляющих размеров) редактирования, не имея доступа к дереву ее построения. Но затем та же самая модель может быть загружена в «классическое» приложение на основе истории построения (Inventor и Creo Parametric), где изменения, сделанные с ней в системе прямого моделирования, могут быть проинтегрированы в ее дерево построения.

PTC применяет в этом месте довольно бесхитростный подход, дописывая псевдо-элементы типа MoveFace и EditRound к концу дерева построения, а Autodesk реализовала довольно хитроумный менеджер изменений, который способен перевести некоторые операции прямого редактирования в изменение параметров конструктивных элементов (но в общем случае скатываясь к тому же MoveFace).

Интересно, что Autodesk в рамках Inventor Fusion и Autodesk 123D реализовала еще и простенький решатель ограничений, что сделало эти приложения немного похожими на разрабатываемые компанией ЛЕДАС – за исключением того, что в продуктах Autodesk отсутствует модуль автоматического распознавания ограничений, а сама номенклатура ограничений существенно беднее. Однако, не вызывает сомнений, что этот функционал будет нарастать по мере выпуска новых версий.

Редактирование импортированной геометрии

Подходы компаний Siemens, Autodesk и PTC нацелены прежде всего на то, чтобы дать пользователям их «классических» приложений возможности прямого моделирования.

Вернемся, однако, к еще одной проблеме моделирования на основе истории построений: работе с разнородными и унаследованными данными. Необходимость работы с такими данными не подлежит никакому сомнению: согласно недавнему опросу 82% опрошенных проектных подразделений используют в своей работе три, и более форматов данных САД, а 42% - более пяти. Причины тому (рис. 6.6) вполне объективны: необходимость тесной кооперации со смежниками и OEM-поставщиками, долгие жизненные циклы проектируемых изделий (превосходящие жизненные циклы ПО), исторические причины развития бизнеса.



Рис. 6.6. Причины, вынуждающие проектировщиков работать с разнородными данными

Главной проблемой при работе с разнородными данными сами опрошенные назвали потерю интеллектуальности, присущей исходной модели в той системе, где она была создана. В «чужой» системе теряется история построения модели, теряются параметрические связи между ее элементами. Именно в этом месте родился термин «немая» геометрия, который метко объясняет суть проблемы: геометрия есть, но «рассказать» о своей конструктивной концепции она ничего не может.

Системы прямого моделирования научили «немую» геометрию «говорить», но разговор получается неполноценным: как гарантировать, что в процессе редактирования не потеряется заложенная в модель конструктивная концепция? Ответ - в методах автоматического распознавания геометрических ограничений в граничной модели. Если две плоских грани тела расположены параллельно или перпендикулярно друг другу, такое положение скорее всего не случайно. Ви-

димо, они должны оставаться параллельными (перпендикулярными) при любой операции редактирования модели (за исключением того случая, когда пользователь захочет явно задать другой угол между этими гранями). Аналогично можно сказать про отверстия равного диаметра, про карманы одинаковой глубины, про различные виды симметрии модели и т.п. Все это можно распознать и сохранить.

Распознавание ограничений не в пример легче распознавания конструктивных элементов или реконструкции дерева построения, ведь возможные геометрические соотношения легко проверить простым перебором граничных элементов. Именно в этом видится ключ к интеллектуальности систем прямого моделирования. И конечно возможности добавления к «немой» геометрии пользовательских спецификаций (будь то распознанные конструктивные элементы или ограничения) существенно помогают обогатить ее конструктивную концепцию.

Недостатки прямого моделирования

Ахиллесовой пятой всех современных систем прямого моделирования все еще остается редактирование сложных NURBS-поверхностей (рис. 6.7). Одно дело - распознать в модели с отсутствующей историей построения плоские, цилиндрические, сферические, конические, торические грани. Другое дело - понять, что данная грань является результатом применения операций *sweep* (заметания плоского контура при движении вдоль заданной кривой), *loft* (построение тела по его плоским сечениям), *blend* (гладкого сопряжения двух поверхностей) и т.п.

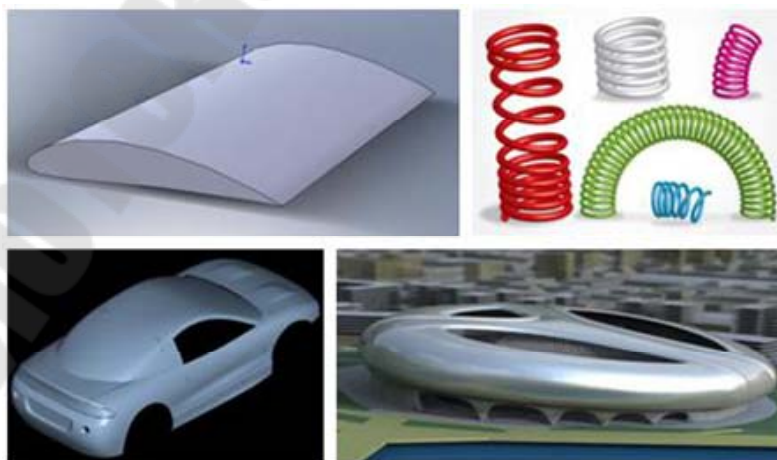


Рис. 6.7. Редактирование сложных NURBS-поверхностей – вызов для современных систем прямого моделирования

Тема 6.3. Отношения «родитель-потомок» между элементами, порядок построения модели. Управление конструкторским замыслом

Программное средство сквозного проектирования и производства верхнего уровня PTC Creo Parametric 7.0 (Parametric Technology Corporation (PTC), США) может удовлетворить требования производства к функциональной полноте. PTC Creo Parametric позволяет быстро создавать, редактировать и ориентировать модель с помощью интуитивного, Windows - стилизованного интерфейса. С помощью таких инструментов интерфейса, как **Навигатор папок** и **Web-браузер**, можно быстро находить, предварительно просматривать и загружать модели, а также непосредственно в среде PTC Creo Parametric получать доступ к Web-ресурсам и иметь возможность для совместной удаленной работы с другими инженерами.

PTC Creo Parametric – мощное CAD/CAM/CAE-решение для твердотельного, поверхностного и комбинированного моделирования, используемое для создания и анализа 3D-моделей деталей и сборок. В процессе проектирования деталей могут быть задействованы также и другие модули PTC Creo Parametric, например, чертежный модуль, модуль маршрутизации проводки, модуль листового железа, модуль проектирования трубопроводов, технологические модули и т. д. (более подробный перечень модулей PTC Creo Parametric приведен в заключении настоящего пособия). Базовый курс моделирования в PTC Creo Parametric может быть описан как последовательность изучения, состоящая из шести фундаментальных этапов:

- знакомство с интерфейсом Creo Parametric и практический обзор возможностей Creo Parametric в технике создания моделей деталей, сборки и чертежей простейшего машиностроительного устройства;
- предварительная подготовка к проектированию модели изделия и работа в режиме создания и редактирования 2D-эскизов, являющихся основой для реализации замысла конструктора;
- техника создания и редактирования вспомогательных **Опорных элементов** – плоскостей, осей, точек и координатных систем;
- создание твердотельных моделей новых деталей;
- создание нового сборочного изделия путем сборки моделей отдельных деталей;
- создание конструкторской документации: детализированных и

сборочных чертежей, спецификаций; вывод на печать чертежей, а также экспорт чертежей, 3D-моделей деталей и сборок.

Практический обзор возможностей Creo Parametric в технике создания моделей деталей, сборки и чертежей простейшего машиностроительного устройства, представленный в первой главе учебного пособия, призван заинтересовать читателя возможностями быстрого и точного конструирования изделия в среде Creo Parametric. В течение короткого времени пользователь, не имеющий подготовки в твердотельном трехмерном моделировании, сможет самостоятельно создать две простые детали, собрать из них сборочное изделие и распечатать чертежи деталей и сборки. Первая лабораторная работа должна позволить понять основные преимущества трехмерного моделирования по сравнению с выполнением двумерных чертежей в AutoCAD и Компас.

Предварительная подготовка к проектированию модели изделия. Очень часто перед проектированием модели детали (изделия) необходимо получить информацию о компонентах сборки, которые будут находиться в непосредственной близости от нее. Следовательно, появится необходимость открыть и изучить сопрягаемые детали до того, как начнете проектирование новой. В некоторых компаниях эта подготовительная стадия может по времени совпасть с процессом проектирования новой детали или может вовсе не случиться. В любом случае, знания о сопряженных деталях могут помочь при проектировании модели новой детали.

Создание твердотельных моделей новых деталей. Твердотельная модель новой детали, соответствующая замыслу конструктора, создается на основе концепции создания геометрии, базирующейся на фичерах (конструктивных элементах). Модель детали позволяет представить внешний вид детали до того, как она будет изготовлена. Модель позволяет:

- предоставить информацию о массовых и инерционных характеристиках детали;
- изменять параметры модели для достижения наилучших характеристик детали;
- визуально представить, как будет выглядеть деталь после ее изготовления.

Создание нового сборочного изделия путем сборки моделей отдельных деталей. Изделие может состоять из одной или нескольких деталей. Детали в сборке расположены и собраны относительно

друг друга так же, как они находятся в реальном изделии. Модель сборочного изделия может быть использована для:

- проверки прилегания деталей;
- проверки пересечений деталей;
- создания спецификации изделия;
- вычисления общего веса сборочного изделия.

Создание конструкторской документации. После создания модели чертежа или сборки часто необходимо создать документацию на них в виде двумерных чертежей. Чертеж обычно содержит различные виды детали или сборки, размеры и титульный блок. На чертеже также могут быть рас положены пояснения, таблицы, технические условия и другая дополнительная конструкторская информация. Выпуск чертежей при создании моделей не является обязательным требованием во всех компаниях. Предприятия, сохранившие технологии производства, основанные на использовании чертежей на бумажном носителе, вынуждены прикладывать значительные усилия по созданию чертежной документации и обеспечению выполнения требований стандартов при их создании.

Современные промышленные предприятия, работающие в условиях безбумажных технологий, не испытывают потребности в двумерных чертежах. Инженер-конструктор, работающий на предприятии, использующем для совместной работы PLM-среду Windchill, завершает создание конструкторской документации с помощью операций *Выгрузить* или *Сдать на хранение*. Операция *Выгрузить* производит сохранение данных в рабочую область пользователя на сервере Windchill. Данные недоступны для других пользователей, но доступны данному пользователю с любого рабочего места PTC Creo Parametric, на котором выполнена процедура регистрации сервера Windchill. Операция *Сдать на хранение* сохраняет данные в общих контейнерах, предоставляя доступ к ним другим пользователям.

Фундаментальные основы базового курса моделирования в PTC Creo Parametric можно представить в виде следующих шести постулатов:

- концепция твердотельного моделирования;
- концепция поэлементного моделирования (геометрия, основанная на конструктивных элементах);
- отношение Родитель/Потомок;
- концепция параметризации;
- концепция ассоциативности всех основных объектов проекти-

рования;

- концепция модель-ориентированного проектирования.

Концепция твердотельного моделирования в РТС Creo Parametric заключается в возможности создания реалистичных представлений трехмерных моделей (3D-моделей) деталей и сборочных изделий. Эти виртуальные модели могут использоваться для визуализации и анализа создаваемой конструкции, не дожидаясь этапа изготовления прототипа (как правило, чрезвычайно дорогостоящего).

Модели включают в себе такие характеристики, как масса, объем, центр тяжести, площадь поверхности и т. д. Все свойства модели обновляются при добавлении или удалении каких-либо конструкторских элементов. Например, если в модели добавляется отверстие, масса модели уменьшается. Дополнительно, твердотельные модели предоставляют возможности анализа допусков и проверку зазоров/натягов при включении детали в сборку. На рис. 1 представлена иллюстрация, поясняющая концепцию твердотельного моделирования в Creo Parametric: модели трех различных деталей, созданные в методологии трехмерного твердотельного моделирования, представленные на рис. 6.8, *а* собраны в сборку, представляющую машиностроительное изделие, показанное на рис. 6.8, *б*.



Рис. 6.8. Создание трехмерных моделей деталей (*а*) и сборок (*б*)

Концепция поэлементного моделирования. РТС Creo Parametric – это инструмент разработки изделия, основанный на конструктивных элементах. Геометрия модели состоит из блоков, подобно зданию, состоящему из кирпичиков. Каждый такой «кирпичик» представляет собой конструктивный элемент. Это справедливо как для деталей, так и для

сборок, только сборка, в первую очередь, будет состоять из компонентов (деталей и подсборок). Конструктивные элементы имеют, как правило, простую для понимания геометрию, но по мере добавления в модель все вместе они формируют сложные детали и сборки. Каждый новый элемент опирается на элемент, созданный ранее, он может ссылаться сразу на несколько предшествующих конструктивных элементов.

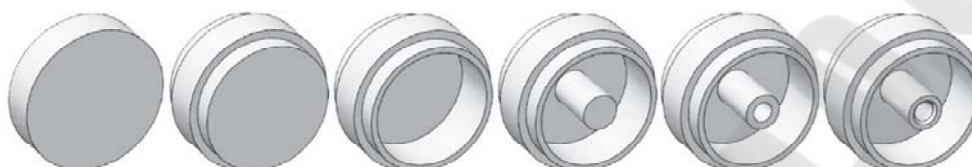


Рис. 6.9. Концепция поэлементного моделирования

На рис. 6.9 мы видим первые шесть этапов создания колеса, иллюстрирующие концепцию поэлементного моделирования:

- на первом этапе создается элемент **ВЫТЯГИВАНИЕ**, который формирует первоначальную форму и размеры модели;
- на втором этапе с помощью дополнительного вытягивания добавляется материал в середине модели;
- третье **ВЫТЯГИВАНИЕ** удаляет материал из средней части модели;
- четвертое **ВЫТЯГИВАНИЕ** создает ступицу внутри модели;
- далее в предыдущем конструктивном элементе создается осное отверстие;
- и, наконец, на ребре отверстия создается фаска.

Отношение Родитель/Потомок

Поскольку твердотельное моделирование представляет собой процесс постепенного создания все новых и новых конструктивных элементов (кумулятивный процесс), некоторые функции предшествуют другим. Последующие конструктивные элементы опираются на ранее созданные элементы, используя их в качестве размерных и геометрических ссылок. Такие отношения между предшествующими и последующими конструктивными элементами называют родительскими и дочерними отношениями или отношениями Родитель/Потомок (рис. 6.10). Так же, как в семье, дети зависят от родителей, и в твердотельном моделировании элементы-родители могут существовать без потомков, но потомки не могут существовать без

своих родителей.

В процессе проектирования модели в РТС Creo Parametric эти отношения между элементами создаются постоянно. В сборке отношения Родитель/Потомок справедливы и для компонентов. Для использования всех преимуществ отношения Родитель/Потомок необходимо правильно им управлять. При создании нового конструктивного элемента любые уже существующие элементы, на которые ссылается создаваемый объект, становятся его Родителями. Далее это выражается в том, что изменение родительского элемента повлечет за собой изменения объектов-потомков, ссылающихся на него.

Концепция параметризации заключается в широком использовании параметрических связей между геометрическими размерами, определении зависимостей между параметрами электронной модели. Параметрические связи могут быть наложены на взаимное расположение отдельных конструктивных элементов (или на их размеры) либо на детали, входящие в состав сборки. Параметры могут быть связаны между собой математическими или логическими взаимосвязями, задание параметров и их редактирование возможны непосредственно в дереве построения модели детали или сборки.

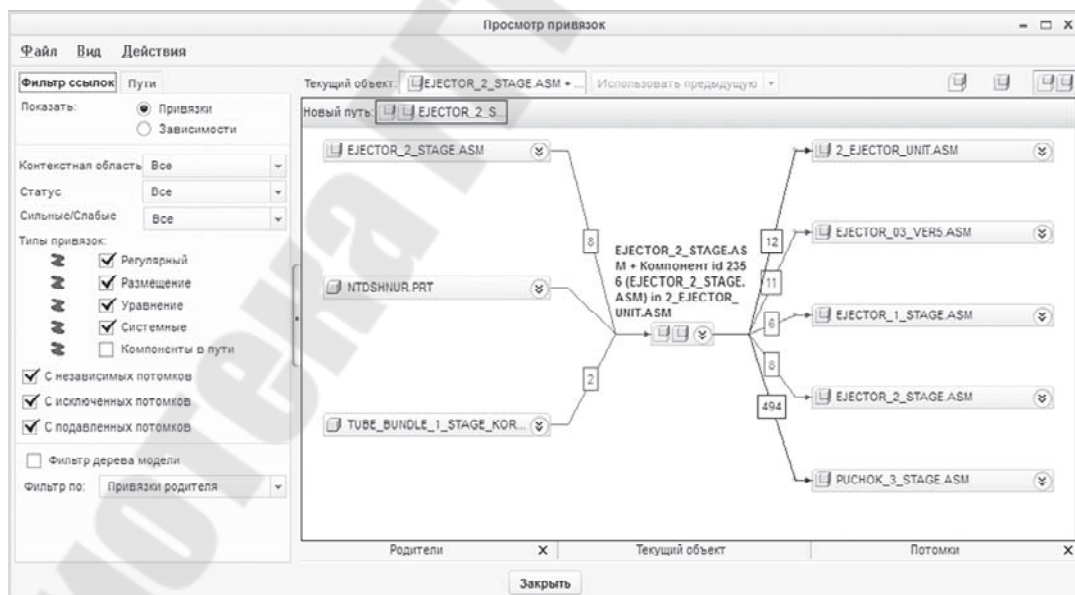


Рис. 6.10. Отношения Родитель/Потомок

Важное значение имеет порядок создания конструктивных элементов. Если задано, что грань конструктивного элемента параллельна опорной плоскости (рис. 6.11), то заданное взаимное расположение будет сохраняться при модификации конструкции.

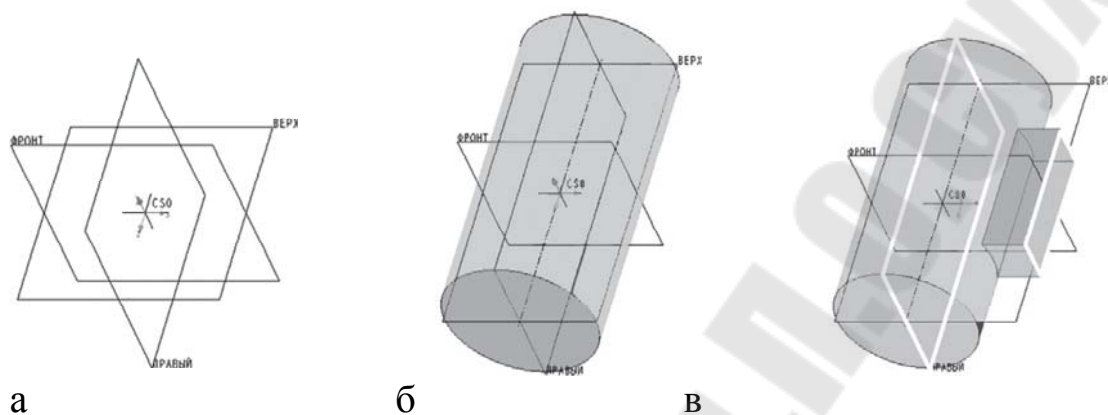


Рис. 6.11. Концепция параметризации

Концепция ассоциативности всех основных объектов проектирования. РТС Creo Parametric – двунаправленно ассоциативный инструмент разработки изделия. Ассоциативность означает, что все изменения, внесенные в объект в любом режиме работы Creo (например, в режиме 3D-модели), автоматически отражаются во всех связанных с ним режимах (чертеж, сборка, технология и т. д.). Двунаправленная ассоциативность означает, что не только изменения в модели вызывают изменения в чертеже детали и сборке, но и изменения в чертеже вызывают соответствующие изменения как в модели детали, так и в сборке. Такая ассоциативность между различными представлениями (рис. 6.12) возможна потому, что деталь, представленная чертежом, не скопирована в чертеж, а скорее ассоциативно связана с чертежом. Аналогично, сборка – это не большой файл, содержащий копии каждой детали, а скорее файл, содержащий ассоциативные связи к каждой модели деталей, используемых в сборке

тежа совместно с моделью, на которую ссылается чертеж. Для работы со сборкой необходимы наличие файла сборки и все модели, используемые в ней.

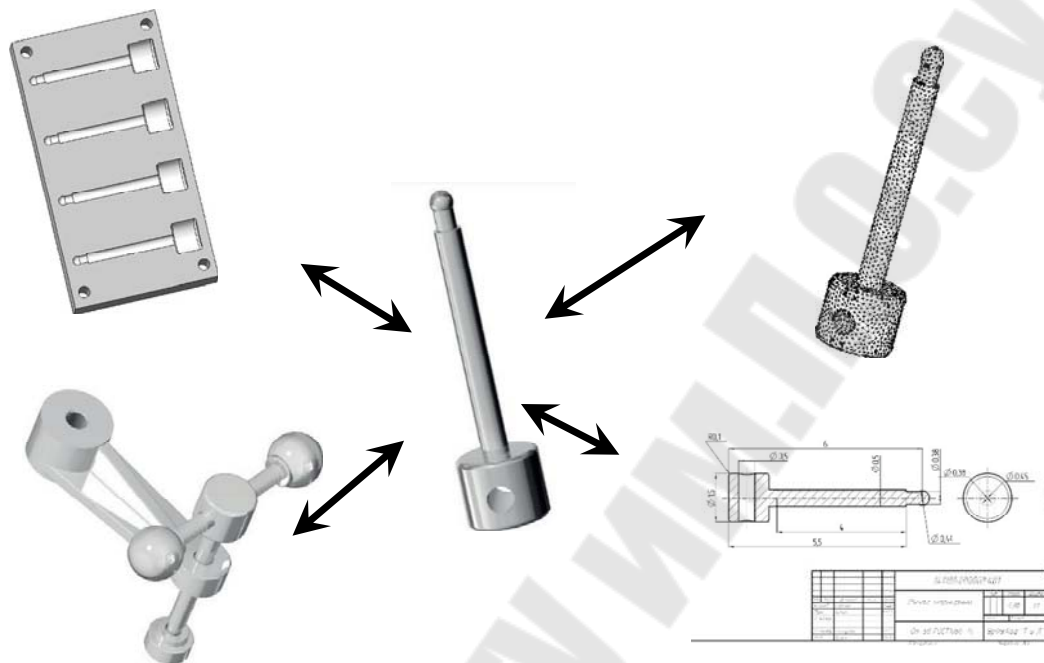


Рис. 6.13. Концепция модель-ориентированного средства разработки изделий

Расширения файлов в PTC Creo Parametric. В PTC Creo Parametric имеются три уникальных вида расширений для идентификации трех общих типов объектов Creo – деталей, сборок и чертежей:

- *prt* – файлы с этим расширением представляют объекты типа детали;
- *asm* – файлы с этим расширением представляют объекты типа сборки. В файлах сборки содержатся точки вставки и инструкции, которые определяют и позиционируют набор деталей и подборок, входящих в сборку;
- *drw* – файлы с этим расширением представляют объекты типа 2D- (двумерный) чертеж. Файл чертежа содержит точки вставки, инструкции и элементы чертежа для создания документации на деталь или сборку.



Каждый раз при сохранении объекта в Creo система создает новую, упорядоченную версию объекта, добавляя в конец имени файла

номер версии, отделенный точкой, например: **имя_файла.prt.1**, **имя_файла.prt.2**, **имя_файла.prt.3** и т. д. При открывании файла система по умолчанию открывает самую последнюю модель (модель с самым большим индексом). Такой подход предоставляет возможность отката на любой предыдущий шаг.

Для удаления версий объекта, утративших свою актуальность, в Creo имеется специальная команда: **Файл > Управление файлом > Удалить старые версии**. Похожая команда **Файл > Управление файлом > Удалить все версии** позволяет удалить все версии. Этой командой удаляются модели не только из оперативной памяти, но и с жесткого диска. Используйте эту команду очень внимательно, так как удаленные файлы не могут быть восстановлены.

Временной отрезок с момента запуска Creo и до момента окончания работы с ним носит название **Сессии**. Все файлы, открытые/созданные в процессе работы с Creo, загружаются в оперативную память компьютера и находятся там все время, пока вы их редактируете. После закрытия файла в рамках одной сессии оперативная память, которая была им занята, не освобождается автоматически. Поэтому при большой продолжительности сессии и нехватке объемов оперативной памяти может появиться заметное замедление работы. Удаление модели из оперативной памяти – это необходимая часть работы с Creo (стирание моделей из оперативной памяти не удаляет их с жесткого диска). **Команда Файл >**

Управление сеансом > Стереть текущий выгружает из оперативной памяти текущий объект, а команда **Файл > Управление сеансом > Стереть непоказанные** освобождает оперативную память от невидимых, закрытых ранее объектов. В PTC Creo Parametric для удаления моделей из оперативной памяти в дополнение к этим командам имеются соответствующие кнопки в панели инструментов *Данные*:

-  кнопка **Стереть текущий** (удаляет объект активного окна);
-  кнопка **Стереть непоказанные** (удаляет все объекты не в окнах из сессии)

Раздел 7. Основы автоматизации проектирования изделий и конструкций деталей в CREO

Тема 7.1. Создание таблиц семейств и элементов пользователя

Процесс проектирования и конструирования, как правило, итеративный и предполагает перебор нескольких вариантов, поэтому упрощение и автоматизация построения модели будущего изделия являются одной из важнейших задач САПР.

Одним из широко распространенных методов решения этой задачи является параметрическое проектирование (или просто параметризация), основанное на моделировании деталей и изделий с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметризация позволяет за короткое время перебрать с помощью изменения параметров или геометрических отношений различные конструктивные схемы, выбрать оптимальные решения и избежать принципиальных ошибок.

Определить цель конструирования достаточно просто, однако процесс поиска рационального решения сложен и требует гармоничного сочетания различных методов автоматизированного конструирования изделий. Параметрическое конструирование как методология автоматизированной разработки является основой для параллельного ведения проектно-конструкторских работ и позволяет уточнить конечную цель конструирования уже на ранних стадиях реализации проекта, что и определяет эффективность совмещения процессов конструирования, инженерного анализа и производства на едином временном интервале и их взаимной интеграции. Параметризация подразумевает использование различных видов взаимосвязей между компонентами модели и приложениями, которые используют данную модель.

Использование технологии параметрического конструирования позволяет, при необходимости, легко изменять форму модели, в результате чего пользователь имеет возможность быстро и эффективно получать альтернативные конструкции или пересмотреть концепцию изделия в целом. При отсутствии средств обеспечения параметрического конструирования модель определена однозначно только своей геометрией, поэтому внесение даже малейших изменений требует значительных трудовых затрат. Изменения же параметрической модели выполняются так же легко, как и изменения значения размеров на чертежах.

Параметризация – концепция, которая охватывает все методы для решения задач конструирования. Важной особенностью современной концепции параметрического конструирования является прежде всего возможность создания геометрической модели с использованием связей и правил, которые могут переопределяться и дополняться на любом этапе ее создания. Связи представляются в виде размерных, геометрических и алгебраических соотношений. Правила же определяются как условия выполнения базовой операции (например, сквозное или «глухое» отверстие).

Параметрическое проектирование существенно отличается от обычного двухмерного черчения или трехмерного моделирования. В случае параметрического проектирования создается по сути математическая модель объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения конфигурации и размеров деталей, их взаимного расположения в сборках и т. п.

На практике применяется достаточно много различных методов параметризации, на сегодняшний день нет однозначно превалирующего решения. Рассмотрим наиболее часто применяемые на практике методы.

Табличная параметризация

Табличная параметризация заключается в создании таблицы параметров типовых деталей (рисунок 7.1).

Создание нового экземпляра детали производится путем выбора из таблицы типоразмеров. Возможности табличной параметризации весьма ограничены, поскольку задание произвольных новых значений параметров и геометрических отношений обычно невозможно.

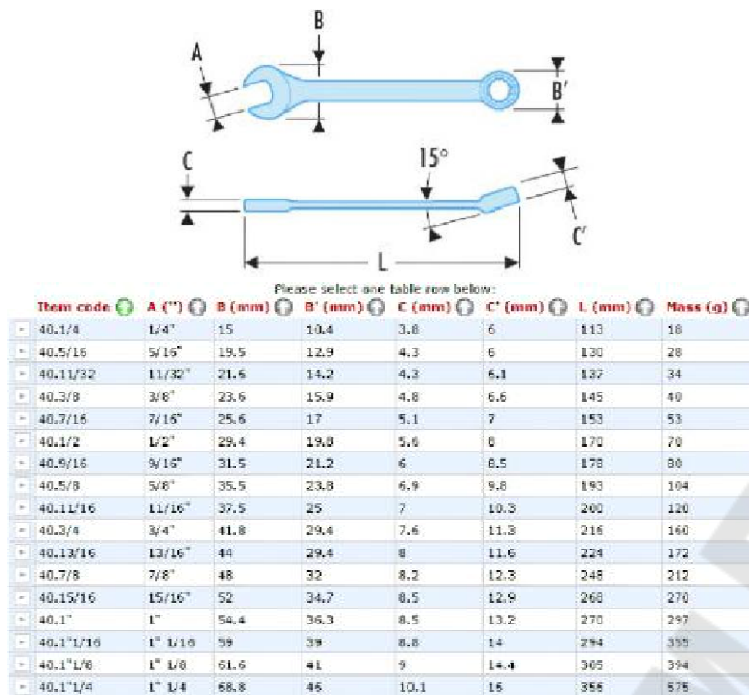


Рис. 7.1. Табличная параметрическая модель гаечного ключа

Однако табличная параметризация находит широкое применение во всех параметрических САПР, поскольку позволяет существенно упростить и ускорить создание библиотек стандартных и типовых деталей, а также их применение в процессе конструкторского проектирования.

Иерархическая параметризация

Иерархическая параметризация (параметризация на основе истории построений) заключается в том, что в ходе построения модели вся последовательность построения отображается в отдельном окне в виде «дерева построения» (рис. 7.2). В нем перечислены все существующие в модели вспомогательные элементы, эскизы и выполненные операции в порядке их создания.

Помимо «дерева построения» модели, система запоминает не только порядок ее формирования, но и иерархию ее элементов (отношения между элементами). (Например: сборки => под сборки => детали). Параметризация на основе истории построений присутствует практически во всех САПР, использующих трехмерное твердотельное параметрическое моделирование. Обычно такой тип параметрического моделирования сочетается с вариационной и/или геометрической параметризацией.

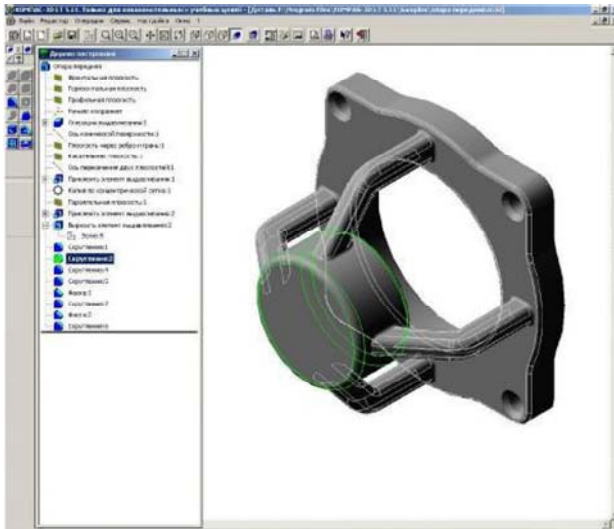


Рис. 7.2. Геометрическая модель с «деревом построения»

Вариационная (размерная) параметризация

Вариационная, или размерная, параметризация основана на построении эскизов (с наложением на объекты эскиза различных параметрических связей) и наложении пользователем ограничений в виде системы уравнений, определяющих зависимости между параметрами (рис. 7.3).

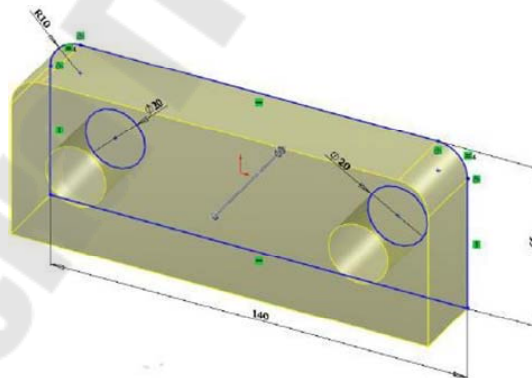


Рис. 7.3. Геометрическая модель с вариационной параметризацией

Процесс создания параметрической модели с использованием вариационной параметризации выглядит следующим образом:

На первом этапе создается эскиз (профиль) для трехмерной операции. На эскиз накладываются необходимые параметрические связи.

Затем эскиз «образмеривается». Уточняются отдельные размеры профиля. На этом этапе отдельные размеры можно обозначить как

переменные (например, присвоить имя Length) и задать зависимости других размеров от этих переменных в виде формул (например, Length/2).

Затем производится трехмерная операция (например, смещение), значение атрибутов операции тоже служит параметром (например, величина смещения).

В случае необходимости создания сборки взаимное положение компонентов сборки задается путем указания сопряжений между ними (совпадение, параллельность или перпендикулярность граней и ребер, расположение объектов на расстоянии или под углом друг к другу и т. п.).

Вариационная параметризация позволяет легко изменять форму эскиза или величину параметров операций, что позволяет удобно модифицировать трехмерную модель.

Частным случаем размерной параметризации является так называемая «эвристическая» параметризация, когда последовательно выполняется эскиз, который «образмеривается»; операцией смещения получают геометрическую модель (рис. 7.4, а). Затем производят редактирование значений размеров и выполняют операцию «эвристическая параметризация», в результате которой происходит автоматическое изменение геометрии профиля (рис. 7.4, б). Результат (рис. 7.4, в) получают после регенерации объемной модели.

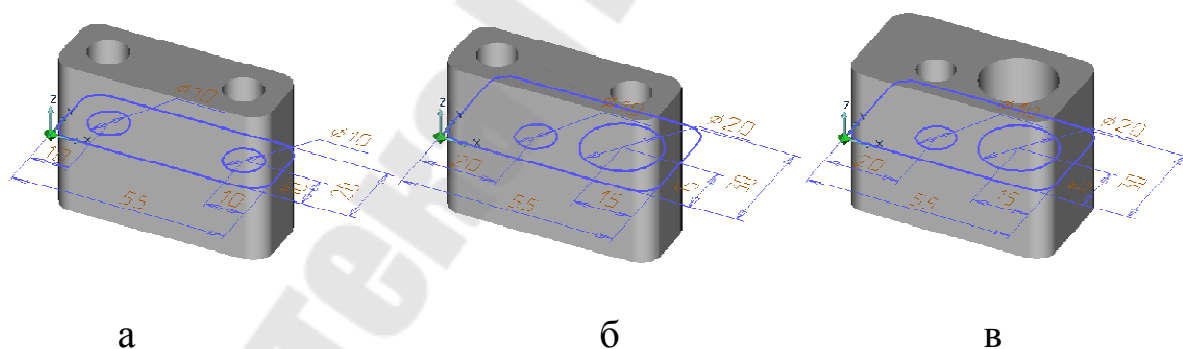


Рис. 7.4. «Эвристическая» параметризация

Геометрическая параметризация

Геометрической параметризацией называется параметрическое моделирование, при котором геометрия каждого параметрического объекта пересчитывается в зависимости от положения родительских объектов, его параметров и переменных.

Параметрическая модель в случае геометрической параметризации состоит из элементов построения и элементов изображения

(рис. 7.5). Элементы построения (конструкторские или вспомогательные линии) задают параметрические связи. К элементам изображения относятся линии изображения (которыми обводятся конструкторские линии), а также элементы оформления (размеры, надписи, штриховки и т. п.). Одни элементы построения могут зависеть от других элементов построения.

Элементы построения могут содержать и параметры (например, радиус окружности или угол наклона прямой). При изменении одного из элементов модели все зависящие от него элементы перестраиваются в соответствии со своими параметрами и способами их задания.

Процесс создания параметрической модели методом геометрической параметризации выглядит следующим образом:

На первом этапе конструктор задает геометрию профиля конструкторскими линиями, отмечает ключевые точки.

Затем проставляет размеры между конструкторскими линиями. На этом этапе можно задать зависимость размеров друг от друга.

Затем обводит конструкторские линии линиями изображения - получается профиль, с которым можно осуществлять различные трехмерные операции.

Последующие этапы в целом аналогичны процессу моделирования с использованием метода вариационной параметризации.

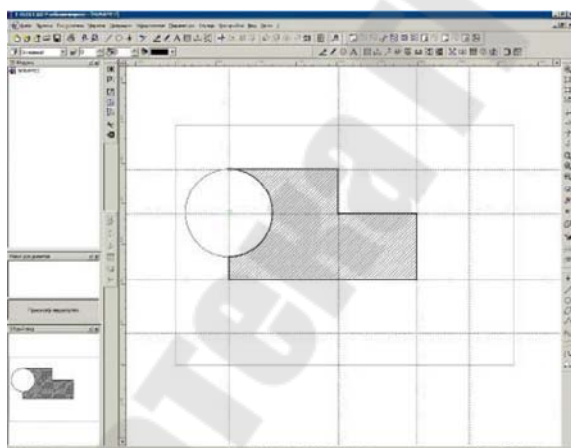


Рис. 7.5. Геометрическая параметризация основного контура с использованием направляющих линий

Геометрическая параметризация обеспечивает возможность более гибкого редактирования модели. В случае необходимости внесения незапланированного изменения в геометрию модели необязательно удалять исходные линии построения (это может привести к потере

ассоциативных взаимосвязей между элементами модели), можно провести новую линию построения и перенести на нее линию изображения.

Ассоциативное конструирование

Ассоциативное конструирование (Associative Design) - это обобщающее название технологии параметрического конструирования, обеспечивающей единую, в том числе и двустороннюю, информационную взаимосвязь между геометрической моделью, расчетными моделями, программами для изготовления изделия на станках с ЧПУ, конструкторской документацией, базой данных проекта.

Использование технологии ассоциативного конструирования позволяет, при необходимости, изменять форму модели и получать автоматически перестроенные чертежи (рис. 7.6) или траектории инструмента для обработки на станках с ЧПУ.

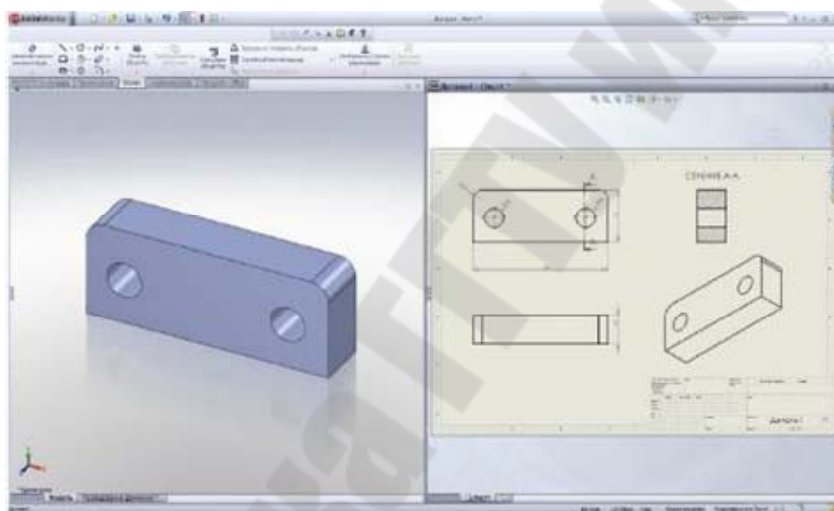


Рис. 7.6 - Конструкторский чертеж, ассоциативно связанный с геометрической моделью

Частным случаем ассоциативного конструирования является технология ассоциативной геометрии, иногда именуемая как направленная ассоциативность (idirected associativity), - это технология ассоциативного конструирования, которая базируется на непосредственных взаимосвязях между объектами. Простейший пример - определение параллельности двух отрезков. Отрезок А может быть определен как параллельный отрезку В. В результате при перемещении отрезка В отрезок А также изменит свое положение с сохранени-

ем ориентации по отношению к отрезку В. Собственное же положение отрезка А не может быть непосредственно изменено. Можно определить отрезки А и В как параллельные и другим способом, так что можно будет изменять положение любого из этих отрезков, удовлетворяя условиям других наложенных связей, - это случай так называемой «мягкой» ассоциативности. Преимущество использования ассоциативной геометрии - скорость.

Недостаток же заключается в том, что пользователь должен полностью определить размеры и ориентацию элемента, прежде чем приступить к созданию следующего элемента.

Объектно-ориентированное конструирование

Объектно-ориентированное конструирование (Feature-Based Modeling) основано на том, что конструктивные элементы геометрии "фьючерсы" (features) представляют собой объекты с предопределенным поведением и структурой данных. Это один из подходов ассоциативного конструирования, с помощью которого определяется поведение геометрической формы при дальнейших изменениях.

Этот подход реализован на основе определенного набора правил и атрибутов, задаваемых при выполнении базовой операции, в дополнение к уже заданным связям и ассоциативной геометрии. Базовые операции являются высокоэффективным инструментом для создания геометрической модели конструкции, инженерного анализа или изготовления. Объектно-ориентированное моделирование предоставляет в распоряжение пользователя макрофункции, ранее определенные как последовательность действий, использующих булевы операции. Например, сквозное отверстие (рис. 7.7) – может быть представлено как булева операция вычитания и цилиндр достаточной длины, большей, чем текущая толщина детали.

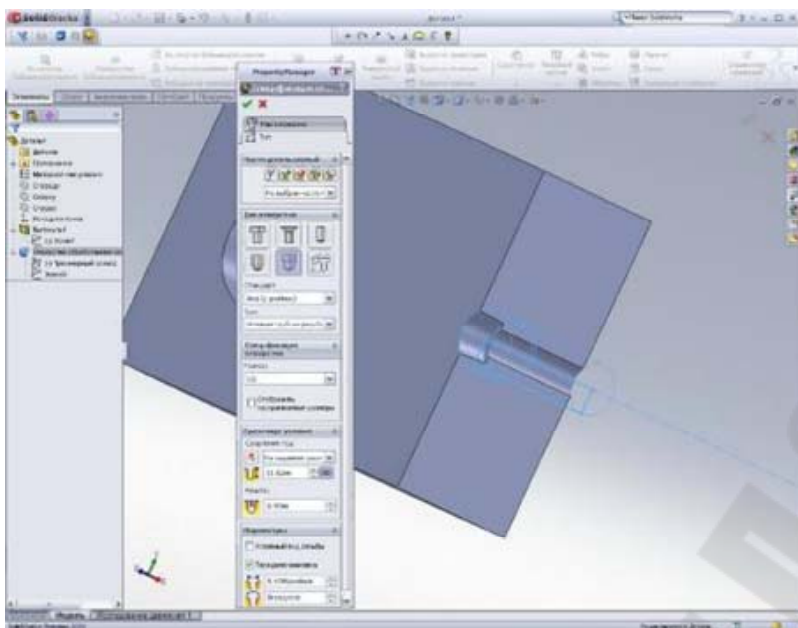


Рис. 7.7 - Конструирование отверстия как специального объекта построения

Но если модель станет толще, то цилиндр уже не будет обладать достаточной длиной и отверстие превратится в «глухое». Однако под сквозным отверстием понимается дополнительное правило, которое определяет сквозной проход в указанном месте через тело модели, независимо от того, изменилась форма модели или нет. Базовые операции также могут иметь и дополнительные атрибуты, которые используются в других приложениях, таких как анализ и изготовление.

Обязательные требования к базовым операциям при объектно-ориентированном моделировании:

- используемая базовая операция должна быть полностью определена. После выполнения базовой операции ее топология должна сохраняться и распознаваться как базовая операция (отверстие, паз и т. д.), а также предоставлять возможность изменения определяющих ее геометрических параметров (диаметр, глубина, и т. д.);

- определение базовой операции должно включать в себя правила, определяющие поведение геометрической формы, а также средства контроля за соблюдением этих правил после выполнения базовой операции. Например, сквозное отверстие должно оставаться таковым, в то время как форма модели подвергается изменению;

- для повышения эффективности процесса параллельной разработки приложения для инженерного анализа и изготовления должны

иметь доступ к описанию объекта, не требуя при этом от пользователя информации об объекте, использованной ранее при выполнении базовой операции.

Уже существующие типы конструктивных элементов могут быть использованы для создания новых типов путем наследования всех свойств исходных объектов и добавления новых атрибутов и поведения. Обязательным компонентом объектно-ориентированного конструирования являются механизмы создания конструктивного элемента и его обновления путем изменения данных каждого элемента. Запуск механизма обновления при изменении данных автоматически инициирует операцию его создания, а так как эти механизмы наследуются всеми конструктивными элементами от базового типа, обеспечивается совместимость структур данных для всего набора элементов. Конструктивные элементы включены в общий цикл обновления, таким образом, любое изменение данных приводит к автоматическому обновлению модели в соответствии с правилами построения и данными для каждого элемента.

Тема 7.2. Выполнение чертежей деталей и сборок на основе их трехмерных моделей в автоматизированном режиме

Конструирование на основе использования параметрической модели комплексного представителя типовой детали

В этом случае геометрические параметры модели могут быть связаны как переменные и можно задать зависимости других размеров от этих переменных в виде формул. Реализация геометрической модели осуществляется в среде САД модуля путем последовательного использования языка высокого уровня (например, VBA или Си++) и табличного процессора Excel.

Каждая группа деталей имеет свои особенности конструкции, определяющие выбор метода создания объемной модели. Несмотря на это, можно перечислить основные этапы работы, общие во всех вариантах:

-анализ конструкции деталей группы (рис. 7.8);

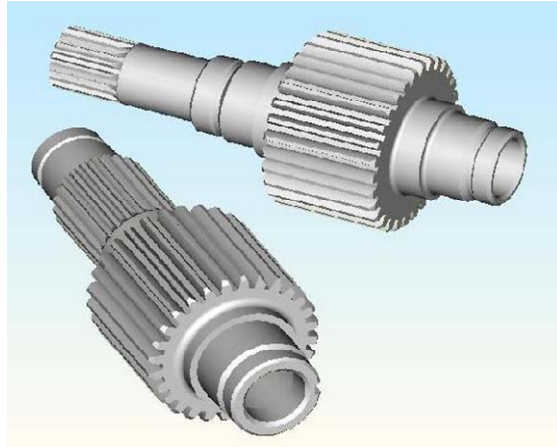


Рис. 7.8. Анализ конструкции деталей группы

- формирование комплексного представителя группы деталей;
- построение исходных контуров для создания объемной модели;
- проставка размеров (координация поверхностей) (рис. 7.9);

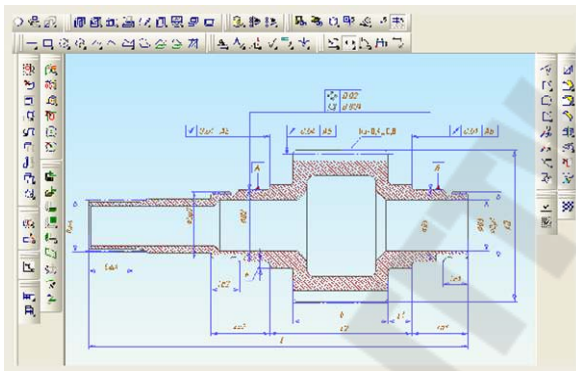


Рис. 7.9 - Проставка размеров

- преобразование размеров в параметрические;
- построение объемной модели с помощью выполнения операций над контурами (рисунок 7.10);
- создание электронной табличной формы для внесения информации из конструкторского чертежа детали (рисунок 7.11);
- написание алгоритма расчета параметрических размеров с использованием данных с чертежа, оформление таблицы расчета;

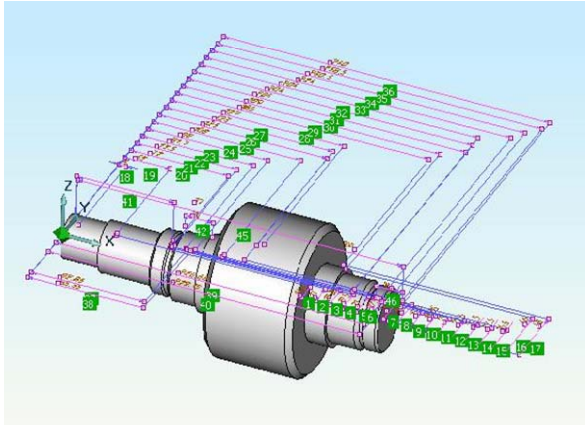


Рис. 7.10. Параметрическая объемная модель комплексного представителя

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		Зубчатый венец			Диаметр вала под подшипники		* - в зав. от серии				
2		<i>m</i>	<i>z</i>	<i>b</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>h</i>	<i>L1</i>	<i>L2</i>	<i>Lo1</i>	<i>Lp1</i>
3	деталь №1	3	30	66	45	45	3	15	96	36	16
4	деталь №2	6	20	65	50	50	4	15	105	38	18
5	деталь №3	3	28	77	55	55	4	8	96	38,5	12,5
6	деталь №4	3	30	60	45	45	4	15	90	37	18
7	деталь №5	4,5	25	38	40	40	3	10	85	28	16
8	деталь №6	3,5	50	45	45	45	4	12	80	25	15
9	деталь №7	5	20	65	50	50	5	10	92	32	18

Рис. 7.11. Табличная форма Excel

-подключение таблицы значений параметрических размеров к параметрической модели, запись параметрического фрагмента.

Философия моделирования детали

Перед началом моделирования детали в Creo Parametric необходимо заглянуть на несколько шагов вперед:

- сделать анализ функционального назначения детали и анализ стратегии построения ее виртуальной модели;
- предусмотреть возможные изменения в конструкции при подготовке производства и в процессе проведения последующих модернизаций изделия;
- произвести анализ модели детали для решения: следует ли создавать модель «с чистого листа» или переделать уже существующую модель?
- до начала построения геометрии детали необходимо ответить на следующие вопросы:

- какие размеры являются критическими для геометрии, т. е. могут кардинально изменить ее пропорции и внешний вид?
- какие размеры могут/будут меняться в будущем?
- какие размеры важны с точки зрения обработки детали?
- какие размеры должны управлять другими через соотношения?
- будет ли деталь принадлежать групповому чертежу (т. е. являться членом *Таблицы Семейств*)?
- как (и какими конструктивными элементами) взаимодействует деталь с другими деталями в сборке (-ах).

Шаги построения модели:

1. Определение базовой операции.
2. Создание эскиза базовой операции.
3. Определение желаемой размерной схемы для базовой операции (размерную схему желательно выбирать такую же, как на чертеже).
4. Сопоставление характеристик операции с операциями в других моделях.
5. Добавление конструктивных операций при соблюдении размерной схемы.
6. Добавление соотношений между размерами для повышения устойчивости модели при модификациях.
7. Назначение баз обработки, полей допусков размерам, отклонение формы и т. д.
8. Добавление дополнительных атрибутов для модели (плотности, параметров и т. д.).

Тема 7.3. Оформление конструкторской документации (КД)

Единая система конструкторской документации (ЕСКД) представляет собой комплекс стандартов, устанавливающих взаимосвязанные единые нормы и правила по порядку разработки, оформления и обращения конструкторской документации (чертежей, схем, текстовых документов), применяемой на всех стадиях жизненного цикла изделия (проектировании, изготовлении, эксплуатации, ремонте и др.).

Эти единые нормы и правила распространяются на все виды конструкторских документов, на учетно-регистрационную, нормативно-техническую, программную и технологическую документацию, а также на научно-техническую и учебную литературу.

Основное назначение стандартов ЕСКД состоит в установлении единых оптимальных правил, требований и норм выполнения, оформления и обращения конструкторской документации, которые обеспечивают:

- применение современных методов и средств при реализации процессов ЖЦ изделия;
- взаимобмен конструкторской документацией без ее пере-оформления;
- безбумажное представление информации и использование электронной цифровой подписи;
- необходимую комплектность конструкторской документации;
- автоматизацию обработки КД и содержащейся в них информации;
- высокое качество изделий;
- наличие в конструкторской документации требований, обеспечивающих безопасность использования изделий для жизни и здоровья потребителей, окружающей среды, а также предотвращение причинения вреда имуществу;
- расширение унификации и стандартизации при проектировании изделий и разработке конструкторской документации;
- проведение сертификации изделий;
- сокращение сроков и снижение трудоемкости подготовки производства;
- правильную эксплуатацию изделий;
- оперативную подготовку документации для быстрой переналадки действующего производства;

- создание и ведение единой информационной базы;
- гармонизацию стандартов ЕСКД с международными стандартами (ИСО, МЭК) в области конструкторской документации;
- информационную поддержку ЖЦ изделия.

Конструкторские документы могут быть выполнены как бумажный КД и/или как электронный КД.

К конструкторским документам относятся графические, текстовые, аудиовизуальные (мультимедийные) и иные документы, установленные стандартами ЕСКД, содержащие информацию об изделии, необходимую для его проектирования, разработки, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации, ремонта (модернизации) и утилизации.

Виды, комплектность и выполнение КД (бумажное или электронное) устанавливает разработчик, если иное не оговорено ТЗ (либо другим заменяющим документом). Для изделий, разрабатываемых по заказу Министерства обороны, эти решения должны быть согласованы с заказчиком (представительством заказчика).

Допускается дополнительно идентифицировать конструкторские документы с применением штрих кода.

При этом в качестве реквизитов штрих кода следует использовать коды страны, организации-разработчика (держателя подлинника) и обозначение документа, его версии и присвоенной ему литеры.

Стандарты ЕСКД распространяются на изделия машиностроения и приборостроения. Область распространения отдельных стандартов может быть расширена, что должно быть оговорено во введении к ним.

Установленные стандартами ЕСКД правила, требования и нормы по разработке, оформлению и обращению документации распространяются на следующую документацию:

- все виды конструкторских документов;
- учетно-регистрационную документацию для конструкторских документов;
- документацию по внесению изменений в конструкторские документы;
- нормативную, технологическую, программную документацию, а также научно-техническую и учебную литературу, в той части, в которой стандарты ЕСКД могут быть применимы для них и не регламентируются другими нормативными документами, например форматы и шрифты для печатных изданий и т.п.

Установленные в стандартах ЕСКД правила, требования и нормы распространяются на указанную выше документацию, разработанную организациями и предпринимателями всех форм собственности (субъектами хозяйственной деятельности) стран - участников соглашения (СНГ), а также научно - техническими, инженерными обществами и другими общественными объединениями.

Состав и классификация стандартов Единой системы конструкторской документации.

Межгосударственные стандарты ЕСКД распределяют по классификационным группам, приведенным в таблице и их перечень приведен в указателе стандартов, публикуемом в установленном порядке (табл. 7.1):

Таблица 7.1

Номер группы	Наименование классификационной группы стандартов
0	Общие положения
1	Основные положения
2	Классификация и обозначение изделий и конструкторских документов
3	Общие правила выполнения чертежей
4	Правила выполнения чертежей различных изделий
5	Правила изменения и обращения конструкторской документации
6	Правила выполнения эксплуатационной и ремонтной документации
7	Правила выполнения схем
8	Правила выполнения документов при макетном методе проектирования
9	Прочие стандарты

Обозначение стандарта состоит из:

- индекса стандарта - ГОСТ;
- цифры 2, присвоенной комплексу стандартов ЕСКД;
- цифры (после точки), обозначающей номер группы стандартов в соответствии с таблицей;
- двузначного числа, определяющего порядковый номер стандарта в данной группе;
- четырех цифр (после тире), указывающих год утверждения стандарта. В стандартах, утвержденных до 2000 года, указаны две по-

следние цифры года.

Структура обозначения изделия и основного КД состоит из групп знаков (буква, цифра), разделенных точками: ХХХХ. ХХХХХХ. ХХХ, где ХХХХ - код организации-разработчика, назначаемый по кодификатору организаций- разработчиков; ХХХХХХ - код классификационной характеристики по классификатору изделий и КД машиностроения и приборостроения (Классификатор ЕСКД); ХХХ - порядковый регистрационный номер (от 001 до 999) в пределах данной классификационной характеристики и кода организации разработчика. В обозначении не основных КД к вышеуказанному обозначению изделия добавляется соответствующий код (шифр) документа. В коде документа должно быть не более 4 знаков, например СБ, ЭС, ПЭЗ, ТУ12.

Пример обозначения ГОСТ 2.316-2008 Единая система конструкторской документации. Правила нанесения надписей, технических требований и таблиц на графических документах (рис. 7.12):

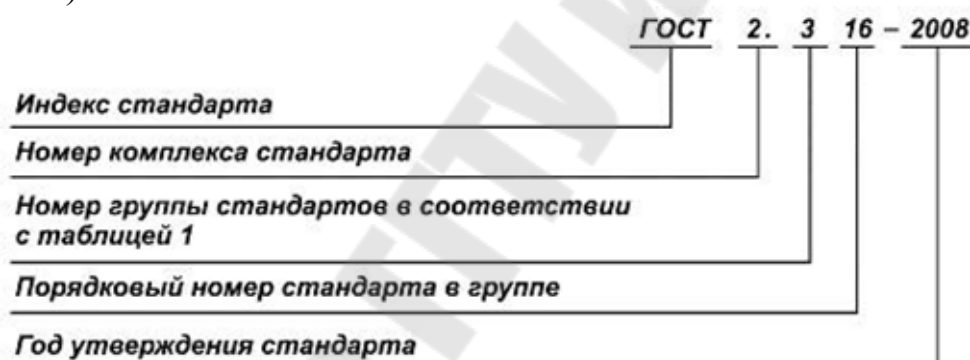


Рис. 7.12. Пример обозначения ГОСТ 2.316-2008 ЕСКД

Внедрение классификационной системы обозначения и классификатора изделий и конструкторских документов машиностроения и приборостроения (классификатор ЕСКД) дает возможность резко повысить уровень унификации конструкторских разработок за счет применения ранее созданных изделий и их составных частей, сформировать базу для автоматизированного поиска и применения изделий и их конструкторских документов.

При внедрении новых, пересмотренных и измененных стандартов ЕСКД конструкторскую документацию, разработанную до введения в действие этих стандартов, допускается не переоформлять. Для конструкторской документации на изделия, разработанные по заказу Министерства обороны, это решение необходимо согласовывать с за-

казчиком (представительством заказчика).

В случае передачи другой организации дубликатов или копий КД вопрос о внесении в подлинники (дубликаты и копии, принятые на абонементное обслуживание) изменений, связанных с внедрением новых, пересмотренных и измененных стандартов ЕСКД, а также выполнение передаваемых КД (бумажное и/или электронное), решается по согласованию между предприятием, передающим документы, и предприятием, принимающим их. В КД допускается указывать ссылки на другие КД, стандарты и технические условия на материалы (вещества).

Единая система технологической документации - комплекс межгосударственных стандартов и рекомендаций, устанавливающих взаимосвязанные правила и положения по порядку разработки, комплектации, оформления и обращения технологической документации, применяемой при изготовлении, контроле, приемке и ремонте (модернизации) изделий (включая сбор и сдачу технологических отходов). Технологические документы могут быть выполнены в бумажной форме и (или) в форме электронного документа. Требования к разработке электронного документа - по ГОСТ 2.051, ГОСТ 2.052, ГОСТ 2.053. Номенклатура реквизитов - по ГОСТ 3.1103. Виды, комплектность и форму выполнения технологических документов устанавливает разработчик, если это не оговорено техническим заданием. На изделия, разрабатываемые по заказу Министерства обороны, эти решения должны быть согласованы с заказчиком (представительством заказчика). Стандарты ЕСТД разрабатывают в соответствии с требованиями ГОСТ 1.0, ГОСТ 1.2 и ГОСТ 1.5.

Единая система технологической документации представляет собой комплекс государственных стандартов, устанавливающих:

- формы документации общего назначения (маршрутная карта технологического процесса, сводная спецификация, карта эскизов, схем и наладок и др.);

- правила оформления технологических процессов и формы документации для процессов литья, раскроя и нарезания заготовок, механической и термической обработки, сварочных работ, процессов, специфичных для отраслей радиотехники, электроники и др.

Существует тесная связь между ЕСТД и ЕСКД. Эти системы играют большую роль в улучшении управления производством, повышении его эффективности, во внедрении автоматизированных систем управления и т. д.

Назначение комплекса документов ЕСТД:

- установление единых унифицированных машинно-ориентированных форм документов, обеспечивающих совместимость информации, независимо от применяемых методов проектирования документов (без применения средств механизации, с применением средств механизации или автоматизации);

- создание единой информационной базы для внедрения средств механизации и автоматизации, применяемых при проектировании технологических документов и решении инженерно-технических задач;

- установление единых требований и правил по оформлению документов на единичные, типовые и групповые технологические процессы (операции), в зависимости от степени детализации описания технологических процессов;

- обеспечение оптимальных условий при передаче технологической документации на другое предприятие (другие предприятия) с минимальным переоформлением;

- создание предпосылок по снижению трудоемкости инженерно-технических работ, выполняемых в сфере технологической подготовки производства и в управлении производством;

- обеспечение взаимосвязи с системами общетехнических и организационно-методических стандартов.

Основные технологические документы содержат различную информацию:

- о комплектующих составных частях изделия и применяемых материалах;

- о действиях, выполняемых исполнителями при проведении технологических процессов и операций;

- о средствах технологического оснащения производства;

- о наладке средств технологического оснащения и применяемых данных по технологическим режимам;

- о расчете трудозатрат, материалов и средств технологического оснащения;

- о технологическом маршруте изготовления и ремонта.

Основные технологические документы используют, как правило, на рабочих местах. Вспомогательные технологические документы разрабатывают с целью улучшения и оптимизации организации работ по технологической подготовке производства. Производные технологические документы применяют для решения задач, связанных с нор-

мированием трудозатрат, выдачей и сдачей материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий.

Различают следующие виды технологических документов:

- ведомость технологических маршрутов (ВТМ) – сводная информация по технологическому маршруту изготовления изделия и его составных частей;

- ведомость материалов (ВМ) – сводные подетальные нормы расхода материалов на изделие;

- ведомость специфицированных норм расхода материалов (ВСН) – сводные данные по специфицированным нормам расхода материалов на изделие;

- ведомость удельных норм расхода материалов (ВУН) – удельные нормы расхода материалов, применяемых при выполнении процессов на покрытия;

- ведомость применяемости деталей (сборочных единиц) в изделии (ВП) – указания о применяемости деталей (сборочных единиц) в изделии;

- ведомость применяемости стандартных, покупных, оригинальных деталей и сборочных единиц (ВП/СОП) – то же, что и ВП;

- ведомость сборки изделия (ВП/ВСИ) – порядок сборки изделия с учетом очередности входимости составных частей и их количества;

- технологическая ведомость (ТВ) – указания по группированию деталей и сборочных единиц по конструкторско-технологическим;

- ведомость технологических документов (ВТД) – полный состав технологических документов, применяемых при изготовлении изделия;

- ведомость оснастки (ВО) – полный состав технологической оснастки, применяемой при изготовлении (ремонте) изделия;

- ведомость оборудования (ВОб) – полный состав оборудования, применяемого при изготовлении (ремонте) изделия;

- технологическая инструкция (ТИ) – описание повторяющихся приемов работы, действий по наладке и настройке средств технологического оснащения, приготовлению растворов, электролитов, смесей и др., а также отдельных типовых и групповых технологических процессов (операций);

- маршрутная карта (МК) – сводные данные по составу применяемых операций, оборудованию, технологическим документам и по трудозатратам на технологический процесс;

- операционная карта (ОК) – описание единичных технологиче-

ских операций;

- паспорт технологический (ТП) – комплекс процедур по выполнению технологических операций исполнителями, технологическому контролю, контролю представителями заказчика или госприемки;

- журнал контроля технологического процесса (ЖКТП) – предназначен для контроля параметров технологических режимов, применяемых при выполнении операций на соответствующем оборудовании, и др.;

- карта измерений (КИ);

- ведомость деталей, изготавливаемых из отходов (ВДО).

Межгосударственные стандарты ЕСТД распределены по классификационным группам, приведенным в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Номер группы	Наименование группы
0	Общие положения
1	Общие требования к документам
2	Классификация и обозначение технологических документов
3	Общие требования к документам на машинных носителях
4	Основное производство. Формы технологических документов и правила их оформления на специализированные процессы по методам изготовления или ремонта изделий
5	Основное производство. Формы технологических документов и правила их оформления на испытания и контроль
6	Вспомогательное производство. Формы технологических документов и правила их оформления
7	Правила заполнения технологических документов
8	Прочие
9	Информационная база

В группу 0 входят стандарты, устанавливающие общие положения.

В группу 1 входят стандарты, устанавливающие правила оформления документов общего назначения и документов, приме-

няемых независимо от методов изготовления и ремонта изделий (например, ведомости оснастки), а также стандарты и рекомендации, требования и правила которых распространяются на оформление всех документов независимо от детализации описания технологических процессов, организации производства и методов изготовления и ремонта изделий.

В группу 2 входят стандарты и рекомендации, устанавливающие классификацию и обозначение технологических документов.

В группу 3 входят стандарты и рекомендации, устанавливающие особенности оформления и функционирования документов на машинных носителях.

В группу 4 входят стандарты и рекомендации, устанавливающие формы и правила оформления технологических документов, применяемых в основном производстве в зависимости от применяемых методов при изготовлении и ремонте изделий, за исключением испытаний и технического контроля.

В группу 5 входят стандарты и рекомендации, устанавливающие формы и правила оформления технологических документов, применяемых в основном производстве при описании технологических процессов (операции) испытаний и технического контроля, а также при контроле выполнения технологических процессов.

В группу 6 входят стандарты и рекомендации, устанавливающие формы и правила оформления документов, применяемых во вспомогательном производстве.

В группу 7 входят стандарты и рекомендации, устанавливающие правила записи технологических операций (переходов).

В группу 8 входят стандарты, имеющие в своем обозначении соответствующий индекс.

В группу 9 входят стандарты и рекомендации, устанавливающие правила и положения по созданию информационной базы для автоматизированных систем управления и проектирования документов.

Обозначение стандартов ЕСТД - по правилам, установленным в ГОСТ 1.0. Обозначение стандарта состоит из:

- индекса "ГОСТ" (категории нормативного документа);
- цифры 3, присвоенной классу стандартов на ЕСТД;
- цифры 1 (после точки), обозначающей подкласс (для изделий машиностроения и приборостроения);
- цифры, обозначающей номер группы стандартов в соответствии с классификатором;

- двухзначного числа, определяющего порядковый номер стандарта в данной группе;
- двух последних чисел (после тире), указывающих год регистрации стандарта.

Внедрение стандартов ЕСТД осуществляется в соответствии с установленным порядком для межгосударственных стандартов. При внедрении новых, пересмотренных и измененных стандартов ЕСТД технологическую документацию, разработанную до введения в действие этих стандартов, допускается не переоформлять. Для технологической документации на изделия, разработанные по заказу Министерства обороны, это решение необходимо согласовать с заказчиком (представительством заказчика).

Пример обозначения ГОСТ 3.1403 Единая система технологической документации. Формы и правила оформления документов на технологические процессы и операцииковки и штамповки (рис. 7.13):



Рис. 7.13. Пример обозначения ГОСТ 3.1403 ЕСКД

При переиздании технологической документации (выпуске новых подлинников) и при передаче подлинников другой организации рекомендуется учитывать требования новых, пересмотренных и измененных стандартов ЕСТД.

При использовании ранее разработанной технологической документации в новых разработках вопрос о внесении в такую докумен-

тацию изменений, связанных с введением новых, пересмотренных и измененных стандартов ЕСТД, решается организацией - разработчиком технологических документов либо держателем подлинников. Для технологической документации на изделия, разработанные по заказу Министерства обороны, это решение необходимо согласовать с заказчиком (представительством заказчика). В случае передачи другой организации дубликатов или учтенных копий технологических документов вопрос о внесении в подлинники (дубликаты и учтенные копии) изменений, связанных с внедрением новых, пересмотренных и измененных стандартов ЕСТД, а также о форме выполнения (бумажная или электронная) передаваемых технологических документов решается по согласованию между организацией, передающей документы, и организацией, принимающей. В технологических документах допускается указывать ссылки на другие технологические документы, стандарты и технические условия на материалы (вещества). Допускается указывать ссылки на стандарты организаций при условии, что они однозначно определяют соответствующие требования к технологии.

На изделия, разрабатываемые по заказу Министерства обороны, стандарты организаций должны быть согласованы с заказчиком (представительством заказчика).

Технологические документы и стандарты организаций, на которые приводят ссылки, подлежат передаче другой организации вместе с комплектом технологических документов, при этом выполнение передаваемых ссылочных документов (бумажное и (или) электронное) должно соответствовать выполнению документов, входящих в комплект, либо быть согласовано с этой организацией.

Раздел 8. Технологии трехмерного синтеза и оцифровки.

Виртуальные прототипы, в роли которых выступают 3D модели, играют большую роль при анализе свойств проектируемого изделия и принятии проектных решений. Однако, они не могут полностью заменить физические прототипы.

Рассмотрим более подробно классификацию прототипов и цели их использования.

Создавая прототип, каждая группа специалистов преследует свои цели. Прототип можно определить, как модель, приближающуюся к изделию по одной или ряду характеристик, важных для разработчиков.

Прототипы могут быть классифицированы по двум критериям (рис. 8.1). Первым критерием является принадлежность прототипа к классу физических или классу аналитических моделей. Физические прототипы изготавливаются из реальных материалов, тогда как аналитические представляют собой расчетные или геометрические компьютерные модели.



Рис. 8.1. Классификация прототипов

Второй критерий относит прототип к классу локальных или классу полных прототипов. Полный прототип отражает большинство свойств изделия, тогда как локальный обеспечивает моделирование одного или малого числа свойств изделия. Полный прототип может быть использован в целях тестирования опытного образца изделия, тогда как локальный используется для анализа и отработки частных проектных решений.

На протяжении всего процесса разработки изделия, прототипы используются в четырех целях: изучения принимаемых проектных решений; информирования руководства и сторонних участников проекта; проверки интегрируемости компонент; демонстрации достигнутых результатов.

Изучение проектных решений: Прототипы часто используются для того, чтобы получить ответ на два вопроса: «Будет ли это работать?» и «Насколько хорошо это отвечает запросам потребителей?». Если прототип используется в целях получения ответа на эти вопросы, то он служит целям изучения принимаемых проектных решений.

Информирование руководства и участников проекта: Прототипы улучшают информирование руководящего персонала, поставщиков, партнеров, внешних разработчиков, потребителей и инвесторов. Это в особенности справедливо для физических прототипов: визуальный осмотр и ощупывание трехмерного образца изделия способствуют гораздо лучшему пониманию, чем словесное описание или даже эскизы.

Проверка интегрируемости компонент: Прототип используется для проверки того, что составляющие его компоненты будут совместно функционировать так, как это предполагалось. Для проверки интегрируемости компонент наиболее эффективны полные физические прототипы, так как они требуют реальной сборки всех деталей изделия.

Демонстрация достигнутых результатов: Прототипы, в особенности на поздних стадиях проекта, используются для демонстрации того, что изделие достигло требуемого уровня функциональности. Руководящий персонал часто требует, чтобы ему был продемонстрирован на прототипе ряд функций изделия перед тем, как будет разрешен переход к следующему этапу проекта. Демонстрационный прототип может подвергаться тестированию.

В то время как некоторые прототипы могут использоваться для всех перечисленных выше целей, другие из них пригодны в основном для отдельных целей. Характер применимости различных видов прототипов для разных целей проиллюстрирован на рис.8.2.

Принципы выбора прототипов. При принятии решений о создании конкретных прототипов полезно руководствоваться рядом общих принципов. Эти принципы связаны с выбором вида прототипа и

с включением работ по созданию прототипа в общий план разработки:

- *Аналитические прототипы обладают большей гибкостью чем физические.* Так как аналитические прототипы содержат в своей основе математические модели, то они, как правило, имеют параметры, которыми можно варьировать для получения альтернативных вариантов. Изменение параметра в аналитическом прототипе проще, чем изменение параметра в физической модели. Поэтому аналитические прототипы обычно предшествуют физическим прототипам и используются для сужения числа варьируемых параметров. После этого используются физические прототипы для совершенствования принимаемых проектных решений.

- *Физические прототипы нужны для выявления непредвиденных свойств.* Физический прототип часто демонстрирует непредвиденные свойства, совершенно не имеющие отношения к целям создания прототипа. Причина состоит в том, что при экспериментировании с физическим прототипом всегда действуют все физические закономерности. Физические прототипы, созданные для исследования чисто геометрических проблем, будут иметь также определенные тепловые и оптические характеристики. Некоторые из присущих физическому прототипу свойств не имеют отношения к конечному изделию. Однако, некоторые из свойств могут говорить о том, что такими же свойствами будет обладать конечный продукт.

- *Прототипы могут снижать риск проведения дорогостоящих итераций.* Во многих случаях результаты контроля или тестирования могут говорить о том, что определенный этап разработки нужно выполнить заново. Например, если отлитая из пластмассы деталь недостаточно хорошо стыкуется с сопрягаемыми деталями, то это может привести к повторному проектированию и изготовлению пресс-формы. Если же выполнить отработку сопряжения детали с другими деталями с помощью прототипа, то вероятность проведения дорогостоящей итерации по проектированию и изготовлению пресс-формы может быть снижена.

- *Прототипы могут ускорять другие этапы разработки.* В ряде случаев включение этапа создания прототипа в общий процесс разработки может привести к более быстрому выполнению последующих этапов в сравнении с тем, как если бы прототип не был создан. Например, наличие аналитического прототипа детали в виде 3D модели может резко снизить время на последующее компьютерное

проектирование пресс - формы, требующейся для изготовления этой детали.

Технологии создания прототипов. Так как методы и средства создания аналитических прототипов уже были рассмотрены выше, то здесь мы остановимся на методах создания физических прототипов с помощью методов быстрого прототипирования.

Быстрое прототипирование представляет собой процесс автоматического изготовления физического образца изделия на основании его компьютерной 3D модели, представленной в формате STL. Процесс изготовления выполняется в так называемых установках быстрого прототипирования, которые можно классифицировать по типу используемого материала:

Фотоотверждающийся полимер (фотополимер); Бумага ламинированная или писчая; Порошкообразные материалы (полимер, металл); Термопластичные материалы (полимерная нить, воск).

Формат STL описывает поверхности модели сеткой треугольников. Специальное математическое обеспечение установок быстрого прототипирования, используя STL-файлы, разбивает 3D модель на ряд плоских параллельных сечений, отстоящих друг от друга на малое расстояние (0,05 – 0,4 мм), определяемое требованиями конкретной установки. Эти сечения последовательно воспроизводятся из того материала, с которым работает установка, образуя в результате физическую модель прототипа.

Изготовление прототипа из фотополимера. Фотополимером называется жидкий полимер, отверждение которого происходит под действием светового излучения, как правило ультрафиолетового диапазона. Существует два класса установок, различающихся способом засветки: с помощью лазера (стереолитография) или без помощи лазера.

Технология стереолитографии заключается в следующем. На основание, расположенное в ванне, наносится слой фотополимера. Луч лазера, управляемый компьютером, засвечивает те участки слоя, которые «принадлежат» 3D модели прототипа на данном уровне. На засвеченных участках происходит отверждение фотополимера. Затем обработанный слой заливается свежим фотополимером и засвечивается очередное сечение. Таким образом, происходит послойное наращивание всего прототипа, который извлекается из ванны, зачищается и используется по назначению. Установки этого типа поставляются, например, фирмой 3D Systems (США).

Изготовление прототипа из бумаги. Технология, известная как LOM (Laminated Object Manufacturing), заключается в следующем. Лента ламинированной бумаги протягивается в рабочую зону, где прикатывается горячим валиком к основанию или к предыдущему слою бумаги. Затем луч лазера прорезает в верхнем слое контур, повторяющий границу сечения модели. Поле, расположенное вне и внутри контура, прорезается лазером на мелкие квадраты для обеспечения возможности их последующего удаления. Поля бумажной полосы не прорезаются, чем обеспечивается автоматическая протяжка. Далее процесс повторяется для следующих слоев. Изготовление прототипа завершается ручным удалением ненужного материала, после чего поверхность зачищается и покрывается защитным лаком (рис.8.2). Установки, работающие на принципе LOM-технологии, поставляются в частности фирмой Helisys (США).



Рис. 8.2. Завершающие действия при использовании LOM-технологии

Изготовление прототипа из порошков. Фирмой EOS (Германия) выпускается класс установок, работающих по сходному принципу послойного выращивания методом спекания из порошков различных материалов (полимеров, металлов или специального песка). Технологический процесс выглядит следующим образом – над основанием проходит каретка и наносит тонкий однородный слой порошка. Луч лазера, управляемый компьютером, спекает порошок в местах, где в данном сечении должны быть стенки модели. Основание

опускается и наносится следующий слой порошка. При прохождении луча лазера материал нового слоя спекается с материалом предыдущего, обеспечивая целостность прототипа. В заключение не спекшийся порошок удаляется.

Примеры деталей-прототипов, полученных методом лазерного спекания, показаны на рис. 8.3.

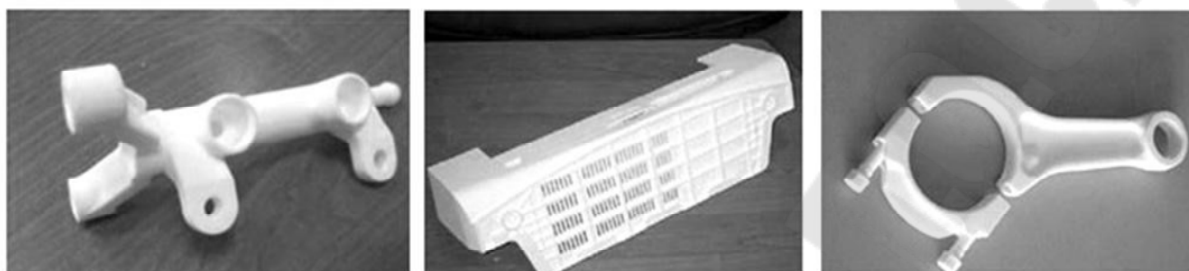


Рис. 8.3. Детали, полученные методом лазерного спекания
Изготовление прототипа из термопластичных материалов

Существует группа установок, основанных на послойном выращивании прототипов из заранее разогретого пластичного материала (например, полиамида или воска). Так, фирмой Stratasys (США) выпускается серия установок послойного синтеза прототипа из полимерной нити. Нить подается в специальную головку, где разогревается и затем послойно укладывается в соответствии с 3D моделью прототипа, заполняя сечение за сечением.

Технология струйного моделирования. Различные запатентованные разновидности этой технологии называются: MJM (Multi-Jet Modeling), PolyJet (Photopolymer Jetting) и DODJet (Drop-On-Demand-Jet). Построение модели осуществляется путем послойного нанесения расплавленного материала с помощью многоструйных головок (по технологии струйных принтеров). Примером установок данного типа может служить безлазерный 3D принтер модели EDEN 350V (рис. 8.4).

В заключение отметим еще один способ применения физических прототипов – их использование в целях последующего изготовления пресс-форм или штампов. Процесс изготовления силиконовых форм выглядит следующим образом. Сначала прототип специальным образом подготавливается – липкой лентой заклеиваются все имеющиеся в нем отверстия. Кроме того, липкая лента наклеивается на стенки прототипа по контуру будущей линии разъема формы. Подготовленный таким образом прототип устанавливается на опорных

стойках в герметичной ванне и полностью заливается неотвержденным силиконом. Ванна переносится в термошкаф, где происходит отверждение силикона. Блок силикона извлекается из ванны, острым ножом разрезается на две части до ленты, формирующей поверхность разъема. Прототип и стойки извлекаются из силиконовой формы, после чего она готова к использованию.



Рис. 8.4. Установка быстрого прототипирования EDEN 350V

Для последующего использования формы обе ее части соединяются в блок, переворачиваются отверстиями от опорных стоек вверх и устанавливаются в вакуумный шкаф. Компоненты полиуретановой смеси загружаются в чашу смесителя шкафа, где они перемешиваются и заливаются в форму. Далее форма переносится в термошкаф, где происходит отверждение полиуретана. Готовая деталь извлекается из формы, а сама она готова к повторному использованию. С помощью одной формы можно получить 20 – 30 деталей (без потери их качества) в зависимости от их сложности, наличия поднутрений и т.п.

Технологии быстрого прототипирования дают возможность получать пространственный физический образец детали быстрее и с меньшими затратами, чем это было возможно раньше. Примененные в нужное время и в нужном месте, эти технологии могут уменьшить общее время разработки и улучшить качество конечного изделия

Тема 8.1. 3D-печать. Подготовка модели изделия к печати

3D-печать, или как ее еще называют - аддитивное производство, это производственный процесс, при котором 3D-принтер создает трехмерные объекты путем нанесения материала слоями, в соответствии с цифровой 3D-моделью объекта.

3D-печать применяется в разных сферах нашей жизни: промышленности, сфере дизайна, медицине, машиностроении, космической и военной сферах, IT-сфере и многих других. 3D-печать позволяет любому желающему легко создавать различные предметы, не выходя из дома.

В отличие от промышленных 3D-принтеров большого размера, установленных на заводах, в настоящее время есть настольные 3D-принтеры, имеющие компактные размеры, которые достаточно просты в эксплуатации, чтобы начать работать без серьезной подготовки.

В настоящее время существует много программ, позволяющих работать с трехмерной графикой. Самые распространенные: «Компас 3D», «Blender», «Fusion 360», «Solid Works» и другие. Прежде чем приступить к созданию модели для 3D-печати, нужно решить, из какого материала Вы хотите напечатать изделие. В настоящее время существует множество материалов для 3D-печати. Начиная с филамента (пластик), фотополимерных смол и, заканчивая строительными смесями и металлом. У каждого материала, используемого для 3D-печати есть свои индивидуальные особенности, такие как: максимальный и минимальный размеры модели, толщина стенок, расстояние между подвижными частями модели и другие особенности.

Обязательным условием для 3D-печати является наличие 3D-модели объекта, предмета, которую будет печатать («выращивать») 3D-принтер. Но, даже имея 3D-модель желаемого объекта, не нужно быть полностью уверенным, что мы можем, что называется «без проблем» ее напечатать на 3D-принтере.

Загвоздка заключается в том, что не все модели пригодны для 3D-печати. К 3D-моделям применяются определенные требования, такие как: размер, сложность модели, дизайн и т.д. Указанные требования варьируются в зависимости от модели 3D-принтера, его индивидуальных характеристик, а также печатного материала, используемого принтером.

Для успешной работы в программах по 3D-моделированию нужно иметь определенные знания и умения.

Но, создание 3D-модели это, что называется, половина дела. Для того чтобы ее напечатать на 3D-принтере, необходимо сохранить модель в нужном формате, чтобы в дальнейшем подготовить ее к печати.

Слайсер – это специальная программа, предназначенная для подготовки 3D-модели к печати. Слайсер преобразует 3D-объект в специальный код - G-код. G-код – это буквенно-числовой код (рис. 8.5). Кодовая система для токарно-фрезерных станков с ЧПУ, 3D-принтеров представляет собой особую группу команд, которые распознаются станками с функциями программного управления.

<pre> % (Header) (Generated by gcodetools from Inkscape.) (Using default header. To add your own header create file "header" in the output) M3 (Header end.) G21 (All units in mm) (Start cutting path id: path2987) (Change tool to Default tool) G00 Z5.000000 G00 X179.009524 Y155.625401 G01 Z-0.125000 F100.0(Penetrate) G02 X161.473826 Y113.491253 Z-0.125000 I-59.387065 J0.000000 F400.0000 G02 X118.936505 Y95.955557 Z-0.125000 I-42.537321 J42.824737 G02 X76.399183 Y113.491254 Z-0.125000 I-0.000000 J60.360432 G02 X58.863487 Y155.625401 Z-0.125000 I41.851369 J42.134147 G02 X76.399182 Y197.759546 Z-0.125000 I59.387060 J-0.000000 G02 X118.936505 Y215.295243 Z-0.125000 I42.537323 J-42.824738 G02 X161.473827 Y197.759547 Z-0.125000 I-0.000000 J-60.360434 G02 X179.009524 Y155.625401 Z-0.125000 I-41.851364 J-42.134146 G01 X179.009524 Y155.625401 Z-0.125000 G00 Z5.000000 (End cutting path id: path2987) </pre>	<pre> Z = 5 X = 179 Y = 155,6 Z = -0,12 .x1=(0 179 4,69 178,83 9,38 178,27 14,08 177,35 18,77 176,07 23,46 174,43 28,15 172,46 32,85 170,15 37,54 167,53 42,23 161,4) .y1=(0 155,6 4,69 150,91 9,38 146,25 14,08 141,65 18,77 137,14 23,46 132,74 28,15 128,49 32,85 124,41 37,54 120,52 42,23 113,4) x=179y=155,6 x=x1[s]y=y1[s] s=s+0.1 .x2=(0 161,4 4,71 157,89 9,42 154,18 </pre>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Рис. 8.5. Пример G-кода

3D-принтер по сути, это станок с числовым программным управлением, реализующий только аддитивные операции.

Слайсер выполняет преобразование объемного изображения (3D-модель) в соответствующий набор команд для печатного устройства. Иными словами, программа делает трехмерную модель более «понятной» для принтера.

Прежде всего, нужно помнить, что большинство слайсеров «распознают» файлы формата STL и OBJ. Практически все современные программы для 3D-моделирования позволяют экспортировать модели в STL-формате. В процессе подготовки 3D-модели к печати (слайсинг) объект разделяется на слои, каждый из которых обладает двумя закодированными параметрами - контуром и процентом запол-

нения. В процессе 3D-печати экструдер принтера перемещается вдоль горизонтальных осей, выполняя движения, заложенные в G-коде модели. По завершении печати одного слоя модели, происходит вертикальное перемещение экструдера или рабочей платформы (печатный стол) для печати следующего слоя.

Современные 3D-принтеры позволяют производить печать не только пластиком (филамент), но и другими материалами.

Рассмотрим технологии 3D-печати.

1. «FDM», «FFF» - технологии:

«Fused Deposition Modeling» («FDM») и «Fused Filament Fabrication» («FFF») и обозначают моделирование трехмерного объекта методом послойного наложения расплавленной полимерной нити (или методом моделирования путем направления). Принцип работы обеих технологий идентичен, разница исторически есть, но сейчас она фактически лишь в названиях данных технологий. Принцип работы технологии «FDM/FFF» следующий: филамент (нить твердого термoplastичного материала) проталкивается через накалившееся до нужной температуры сопло экструдера, расплавляясь в процессе. Принтер наносит материал на печатный стол согласно запрограммированной траектории, слой за слоем. На печатном столе филамент остывает и затвердевает, образуя твердый объект.

2. «SLA», «DLP» - технологии:

расшифровываются эти аббревиатуры как «Stereolithography» (стереолитография) и «Digital Light Processing» (цифровая обработка светом). Процесс печати по этим технологиям получил название полимеризация в чане. Принцип работы обеих технологий состоит в том, что фотополимерная смола, находящаяся в чане, селективно полимеризуется источником света.

Принципиальное отличие «SLA» от «DLP» заключается в использовании разных источников света. «SLA»-принтеры используют координатный лазер, в то время как DLP-принтеры используют ультрафиолетовый проектор для одномоментной засветки слоя, а самые доступные из этой категории - LCD DLP - жидкокристаллический экран.

3. «DMLS» - технология:

Расшифровывается как «Direct Metal Laser Sintering» и означает прямое лазерное спекание металлов. «DMLS» - принтер не расплавляет металлический порошок, но нагревает его до такой степени, что его частицы начинают сплавляться на молекулярном уровне. Технология

«SLM» использует лазер, чтобы добиться полного расплавления металлического порошка, образуя однородную структуру изделия. Получается, что для обработки по технологии «DMLS», расходный металлический порошок вовсе не обязательно должен иметь единую температуру плавления.

4. «SLS» и «SLM» - технологии:

аббревиатуры расшифровываются как «Selective Laser Sintering» (лазерное спекание порошковых компонентов) и «Selective Laser Melting» (селективное лазерное сплавление). Основная разница данных технологий - в степени нагрева материала печати и используемых материалах. «SLS»-технология используется с разными материалами, в то время как «SLM» работает в основном с металлами.

Печать по данным технологиям подразумевает послойное спекание порошкообразного материала для получения изделия по заданной CAD-модели. Спекание частиц порошка происходит за счет воздействия лазерного луча. Перед началом печати порошкообразный материал разогревается так, чтобы его температура не превышала температуру плавления материала. Построение объекта происходит послойно, снизу вверх. Порошок подается в камеру построения, где лазерный луч спекает слой изделия согласно заданной цифровой модели. После спекания в камеру подается следующая порция порошка для образования нового слоя. Во время конструирования платформа принтера плавно опускается вниз строго по толщине печатного слоя.

Для подготовки 3D-моделей к печати по самой распространенной «FDM» - технологии применяются следующие слайсеры:

1. «Repetier-Host»,
2. «Cura»,
3. «Slic3r»,
4. «Polygon X»,
5. «Tinkerine Suite» и другие.

Рассмотрим подготовку 3D-модели к печати с помощью слайсера «Repetier-Host». Программа позволяет напрямую управлять 3D-принтером подключившись через шнур, либо сгенерировать задание для печати (G-код) и, сохранив на носителе (SD-карту, например) запустить печать. Стартовое окно «Repetier-Host» выглядит следующим образом (рис. 8.6):

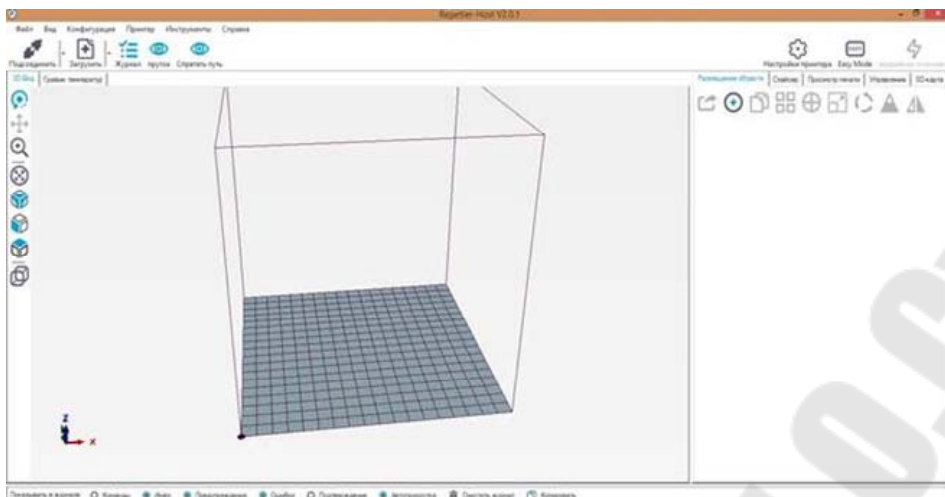


Рис. 8.6. Стартовое окно «Repetier-Host»

В открывшемся окне мы видим виртуальный стол 3D-принтера. Жирная точка в левом углу стола указывает начало координат принтера. Данный указатель помогает при размещении объекта на печатном столе и позволяет сориентироваться, если нам необходимо повернуть объект и т.д. При запуске программы активна лишь клавиша «+» - добавить. Добавив 3D-модель в STL или OBJ формате (кнопка «+»), мы можем изменить ее размер (клавиша «Масштабировать»), повернуть, копировать и т.д.

Итак, приступим к подготовке модели - слайсингу. Переходим во вкладку «Слайсер» и указываем нужные параметры, которые напрямую зависят от сложности, размера и других параметров 3D-модели.

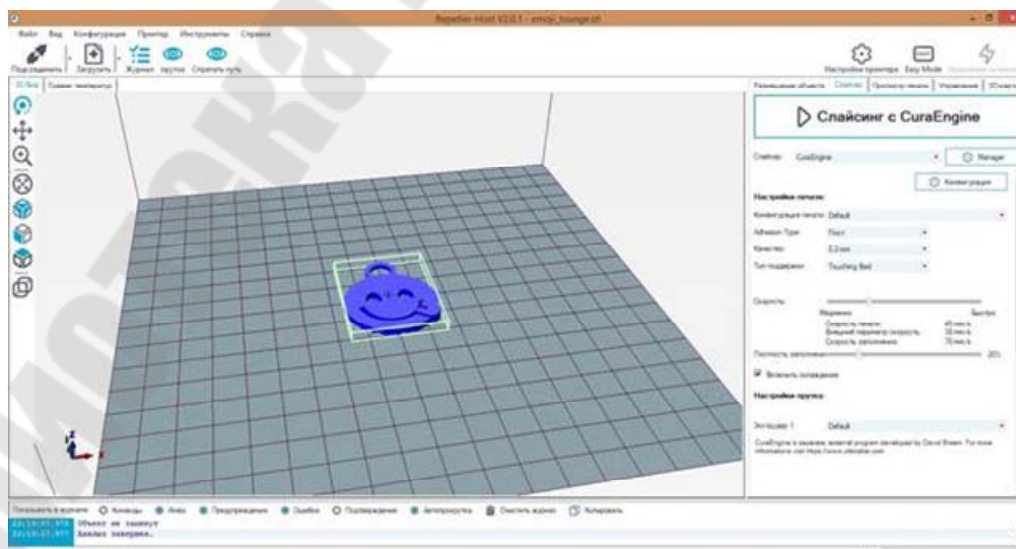


Рис. 8.7. Подготовка модели к слайсингу

- Во вкладке «Слайсер» мы указываем следующие параметры:
- адгезия (тип прилипания модели к печатному столу: «Край», «Плот»);
 - качество (зависит от размера сопла, стандартное: 0.3-0,4 мм.);
 - тип поддержки («От основания», «По всей модели»);
 - плотность заполнения (стандартное: 17-20%).

Если модель сложная и имеет, например, нависающие части, необходимо задать параметры поддержки, т.к. принтер не сможет произвести печать данных элементов.

Например, модель Эйфелевой башни без поддержки (рис. 8.7):

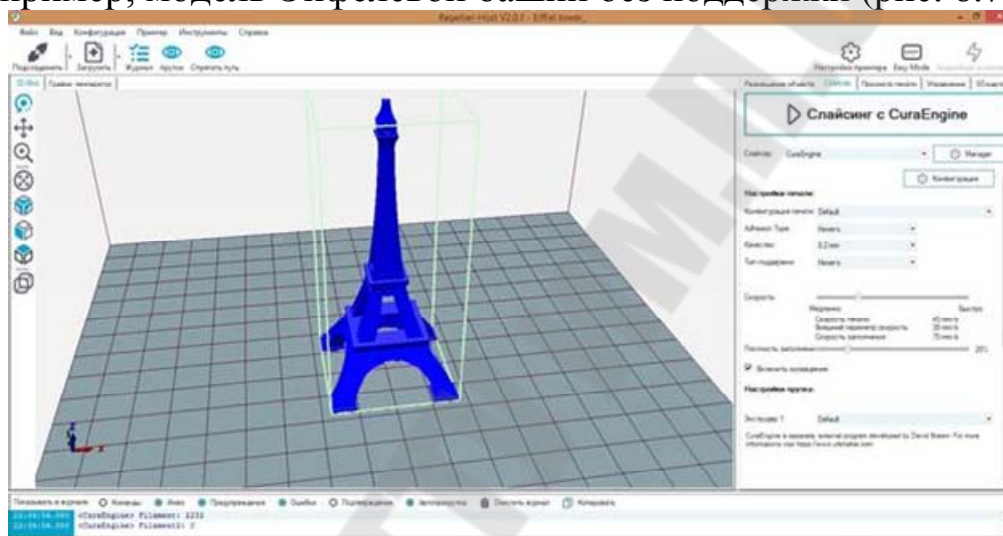


Рис. 8.7. Модель Эйфелевой башни без поддержки

Модель Эйфелевой башни с указанием поддержек (рис. 8.9):

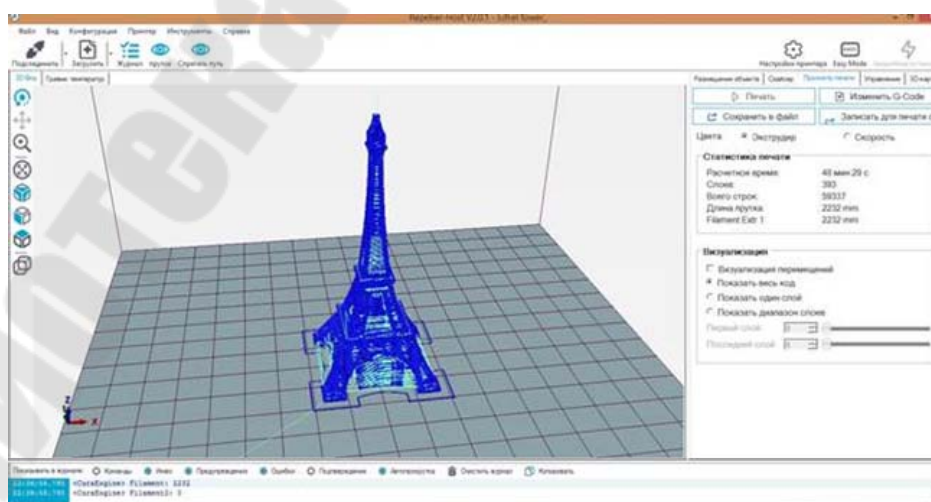


Рис. 8.8. Модель Эйфелевой башни с указанием поддержек

Указав все необходимые параметры, нажимаем клавишу «Слайсинг» и программа рассчитывает время печати нашей модели, количество слоев, расход филамента (пластика) и иные параметры. Указанные параметры не следует считать абсолютными, т.к. любая программа имеет определенную погрешность.

По завершении процедуры слайсинга, мы можем запустить печать – в случае, если 3D-принтер подключен посредством шнура, либо же сохранить задание на носитель и, с него запустить печать напрямую с принтера.

Перейдя во вкладку «Изменить G-код», мы можем просмотреть и, при необходимости изменить G-код – указать паузу на определенном слое печати, например см.рис. 8.10.

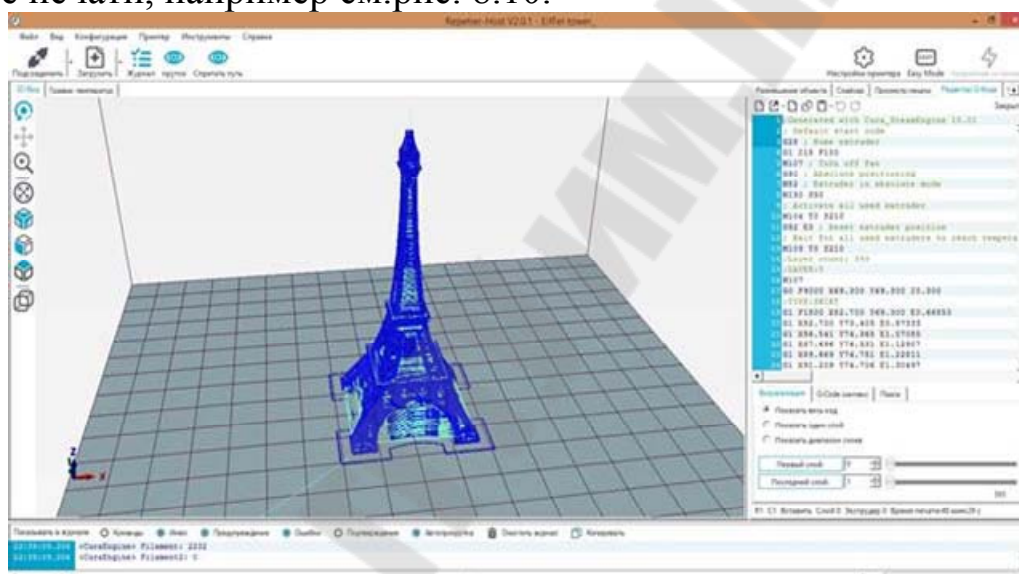


Рис. 8.10. – Готовая к печати модель Эйфелевой башни

Модель готова к печати. Остается нажать клавишу «Печать» - если принтер подключен посредством шнура, либо «Сохранить в файл» и, запустить печать с носителя.

Технологии трехмерного синтеза и оцифровки представляет собой хорошо спланированный и подготовленный процесс преобразования виртуальных моделей в физические объекты. Процесс 3D-печати состоит из этапов, перечисленных на следующем рис. 8.11.



Рис. 8.11. – Этапы 3D-печати

Ниже мы раскроем содержание этапов 3D-печати на примере самой распространенной технологии FDM (Fused Deposition Modeling), которая предполагает формирование объектов методом послойной укладки расплавленной полимерной нити.

Этап 1: Создание цифровой модели

Процесс 3D-печати начинается с разработки виртуального образа будущего объекта в 3D-редакторе или CAD-программе («3D Studio Max», «AutoCAD», «Компас», «SolidWorks» и др.). Простую модель может создать любой пользователь, который имеет навыки работы с персональным компьютером и стандартными пакетами прикладных программ. Для создания сложных моделей (рис. 8.12) требуется пакет профессиональных программ и услуги специалиста в области 3D-моделирования.

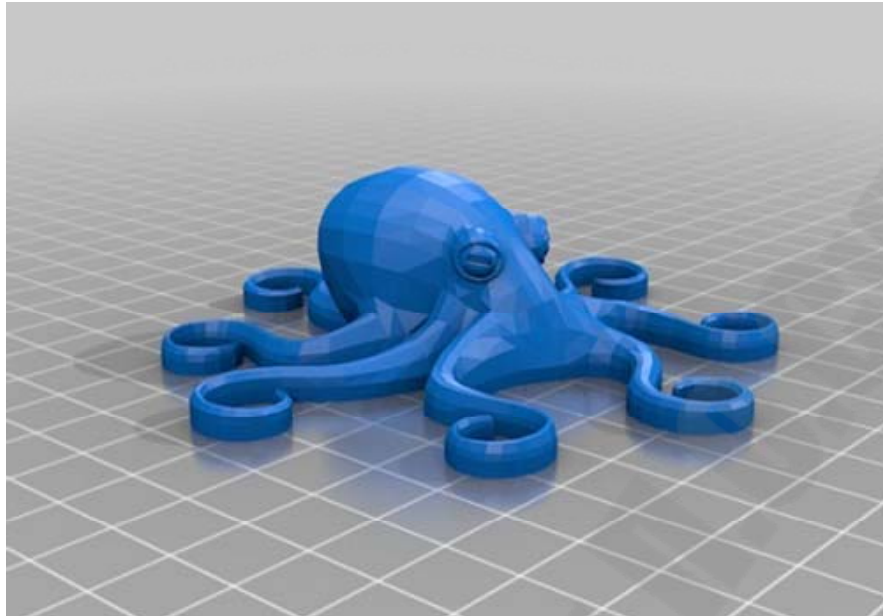


Рис. 8.12. Виртуальная модель в среде 3D-редактора

На создание виртуального образа будущего объекта потребуется от нескольких часов до нескольких дней, в зависимости от степени сложности модели. Если модель имеет сложную конструкцию, то лучше доверить ее разработку профессионалам.

В отдельных случаях для создания виртуальных образов будущих объектов используются 3D-сканеры. При этом точность объектов снижается, они получаются слегка размытыми. Чтобы получить высокоточный объект, следует создавать его вручную.

Также готовые виртуальные модели можно найти в Интернет, на специализированных сайтах, посвященных 3D-печати.

Этап 2: Экспорт 3D-модели в STL-формат

Когда моделирование окончено, следует перевести полученный файл в STL-формат, который распознает большинство современных 3D-принтеров. Для этого нужно выбрать в меню пункт «Сохранить как» или «Import/Export», в зависимости от используемой программы.

Перед экспортом файла следует указать степень детализации модели или степень ее разбиения на треугольники. Если выбрать параметр «Точно», то разбиение получится плотным, готовый файл займет довольно много места на жестком диске компьютера и будет дольше обрабатываться специальным программным обеспечением, но зато на выходе пользователь получит объект с высококачественной поверхностью. Если выбрать параметр «Грубо», то разбиение получится менее плотным или совсем неплотным, готовый файл займет на жестком диске меньше места и будет быстрее обрабатываться в спе-

циальной программе, но и качество внешних поверхностей будет значительно ниже, чем при точном разбиении.

При выборе способа разбиения объекта необходимо учитывать требования к качеству его внешней поверхности, а также мощность персонального компьютера и его способность справиться с обработкой модели перед отправкой на печать.

Этап 3: Генерирование G-кода

STL-файл с будущим объектом обрабатывается специальной программой-слайсером, которая переводит его в управляющий G-код для 3D-принтера. Если модель не подвергнуть слайсингу, то 3D-принтер не распознает ее. Среди наиболее популярных слайсинговых программ можно отметить Kisslicer, Skineforge, Slic3r и др. Програма-слайсер указывает последовательность нанесения материала во время 3D-печати

Программы-слайсеры разрезают модель на тонкие горизонтальные пластины и преобразуют в цифровой G-код, понятный трехмерному принтеру. Програма-слайсер как бы задает траекторию движения печатающей головки 3D-принтера при нанесении расходного материала.

Этап 4: Подготовка 3D-принтера к работе

На этапе подготовки 3D-принтера с технологией FDM-печати к работе следует наклеить на рабочую платформу специальную самоклеющуюся пленку и загрузить в специальный отсек бобину с полимерными нитями.

В последнее время в гипермаркетах расходных материалов появилась специальная защитная пленка для 3D-принтеров, хотя для защиты печатной платформы можно использовать и обычную самоклеющуюся пленку для лазерных принтеров. Пленка приклеивается к платформе, после чего канцелярским ножом обрезаются ее края. Если под пленкой образовались пузырьки, их нужно выпустить, проколов иголкой. Перед началом печати пленку рекомендуется обезжирить, протерев спиртом.

Далее следует загрузить в 3D-принтер бобину с полимерной нитью нужного цвета. Самыми популярными видами пластика для 3D-печати являются ABS и PLA. Пластик ABS формирует непрозрачные ударопрочные термопластичные объекты, Бобина устанавливается на подставку, подрезается конец нити, чтобы он был ровным. Для печати нельзя использовать грязные, поврежденные или изломанные нити, которые могут повредить принтер, вывести его из строя. Конец нити

заправляется в отверстие для подачи и продвигается вперед до тех пор, пока он не упрется в экструдер. Через несколько секунд из экструдера появится мягкая нить расплавленного пластика. Теперь можно приступать к печати.

Этап 5: Печать 3D-объекта

Важнейшими элементами 3D-принтера являются рабочая платформа и печатающая головка (рис. 8.13). На рабочей платформе происходит формирование готового объекта. Во время работы платформа движется вверх и вниз по оси Z. Печатающая головка выдавливает на рабочую платформу расплавленную полимерную нить, слой за слоем формируя готовый объект. Печатающая головка 3D-принтера движется по горизонтали и вертикали (оси X, Y).

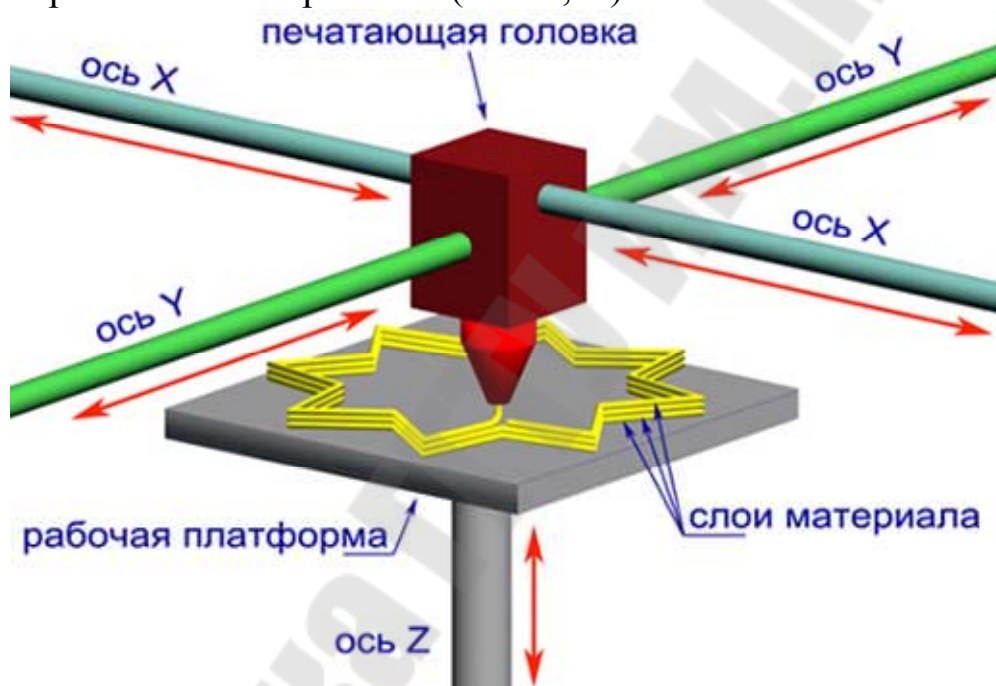


Рис. 8.13. Конструктивные элементы FDA-принтера

Сам по себе процесс трехмерной печати довольно прост. Печатающая головка выдавливает в рабочую зону первый слой расплавленного пластика, после чего платформа опускается вниз на толщину слоя и начинается формирование следующего слоя, который накладывается поверх предыдущего. После завершения печати каждого слоя платформа опускается вниз, так происходит на протяжении всего цикла печати, пока на платформе не появится готовый объект. 3D-печать: принтер наносит на платформу первые слои изделия. Печать

объекта продолжается. На фото (рис. 8.14) хорошо видны слои, которые наносит печатающая головка.



Рис. 8.14. 3D-печать на завершающем этапе

Чтобы напечатать трехмерную модель, принтеру требуется несколько часов, в зависимости от сложности изделия. Безусловно, у разных моделей 3D-принтеров есть свои особенности функционирования, но базовые принципы остаются неизменными.

Этап 6: Финишная обработка объекта

Если объект имеет нависающие элементы, выступы, консоли, то 3D-принтер во время печати использует поддерживающие конструкции (они же – конструкции поддержки, структуры поддержки). Рассмотрим цифровая модель лошади (рис. 8.15).



Рис. 8.15. Цифровая модель лошади без поддерживающих конструкций

Перед вами цифровая модель лошади (рис.8.15). Печать объекта начинается снизу, с задних копыт, которые принтер напечатает без проблем, поскольку они касаются поверхности рабочей платформы. Но как быть с деталями, которые висят в воздухе и не соприкасаются с рабочей платформой? Для наложения слоев расплавленного пластика принтеру нужна какая-то основа, будь то рабочая платформа или предыдущие слои материала, поскольку он не может печатать в пустоте. Чтобы напечатать такие нависающие детали, 3D-принтер использует поддерживающие конструкции, которые показаны на следующем изображении (рис. 8.16).

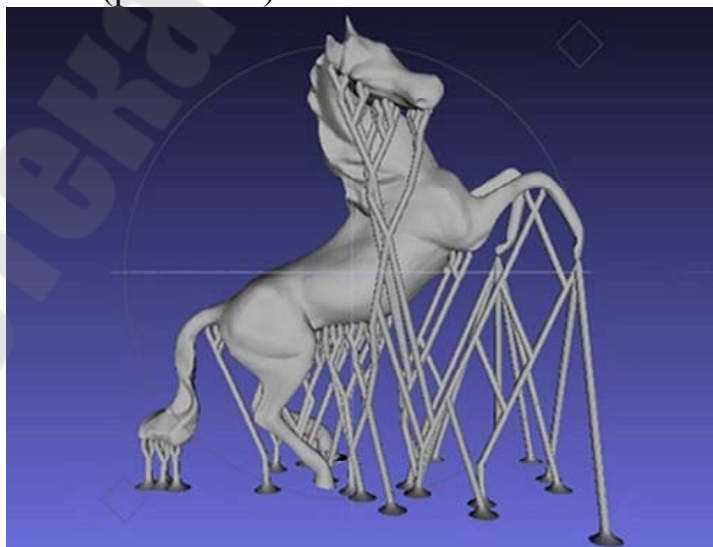


Рис. 8.16. Цифровая модель с поддерживающими конструкциями

За счет добавленных конструкций детали не висят в воздухе, а опираются на рабочую платформу, что позволяет принтеру их напечатать.

После окончания печати, поддерживающие конструкции удаляются. Если поддержки напечатаны из того же материала, что и основная модель, то удалить их довольно сложно. Отрезание или отламывание таких конструкций портит и без того не идеальную поверхность объекта. Поэтому в большинстве современных принтеров используются дополнительные восковые материалы, которые легко удаляются при финишной обработке и не оставляют следов на поверхности объекта.

В следующей статье мы расскажем о других технологиях 3D-печати: стереолитографии, лазерном спекании порошковых материалов, технологии струйного моделирования, технологии склеивания порошков и пр.

Тема 8.2. Сканирование и оцифровка натурального объекта

Если вам необходимо оцифровать реальный объект с точной передачей его размеров, пропорций и формы, вам необходим 3D-сканер. При помощи технологии трехмерного сканирования можно измерить объект со сложной геометрией, получить его интерактивную 3D-модель. При этом не нужно прибегать к сложным математическим расчетам, тратить силы и время.

Впервые о том, чтобы создать доступное и удобное устройство для переноса изображения трехмерного объекта в виртуальную реальность, заговорили в 80-е годы прошлого века. Но тогда технологии не позволяли реализовать подобную идею. Сегодня 3D-сканеры широко используют при создании цифровых макетов деталей, приборов, построек, когда особенно важна точность размеров.

Трехмерное сканирование применяется при:

- 3D-моделировании (когда нужны точные пропорции предмета);
- протезировании;
- изготовлении предметов одежды по индивидуальному заказу;
- промышленном производстве - для определения наличия брака;
- проведении ремонтных и сервисных работ – устройство может использоваться для измерения параметров деталей;
- оцифровке экспонатов и создании виртуальных хранилищ.

Сферы применения можно перечислять долго: реверс-инжиниринг, образование, строительство и другие.

Что такое 3D-сканер и как он работает

В состав устройства входят несколько камер и проектор. В процессе сканирования изображение, получаемое с камер в разных плоскостях, комбинируется и оцифровывается. В итоге получается точная 3D-копия объекта, соответствующая оригиналу по размерам, пропорциям, конфигурации.

Существуют контактные и бесконтактные модели.

- **Контактные.** Для получения 3D-изображения им необходим контакт с предметом сканирования. Объект помещается на платформе с подсветкой, чтобы устройство могло свободно его исследовать и получать информацию. Несмотря на высокую точность получаемого изображения, они медлительны и не подходят для сканирования хрупких вещей, так как могут деформировать их;

- **Бесконтактные.** Их работа строится на использование камер. Они фиксируют отраженные от разных точек объекта световые, ультразвуковые волны, лазерные лучи и передают его полное цифровое изображение. В результате на экране компьютера проступает точная модель сканируемого предмета. Например, речь может идти о получении виртуального слепка челюсти, цифровой модели статуи и пр. Бесконтактные модели популярны, потому что не требуют соприкосновения с объектом, работают быстрее контактных.

Существуют мобильные и стационарные бесконтактные сканеры.

- **Мобильные.** Используются быстрого получения 3D-изображений любых объектов, которые можно обвести с разных сторон. Для измерения объект не нужно фиксировать – легкий и удобный прибор достаточно поднести на определенное расстояние и считать пространственные параметры измеряемого предмета;

- **Стационарные.** Наиболее точные приборы, обеспечивают доскональный перенос формы и размеров. Недостаток: невозможно оцифровать объекты, которые нельзя установить на специальной платформе устройства.

В XXI веке с появлением мощных компьютеров стали набирать свою значимость технологии 3D моделирования, и уже к 2014 году известно большое количество сверхпроизводительных программных комплексов для построения и обработки геометрических данных. Это программы на основе CAD, CAM, CAE – технологий. Но до сих пор

существуют задачи оптимизации при подготовке и получении трехмерных моделей. Среди методов построения трехмерной графики основными являются: Точное моделирование – построение 3D модели на основе обработки геометрических примитивов оператором, с использованием параметрически настроенного математического аппарата современных программных комплексов; Рисование 3D форм – построение сложной трехмерной графики вручную для получения приближенной формы объектов; 3D Сканирование – получение трехмерной геометрии путем преобразования геометрических данных объекта измерительным способом.

Все эти этих направления достаточно сильно развиты и имеют широкое применение в инженерии, медицине, торговле, кинематографии и др. Если абстрагироваться от преимуществ тех или иных продуктов и рассматривать их со стороны инженерного дела, в части построения 3D графики, то во всем многообразии решений можно уследить несколько важных аспектов: 1) Программные САПР различных брендов достаточно развиты и на их основе можно выполнять любые инженерные построения; 2) Математический аппарат современных САПР и графических препроцессоров позволяет вводить любые геометрические данные, полученные в результате 3D сканирования и оцифровки натуральных объектов; 3) В некоторых инженерных трехмерных задачах необходимо сопряжение проектируемых форм с существующими; 4) При наличии натурального образца построение сложной 3D геометрии методом рисования является лишь приближенной формой проектируемого объекта; 5) Процесс построения сложной формы точным моделированием очень трудоемкий и требует особых навыков от инженера; 6) Сканирование форм ускоряет процесс получения 3D моделей и улучшает качество инженерных подходов; 7) Устройства сканирования геометрии вместе с программным обеспечением, как правило, очень дорогие для пользователей (от 200 тыс. рублей и выше). Такая картина является стандартной для проектных и исследовательских организаций, а также малых производственных предприятий. А наиболее слабым местом в отечественном инженерном деле видится отсутствие доступной технологии 3D сканирования. 3D-сканирование – это систематический процесс определения координат точек, принадлежащих поверхностям сложно профильных физических объектов (в частности, деталей) с целью последующего получения их пространственных математической моделей, которые могут модифицироваться с помощью САД-систем.

Устройства, с помощью которых осуществляется сканирование объектов, называют 3D-сканерами. Эти устройства не только упрощают процесс создания 3D-моделей, но и позволяют решать эту задачу с максимальной степенью достоверности по отношению к исходному оригиналу. Устройства сканирования сложной геометрии по принципу работы подразделяются на две группы: контактные и бесконтактные. При этом вторая группа самая многочисленная и включает в себя приборы лазерного, оптического, акустического и электромагнитного сканирования и имеет наибольший успех в медицине, строительстве, рекламе. Контактные устройства не настолько распространены, но имеют меньшую стоимость и для инженерных задач являются более актуальными и понятными. Конечно перспективы развития 3D-сканеров весьма впечатляют: появляются все новые модели лазерных и оптических сканеров, улучшаются скорость и точность измерений, существенно возросли границы масштабов измеряемых форм. Однако использование тех или иных методов получения геометрической информации существенно зависит от самих объектов и целей сканирования. Например, для сканирования деталей с богатой детализацией, к примеру шестеренки, лучше подходят бесконтактные сканеры. Контактные, в свою очередь, для деталей корпусов машин, судов и пр. И те и другие очень сильно зависят от квалификации специалиста производящего замер. А в настоящее время подходы в обучении инженерных кадров, в части навыков графического моделирования постоянно отстают от современных реалий, что лишь усугубляет проблему

Раздел 9. Моделирование средств технологического оснащения

Тема 9.1. Классификация элементов и основных систем технологической оснастки

Инженерные исследования являются неотъемлемой частью процесса конструкторского проектирования, если понимать проектирование в широком смысле этого слова. Эти исследования проводятся с помощью CAE- систем (Computer Aided Engineering). В отличие от CAD-систем, решающих геометрические задачи, CAE-системы моделируют физические процессы поведения проектируемого объекта – например, поведение изделия при различных механических нагрузках, ударах, различных температурных режимах и др. В результате исследований оптимизируются соответствующие прочностные или тепловые характеристики, повышается ресурс и долговечность объекта.

Исследоваться могут не только проектируемые изделия или детали, но и проектируемые технологические процессы – например, процесс горячей штамповки, гибки, прокатки или литья из пластмасс. Оптимизация параметров технологического процесса приводит к улучшению качества и повышению долговечности изготавливаемого изделия, уменьшению его материалоемкости. Кроме того, при исследовании технологического процесса вырабатываются рекомендации, способствующие улучшению характеристик соответствующей оснастки.

На рис. 9.1 приведена общая схема совместного использования CAD- и CAE-систем применительно к задаче проектирования средств технологического оснащения. Разрабатываемые в CAD-системе конструкторские решения подвергаются исследованиям с помощью CAE-системы. По результатам исследований выполняются соответствующие изменения конструкции или параметров проектируемой оснастки. При необходимости выполняются повторные исследования и т. д., до получения оптимального (или просто приемлемого) результата.

Конечноэлементный анализ . Математической основой инженерных исследований являются методы нелинейного конечноэлементного анализа (FEA – Finite Element Analysis). FEA – это чрезвычайно мощное средство, которое дает инженеру возможность моделировать структурное поведение объекта, выполнять изменения и наблюдать результаты этих изменений. Метод конечных элементов работает на основе расщепления геометрии объекта на большое чис-

ло (тысячи или десятки тысяч) элементов (например, параллелепипедов). Эти элементы образуют ячейки сети с узлами в точках соединений. Поведение каждого малого элемента стандартной формы быстро рассчитывается на основе математических уравнений. Суммирование поведения отдельных элементов дает ожидаемое поведение объекта в целом. По существу, FEA является численным методом решения инженерных задач, таких как анализ напряжений, теплопередача, электромагнитные явления и течение жидкостей.

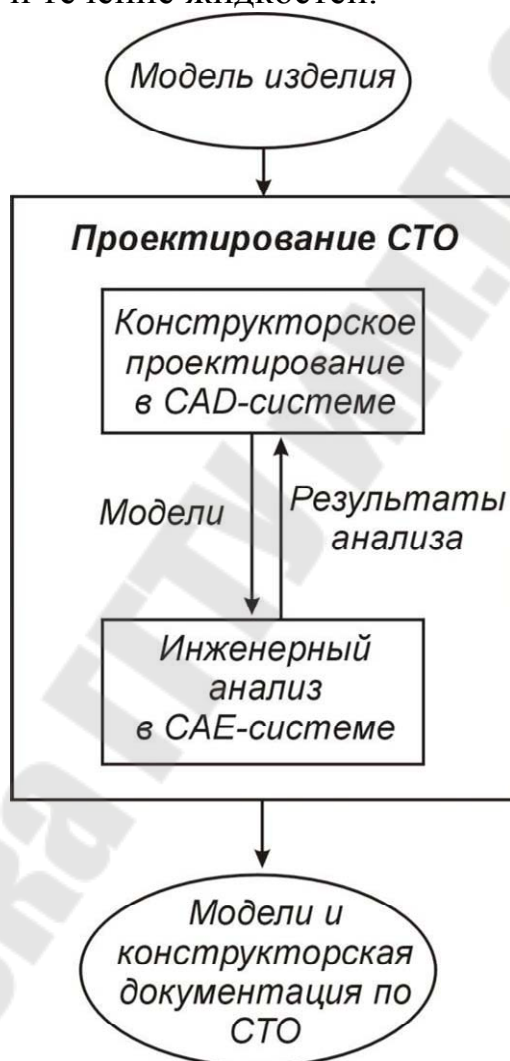


Рис. 9.1. Роль САЕ-систем в проектировании средств технологического оснащения (СТО)

В зависимости от того, отвечает ли исследуемая модель требованию линейности, используется линейный или нелинейный конечно-элементный анализ. В отличие от линейного FEA, где решение достигается в одном шаге, нелинейный FEA представляет собой итерационную процедуру, которая может потребовать сотен и даже

тысяч шагов. Существует три основных типа нелинейностей:

- Материальные – пластичность, ползучесть, вязкоупругость материала;
- Геометрические – большие деформации или растяжения, резкие изгибы;
- Граничные – контакты с другими объектами, трение, дополнительные силы.

В практических ситуациях чаще всего имеют место нелинейные модели, требующие применения нелинейного конечноэлементного анализа.

Теоретически нет ограничений на приложения с использованием FEA. Методы FEA впервые были применены в аэрокосмической и автомобильной промышленности, но затем распространились практически на все другие отрасли. Сегодня любой проектируемый объект может быть подвергнут моделированию с использованием технологий FEA.

Конечные элементы, применяемые в FEA, отличаются достаточно большим разнообразием форм и могут быть треугольными, четырехугольными и др. (рис. 9.2).

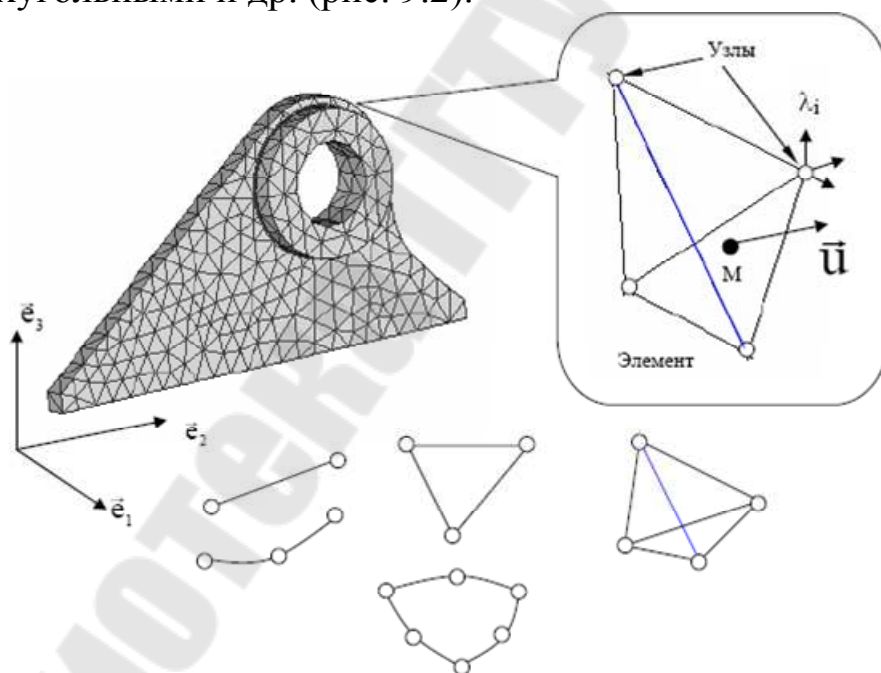


Рис. 9.2. Формы конечных элементов

Элементы бывают одномерными, плоскими и пространственными, с прямолинейными или криволинейными сторонами. Вдоль каждой из них может быть два или более узлов (табл.9.1).

Таблица 9.1

Возможное число узлов в конечных элементах

Форма элемента	Количество узлов
Балка	2/3/4
Треугольник	3/4/6/7/9/13
Четырехугольник	4/5/8/9/12/16
Тетраэдр	4/5/10/11/14/15/16/40
Трехгранная призма	6/7/15/16/20/21/24/52
Гексаэдр	8/9/20/21/26/27/32/64

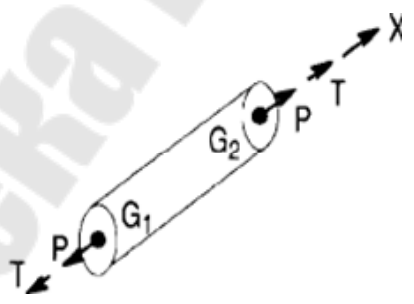
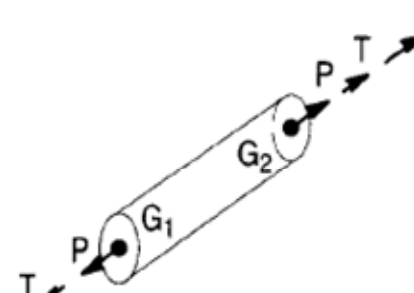
Существует также набор специальных элементов: сосредоточенная масса;

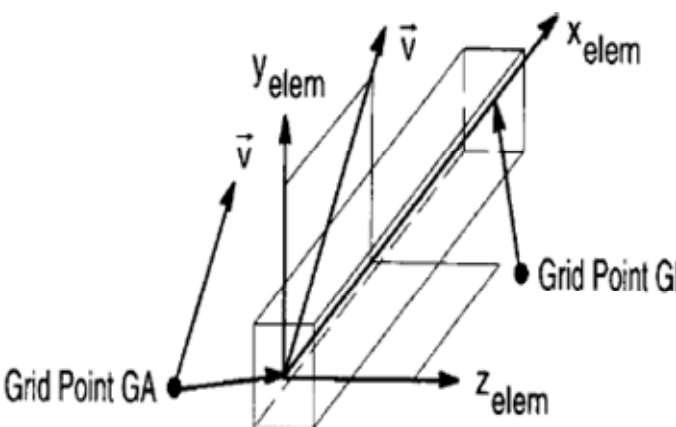
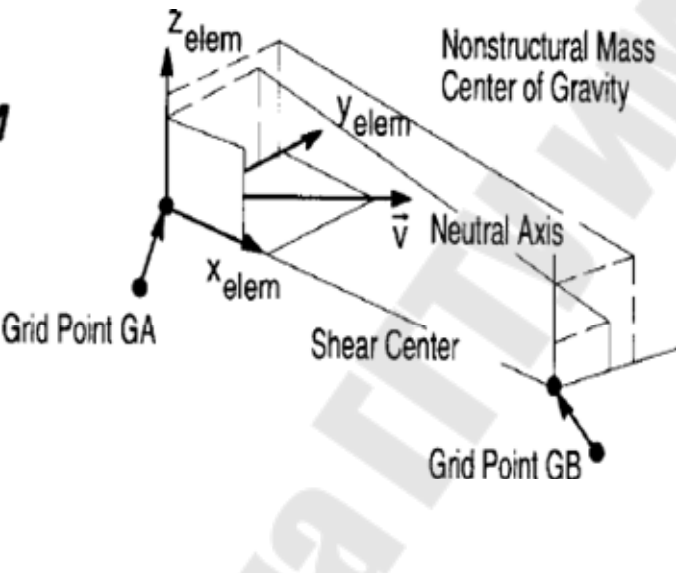
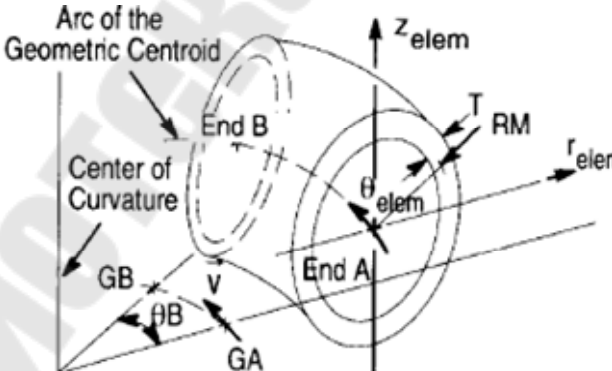
- пружина; демпфер;
- "жесткость" закрепления;
- "списки степеней свободы" (Degree-of-Freedom Lists); межузловые связи (взаимное ограничение степеней свободы).

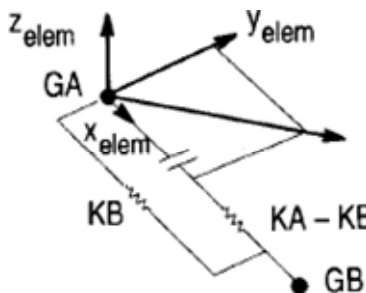
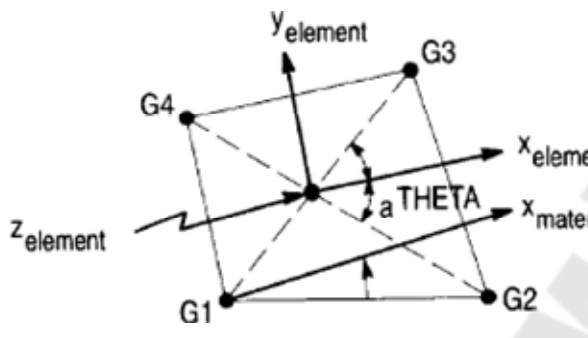
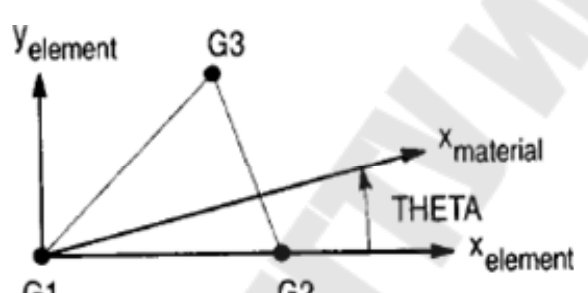
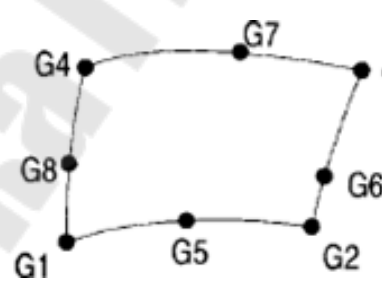
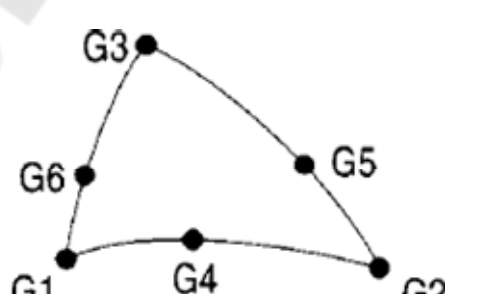
В табл.9.2 приведено описание некоторых конечных элементов, применяемых для проведения инженерных расчетов.

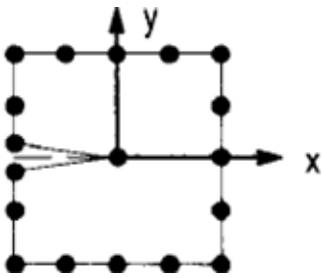
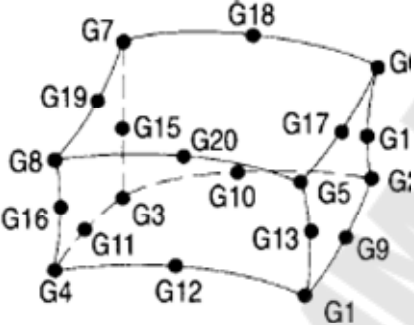
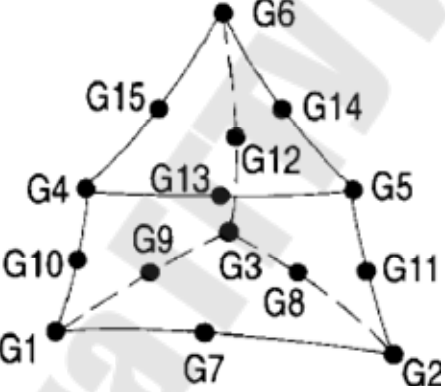
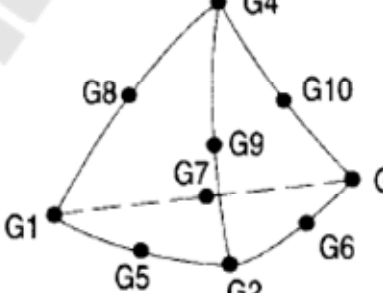
Таблица 9.2

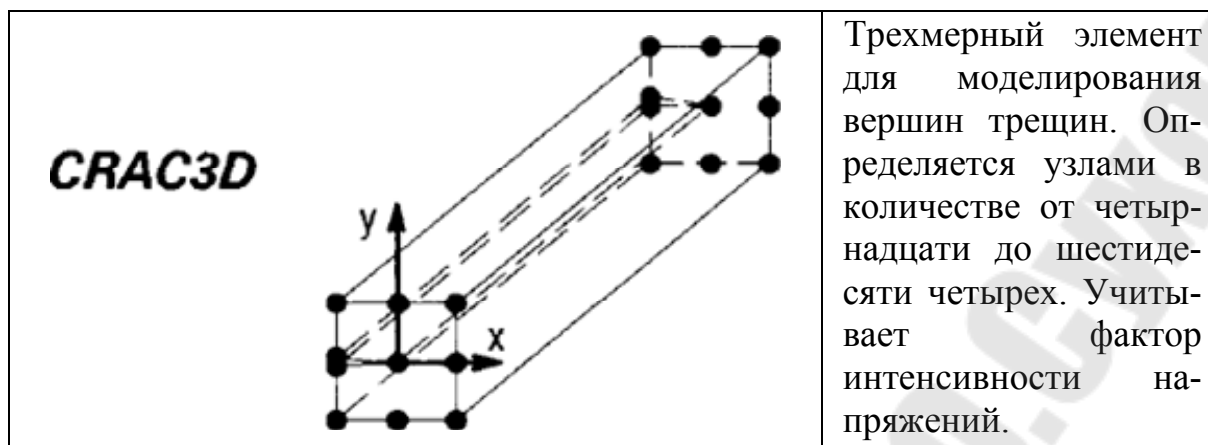
Описание некоторых конечных элементов

<p>ROD</p> 	<p>Одномерный двухузловой элемент, работающий на растяжение-сжатие и кручение. Две степени свободы в узле (T_x, R_x).</p>
<p>TUBE</p> 	<p>Одномерный двухузловой элемент трубы, работающий на растяжение-сжатие и кручение. Две степени свободы в узле (T_x, R_x).</p>

<p>BAR</p> 	<p>Одномерный простой балочный двухузловой элемент. Шесть степеней свободы в узле (T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z). Допускается смещение нейтральной оси относительно узлов элемента. Может учитывать эффект поперечного сдвига.</p>
<p>BEAM</p> 	<p>Одномерный сложный балочный двухузловой элемент. Семь степеней свободы в узле (T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z и деформация сечения). Допускается смещение оси центра сдвига относительно узлов элемента. Нейтральная линия и центр сдвига могут не совпадать. Допускается клиновидность элемента. Учитывается поперечный сдвиг.</p>
<p>BEND</p> 	<p>Одномерный криволинейный балочный двухузловой элемент. Шесть степеней свободы в узле (T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z).</p>

<p>GAP</p> 	<p>Одномерный контактный двухузловой элемент. Используется в нелинейных задачах для моделирования контактных усилий.</p>
<p>QUAD4</p> 	<p>Двумерный четырехугольный мембранно-изгибный плоский элемент с четырьмя узлами. Пять степеней свободы в узле (T_x, T_y, T_z, R_x, R_y).</p>
<p>TRIA3</p> 	<p>Двумерный треугольный мембранно-изгибный плоский элемент с тремя узлами. Пять степеней свободы в узле (T_x, T_y, T_z, R_x, R_y).</p>
<p>QUAD8</p> 	<p>Двумерный четырехугольный криволинейный оболочечный элемент с количеством узлов от четырех до восьми. Пять степеней свободы в узле (T_x, T_y, T_z, R_x, R_y).</p>
<p>TRIA6</p> 	<p>Двумерный треугольный криволинейный оболочечный элемент с количеством узлов от трех до шести. Пять степеней свободы в узле (T_x, T_y, T_z, R_x, R_y).</p>

<p>CRAC2D</p> 	<p>Двумерный элемент для моделирования вершины трещины. Определяется узлами в количестве от семи до восемнадцати. Учитывает фактор интенсивности напряжений.</p>
<p>HEXA</p> 	<p>Трехмерный шестигранный объемный элемент с количеством узлов от восьми до двадцати. Три степени свободы в узле (T_x, T_y, T_z).</p>
<p>PENTA</p> 	<p>Трехмерный пятигранный объемный элемент с количеством узлов от шести до пятнадцати. Три степени свободы в узле (T_x, T_y, T_z).</p>
<p>TETRA</p> 	<p>Трехмерный четырехгранный объемный элемент с количеством узлов от четырех до десяти. Три степени свободы в узле (T_x, T_y, T_z).</p>



Во всех узлах задаются обобщенные координаты, называемые узловыми смещениями, совокупность которых для данного элемента записываются в виде матрицы. Узловые смещения могут представлять собой компоненты вектора перемещения узлов вдоль осей координат, а также углы поворота элемента в узловых точках. В пределах каждого элемента для компонент вектора перемещения любой точки задают аппроксимацию через узловые смещения, которые являются неизвестными величинами и называются функциями формы элемента и выражают связь между узловыми смещениями и вектором перемещения точки тела. В качестве функций формы обычно используют полиномы. Они подставляются в уравнения равновесия тела, из которых и определяются узловые смещения для каждого элемента.

Уравнения равновесия тела при использовании FEA удобнее всего получить исходя из принципа возможных перемещений. В соответствии с указанным принципом приращение работы внутренних сил равно работе внешних сил на возможных перемещениях. Учитывая зависимость компонентов тензора деформаций от узловых смещений и связь между компонентами тензоров напряжений и деформаций для упругого тела, выражающуюся законом Гука, находится зависимость компонентов тензора напряжений от узловых смещений. Путем несложных математических преобразований получается система линейных алгебраических уравнений, выражающая условия равновесия конечного элемента, которые включают в себя матрицу жесткости элемента, вектор узловых смещений и вектор узловых сил. Совокупность таких уравнений для всех элементов, дополненная уравнениями связей, наложенных на тело (граничные условия), представляет собой систему уравнений равновесия рассматриваемого тела. Полученные уравнения используются для расчета конструкций на прочность при статическом нагружении. Из их решения определяет-

ся вектор узловых смещений, перемещения точек тела, деформации и напряжения. Эти решения являются основой для вычисления запасов прочности и оценки прочности конструкции.

При решении задач динамики напряжения, деформации, перемещения являются функцией времени, и в этом случае проводят исследования вибрационных характеристик конструкций (вычисляют частоты, амплитуды колебаний, амплитудные значения напряжений, деформаций, исследуют резонансные явления). Вводя по принципу д'Аламбера объемные силы инерции в интеграл для узловых сил, можно получить уравнения движения элемента. При наличии в системе сил вязкого сопротивления, пропорциональных скоростям точек, в уравнения движения вводят матрицу коэффициентов демпфирования. Совокупность уравнений для всех элементов дает систему уравнений движения для всего тела, используемую для расчета динамики конструкций. При отсутствии внешних сил система уравнений описывает собственные колебания тела. Отыскивая в этом случае узловые смещения, находят собственные частоты колебаний и далее соответствующие им собственные векторы узловых смещений, называемые также собственными формами колебаний конструкции. При наличии внешних сил решается задача о вынужденных колебаниях.

При исследовании задач упругой устойчивости элементов конструкций уравнения равновесия составляются с учетом изменения геометрии тела в деформированном состоянии. В этом случае также приходят к задаче на собственные значения, где с помощью матрицы геометрической жесткости, называемой дифференциальной, учитывают работу внешних сил, обусловленную изменением геометрии тела, параметры нагрузки, при которых существуют нетривиальные решения для узловых смещений, то есть появляются новые формы равновесия тела, отличные от исходной. Значения нагрузки, называемые критическими, показывают, во сколько раз эта критическая нагрузка, при которой происходит потеря устойчивости исходной формы равновесия тела, больше текущей нагрузки. Практический интерес обычно представляет первая (наименьшая) критическая нагрузка, поскольку именно она будет реализована при работе конструкции.

Аналогичным образом возможно решение других типов задач, таких как анализ теплопроводности, электромагнитных полей, исследования различных технологических производственных процессов, связанных с нелинейным поведением материалов, анализ кинематики

механических систем и многие другие.

Программный комплекс MSC.Software. Первые системы для автоматизации решения задач инженерного анализа появились более 30 лет назад. В настоящее время разработаны и широко используются целые программные комплексы, среди которых лидирующие позиции занимает комплекс, разработанный компанией MSC.Software. Рассмотрим кратко его состав и функции.

MSC.Nastran - расчет и оптимизация конструкций. MSC.Nastran обеспечивает практически полный набор расчетов, включая расчет напряженно - деформированного состояния, собственных частот и форм колебаний, анализ устойчивости, решение задач теплопередачи, исследование установившихся и неустойчивых процессов, нелинейных статических процессов, нелинейных динамических переходных процессов, расчет критических частот и вибраций роторных машин, анализ частотных характеристик при воздействии случайных нагрузок, спектральный анализ и исследование аэроупругости. Предусмотрена возможность моделирования практически всех типов материалов, включая композитные и гиперупругие. Расширенные функции включают технологию суперэлементов (под-конструкций) и макроязык DMAP для создания пользовательских приложений.

Наряду с расчетом конструкций, Nastran может использоваться и для оптимизации проектов. Это делается путем вариации параметров формы, размеров и свойств проекта. Благодаря своей эффективности алгоритмы оптимизации обрабатывают неограниченное число проектных параметров и ограничений. Вес, напряжения, перемещения, собственные частоты и многие другие характеристики могут рассматриваться либо в качестве целевых функций проекта (в этом случае их можно минимизировать или максимизировать), либо в качестве ограничений. Алгоритмы анализа чувствительности позволяют исследовать влияние различных параметров на поведение целевой функции и управлять процессом поиска оптимального решения. Nastran применяется также и для планирования экспериментов (определения мест расположения датчиков) и оценки полноты полученных экспериментальных данных.

MSC.Dytran - анализ высоконелинейных быстропротекающих динамических процессов. Dytran – система анализа высоконелинейных быстропротекающих процессов, связанных с взаимодействием различных частей конструкции, конструкции и конструкции, а также конструкции и жидкости (газа). Типичные приложения Dytran вклю-

чают взаимодействие автомобиля, препятствия, пассажира и подушки безопасности в момент ее заполнения воздухом при катастрофе, столкновение птиц с самолетными конструкциями, столкновение и посадку на мель судов, взрывы в ограниченном пространстве, удар снаряда о преграду и ее пробивание, попадание метеорита в обшивку космического аппарата, штамповку металла, поведение жидкости в не полностью заполненных емкостях и другие задачи.

В основе Dutran лежит явный метод интегрирования дифференциальных уравнений по времени. Это избавляет от необходимости декомпозиции больших матриц, на которую уходит большая часть процессорного времени при решении высоконелинейных задач. Программа полностью векторизована, может эффективно применяться на компьютерах, поддерживающих параллельную обработку данных. Благодаря своей способности решать высоконелинейные задачи анализа взаимодействия разнородных сред, Dutran эффективно применяется в автомобильной, аэрокосмической, оборонной и других отраслях промышленности, где эти проблемы весьма актуальны.

MSC.Marc - комплексный нелинейный анализ конструкций, решение задач термпрочности, анализ технологических процессов. Программный комплекс Marc – один из мировых лидеров в моделировании нелинейных процессов в механике, теплопередаче, электро- и магнитостатике и динамике, в акустике.

Хотя Marc является универсальной конечно-элементной программой, ее применение особенно эффективно для проведения углубленного анализа высоконелинейного поведения конструкций и решения задач теплопередачи. В дополнении к возможностям Nastran и Dutran по решению нелинейных задач, с помощью Marc возможно решение задач, по условиям которых конструкции подвергаются большим линейным и угловым перемещениям, материалы имеют нелинейные свойства или свойства, зависящие от истории нагружения, присутствует сложное контактное взаимодействие частей конструкции. Примерами таких задач являются анализ поведения резиновых уплотнений, анализ строительных (в том числе гидротехнических) сооружений с учетом свойств грунта, моделирование контакта зубчатых зацеплений и т.д.

Множество специальных типов анализа в среде Marc поддерживается полным набором конечно-элементных формулировок. Программа предусматривает возможность применения пользовательских подпрограмм, с помощью которых обеспечивается моделирование

поведения изделия в особых ситуациях. Marc работает на персональных компьютерах, рабочих станциях и суперкомпьютерах, предусматривается возможность параллельной обработки данных на ЭВМ, которые поддерживают эту функцию.

MSC.Patran – интегрированная среда моделирования, анализа и проектирования. MSC.Patran обеспечивает интеграцию систем проектирования, моделирования, анализа и оценки результатов расчетов. Использование Patran в комбинации с другими программными продуктами позволяет достичь наибольшей эффективности в оценке работоспособности и оптимальности конструкции изделий при их разработке, производстве и эксплуатации еще до того, как начнутся изготовление и испытания опытных образцов.

Patran располагает развитыми средствами генерации конечно-элементных сеток, что придает этому процессу гибкость и высокую степень автоматизации. Нагрузочные и граничные условия могут быть увязаны как с геометрическими, так и с конечно-элементными моделями. Развитые средства визуализации помогают ускорить и повысить качество анализа полученных результатов расчета.

При использовании Patran основой создаваемой конечно-элементной модели является, как правило, геометрическая модель. Поэтому Patran предоставляет прямой доступ к результатам геометрического моделирования в наиболее популярных в мире программных пакетах автоматизированного проектирования или к универсальным форматам обмена данными при отсутствии прямых интерфейсов. Patran имеет также собственные обширные возможности создания и модифицирования геометрических моделей, контроля CAD-геометрии и преобразования ее перед построением конечно-элементной модели.

Patran используется не только для работы с расчетными системами компании MSC.Software, он на высоком уровне интегрируется и с системами анализа многих других разработчиков.

Программный комплекс DEFORM для моделирования технологических процессов формообразования. Основанный на методе конечных элементов, комплекс DEFORM (разработка компании Scientific Forming Corporation) доказал свою эффективность и точность более чем двадцатилетним применением на промышленных предприятиях. DEFORM позволяет производить всеобъемлющий анализ процессов металлообработки, включая операции формообразования (ковка, штамповка, прокатка, прессование и др.), термообработку

(закалка, старение, отпуск и др.) и окончательную механообработку (фрезерование, сверление и др.). DEFORM позволяет проверить, отработать и оптимизировать технологические процессы с помощью компьютерного моделирования, а не в ходе экспериментов на производстве, методом проб и ошибок. Благодаря этому существенно сокращаются сроки выпуска продукции, повышается ее качество и снижается себестоимость.

Возможности DEFORM, в частности, широко используются в металлургических и машиностроительных отраслях промышленности для виртуального моделирования технологических процессов кузнечно-штамповочного производства. Применение этих средств позволяет существенно оптимизировать технологию производства штампованных заготовок, а именно: вносить необходимые корректировки в схему технологического процесса и в геометрию гравюры штамповой оснастки технологических переходов на стадии ее проектирования.

Данная оптимизация преследует несколько целей: минимизировать норму расхода материала, количество зон затрудненной деформации и зон локализации деформации для исключения образования перегрева и формирования отрицательной текстуры поковки; добиться необходимого уровня свойств готовых изделий путем оптимизации режимов деформирования на ковочных и штамповочных переходах. Для первых – это форма бойков, величина обжатия и подачи, температурный режим, для вторых – скорость деформирования как функция от величины рабочего хода, геометрии предшествующих переходов и исходной заготовки, технологические напуски и т.п.

Анализ напряженно-деформированного состояния штампов, учет упругой деформации во время штамповки позволяют оптимизировать конструктивное исполнение штампов с целью повышения срока их службы.

Одним из немаловажных факторов применения средств математического моделирования технологических процессов кузнечно-штамповочного производства являются дополнительные требования к необходимой документации и контрактным обязательствам выдвигаемые многими зарубежными фирмами на ряд поставляемых штампованных заготовок. Они обуславливают необходимость математического моделирования основных формообразующих переходов и термической обработки. Это нужно уже не для подтверждения правильности формообразования, а для анализа температурных и деформационных полей по времени процессов штамповки и термообработ-

ки. Так у фирмы “General Electric” это требование оговаривается в спецификации S-432 «Спецификация подразделений авиационных двигателей компании General Electric по качеству источника поставок». Данное требование предполагает наличие у поставщика общепризнанного пакета программ для математического моделирования технологических процессов, с представлением в наглядной форме основных характеристик напряженно-деформированного состояния.

В качестве примера на рис. 9.3 показаны результаты компьютерного моделирования процесса горячей штамповки в системе DEFORM 3D. Здесь моделируется изменение состояния заготовки при штамповке детали шасси самолета А-380, изготавливаемой из сплава Ti-10V-2Fe-3Al.

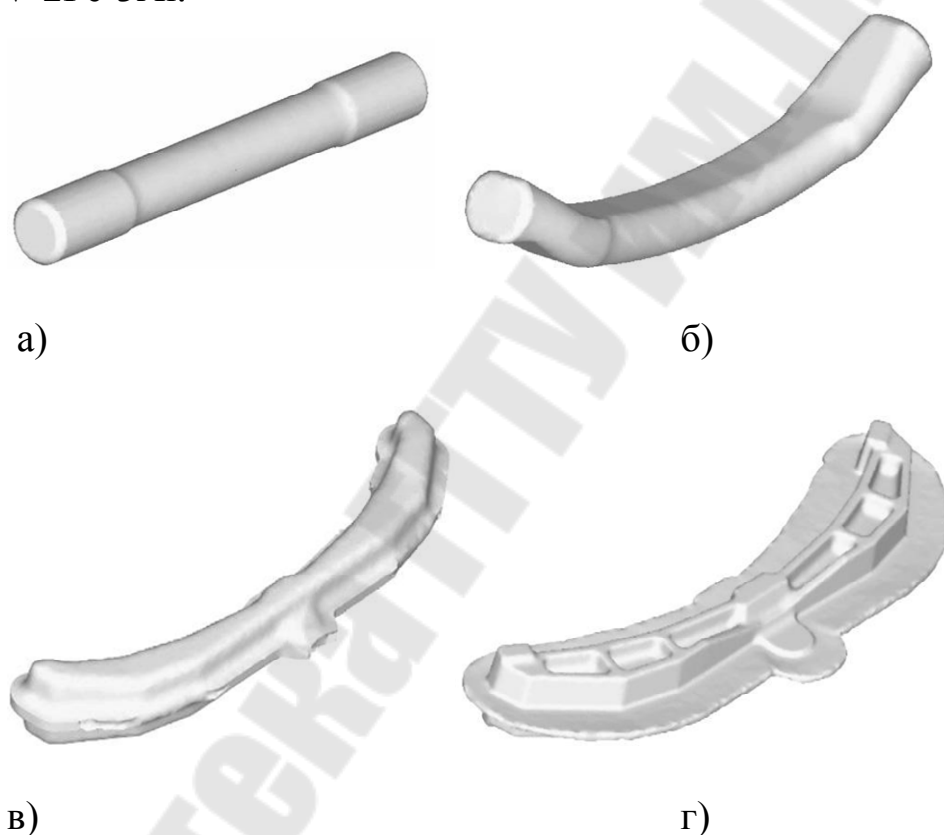


Рис. 9.3. Компьютерное моделирование процесса горячей штамповки в DEFORM 3D:

а, б, в – предварительные операции;
г – окончательная штамповка

Сложность данного процесса обусловлена ограниченной степенью деформации в двухфазной области на финишной стадии для штамповок из данного сплава. Особую актуальность имеет достижение равномерности деформации по переходам штамповки и, как след-

ствии, необходимость предварительного математического моделирования операций фасонирования и штамповки, так как. неправильная конструкция предварительных переходов приводит к нерациональной по геометрии заготовке под окончательную штамповку.

Приведем еще один практический пример, иллюстрирующий эффективность применения средств виртуального моделирования технологических процессов. Здесь при изготовлении зуба ковша экскаватора типа ЭГК-8(10) были поставлены следующие задачи: снизить вес заготовки; уменьшить стоимость оснастки; повысить стойкость оснастки; улучшить качество изделия. Было проведено моделирование и анализ процессаковки зуба ковша (рис. 9.4). При этом было получено очень хорошее совпадение результатов расчета с реальным процессом.

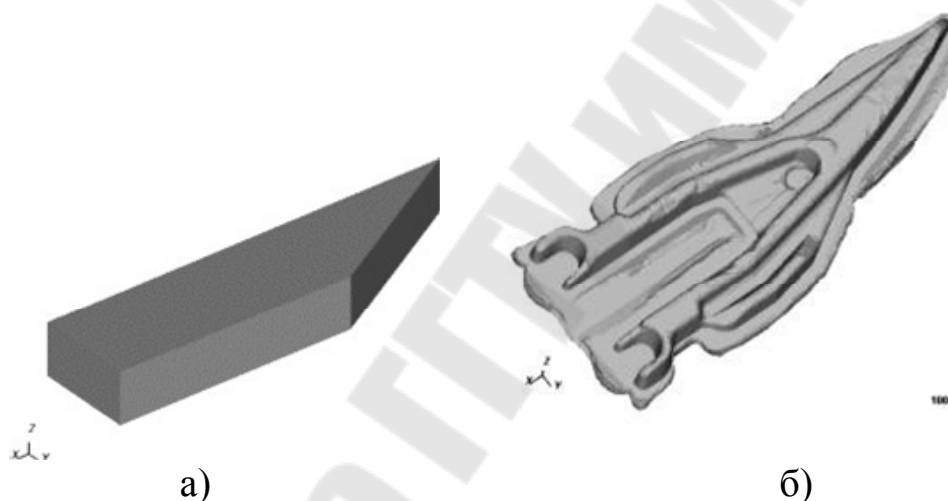


Рис. 9.4. Моделирование процессаковки зуба ковша экскаватора: а) заготовка; б) результатковки

После анализа выполненных в САЕ-системе расчетов, были произведены изменения в геометрии заготовки и гравюр штампов. В результате удалось:

- уменьшить вес заготовки на 50 кг (вес заготовки с 265 кг снизился до 212 кг);
- отказаться от обрезного штампа после предварительной штамповки; получить полное заполнение гравюр штампов при окончательнойштамповке;
- уменьшить износ штампов.
- Технологии компьютерного моделирования технологических процессов штамповки,ковки, прокатки и гибки начинают в на-

стоящее время все более активно использоваться в отечественной промышленности.

Тема 9.2. Создание параметрических пакетов узлов оборудования

Проектирование и изготовление сложной формообразующей оснастки и инструмента (ФО и ФИ) является одной из наиболее трудоемких задач ТПП. При низком уровне автоматизации длительные сроки проектирования и изготовления ФО и ФИ зачастую являются «узким местом», сдерживающим общую производительность ТПП. По сравнению с проектированием других видов оснастки (например, приспособлений), проектирование ФО и ФИ требует от конструктора значительно более высокой квалификации.

К ФО относятся формы для инжекционного литья изделий из пластмасс и резины (пресс-формы), штампы для горячей штамповки изделий из металла, гибочные штампы и др. К ФИ следует отнести электроды для прожига отдельных зон формообразующих элементов ФО на прошивных электроэрозионных станках. Поскольку ФИ используется для изготовления не деталей основного изделия, а деталей оснастки, его называют “оснасткой 2-го порядка”.

Многие современные САД (САД/САМ) системы, ориентированные на их использование в сфере ТПП, содержат в своем составе специализированные приложения, ориентированные на проектирование литьевых форм (пресс-форм). Такие приложения, базирующиеся на универсальных средствах 3D моделирования и черчения, представляют собой, по существу, специализированные САПР с высоким уровнем автоматизации.

Рассмотрим методику решения задач проектирования ФО (пресс-форм) и ФИ с применением САД/САМ Cimatron. Эта система (разработка компании Cimatron Ltd.) является одной из наиболее мощных в сфере инструментального производства и обеспечивает интегрированное решение следующих задач проектирования ФО и ФИ:

- прием модели изделия через один из имеющихся интерфейсов; анализ конструкции изделия и возможные корректировки модели; учет усадки материала изделия при его изготовлении;
- определение направлений разъема и числа формообразующих элементов оснастки;
- проектирование формообразующих элементов; проектирование конструкции пресс-формы;

- получение комплекта чертежно-конструкторской документации на пресс-форму;
- проектирование электродов для прожига тех участков формообразующих поверхностей, которые трудно или нецелесообразно изготавливать с помощью фрезерования;
- получение чертежно-конструкторской документации на электроды;
- разработку управляющих программ для изготовления формообразующих деталей пресс-формы и рабочих поверхностей электродов на станках с ЧПУ.

Исходные данные для проектирования ФО и ФИ поступают в виде 3D модели детали. Если модель была создана в другой САД-системе, то она принимается в Сimatron через один из имеющихся интерфейсов. При этом, если модель поступила в поверхностном представлении, то нет необходимости выполнять операции по устранению дефектов геометрии (затяжке возможных щелей между поверхностями). Их наличие не влияет ни на качество проектируемых объектов, ни на скорость проектирования.

Следующим действием является анализ модели и возможные корректировки (при их согласовании с разработчиком модели) с целью последующего упрощения конструкции ФО. Для редактирования модели Сimatron предлагает гибридную рабочую среду, единую для работы с каркасными элементами, поверхностями, твердотельными объектами. При этом предоставляются такие возможности, как создание сложных параметрических поверхностей со скоростью твердотельной технологии, выполнение булевых операций над открытыми и замкнутыми объектами, создание уклонов, добавление галтелей, скругление углов и др.

После завершения предварительной работы с моделью изделия (если такая работа оказалась необходимой), создаются модели формообразующих элементов оснастки. Первое действие при этом – учет усадки материала детали. Усадка задается вводом коэффициентов масштабирования детали по осям произвольной системы координат и пересчитывается в значение объемной усадки.

Следующий этап работы выполняется с помощью приложения QuickSplit, где осуществляется разделение модели на наборы формообразующих поверхностей. Для этого конструктор задает сначала главное направление разреза, а после этого – все остальные направления до тех пор, пока “неразделенных” поверхностей не останется

(после разделения они меняют цвет и положение на экране).

Направления разъема задаются различными способами: касательно к линии, по нормали к линии или плоскости, вдоль прямой или оси произвольной системы координат, по углу к заданной плоскости, по двум точкам или вдоль оси цилиндра или конуса. При этом определяется, к какому формообразующему набору, соответствующему главному направлению разъема (пуансону или матрице), должны относиться вертикальные поверхности. При необходимости, поверхности переносятся из одного набора в другой: указывается поверхность, а затем – набор, к которому ее нужно перенести. Перенос поверхностей может понадобиться, например, если все вертикальные поверхности должны относиться к матрице, но вертикальные поверхности какого-либо выреза на модели, с точки зрения технологичности изготовления, должны быть размещены на пуансоне. После разделения модели, с помощью специального “движка” на экране Cimatron, производится динамическая визуализация перемещения наборов формообразующих поверхностей вдоль заданных направлений разъема.

Когда модель разделена, можно выполнить операцию анализа углов уклона поверхностей модели, что позволит выявить вертикальные зоны или поднутрения. Анализ производится одновременно для каждого формообразующего набора, относительно соответствующего направления разъема. В результате на модели создается цветовая карта углов уклона – каждому интервалу значений углов соответствует свой цвет. Значения углов и соответствующих им цветов задаются пользователем.

Команда построения наружных и внутренних линий разъема работает в автоматическом или интерактивном режиме. Поверхности разъема также могут быть созданы автоматически. При интерактивном их построении разрешается использовать любые операции Cimatron по созданию поверхностей. Поверхности разъема ассоциативно связаны с линией разъема

– любое изменение линии разъема приводит к соответствующему изменению поверхности, что очень удобно при работе со сложными деталями, когда прорабатывается несколько вариантов. По завершении указанных действий задается заготовка формообразующего блока и выполняется ее разделение по формообразующим поверхностям. При этом создаются модели формообразующих деталей оснастки.

Следующим этапом является проектирование конструкции пресс-формы. Эта задача может быть решена с использованием при-

ложения MoldDesign (рис. 9.5).

Работая в MoldDesign, конструктор оснастки может использовать стандартные каталоги деталей пресс-форм (такие как DME, EOC, FUTABA, HASCO и др.), а также создавать, вести и использовать свои собственные нормали. Система обеспечивает проектирование таких сложных видов пресс-форм, как многоместные и шиберные, поддерживает не только модели стандартных деталей и сборок, но и ведет по ним всю совокупность информации: чертежи, спецификации и управляющие программы. Конструктору предлагаются как стандартные средства для создания 3D-модели пресс-формы, так и специальные средства для проектирования ее подсистем – впрыска, выталкивания, охлаждения и нагрева. В системе имеются также средства анализа проектируемой оснастки, которые позволяют:

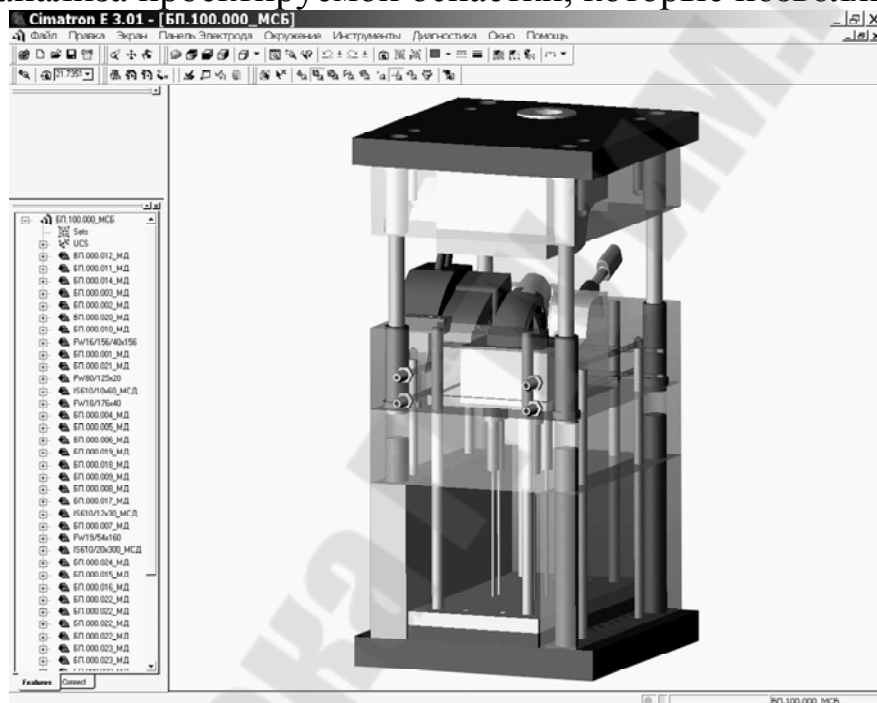


Рис. 9.5. - Модель пресс-формы в подсистеме MoldDesign

- анализировать “наложения” деталей и их столкновения;
- выполнять контроль минимальных толщин стенок (расстояний до каналов системы охлаждения) деталей пресс-формы;
- определять эффективность системы охлаждения;
- выполнять реалистичную визуализацию работы пресс-формы; передавать данные в CAE-систему для анализа процесса литья изделия.

При работе с Mold Design чертежи (проекционные виды и размеры,

обозначения позиций на сборочном чертеже и резьб, таблицы отверстий и координатное образмеривание, удобные для станочников-универсалов), спецификации и управляющие программы для обработки плит пресс-формы создаются автоматически, поскольку системой ведется вся необходимая информация. Вместе с тем, при необходимости конструктор может в любой момент внести коррективы в выходные документы.

После того, как проектирование пресс-формы завершено, переходят к этапам ее изготовления. Эти этапы могут потребовать проектирования дополнительного формообразующего инструмента – электродов для прожига. Прожиг применяется там, где обработка фрезерованием затруднена (например, глубокий паз на поверхности) или где обработка прожигом, по тем или иным причинам, является предпочтительной по сравнению с фрезерованием. В частности, при решении альтернативы “прожиг или фрезерование” в пользу прожига важную роль играет наличие на предприятии современного электроэрозионного оборудования и такой уровень его текущей загрузки, который позволяет выполнить работу в плановый срок.

Проектирование электродов выполняется с помощью приложения QuickElectrode. Сначала пользователь определяет профиль электрода в плане (прямоугольный или круглый) и зону прожига. Одним из вариантов задания зоны прожига является указание поверхностей модели, которые надо обработать. После этого система может совместить геометрические центры зоны прожига и электрода, показать минимально возможные размеры электрода. Другим вариантом определения зоны прожига является задание габаритов электрода, после чего при динамическом перемещении полученного контура по модели детали система подсвечивает поверхности, которые могут быть таким электродом обработаны. Этот вариант особенно удобен, когда известны размеры заготовок электродов, находящихся на складе, на заготовительном участке или закупаемых у стороннего производителя, и они внесены в базу данных. После выполнения этих действий создаются контуры, определяющие габариты заготовки электрода, и формообразующие поверхности электрода.

Далее возможны два варианта работы: с использованием или без использования шаблона проектирования. Если шаблон не используется, то последовательно выполняются следующие действия – определяется система координат прожига, автоматически создаются поверхности хвостовика электрода, задаются правила для автоматического

создания “переходных” поверхностей (поверхности между основанием электрода и его формообразующими поверхностями). Ни одна из поверхностей электрода пользователем не строится в традиционном понимании этого слова. Правилами для автоматического создания, например, “переходных” поверхностей являются такие, как: “строить касательно к поверхностям”, “вдоль заданного направления”, “по двум направлениям”, “создать поверхность замыкания”.

Если используется шаблон проектирования, следует задать только зону прожига и применить шаблон. Все остальные построения будут произведены полностью автоматически. В качестве шаблона проектирования может быть использован любой ранее спроектированный электрод. Этот режим проектирования очень производителен, так как на большинстве предприятий параметры прошивной электроэрозии (вид заготовок электродов, схемы базирования, конфигурации электродов и т.п.) и виды обрабатываемых зон прожига унифицированы.

После создания моделей электродов можно выполнить команду полностью автоматического создания необходимых чертежей. При этом в чертеже создаются не отдельные проекционные виды, а сразу все необходимые виды с размерами, оформленной и заполненной основной надписью чертежа, таблицами заданных при проектировании параметров. Для каждого электрода автоматически создается и карта наладки станка (рис. 9.6)

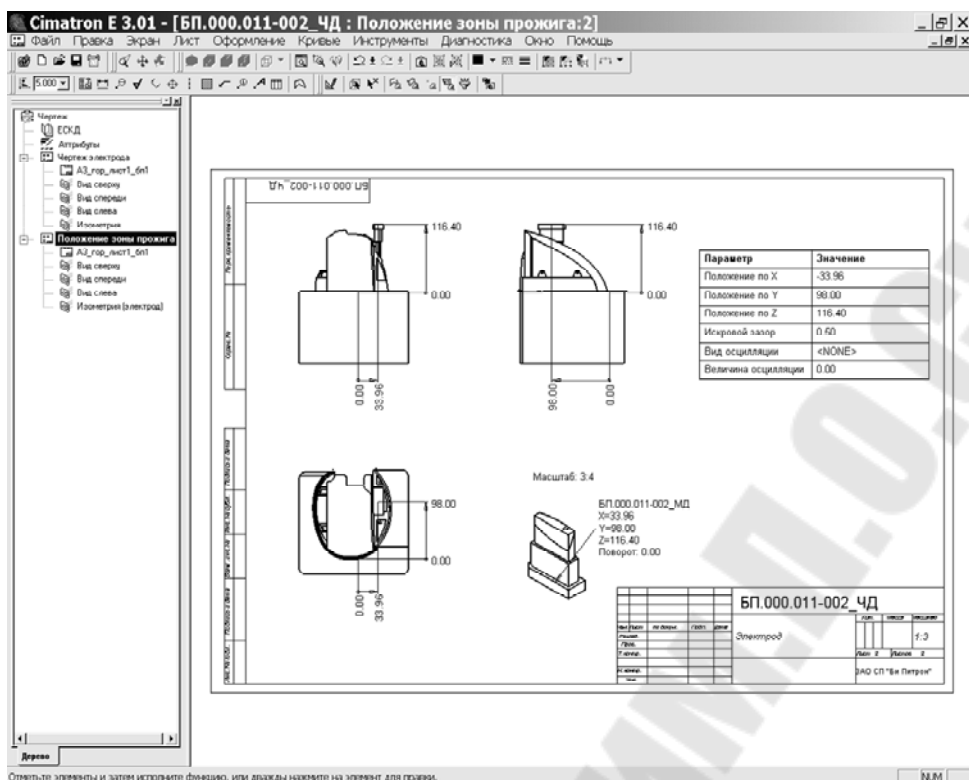


Рис. 9.6. Карта наладки электроэрозионного станка

Автоматическое формирование производственной документации обеспечивается за счет возможности предварительной настройки как параметров электроэрозионной обработки, так и каждого из создаваемых документов. Параметрами являются число переходов при прожиге (черновая, получистовая, чистовая, финишная обработка) и параметры каждого перехода – искровой зазор, вид и значение осцилляции, маска для автоматического формирования имен электродов и имен формируемых документов. Для документов указываются формат основной надписи, состав проекционных видов, места размещения технологических таблиц и другие параметры.

На рис.9.7 представлена общая схема интегрированного выполнения конструкторско-технологических работ по проектированию ФО и ФИ с использованием CAD/CAM Cimatron, с учетом связи этих работ с организационно-производственными задачами ТПП.



Рис. 9.7. Интегрированное выполнение работ при проектировании ФО иФИ с использованием CAD/CAM Cimatron

Реализация интегрированного решения в Cimatron обеспечивает возможность коллективной работы пользователей над проектом и возможность параллельного проектирования, что достигается благодаря наличию общей базы данных проекта. В частности, можно параллельно проектировать формообразующие детали пресс-формы и ее общую конструкцию, получать чертежно-конструкторскую документацию на пресс-форму и проектировать электроды, получать чертежно-конструкторскую документацию на электроды и разрабатывать управляющие программы для обработки формообразующих деталей на станках с ЧПУ (рис. 9.8). Отметим, что схема на рисунке дана в нотации диаграмм деятельности UML.

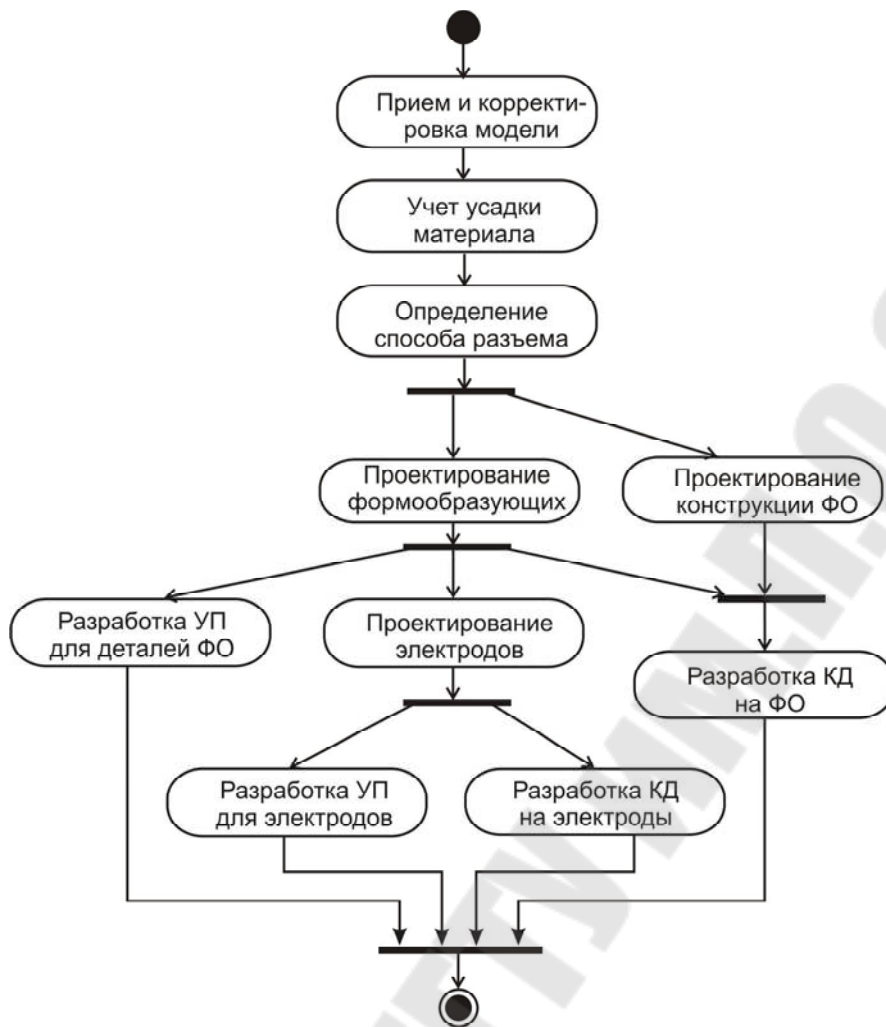


Рис. 9.8. Параллельное выполнение этапов проектирования ФО и ФИ

Как показывает практика, использование параллельного проектирования при решении рассмотренных выше задач позволяет сократить общее время их решения (по сравнению с методами последовательным проектированием) в 1,5 – 2 раза.

Не менее важным является также то, что в случае внесения изменений в исходную модель изделия конструктору или технологу ЧПУ не нужно повторно выполнять этапы проектирования ФО и ФИ – система автоматически проведет соответствующие изменения по всем этапам процесса проектирования. Конструктору (технологу) необходимо лишь “подтвердить” факт проведения изменений. Тем самым обеспечивается значительное повышение общего уровня автоматизации проектирования и, как следствие, значительное сокращение сроков ТПП. Отметим, что автоматическое проведение изменений

становится возможным благодаря не только общей базе данных проекта, но и параметрическим свойствам используемых 3D моделей.

Проведенный анализ комплексного решения задач конструкторско-технологического проектирования ФО и ФИ иллюстрирует высокую эффективность метода использования интегрированных приложений САД-системы для решения сложных проектных задач ТПП, что подтверждается также практикой внедрения рассмотренных выше систем на предприятиях машиностроения. Следует подчеркнуть, что в основе данного метода лежит использование параметризованных 3D моделей изделия, размещаемых в общей базе данных проекта. Это обеспечивает как высокий уровень автоматизации решения проектных задач, так и возможность коллективного и параллельного проектирования.

Раздел 10. Моделирование основных технологических процессов и явлений при аддитивном синтезе

Тема 10.1. Процесс течения пластика при 3D-печати.

Моделирование технологических процессов литья изделий из пластмасс. Для анализа таких процессов широко используются CAE - системы Moldflow Part Adviser и Moldflow Mold Adviser, разработанные компанией Moldflow.

Moldflow Part Adviser дает возможность анализа процесса литья термопластов на основе модели изделия, без учета литниковой системы. Модель принимается из CAD-системы и должна иметь поверхностную сетку в формате STL. Система содержит стандартный банк данных материалов (около 400 марок). Имеется возможность подключения дополнительного банка данных материалов, выпускаемых в России и СНГ (более 200 марок). Системой решаются следующие задачи: оптимизация толщин стенок изделия; выбор мест впуска материала; анализ проливаемости изделия и диагностика недолива; определение положения линий спая и воздушных ловушек; выбор и замена материала (по технологическим параметрам); оценка технологического режима впрыска материала.

Самыми распространенными материалами для изготовления разнообразных изделий при помощи аддитивных технологий являются такие полимеры как: ABS, PLA, PC, PETG (PET, PETT), Nylon, TPE, TPU, TPC и др.

PLA-пластик (полилактид, ПЛА) – биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Сырьем для производства служат ежегодно возобновляемые ресурсы, такие как кукуруза и сахарный тростник. Используется для производства изделий с коротким сроком службы (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), а также в медицине – для производства хирургических нитей и штифтов.

Существует два способа синтеза полилактида: поликонденсация молочной кислоты и полимеризация лактида (рис. 101). В промышленности используется их комбинация. Поликонденсацией молочной кислоты можно получать только низкомолекулярный полилактид, так как в процессе выделяется побочный продукт – вода, отвести которую из реакции сложно, и поэтому растущая полимерная цепь разрушается. Получившийся низкомолекулярный полилактид деполимеризуют

до димера молочной кислоты, лактида. Полученный лактид полимеризуют при высокой температуре с добавлением катализатора октаноата олова, получая высокомолекулярный полилактид.

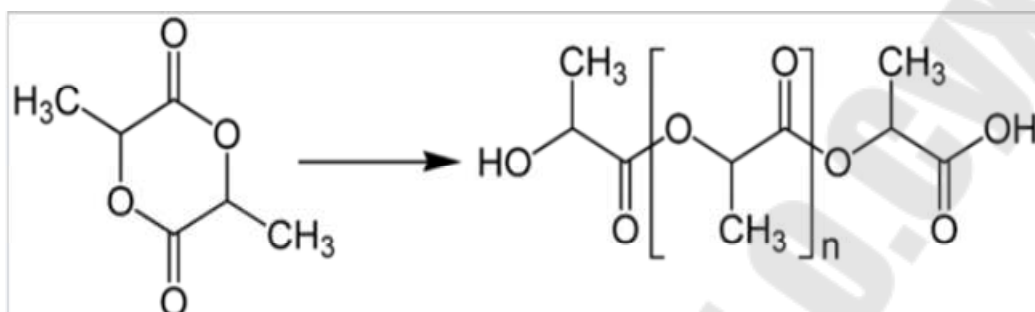


Рис. 10.1. Полимеризация лактида с раскрытием цикла

PLA пластик – безусловный король в условиях домашней печати. Его часто сравнивают с ABS – второй по популярности – но все равно PLA значительно обгоняет ABS. И на то есть причины.

Первая и самая важная – PLA пластиком легко печатать. Температура для печати PLA пластиком ниже чем ABS и он не так легко отрывается от основания, то есть использовать стол с подогревом не обязательно (хотя это однозначно поможет). Второе преимущество PLA он не воняет во время печати. В принципе, считается, что он без запаха, но на самом деле испарения присутствуют. Ну и последнее – это дружелюбный к окружающей среде материал, изготавливаемый из возобновляемых ресурсов, например, кукурузы. Как и ABS, PLA является основой для многих экзотических материалов, например, проводящих электричество, светящихся в темноте или с содержанием дерева и металла.

И молочная кислота, и лактид проявляют оптическую активность, то есть существуют в виде двух L- и D-стереоизомеров, являющихся зеркальным отображением друг друга. Варьируя относительное содержание этих форм в полилактиде, можно задавать свойства получаемого полимера, а также получать различные классы полилактидных материалов. Полилактид из 100 % L-лактида (L-ПЛА) имеет высокую степень стереорегулярности, что придает ему кристалличность. Температура стеклования L-ПЛА: 54...58 °С, температура плавления 170...180°С, скачок теплоемкости 100% аморфного ПЛА 0,54Дж/(г·К). Используя при полимеризации смесь D- и L-форм лактида, получают аморфный полилактид (L,D-ПЛА), температура стеклования которого составляет 50...53 °С, плавление отсутствует, так как нет кристаллической фазы.

Самая высокая температура плавления у стереокомплекса, состоящего из чистого L-ПЛА и чистого D-ПЛА. Две цепочки сплетаются, и образующиеся дополнительные взаимодействия между ними ведут к повышению температуры плавления (до 220 °С).

Основные механические свойства. Прочность на изгиб ПЛА составляет 55,3 МПа, прочность на разрыв – 57,8 МПа, относительное удлинение – 3,8%, модуль упругости – 2,3...3,3 ГПа, температура стеклования – 60...65 °С, плотность – 1,23...1,25 г/см³, минимальная толщина стенок печати – 1 мм, размер мельчайших деталей – 0,3 мм, точность печати ±0,1 %, влагопоглощение до 50%, усадка отсутствует.

Полилактид применяется для производства экологически чистой биоразлагаемой упаковки, одноразовой посуды, средств личной гигиены. Биоразлагаемые пакеты из полилактида используются в таких крупных торговых сетях как Wal-Mart Stores и Kmart. Ввиду своей биосовместимости, полилактид широко применяется в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов, а также в системах доставки лекарств.

Полилактид отвечает концепции устойчивого развития, так как для его синтеза используются ежегодно возобновляемые природные ресурсы. Упаковочные изделия из полилактида – экологически чистая альтернатива традиционной бионеразлагаемой упаковке на основе химически стойких полимеров. Полилактид также применяется в 3D-принтерах в качестве исходного материала для печати.

Типовой технологический процесс производства PLA предполагает, что при полимеризации лактонов используются металлосодержащие катализаторы, которые являются опасными для здоровья и окружающей среды.

С 2015 года в России налажено производство медицинского высококачественного PLA на мощностях АО «ВНИИСВ». В феврале 2020 года ВТБ заявил о начале производства банковских карт из полилактида.

ABS-пластик занимает вторую строчку по популярности, после PLA. По своим свойствам ABS является своеобразным улучшением PLA, хотя печатать им гораздо сложнее. При этом, благодаря своим физическим свойствам, ABS пластики активно используются в производстве. Из этого материала изготавливают, например, кирпичики LEGO и шлемы для мотоциклов. Изделия из ABS пластика обладают высоким сроком службы, выдерживают высокие температуры, но при этом для 3D-печати надо поддерживать высокую температуру, пла-

стик имеет свойство ужиматься при охлаждении, испарения при печати ABS пластиком вредны для организма. Печатать ABS пластиком надо с использованием подогретого стола, в хорошо проветриваемом помещении.

АБС-пластик (акрилонитрил бутадиен стирол, химическая формула $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$) – ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (название пластика образовано из начальных букв наименований мономеров). Пропорции могут варьироваться в пределах: 15–35 % акрилонитрила, 5–30 % бутадиена и 40–60% стирола. Строение молекулы АБС-пластика приведено на рис. 10.2.

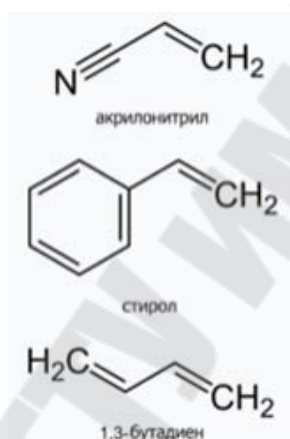


Рис. 10.2. Химические формулы мономеров, из которых производится АБС-пластик

Некоторые виды АБС могут разрушаться под воздействием солнечного света. Это стало причиной одного из самых обширных и дорогостоящих отзывов автомобилей в истории США. Он может быть повторно переработан.

АБС-пластик обладает следующими свойствами:

- Непрозрачный (хотя есть и прозрачная модификация – МABS) материал желтоватого оттенка. Окрашивается в различные цвета;
- Нетоксичность в нормальных условиях;
- Долговечность в отсутствии прямых солнечных лучей и ультрафиолета;
- Стойкость к щелочам и моющим средствам;
- Влагостойкость;
- Маслостойкость;

- Кислотостойкость;
- Теплостойкость 103 °С (до 113 °С у модифицированных марок);
- Широкий диапазон эксплуатационных температур (от –40 °С до +90 °С);
- Растворяется в сложных эфирах, кетонах, 1,2-дихлорэтано, ацетоне, этилацетате;
- Плотность 1,02-1,06 г/см³.

АБС-пластик широко используется для изготовления различных деталей как промышленного назначения так и изделий домашнего обихода:

- крупных деталей автомобилей (приборных щитков, элементов ручного управления, радиаторной решетки);
- корпусов крупной бытовой техники, радио- и телеаппаратуры, деталей электроосветительных и электронных приборов, пылесосов, кофеварок, пультов управления, телефонов, факсовых аппаратов, компьютеров, мониторов, принтеров, калькуляторов, другой бытовой и оргтехники;
- корпусов промышленных аккумуляторов;
- спортивного инвентаря, деталей оружия;
- лодок;
- мебели;
- изделий сантехники;
- выключателей, переключателей;
- канцелярских изделий;
- музыкальных инструментов;
- настольных принадлежностей;
- игрушек, детских конструкторов (рис. 10.3);
- чемоданов, контейнеров;
- деталей медицинского оборудования, медицинских принадлежностей (гамма-стерилизация);
- смарт-карт;
- как добавка, повышающая теплостойкость и/или улучшающая перерабатываемость композиций на основе ПВХ, ударопрочность полистирола, снижающая цену поликарбонатов.

Растворяется АБС пластик исключительно в ограниченном числе жидкостей: ацетон, бензол, анилин, эфир, анизол.

Превосходная пластичность и устойчивость к механическим повреждениям – то, что сразу же характеризует данный материал и существенно расширяет сферу его использования. Если говорить о механической прочности и термоустойчивости, то уже известный нам АБС пластик в несколько раз по своим показателям превосходит все известные сополимеры стирола. Что еще характеризует его? Конечно же, это прекрасная износостойкость, размерная стабильность, кстати, именно благодаря последней удается внедрять АБС пластик в литьевое производство особой точности. Данный материал неплохо поддается сварке. Говоря о недостатках столь инновационного материала, хочется упомянуть не достаточно высокие электроизоляционные характеристики, опять же если сравнивать с другими материалами, как, например, полистирол. Кроме того, АБС пластик совершенно не переносит воздействия прямых солнечных лучей, то есть ультрафиолета. Под его воздействием он постепенно утрачивает те свойства, благодаря которым и получил свое распространение и известность.



Рис. 10.3. Применение АБС-пластика

Также АБС популярен в любительских экструзионных 3D принтерах (системах быстрого прототипирования) благодаря своей температуре стеклования – достаточно высокой, чтобы не возникало деформаций при небольшом нагреве в бытовых условиях, но достаточно низкой для безопасной экструзии с помощью стандартных инструментов.

Мировое производство АБС-пластика до восьмидесятых годов концентрировалось в основном в США. С середины 1980-х началось смещение мирового рынка АБС-пластика в страны Азии. На середину 2010-х годов основными мировыми регионами потребления являются страны Азии (около 55 % Китай, 7 % другие страны ЮВА), Западная Европа (8 %) и Северная Америка (9 %). В странах Юго-Восточной

Азии АБС во многих областях вытесняет ударопрочный полистирол. На 2012 год возможности производства ABS оценивались в 9,5 млн тонн, 80% мощностей находились в Азии. Международная торговля пластиком превышала 9 млрд долларов.

В настоящее время в мире существует 48 производителей АБС-пластика. Наиболее крупные из них:

- Chi Mei Corporation, Formosa, Dow, Grand Pacific на Тайване;
- LG Chemicals, BASF, Lanxess, Samsung Cheil Industries в Республике Корея;
- Techno Polymer в Японии;
- Dow Chemicals, Polimeri Europe, Ineos в Европе;
- ПАО «Нижекамскнефтехим», ОАО «Пластик» в России.

Реальная опасность, которую может представлять АБС-пластик для человека, может возникнуть в нескольких случаях:

➤ нагрев (образуются пары ядовитого акрилонитрила) материала во время производства (литье, экструзия). Необходимы закрытые специальные боксы с мощными вытяжками и дистанционное управление процессом. Но вред от использования АБС-пластика при изготовлении прототипов по технологии 3D-печати, часто преувеличивается. При печати происходит единовременный расплав очень небольшого количества пластика. В свою очередь, ПДК акрилонитрила всего $0,5 \text{ мг/м}^3$, добиться такой концентрации при помощи одного работающего принтера в негерметичном помещении сложно;

➤ использование для пищи, в лучшем случае, только холодные продукты (не нагревать). Недопустим алкоголь – так как вещества вступают во взаимодействие по аналогии с нагреванием, и выделяется стирол;

➤ использование при взаимодействии с биоматериалом (в медицине).

Широкую популярность приобрел АБС-пластик для 3D-ручки (рис. 10.4). Это легкое и компактное устройство пользуется в последнее время широкой популярностью. Предназначена 3D-ручка для рисования пластиком. Другими словами, такое устройство можно охарактеризовать как "ручной 3D-принтер". Ну а если приобрести к ручке набор АБС-пластика, состоящий из 12 и больше цветов, то и вовсе можно научиться создавать объемные пластиковые фигурки и даже игрушки. Такое устройство – настоящая находка для творческих людей. Принцип работы 3D-ручки достаточно прост. "Чернила" в ней заменяет нить пластика, толщина которой составляет 1,75 мм. В про-

даже имеются целые наборы пластика ABS, что дает возможность рисовать "в воздухе" разными цветами. Такие ручки относятся к горячему типу. Пластиковая нить нагревается внутри устройства и с помощью специального механизма подается наружу через носик (сопло). При контакте с воздухом пластик застывает и становится твердым.



Рис. 10.4. 3D-ручка

К преимуществам материала можно отнести следующее: способность выдерживать температуру нагрева до 90°C ; эстетичный внешний вид, широкая цветовая гамма; устойчивость формы и габаритов изделия в процессе эксплуатации; широкая сфера применения.

Недостатки ABS-пластика: растворяется во многих органических растворителях, таких как бензол, эфир, ацетон; неустойчивость к атмосферным осадкам и воздействию ультрафиолета; неприятный запах при нагревании.

Polyethylene terephthalate (PET) - самый распространенный вид пластика в мире. Вам он может быть знаком как полимер, используемый для бутылок из-под воды, контейнеров для еды, пакетов и пр.

Исследования по полиэтилентерефталату были начаты в 1935 г. в Великобритании Уинфилдом и Диксоном, в фирме Calico Printers Association Ltd. Заявки на патенты по синтезу волокнообразующего полиэтилентерефталата были поданы и зарегистрированы 29 июля 1941 года и 23 августа 1943 года. В СССР был впервые получен в Лабораториях Института Высокомолекулярных Соединений Академии наук СССР (отсюда – лавсан) в 1949 году. ПЭТ-бутылка была запатентована в 1973 году. А в 1977 году началась промышленная переработка использованной ПЭТ-тары. Распространению бутылок из ПЭТ

способствовала их сравнительная дешевизна и практичность. Переработке ПЭТ-бутылок уделяют особое внимание, во многих регионах их собирают отдельно от других бытовых отходов.

Физические свойства ПЭТ:

- плотность – 1,38–1,4 г/см³;
- температура размягчения (t разм.) – 245 °С;
- температура плавления (t пл.) – 260 °С;
- температура стеклования (t ст.) – 70 °С;
- температура разложения – 350 °С.

Нерастворим в воде и органических растворителях. Неустойчив к кетонам, сильным кислотам и щелочам.

В России полиэтилентерефталат используют главным образом для изготовления пластиковых емкостей различного вида и назначения (в первую очередь, пластиковых бутылок). В меньшей степени применяется для переработки в волокна, пленки, а также литьем в различные изделия. В мире ситуация обратная: большая часть ПЭТФ идет на производство нитей и волокон. Многообразно применение полиэтилентерефталата в машиностроении, химической промышленности, пищевом оборудовании, транспортных и конвейерных технологиях, медицинской промышленности, приборостроении и бытовой технике. Для обеспечения лучших механических, физических, электрических свойств ПЭТФ наполняется различными добавками (стекловолокно, дисульфид молибдена, фторопласт).

Полиэтилентерефталат относится к группе алифатически-ароматических полиэфиров, которые используются для производства волокон, пищевых пленок и пластиков, представляющих одно из важнейших направлений в полимерной индустрии и смежных отраслях.

Область применения полиэфиров:

- самое массовое из всех видов химических волокон для бытовых целей (одежда) и техники;
- емкости для жидких продуктов питания, особенно емкости (бутылки) для различных напитков;
- основной материал для армирования автомобильных шин, транспортерных лент, шлангов высокого давления и других резинотехнических изделий;
- в недавнем прошлом чрезвычайно важный материал для носителей информации – основа некоторых современных фото-, кино- и рентгеновских пленок (в качестве подложки фото-киноматериалов большей частью используется триацетат целлюлозы); основа носите-

лей информации в компьютерной технике (гибкие диски – дискеты), основа магнитных лент для аудио-, видео- и другой записывающей техники;

- материал для ответственных видов изделий в различных отраслях машиностроения, электро- и радиотехнике, например, применяется в качестве изолятора в электрических конденсаторах;
- листовый материал, прозрачный для солнечных лучей (в том числе и УФ) и устойчивый к воздействиям окружающей среды, используемый в сельском хозяйстве и строительстве;
- металлизированная пленка широко используется в качестве декоративного, термоизоляционного, светоотражающего, архитектурно-строительного материала;
- применяется в качестве материала для вкладышей подшипников и втулок скольжения;
- электроизоляционные материалы, в частности в композициях обмоточных изоляционных лент для электрических машин;
- в пищевой индустрии, скребки, направляющие.

По итогам 2015 года производство полиэтилентерефталата в первичных формах составило 388,8 тыс. тонн, что на 4,8 % больше, чем по итогам 2014 года (370,9 тыс. тонн).

"Чистый" PET редко используется для 3D-печати, но его разновидность – PETG – достаточно распространенный материал. "G" означает "glycol-modified", что делает материал чище, менее хрупким и, что самое важное, его проще использовать для 3D-печати чем стандартный PET. PETG часто позиционируют как нечто среднее между ABS и PLA, два самых распространенных материала для 3D-печати. PETG более пластичный и чем PLA и им легче печатать чем ABS пластиком. На рис. 10.5 приведен внешний вид изделия, полученный из PETG.

PETG не кристаллизуется при нагреве, что обеспечивает изделиям из него прочность даже в сложных конструкциях. Хорошая отражающая способность, высокая прозрачность и блеск – свойства, которые обуславливают широкое применение этого пластика в упаковочной промышленности и рекламе. Методом вакуумного формования из ПЭТГ производят косметическую упаковку, листовый пластик используют для создания вывесок, витрин, офисных перегородок, медицинского оборудования.

ПЭТГ поддается окрашиванию, металлизации, на него может быть нанесена печать. Из ПЭТГ изготавливают филамент для печати на 3D-принтерах.



Рис. 10.5. Изделие, полученное при помощи 3D-печати из полиэтилена PETG

Polyethylene coTrimethylene Terephthalate (PETT) – вторая разновидность PET. Этот материал более жесткий чем PETG, обрел популярность из-за того, что прозрачный.

Достоинства ПЭТФ. Материал обладает высокой механической прочностью, низким коэффициентом трения и гигроскопичности, а также устойчив к многократным деформациям при растяжении или изгибе. Полиэтилентерефталат сохраняет свои высокие ударостойкие характеристики в рабочем диапазоне температур от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Материал имеет высокую химическую устойчивость к воздействию кислот, щелочей, солей, спиртов, парафинов, минеральных масел, бензина, жиров и эфиров. ПЭТ обладает значительной пластичностью в холодном и нагретом состоянии. Электрические свойства полиэтилентерефталата при температурах до 180°C изменяются незначительно (даже при присутствии влаги). Листы из ПЭТ по светопропусканию (90 %) аналогичны прозрачному оргстеклу (акрилу) и поликарбонату, но при этом в сравнении с ними обладает в 10 раз большей ударопрочностью.

Недостатки. Существенными недостатками тары из ПЭТФ являются ее относительно низкие барьерные свойства. Она пропускает в бутылку ультрафиолетовые лучи и кислород, а наружу – углекислоту, что ухудшает качество и сокращает срок хранения продукта. Это связано с тем, что высокомолекулярная структура полиэтилентерефталата-

та не является препятствием для газов, имеющих небольшие размеры молекул относительно цепочек полимера.

В СССР полиэтилентерефталат и получаемое из него волокно называли лавсаном, в честь места разработки – Лаборатории высокомолекулярных соединений Академии наук. Аналогичные волоконные материалы, изготавливаемые в других странах, получили другие названия: терилен (Великобритания), дакрон (США), тергал (Франция), тревира (ФРГ), теторон (Япония), полиэстер, мелинекс, милар (майлар), Тесарет («Текапэт») и Тесадур («Текадур») (Германия) и т. д.

Пластики на основе полиэтилентерефталата называются ПЭТФ (в российской традиции) либо PET (в англоязычных странах). В настоящее время в русском языке употребляются оба сокращения, однако когда речь идет о полимере, чаще используется название ПЭТФ, а когда об изделиях из него – ПЭТ.

Вплоть до середины 1960-х годов ПЭТФ промышленно получали переэтерификацией диметилтерефталата этиленгликолем с получением дигликольтерефталата, и последующей поликонденсацией последнего. Несмотря на недостаток этой технологии, заключавшийся в ее многостадийности, диметилтерефталат был единственным мономером для получения ПЭТФ, поскольку существовавшие в то время промышленные процессы не позволяли обеспечить необходимую степень чистоты терефталевой кислоты. Диметилтерефталат же, имея более низкую температуру кипения, легко подвергался очистке методом дистилляции и кристаллизации[9].

В 1965 году Amoco Corporation смогла усовершенствовать технологию, в результате чего широкое распространение получил одностадийный синтез ПЭТФ из этиленгликоля и терефталевой кислоты (РТА) по непрерывной схеме.

Химическая формула PETG $(C_{10}H_8O_4)_n$. Строение ПЭТФ приведено на рис. 10.6.

С точки зрения углеродного следа, ПЭТ-бутылка является самым экологичным вариантом упаковки для напитков из исследуемых материалов. Наиболее экологичным методом производства является производство ПЭТ-бутылки с содержанием вторичного ПЭТФ. По заявлению компании Coca-Cola, она не собирается отказываться от одноразовых пластиковых бутылок, так как использование только алюминиевой и стеклянной тары приведет к увеличению углеродного следа. Представители компании также сообщили, что к 2030 году Coca-Cola планирует перерабатывать весь пластик, используемый для

упаковки. Для реализации компания собирается использовать при производстве упаковки не менее 50 % переработанного материала.

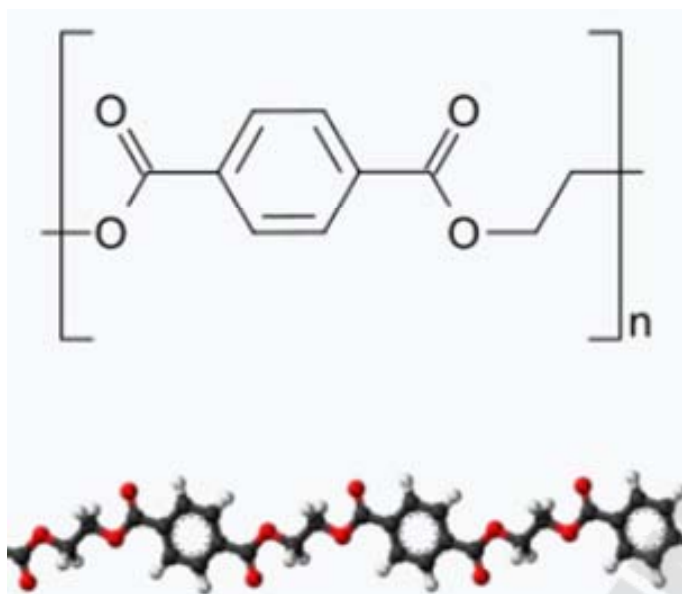


Рис. 10.6. Структура ПЭТГ

Каждую секунду в мире производят 20 тыс. ПЭТ бутылок, а покупают каждую минуту около 1 млн. По прогнозам, к 2021 году это число вырастет примерно на 20 %.

Существующие способы переработки отходов полиэтилентерфталата можно разделить на две основные группы: механические и физико-химические.

Основным механическим способом переработки отходов ПЭТФ является измельчение, которому подвергаются некондиционная лента, литьевые отходы, частично вытянутые или невытянутые волокна. Такая переработка позволяет получить порошкообразные материалы и крошку для последующего литья под давлением. Характерно, что при измельчении физико-химические свойства полимера практически не изменяются.

При переработке механическим способом ПЭТ тары получают т.н. «флексы», качество которых определяется степенью загрязнения материала органическими частицами и содержанием в нем других полимеров (полипропилена, поливинилхлорида), бумаги от этикеток.

Физико-химические методы переработки отходов ПЭТФ могут быть классифицированы следующим образом:

➤ деструкция отходов с целью получения мономеров или олигомеров, пригодных для получения волокна и пленки;

- повторное плавление отходов для получения гранулята, агломерата и изделий экструзией или литьем под давлением;
- переосаждение из растворов с получением порошков для нанесения покрытий;
- получение композиционных материалов;
- химическая модификация для производства материалов с новыми свойствами.

Утилизация ПЭТФ производится управляемым сжиганием при температуре не менее 850 °С.

Вторичная переработка и утилизация ПЭТФ началась практически сразу после его широкого распространения на рынке. В 1976 году, первыми, компания St. Jude Polymers начала перерабатывать использованные бутылки в волосяные щетки и пластиковую ленту. А уже в 1977 компания приступила к производству гранулированного ПЭТФ.

Следующим важным событием в сфере переработки отходов из ПЭТФ стало начало их переработки в волокно, пригодное для производства ковровых покрытий и волокнистого наполнителя компанией Wellman.

С 1994 года был предложен процесс переработки, который подразумевает производство вторичного ПЭТФ, близкого по свойствам к первичному материалу. Процесс состоит из измельчения ПЭТФ отходов, очистки и переработки полученного дробленного материала в гранулят. В 1998 году одно из предприятий во Франции уже производило до 30 тыс. тонн подобного гранулята в год.

ПЭТФ полностью поддается переработке, но в 2016 году меньше половины всех проданных бутылок были собраны для переработки, и только 7% из них дошли до конца цепочки, став новыми бутылками. Часть пластиковых отходов (около 12 %) сжигается, однако, как отмечают эксперты, подобная утилизация может иметь негативные последствия для окружающей среды и здоровья. В ходе сгорания могут выделяться разные токсичные соединения, в том числе диоксины.

Лидерами по сбору ПЭТ бутылок остаются развитые западные страны, в которых успешно функционируют системы вторичной переработки пластиковой тары. Так, в Европе в переработку попадает около 60 % ПЭТ бутылок, а в Германии и Нидерландах перерабатывается более 90 % всех собранных пластиковых бутылок. К тому же, в Евросоюзе законодательством запрещен контакт ПЭТФ с пищевым продуктом. Это связано с тем, что в общий поток отходов на переработку может попасть упаковка от продуктов бытовой химии или иных

веществ, которые могут оказаться токсичными. Таким образом, производители упаковки либо используют ПЭТФ для производства непродовольственной тары, либо прибегают к технологии bottle-in-bottle. Данная технология предполагает, что содержимое упаковки будет контактировать со слоем материала, изготовленного из первичного ПЭТФ. Данный метод позволяет обеспечивать производство из вторичного материала только на 80 %.

Если описывать российский опыт, то в России в год отсортировываются около 650 тыс. тонн ПЭТ бутылок. Сектор безалкогольных напитков составляет около 55 % этой доли, остальная часть приходится на пиво – 18 %, молоко – 13 % и масляную продукцию – 8 %. Но все же, только 170 тыс. тонн ПЭТ отходов попадает на переработку. Это не более 26 % от общего числа собранных бутылок, хотя мощности заводов по вторичной переработке недогружены.

Многие российские компании уже придерживаются ответственного подхода при ведении бизнеса и используют вторичное сырье при производстве тары для собственной продукции. Так, например, Bavaria уже использует 10 % восстановленного сырья при производстве ПЭТ тары, а Unilever использует ПЭТ тару, состоящую на 100 % из вторичного сырья.

Компания из нефтехимической отрасли «СИБУР» заявила о намерении наладить переработку ПЭТ-упаковки на предприятии «Полиэф», расположенного в Башкирии. Из упаковки планируется производить гранулы с использованием 25 % вторичного ПЭТ и вовлекать его в производство первичного ПЭТФ.

Кроме бутылок, одним из назначений для вторичного ПЭТФ является производство волокон, используемых в нетканых материалах, ковровых покрытиях, штапельных материалах для одежды и спальных мешков и другие. Вторичный ПЭТФ также идет на изготовление лент, канатов, листов, полимерно-песчаной черепицы, стеновых блоков, тротуарной плитки и т.д.

В 2016 году японские ученые открыли бактерию *Ideonella sakaiensis* (линия 201-F6), которая способна разлагать ПЭТФ до терефталевой кислоты и этиленгликоля примерно за шесть недель. Это открытие показало, что существуют возможности биоремедиации ПЭТФ. В 2018 году было показано, что с помощью генетической инженерии можно повысить эффективность фермента ПЭТФазы, ответственного за разложение ПЭТФ у *Ideonella sakaiensis*. Этого удалось достичь путем изменения двух аминокислотных остатков в активном

центре фермента. Оказалось также, что модифицированный фермент ПЭТФаза способен к разложению другого пластика – полиэтиленфурандикарбоксилата, то есть модификация фермента привела к появлению нового субстрата для его действия

Три аспекта, которые следует учитывать в процессе 3D-печати PETG:

- PETG абсорбирует влагу из воздуха. Так как это негативно сказывается на последующем процессе 3D-печати, убедитесь, что вы храните пластик в прохладном, сухом месте;
- PETG усаживается во время печати, так что будьте особенно внимательны при печати первых слоев;
- хоть PETG и не хрупкий, он царапается сильнее ABS.

Нейлон (neylon) – популярное семейство синтетических полимеров, которое используется в производстве. Это своеобразный тяжеловес в мире 3D печати. По сравнению с большинством других материалов, нейлон обладает самыми сбалансированными характеристиками жесткости, гибкости и сроком службы. Еще одна уникальная характеристика этого материала - вы можете покрасить до или после печати. Один из основных недостатков - так же как и PETG, нейлон впитывает влагу, так что надо хранить его в прохладном, сухом месте.

На рис. 10.7 представлен внешний вид изделий из нейлона с различным цветом.

Нейлон – семейство синтетических полиамидов, используемых преимущественно в производстве волокон. Наиболее распространены два вида нейлона:

- полигексаметиленадипинамид (анид (СССР/Россия), нейлон 66 (США)), часто называемый собственно нейлоном;
- поли-ε-капроамид (капрон (СССР/Россия), нейлон 6 (США)).

Известны также другие виды, например:

- поли-ω-энантоамид (энант (СССР/Россия), нейлон 7 (США));
- поли-ω-ундеканамид (ундекан (СССР/Россия), нейлон 11 (США), рильсан (Франция, Италия)).

Также существует большое количество разновидностей нейлона, но чаще всего во время 3D печати используются марки 618 и 645.



Рис. 10.7. Внешний вид изделий, полученный при помощи 3D-печати из нейлона

Пластмассовые изделия могут изготавливаться из жесткого нейлона – эколлона, путем впрыскивания в форму жидкого нейлона под большим давлением, чем достигается большая плотность материала.

В кристаллических участках макромолекулы нейлонов имеют конформацию плоского зигзага с образованием с соседними молекулами водородных связей между атомами кислорода карбонила и атомами водорода соседних амидных групп (рис. 4.10). Вследствие этого нейлоны обладают более высокими, по сравнению с полиэфирами и полиалкенами физико-механическими свойствами, более высокой степенью кристалличности (40...60 %) и температурами стеклования и плавления.

При повышении степени кристалличности нейлонов их прочностные характеристики улучшаются, такое повышение кристалличности происходит и при холодной вытяжке волокна на 400...600 %, происходящая при этом ориентация макромолекул в направлении вытяжки ведет к повышению кристалличности и упрочнению волокна в 4...6 раз.

В промышленности нейлон применяется для изготовления втулок, вкладышей, пленок и тонких покрытий. Нейлон, нанесенный на трущиеся поверхности в виде облицовки или тонкослойного покрытия на тонкие металлические втулки, вкладыши и корпуса подшипников, повышает их эксплуатационные качества. В подшипниковых узлах трения удельные давления, диапазон рабочих температур примерно такие же, как у баббита. Нейлон имеет низкий коэффициент трения и низкую температуру на трущихся поверхностях. Коэффициент трения у нейлона при работе по стали без смазки или при недостаточной смазке равен 0,17...0,20, с масляной смазкой – 0,014...0,020,

с водой в качестве смазки – 0,02...0,05. Хорошие антифрикционные свойства позволяют применять нейлон в парах трения без смазки или при недостаточной смазке. Лучшим смазывающим материалом для композитов на основе нейлона являются минеральные масла, эмульсии и вода. При температурах до +150 °С на нейлон не влияют минеральные масла, консистентные смазки. Он не растворяется в большинстве органических растворителей, не поддается воздействию слабых растворов кислот, щелочей и соленой воды.

Нейлоны при нагревании на воздухе подвергаются термоокислительной деструкции, ведущей к снижению прочностных характеристик: при выдерживании на воздухе при температурах +100...+120 °С предел прочности на растяжение снижается в 5...10 раз. Деструкция ускоряется под воздействием ультрафиолетового излучения.

Используется также для изготовления струн некоторых музыкальных инструментов как альтернатива традиционным струнам животного происхождения: гитара, калмыцкая домбра, монгольский морин хуур и некоторые другие.

Синтез 66-мономером (нейлон) впервые был проведен 28 февраля 1935 года У. Карозерсом, главным химиком исследовательской лаборатории американской компании DuPont. Существует версия, что слово «нейлón» произошло от названий городов Нью-Йорк и Лондон (NYLON = New York + London). Также встречается мнение, что это слово – аббревиатура от New York Lab of Organic Nitrocompounds, однако достоверных сведений об этом нет. В словаре Вебстера сообщается, что это искусственно придуманное слово. В этимологическом словаре Дугласа Харпера указано, что название создано компанией DuPont из случайно выбранного родового слога *nyl-* и окончания *-on*, часто употребляемого в названиях волокон (например, капрон), исходно взятого из английского слова «cotton» («хлопок»).

Нейлон (Nylon) – это невероятно прочный, долговечный и универсальный материал для 3D-печати. Гибкий когда тонкий, но с очень высокой межслойной адгезией, Нейлон (Nylon) хорошо применим при изготовлении таких моделей, как подвижные шарниры или другие функциональные части и механизмы. Низкий коэффициент трения и высокая температура плавления Нейлона (Nylon) – отличный выбор при печати таких вещей, как шестеренки.

Вот что нужно знать, чтобы начать печать нейлоном (Nylon):

1) Температура плавления нейлона – 240°C и выше, убедитесь в том, что экструдер вашего принтера можно нагреть хотя бы до 260°C.

2) Нейлон (Nylon) должен быть высушен. Нейлон (Nylon) очень гигроскопичен. Это означает, что он легко поглощает воду из воздуха. Нейлон (Nylon) может поглотить более чем на 10% от своего веса воды, менее чем за 24 часа. Для достижения успешной печати нейлоновыми нитями требуется сухая нить. При печати нейлоном (Nylon), который не сухой, вода взрывает нить, вызывая пузырьки воздуха во время печати, что препятствует хорошей адгезии слоя и значительно ослабляет модель. Оно становится хрупкой. Сухой Нейлон (Nylon) печатается с маслянисто-гладкой или глянцевой поверхностью. Для того чтобы просушить нейлон (Nylon), его надо поместить в термошкаф с температурой 80...95°C на 6...8 часов. После сушки храните в герметичном контейнере, предпочтительно с осушителем (силикагелем).

3) Нейлон (Nylon) может покоробиться. Нейлон (Nylon) деформируется примерно также, как и ABS.

При печати Нейлоном (Nylon) обязательно требуется принтер с подогреваемым столом. А клей-карандаш на основе ПВА нанесенный на подогреваемый стол – это лучший способ адгезии. Клей или скотч-лента достаточно недорогой расходный материал и его достаточно просто найти. Разогретый до 75°C подогреваемый стол, совместно с тонким слоем клея отлично работает при печати Нейлоном (Nylon). Использование вентилятора охлаждения слоев недопустимо. Для лучшего результата 3D печати избегайте сквозняков или прохладных мест.

Рекомендуемые параметры печати:

- Температура экструзии – 240...260°C;
- Температура подогреваемого стола – 70...80°C (используем клей ПВА);
- Скорость печати: 30...60мм/с;
- Высота слоя: 0,2...0,4 мм.

Для печати обычно используется нейлон производства Taulman3D, американской компании, которая посвятила себя разработке инновационных материалов для 3D-печати. На сегодняшний день доступно 3 вида нейлона под марком Taulman3D:

Taulman3D 618 Nylon специально разработан для 3D-печати, его отличительными особенностями является: хорошее соединение с поверхностью, высокая водонепроницаемость, хорошее сопротивление

разрыва и возможность впитывать краску. Модели, напечатанные этим материалом имеют натурально белый цвет с прозрачной поверхностью. Пластик также легко можно окрасить, как до печати, так и после.

Taulman3D 645 Nylon обладает неповторимыми характеристиками. Ожидаемый предел прочности равен 16,533 фунта на квадратный дюйм (114 мПа), устойчивость на разрыв – 120%. Taulman3D 645 Nylon обладает всеми теми же качествами, что и Taulman3D 618 Nylon, но с улучшенными характеристиками. Рекомендованная температура печати от ~230°C до 265°C.

Taulman3D 645 Nylon – последняя разработка компания с улучшенными свойствами адгезии между слоями и повышенной прочностью.

Помимо чистых марок нейлона при объемной печати встречаются и наполненные композитные материалы на основе нейлона:

PA-CF (угленаполненный нейлон). Экологически чистый, на основе нейлона + 20% углеродного волокна. Легкая печать без запаха, матовый эффект. Высокая твердость, высокая жесткость, хорошая прочность, износостойкий материал, подходит для печати промышленных деталей. Температура деформации 120 °C, поэтому подходит для высокотемпературного использования. По сравнению с нейлоном имеет более низкую усадку и искажения. Уровень огнестойкости: UL94-V2.

PA-GF (стеклонаполненный нейлон). Нейлон, армированный стекловолокном. По сравнению с чистыми нейлоновыми нитями, механическая прочность, жесткость, термостойкость и усталостная прочность значительно улучшились, а усадка при литье была снижена. Более того, снижена гигроскопичность.

Термопласты TPE, TPU, TPC.

Термоэластопласт (ТЭП, англ. TPE) или термопластичный каучук – полимерная смесь или соединение, которое при температуре плавления проявляет термопластичный характер, который позволяет его формовать в готовое изделие и которое в пределах его расчетного температурного диапазона обладает характеристиками эластомеров без сшивания в процессе изготовления. Этот процесс является обратимым, и изделия из TPE можно перерабатывать и переделывать.

Как следует из названия, термопластичные эластомеры (TPE) – это, в основном, пластмассы, обладающие свойствами резины, что делает их чрезвычайно гибкими и долговечными. Таким образом, TPE

обычно используется для производства автомобильных деталей, бытовых приборов и предметов медицинского назначения.

В действительности, TPE – это широкий класс сополимеров (и полимерных смесей), но, тем не менее, он используется для маркировки многих коммерчески доступных типов нитей для 3D-принтеров. Мягкие и растяжимые, эти нити могут выдерживать физические нагрузки, которые не могут выдержать ни ABS, ни PLA. С другой стороны, печать не всегда проста, так как TPE может быть трудно экструдировать.

Первый термопластичный эластомер стал доступен в 1959 году, и с тех пор появилось множество новых вариантов таких материалов. Существует шесть основных групп TPE, которые доступны коммерчески: стирольные блок-сополимеры (TPE-S), полиолефиновые смеси (TPE-O), эластомерные сплавы, термопластичные полиуретаны (TPE-U), термопластичные сополиэферы (TPE-E) и термопластичные полиамиды (TPE-A).

На рис. 10.8 показаны изделия из термоэластопласта.



Рис. 10.8. Пример изделий из термоэластопласта TPE

Несмотря на то, что ТЭП является термопластичным, он обладает эластичностью, аналогичной эластичности сшитого каучука. Ключевым индикатором является их мягкость или твердость, измеренная по шкале дюрометра Шора. Подобно сшитому каучуку, ТЭП доступны в виде очень мягких гелевых материалов от 20 Shore 00 до 90 Shore A, после чего они входят в шкалу Shore D и могут быть произведены с целью получения значения твердости до 85 Shore D, которая обозначает очень твердый материал.

Конструкторы все чаще используют ТЭП из-за значительной экономии затрат, потому что их можно обрабатывать на оборудовании для переработки пластмасс. Обычный каучук, как натуральный,

так и синтетический, представляет собой терморезактивный материал, который должен подвергаться химической реакции сшивания во время формования или экструзии, обычно называемой вулканизацией. Благодаря этому процессу ТЭП обычно не обрабатывается в стандартном оборудовании для термопластов. Время, необходимое для завершения реакции вулканизации, зависит от многих факторов, однако в основном, это где-то между 1 минутой и несколькими часами. С другой стороны, термопластичные формовочные и экструзионные процессы, используемые для ТЭП, избегают стадии поперечной сшивки и могут достигать очень быстрых циклов, которые могут составлять всего 20 секунд. Для защиты окружающей среды затраты на издержки требуют, чтобы все больше и больше материалов подлежало переработке. Отходы от обработки ТЭП, отбракованные детали или продукты конечного использования можно легко перерабатывать, тогда, как большинство терморезактивных эластомеров заканчивают свою жизнь на полигоне.

Дополнительные преимущества по сравнению с терморезактивной резиной, обеспечиваемые ТЭП, включают отличную цветоустойчивость и меньшую плотность. Вот почему ТЭП являются одними из самых быстрорастущих сегментов пластмасс:

- ТЭП – уникальный класс технических материалов, сочетающий внешний вид, упругость и эластичность обычной терморезактивной резины и эффективность обработки пластмасс;
- перерабатываемость расплавленного ТЭП делает его очень подходящим для литья под давлением и экструзии с большими объемами. Его можно также утилизировать и перерабатывать;
- как эластомеры, ТЭП обладает высокой эластичностью.

Основные свойства ТЭП:

- ✓ отличная износостойкость при изгибе;
- ✓ хорошие электрические свойства;
- ✓ хорошая стойкость к разрыву и истиранию;
- ✓ устойчивость к температурам от -30 до $+140^{\circ}\text{C}$;
- ✓ высокая стойкость к ударам;
- ✓ низкий удельный вес;
- ✓ отличная стойкость к химикатам и атмосферному воздействию;
- ✓ совместная инъекция и совместная экструзия с полиолефинами и некоторыми инженерными пластмассами;
- ✓ возможность окраски в любой цвет.

Существует шесть основных групп ТЭП (TPE), доступных в продаже, и они перечислены в приблизительно возрастающем ценовом порядке:

Стирольные блок-сополимеры (SBS, TPE-S) основаны на двухфазных блок-сополимерах с твердыми и мягкими сегментами. Блоки стирольных концов обеспечивают термопластичные свойства, а бутадиеновые средние блоки обеспечивают эластомерные свойства. SBS, вероятно, имеет самый большой объем производства, и обычно используется в обуви, адгезивах, модификации битума, уплотнениях и рукоятках с более низкой спецификацией, где устойчивость к химическим веществам и старение имеют низкий приоритет. SBS при гидрировании превращается в SEBS, так как устранение связей C=C в бутадиеновом компоненте приводит к получению промежуточного блока этилена и бутилена, поэтому используется аббревиатура SEBS. SEBS характеризуется значительно улучшенной термостойкостью, механическими свойствами и химической стойкостью.

Термопластичные полиолефины (TPE-O или TPO). Эти материалы представляют собой смеси полипропилена (PP) и несшитого EPDM-каучука, в некоторых случаях присутствует низкая степень поперечной сшивки для повышения свойств терморезистентности и сжатия. Они используются в применениях, где требуется повышенная ударная вязкость по сравнению со стандартными сополимерами полипропилена, например, в автомобильных бамперах и приборных панелях. Свойства ограничены верхним пределом шкалы твердости, обычно 80 Shore A, и ограниченными эластомерными свойствами.

Термопластические вулканизаты (TPE-V или TPV). Эти материалы являются следующим шагом по показателям от TPE-O. Это также соединения из полипропилена и EPDM, однако, они динамически вулканизированы на стадии смешения. Данный материал стал хорошим заменителем EPDM в автомобильных уплотнениях, уплотнениях труб и других применениях, где требуется термостойкость до 120 C. Значения твердости по Шору обычно составляют от 45 A до 45 D. В настоящее время внедряется ряд новых TPE-V, называемых «Super TPVs», которые основаны на инженерных пластмассах, смешанных с высокоэффективными эластомерами, которые могут обеспечить значительно улучшенную тепловую и химическую стойкость.

Термопластичные полиуретаны (TPE-U или TPU). Эти материалы могут быть основаны на полиэфирных или полиэфир-уретановых типах и используются в тех случаях, когда изделие требует отличной

прочности на разрыв, стойкости к истиранию и износостойкости. Примеры включают подошвы для обуви, промышленные ремни, лыжные ботинки, а также проволоку и кабель. Твердость ограничивается верхним краем шкалы Shore A, обычно 80 Shore A.

Термопластичные сополиэфиры (ТРЕ-Е или СОРЕ или ТЕЕЕ) используются там, где требуется повышенная химическая стойкость и термостойкость до 140 С. Они также обладают хорошей устойчивостью к усталости и прочности на разрыв и поэтому используются в автомобильных применениях, а также для производства промышленных шлангов. Верхний предел твердости по Шору между 85А и 75D.

Термопластические полиэфирные блок-амиды (ТРЕ-А). Эти продукты обладают хорошей термостойкостью, имеют хорошую химическую стойкость и склеивание с полиамидными пластмассами. Их применения включают кабельные оболочки и аэрокосмические компоненты.

Поликарбонат (РС). Прозрачный как стекло, твердый как металл и легкий как плексиглас – все это поликарбонат – одно из самых выдающихся достижений современного органического синтеза.

Поликарбонат (ПК, РС) – это термопластичный полимер, который не имеет аналогов среди современных полимеров. Он отличается превосходными параметрами светопрозрачности, ударопрочности и термостойкости. Свойства поликарбоната практически не зависят от погодных условий: критически низкие температуры, при которых он может стать хрупким, находятся вне диапазона температур эксплуатации. Его твердость и сопротивление сжатию аналогично алюминию – армированный многослойный монолитный поликарбонат способен выдержать даже выстрел из огнестрельного оружия.

Множество превосходных технико-эксплуатационных характеристик в сочетании с низкой ценой обеспечили этому материалу огромную популярность. Сегодня этот термопластичный полимер используется везде, где необходим прозрачный материал с исключительными механическими свойствами, – от производства солнцезащитных очков до остекления самолетов.

Поликарбонат РС – группа термопластичных полимеров из группы сложных полиэфиров, которые являются эфирами угольной кислоты. Их получают путем реакции конденсации угольной кислоты с диолами (двухатомными фенолами – фосгеном, бисфенолом А).

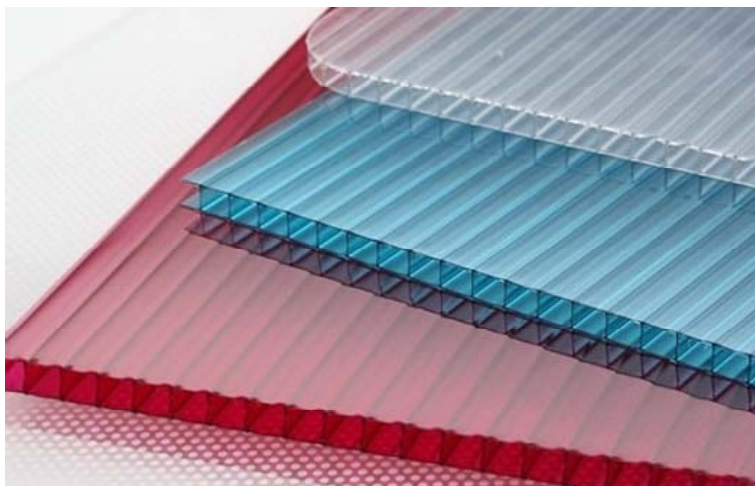


Рис. 10.9. Сотовый поликарбонат

Термопластичный полимер на основе бисфенола А – аморфное вещество. Из-за очень плохой кристаллизационной способности полимера чистые продукты из него прозрачны, бесцветны или желтоваты. ПК совместим с множеством химикатов, при контакте с некоторыми проявляет умеренную стойкость или разрушается.

Химические свойства и использование поликарбоната:

- РС устойчив к солям и минеральным маслам;
- умеренная химическая стойкость к слабым кислотам – практически не повреждается при температурах $> 60^{\circ}\text{C}$;
- частично растворяются в хлорированных алифатических и ароматических углеводородах, циклогексаноне и диоксане;
- ПК не устойчив к щелочам, аминам, аммиаку, альдегидам, кетонам, этиловому спирту и др. (быстро разрушается в течение короткого периода времени);
- РС не устойчив к ароматическим углеводородам, к бензину, керосину, анилину, лакам, растворителям, толуолу, метилхлориду (им склеивают ПК) и другим соединениям.

Особенности эксплуатации поликарбоната, обусловленные его химическими свойствами:

- термопласт более восприимчив воздействию химических агентов, когда он находится в напряженном состоянии и/или при деформации;
- воздействие агрессивных к ПК химических реагентов не всегда приводит к снижению его технико-эксплуатационных характеристик – пластик может частично раствориться, размягчиться или абсорбировать химикат;

- в случае химического разрушения могут возникнуть трещины под напряжением – видимые и микроскопические, что приводит к помутнению или порче изделия из ПК;
- нетоксичный и химически инертный материал – PC соответствует требованиям ЕС и FDA для контакта с некоторыми пищевыми продуктами;
- химическая устойчивость ПК к воде не является постоянной и зависит от давления и температуры (до +60 °С) – при более высоких температурах воды ПК постепенно разрушается;
- при уходе за пластиком PC следует избегать составов для чистки стекла с аммиаком;
- следует учитывать, что материал растворим в технических растворителях;
- перед применением герметиков, силикона и клеев необходима проверка на совместимость с ПК.

Это уникальный материал во многих отношениях, как с точки зрения механических, физических, химических, так и теплоизоляционных характеристик, обуславливающих его широкое применение, в числе которых:

- высокая жесткость, твердость и ударная вязкость (более 20 кДж /м²) во всем диапазоне рабочих температур (до -50°С);
- легкость – плотность материала 1,20 г/см³;
- стабильность формы, размеров, физических и механических свойств в рабочем диапазоне от -100°С до +135°С;
- высокая сопротивляемость ползучести при комнатной температуре;
- хорошая термическая стабильность – длительное удерживание термопласта в нагретом состоянии (до +153°С) не изменяет его свойств;
- термостойкость – температура обработки от +280°С до +310°С;
- светопрозрачность – 90% ± 1%;
- показатель преломления – 1,585 ± 0,001;
- низкий коэффициент термического удлинения – напряжение при пределе текучести – 55...65 МПа;
- упругость при растяжении – 2300...2400 МПа;
- предел прочности при растяжении > 70 МПа;
- удлинение на границе текучести – 6...7%;

- низкий коэффициент водопоглощения – 0,1...0,2%.

Технико-эксплуатационные свойства:

- PC в 250 раз превышает ударопрочность кварцевого стекла и почти в 10 раз – плексигласа;
- высокая морозостойкость;
- высокие теплоизоляционные параметры;
- высокая паро- и газопроницаемость;
- хорошие диэлектрические свойства (высокое удельное сопротивление);
- термопластичный полимер устойчив к динамическим нагрузкам и к истиранию;
- чистый PC поглощает ультрафиолетовый спектр излучения – без специальных добавок и защитных пленок пластик не устойчив к ультрафиолету;
- огнестойкий, трудновоспламеняемый и самозатухающий материал: класс B1 (стандарт DIN 4102) .
- термопласт PC долговечен – срок его эксплуатации превышает 10 лет;
- легко обрабатывается;
- термопластичный полимер устойчив к погодным условиям (в т.ч. и к граду) и биологическому разрушению;
- гладкая поверхность материала облегчает уход, практически не загрязняется;
- не царапается, не требует защиты от механических повреждений.

Преимущества термопластичного полимера, такие как долговечность, прочность, надежность и эстетичность, очень ценны для строительной отрасли. Эти свойства делают его наиболее универсальным материалом, способным сочетать самые высокие оптические и силовые параметры с отличной теплоизоляцией и малым весом.

Промышленные поликарбонаты. Термопласты могут подвергаться обработке с применением следующих технологий:

- ✓ литье под давлением при 280...320 °C – так получают монолитный поликарбонат;
- ✓ экструзия из гранул при 240...280°C с холодным и горячим формованием – метод изготовления сотового ПК;
- ✓ литье из растворов в метиленхлориде – получение пленок из термопластичных полимеров.

Для улучшения параметров прочности, жесткости и стабильности при высоких температурах промышленные поликарбонаты дополнительно армируются стекловолокном, модифицируются свето-и/или термостабилизаторами:

- модификации ПК с более высокой текучестью используются для получения продукции с большой площадью.
- разновидности РС, усиленные армирующей сеткой из стекловолокна (10...40%), отличаются повышенной жесткостью и стойкостью к образованию трещин.
- модификации с присадками из графита, сульфита молибдена или тефлона обеспечивают пластику повышенную гладкость и устойчивость к истиранию.

Сополимеры, полученные из бисфенола ТМС (1,1-бидкисифенилфенилтриметилциклогексана) – прозрачные пластики с расширенным диапазоном рабочих температур (от +160°C до +205°C).

Сополимеры с галогенизированными бисфенолами, в частности с тетрабромбисфенолом, характеризуются пониженной воспламеняемостью. Использование бисфенола S для сополимеризации увеличивает ударную вязкость.

Сотовый поликарбонат: свойства и сфера его использования. Ячеистый (многоперегородчатый) термопластичный полимер изготавливается в виде полых панелей различной толщины, цветов и размеров с дополнительными ребрами жесткости. Многокамерное (сотовое) строение обеспечивает повышенные параметры теплоизоляции (U до 1,0 Вт/м²*К в панелях толщиной 40 мм). Использование его в качестве материала для остекления снижает затраты на отопление помещений.

Сферы применения ячеистого листового термопластика в качестве материала для остекления:

- веранд, зимних садов, беседок и лоджий;
- кровельных покрытий промышленных, коммерческих и спортивных объектов,
- теплиц и бассейнов.

Он широко применяется также для изготовления:

- козырьков, навесов, остановок;
- рекламных панелей;
- акустических экранов;
- перегородок;

- антивандальных дверей и окон;
- световых люков и др.

Поликарбонат (РС), помимо того, что он является самым прочным пластиком для 3D-принтеров, представленной в этом списке, чрезвычайно долговечен и устойчив к физическим воздействиям и нагреву, способен выдерживать температуры до 110°C. Это прозрачный пластик, что объясняет его использование в коммерческой продукции, такой как пуленепробиваемое стекло, маски для подводного плавания, электронные экраны, защитные шлемы для спортсменов (рис. 10.10).

Несмотря на некоторые подобные случаи использования, РС не следует путать с акрилом или плексигласом, которые разрушаются или трескаются под нагрузкой. В отличие от этих двух материалов, РС является умеренно гибким (хотя и не таким, как, например, нейлон), что позволяет ему изгибаться до тех пор, пока в конечном итоге не деформируется.

Нить для 3D-принтера РС гигроскопична, способна впитывать воду из воздуха, поэтому не забывайте хранить ее в сухом прохладном месте, чтобы обеспечить лучшее качество отпечатков.



Рис. 10.10. Шлем, напечатанный на 3D-принтере из поликарбоната

Свойства нити РС:

- прочность – очень высокая;
- эластичность – средняя;
- долговечность – очень высокая;
- сложность применения – средняя;
- температура печати – 270...310°C;
- температура стола – 90...110°C;

- усадка или деформация – значительные;
- растворимость – не растворим;
- пищевая безопасность – не безопасны.

Благодаря своим физическим свойствам, PC является идеальным филаментом для 3D-принтера и для печати деталей, которые должны сохранять свою прочность, ударную вязкость и форму в условиях высокой температуры, таких как электрические, механические или автомобильные компоненты.

Тема 10.2. Термоусадочные явления в области печати

К числу промышленных материалов для технологий аддитивного синтеза можно причислить: полипропилен (PP), смесь PC-ABS, PMMA (акрил), FPE, керамику (clay), углеродсодержащие пластики и пр.

Полипропилен (PP) – твердое вещество белого цвета, является продуктом полимеризации пропилена и принадлежит к классу полиолефинов. Проще говоря, это пластиковый полимер с широкой областью применения. Сегодня он является наиболее востребованным современным пластиком благодаря своим отличным потребительским свойствам и универсальностью использования.

Материал получают из пропилена, формула которого C_3H_6 , в результате реакции между пропиеном и катализатором Циглера-Натта. Таким образом, его химическая формула выглядит так – $(C_3H_6)_n$. Сегодня существует несколько разновидностей этого вещества, все они имеют одну формулу, но отличаются пространственной структурой: изотактический, синдиотактический, атактический.

Изотактическая и синдиотактическая молекулярные структуры могут характеризоваться разной степенью совершенства пространственной регулярности.

Стереизомеры полипропилена существенно различаются по механическим, физическим и химическим свойствам. Атактический полипропилен представляет собой каучукоподобный материал с высокой текучестью, температурой плавления – около $80^\circ C$, плотностью – 850 кг/м^3 , хорошей растворимостью в диэтиловом эфире. Изотактический полипропилен по своим свойствам выгодно отличается от атактического, а именно: он обладает высоким модулем упругости, большей плотностью – 910 кг/м^3 , высокой температурой плавления – $165...170^\circ C$ и лучшей стойкостью к действию химических реагентов. Стереоблокполимер полипропилена при исследовании с помо-

щью рентгеновских лучей обнаруживает определенную кристалличность, которая не может быть такой же полной, как у чисто изотактических фракций, поскольку атактические участки вызывают нарушение в кристаллической решетке. Изотактический и синдиотактический образуются случайным образом;

Для каждого из них характерны свои физические и химические свойства. Например, атактический полимер характеризуется текучестью и низкой температурой плавления, а изотактический, наоборот, упругий и плотный, плавится при 170 градусов Цельсия.

Основные физические свойства:

- низкая плотность материала – $0,91 \text{ г/см}^3$. Полипропилен имеет самую низкую плотность из всех пластмасс, что выгодно отличает его от более плотных аналогов;
- высокая прочность. Многочисленные эксперименты показали, что он выдерживает большую нагрузку, что намного превышает возможности полиэтилена;
- устойчивость к низким температурам. Полимер прекрасно справляется с отрицательными температурами, выдерживая – 10 градусов по Цельсию и более низкие температуры;
- устойчивость к высоким температурам. Выдерживает не только низкие, но и высокие температуры, его температура плавления составляет 160...170 градусов по Цельсию;
- устойчивость к резким перепадам температуры. Быстрая смена температурного режима также не страшна этому материалу. Хорошо выдерживает стремительный переход от минуса к плюсу и обратно;
- превосходные диэлектрические свойства. Высокая диэлектрическая константа вместе с большой диэлектрической прочностью обеспечивают широкие возможности его применения в качестве электроизоляционного материала;
- легкая обработка. Полипропилен легко поддается сварке, распилу, сверлению, хорошо гнется, что значительно расширяет возможности его применения в промышленности и быту;

Химические характеристики:

- устойчивость к агрессии химических веществ. Эта особенность материала позволяет широко применять его для нужд химических предприятий. Он выдерживает воздействие раскаленного металла, различных кислот и испарений. В частности, это свойство

используется при изготовлении воздуховодов и вентиляции для вредных производств;

- экологичность и безопасность для окружающей среды и человека. Многочисленные опыты доказали нетоксичность и абсолютную экологическую безопасность этого материала для окружающей среды и человека. Поэтому он используется при производстве емкостей для воды, а также различных жидкостей и сыпучих продуктов питания. Очень часто его применяют при строительстве сооружений для очистки воды.

Полипропилен – водостойкий материал. Даже после длительного контакта с водой в течение 6 месяцев (при комнатной температуре) водопоглощение полипропилена составляет менее 0,5 %, а при 60 °С – менее 2%.

Полипропилен имеет более высокую температуру плавления, чем полиэтилен, и соответственно более высокую температуру разложения. Чистый изотактический полипропилен плавится при 176 °С. Максимальная температура эксплуатации полипропилена 120...140 °С. Все изделия из полипропилена выдерживают кипячение, и могут подвергаться стерилизации паром без какого-либо изменения их формы или механических свойств.

Превосходя полиэтилен по теплостойкости, полипропилен уступает ему по морозостойкости. Его температура хрупкости (морозостойкости) колеблется от –5 до –15 °С. Морозостойкость можно повысить введением в макромолекулу изотактического полипропилена звеньев этилена (например, при сополимеризации пропилена с этиленом).

Показатели электрических свойств полипропилена приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Теплофизические свойства полипропилена

Температура плавления, °С	160–170
Теплостойкость по методу НИИПП, °С	160
Удельная теплоемкость (от 20 до 60°С), кал/(г·°С)	0,46
Термический коэффициент линейного расширения (от 20 до 100 °С), 1/°С	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Температура хрупкости, °С	От –5 до –15

Перспективы у этого высокотехнологичного материала весьма радужные. Очевидно, что его процент в мировом потреблении будет увеличиваться. Этому способствуют и постоянные исследования, и появление новых технологий и модификаций полипропилена. С большей долей вероятности, так будет продолжаться пока не появятся более совершенные синтетические материалы, но даже тогда пропилен будет широко использоваться в промышленности и народном хозяйстве.

Для вибро- и теплоизоляции также широко применяется пенополипропилен (ППП). Близок по характеристикам к вспененному полиэтилену (пенополиэтилен). Также встречаются декоративные экструзионные профили из ППП, заменяющие пенополистирол. Атактический полипропилен используют для изготовления строительных клеев, замазок, уплотняющих мастик, дорожных покрытий и липких пленок.

Структура применения полипропилена в России в 2012 году была следующей: 38 % – тара, 30 % – нити, волокна, 18 % – пленки, 6 % – трубы, 5 % – полипропиленовые листы, 3 % – прочее.

Полипропилен занимает второе место в мире среди полимеров по объему потребления, с долей 26 % уступая только полиэтилену. Следует иметь в виду, что при 3D-печати полипропиленом могут возникнуть трудности, обусловленные его свойствами. Полукристаллическая структура ПП делает его сложным материалом для 3D-печати. Изменение температуры экструзии может привести к различным свойствам 3D-печатной детали. Например, повышение температуры может улучшить адгезию слоя, в результате чего можно получить более прочные детали.

Для успешных копий самым дешевым и простым решением будет использование полипропиленовой ленты на рабочей пластине. Это обеспечит лучшую адгезию. Следует учесть, что разные модели 3D-принтеров могут дать неодинаковые результаты.

Кроме того, необходимо убедиться, что температура сопла (230-260°C) и пластины (85-100°C) надлежащая, т.к. некоторые 3D-принтеры могут не поддерживать температуру в 260 °C, что может привести к плавлению частей 3D-принтера (что определенно нежелательно).

Несмотря на то, что полипропилен безопасен для пищевых продуктов и нетоксичен, в процессе 3D-печати могут выделяться токсичные испарения. Что касается доступных цветов, варианты более огра-

ничен, чем у других материалов, учитывая, что полипропилен уже очень давно доступен на рынке. Кроме того, он дороже, чем другие пластики для 3D-печати, такие как PLA или ABS.

Полиметилметакрилат (ПММА, оргстекло), или – акриловая смола, синтетический виниловый полимер метилметакрилата, термопластичный прозрачный пластик, известный под наименованиями Plexiglas, Deglas, Acrylite, Lucite, Perspex, Setacryl, плексиглас, акри-ма, новаттро, плексима, лимакрил, плазкрил, акриллекс, акрилайт, акрипласт, акриловое стекло, акрил, метаплекс и многими другими. Может подвергаться окрашиванию и тонированию.

Материал под маркой Plexiglas создан в 1928 году, запатентован в 1933 году Отто Ремом (нем. Otto Röhm). С 1933 года началось его промышленное производство фирмой Röhm and Haas (Дармштадт), первые продажи готовых изделий относятся к 1936 году.

Появление органического стекла (в то время – «плексигласа») в период между двумя мировыми войнами было востребовано бурным развитием авиации, непрерывным ростом скоростей полета всех типов самолетов и появлением машин с закрытой кабиной пилота (экипажа). Необходимым элементом таких конструкций является фонарь кабины пилота. Для применения в авиации того времени органическое стекло обладало удачным сочетанием необходимых свойств: оптическая прозрачность, безосколочность, то есть безопасность для летчика, водостойкость, нечувствительность к действию авиабензина и смазочных масел.

В годы Второй мировой войны органическое стекло широко применялось в конструкциях фонаря кабины, турелей оборонительного вооружения тяжелых самолетов, элементов остекления перископов подводных лодок. Однако, ввиду очень легкой возгораемости, при первой же возможности в авиации перешли к другим прозрачным материалам.

Тем не менее, полимеры только частично способны заменять термостойкие стекла повышенной прочности – в современной авиации во многих случаях они применимы только в виде композитов. Развитие современной авиации подразумевает полеты в верхних слоях атмосферы и гиперзвуковые скорости, высокие температуры и давление, где органическое стекло неприменимо вовсе. Примерами могут служить летательные аппараты, сочетающие в себе качества космических кораблей и самолетов: «Спейс Шаттл» и «Буран».

Существуют органические альтернативы акриловому стеклу – прозрачные поликарбонат, поливинилхлорид и полистирол.

В СССР отечественный плексиглас – оргстекло был синтезирован в 1936 году в НИИ пластмасс (Москва). В наши дни теплостойкие фторакрилатные органические стекла используются в качестве легких и надежных деталей остекления военных и гражданских самолетов, – работоспособны при температурах эксплуатации от -60 до $+250^{\circ}\text{C}$.

Органическое стекло полностью состоит из термопластичной смолы. Химический состав стандартного оргстекла у всех производителей одинаков. Другое дело, когда необходимо получить материал с разными специфическими свойствами: ударопрочными (антивандальными), светорассеивающими, светопропускающими, шумозащитными, УФ-защитными, теплостойкими и другими, тогда в процессе получения листового материала может быть изменена его структура или в него могут быть добавлены соответствующие компоненты, обеспечивающие комплекс необходимых характеристик.

Эти органические материалы только формально именуется стеклом и относятся к совершенно иному классу веществ, о чем говорит само их название и чем в основном определяются ограничения свойств и, как следствие, возможностей применения, несопоставимых со стеклом по многим параметрам. Органические стекла способны приблизиться по свойствам к большинству видов неорганических стекол только в композитных материалах, однако огнеупорными они быть не могут. Стойкость к агрессивным средам органических стекол также определяется значительно более узким диапазоном.

Тем не менее, этот материал, когда его свойства дают очевидные преимущества (исключая специальные виды стекол), используется как альтернатива силикатному стеклу. Различия в свойствах этих двух материалов следующие:

- ПММА легче: его плотность (1190 кг/м^3) приблизительно в два раза меньше плотности обычного стекла;
- ПММА более мягок, чем обычное стекло, и чувствителен к царапинам (этот недостаток исправляется нанесением стойких к царапинам покрытий);
- ПММА может быть легко деформирован при температурах выше $+100^{\circ}\text{C}$; при охлаждении приданная форма сохраняется;
- ПММА легко поддается механической обработке обычным металлорежущим инструментом;

- ПММА лучше, чем неспециальные, разработанные с этой целью виды стекол, пропускает ультрафиолетовое и рентгеновское излучения, отражая при этом инфракрасное; светопропускание оргстекла несколько ниже (92–93 % против 99 % у лучших сортов силикатного);

- ПММА неустойчив к действию спиртов, ацетона и бензола.

Основные преимущества:

- малая теплопроводность (0,2–0,3 Вт/(м·К)) по сравнению с неорганическими стеклами (0,7–13,5 Вт/(м·К));

- высокая светопропускаемость – 92 %, которая не изменяется с течением времени, сохраняя свой оригинальный цвет;

- сопротивляемость удару в 5 раз больше, чем у стекла;

- при одинаковой толщине оргстекло весит почти в 2,5 раза меньше, чем стекло, поэтому конструкция не требует дополнительных опор, что создает иллюзию открытого пространства;

- устойчиво к действию влаги, бактерий и микроорганизмов, поэтому может использоваться для остекления яхт, производства аквариумов;

- экологически чистое, при горении не выделяет никаких ядовитых газов;

- возможность придавать разнообразные формы при помощи термоформования без нарушения оптических свойств с прекрасной детализацией;

- механическая обработка осуществляется почти с такой же легкостью, как и обработка дерева;

- устойчивость во внешней среде, морозостойкость;

- пропускает 73 % ультрафиолетовых лучей, при этом УФ-лучи не вызывают пожелтения и деградации акрилового стекла;

- устойчивость в химических средах;

- электроизоляционные свойства;

- подлежит утилизации.

Недостатки:

- при пиролизе выделяет вредный мономер – метилметакрилат;

- склонность к поверхностным повреждениям (твердость 180–190 Н/мм²);

- технологические трудности при термо- и вакуумформовании изделий – появление внутренних напряжений в местах сгиба при формовке, что ведет к последующему появлению микротрещин;

- легковоспламеняющийся материал (температура воспламенения +260 °С).

Особенности экструзионного оргстекла по сравнению с литым оргстеклом:

- ряд возможных толщин листов меньше, что определяется возможностью экструдера;
- возможная длина листов больше;
- разнотолщинность листов в партии меньше (допуск по толщине 5 % вместо 30 % у литого акрила);
- меньшая ударостойкость;
- меньшая химическая стойкость;
- большая чувствительность к концентрации напряжений;
- лучшая способность к склеиванию;
- меньший и более низкий диапазон температур при термоформовке (примерно от +150 до +170 °С вместо от +150 до +190 °С);
- меньшее усилие при формовке;
- большая усадка при нагреве (6 % вместо 2 % у литого акрила).

На оргстекло воздействуют разбавленные фтористоводородные и цианистоводородные кислоты, а также концентрированные серная, азотная и хромовая кислоты. Растворителями оргстекла являются хлорированные углеводороды (дихлорэтан, хлороформ, метилен хлористый), альдегиды, кетоны и сложные эфиры. На оргстекло также воздействуют спирты: метиловый, бутиловый, этиловый, пропиловый. При непродолжительном воздействии 10 % этилового спирта взаимодействие с оргстеклом отсутствует.

Оргстекло получают двумя способами: экструзией и литьем. Поэтому существует два типа оргстекла – экструзионное и литое. Сам способ производства накладывает ряд ограничений и определяет некоторые свойства пластика.

Экструзионное оргстекло (англ. extrusion, нем. Extrudiert) получают методом непрерывной экструзии (выдавливания) расплавленной массы гранулированного ПММА через щелевую головку с последующим охлаждением и резкой по заданным размерам.

Блочное (англ. cast, в русском языке утвердились также термины «литьевое», «литое») получают методом заливки мономера ММА между двумя плоскими стеклами с дальнейшей его полимеризацией до твердого состояния.

Способы обработки оргстекла: сверление, нарезание резьбы, резьбовое соединение, фрезерование и обработка по заданному про-

филю, обработка на токарном станке, обработка резанием, пемзование, шлифование, полирование, формование, вакуумное формование, штамповка, втягивание, вдувание, сгибание, нагревание, охлаждение, отжиг, стыкование, склеивание, сварка, окрашивание и металлизация.

В связи со стремительным развитием лазерной техники в последние годы широкую популярность получил лазерный метод обработки ПММА. СО₂-лазеры идеально подходят для этой задачи, поскольку длина волны лазерного излучения этого типа лазера (9,4 – 10,6 мкм) приходится на пик поглощения ПММА. Срез, полученный методом лазерного воздействия, получается гладким, без следов продуктов горения. При лазерной резке прозрачного ПММА не наблюдается изменения цвета на срезе. Цветной ПММА может менять оттенок на срезе в редких случаях.

Как уже отмечено, самолеты и вертолеты, относящиеся к предыдущему поколению, остекляют однослойными или многослойными (композитными) материалами на основе органических и силикатных стекол. Изделия из оргстекла получают вакуумным формованием, пневмоформованием и штамповкой. Используется также метод холодного формования. Многие области применения этих полимеров пересекаются со стеклом, но оргстекло значительно проще обрабатывается и формуется, а также обладает меньшим весом. Это определяет его преимущество для изготовления различных деталей интерьера, указателей, рекламной продукции и аквариумов. Обычно для связи используется трудоемкое оптическое стекло. В этом волокне сердцевина делается из кварцево-германатного стекла. Хотя материал стеклянных волокон дешевле пластиковых, их себестоимость выше из-за специальной обработки и технологии изделий. В отдельных, менее ответственных случаях широкое применение для связи имеет пластиковое волокно.

Из необычных областей применения оргстекла следует отметить:

- ✓ изготовление клея-растворителя для самого себя путем получения мономера (метилметакрилата) перегонкой;
- ✓ в сантехнике (акриловые ванны), в торговом оборудовании.

ПММА нашел широкое применение в офтальмологии: из него уже несколько десятилетий изготавливаются жесткие газонепроницаемые контактные линзы и жесткие интраокулярные линзы (ИОЛ), которых в настоящее время имплантируется в мире до нескольких

миллионов штук в год. Интраокулярные (то есть внутриглазные) линзы известны под названием искусственного хрусталика, и ими заменяют капсулу, помутневшую в результате возрастных изменений и других причин, приводящих к катаракте.

Органические стекла как биоматериалы именно из-за таких качеств, как пластичность, позволили заменить стекла неорганические (например, контактные линзы). Работа ученых в течение более чем 20 лет привела к созданию в конце 1990-х годов силикон-гидрогелевых линз, которые благодаря сочетанию гидрофильных свойств и высокой кислородопроницаемости могут непрерывно использоваться в течение 30 дней круглосуточно. Тем не менее это не стекла, но оптический материал со своими характеристиками.

Области применения: осветительная техника (плафоны, перегородки, лицевые экраны, рассеиватели), наружная реклама (лицевые стекла для коробов, световых букв, формованные объемные изделия), торговое оборудование (подставки, витрины, ценники), сантехника (оборудование ванных комнат), строительство и архитектура (остекление проемов, перегородки, купола, танц-пол, объемные формованные изделия, аквариумы), транспорт (остекление самолетов, катеров, обтекатели), приборостроение (циферблаты, смотровые окна, корпуса, диэлектрические детали, емкости).

ПММА широко используется в микро- и наноэлектронике. В частности, ПММА нашел применение в качестве позитивного электронного резиста в электронно-лучевой литографии. Раствор ПММА наносят на кремниевую пластину или другую подложку с помощью центрифуги, в результате чего образуется тонкая пленка, после чего сфокусированным электронным лучом, например, в растровом электронном микроскопе (РЭМ) создается требуемый рисунок. В тех местах пленки ПММА, куда попали электроны, происходит разрыв межмолекулярных связей, в результате чего в пленке образуется скрытое изображение. С помощью проявляющего растворителя засвеченные участки удаляются. Помимо электронного пучка рисунок можно сформировать путем облучения ПММА ультрафиолетом и рентгеновским излучением. Преимущество ПММА в сравнении с другими резистами состоит в том, что с его помощью удастся получать рисунки с линиями нанометровой ширины. Гладкая поверхность ПММА может быть легко наноструктурирована путем обработки в кислородной высокочастотной плазме, а наноструктурированная поверхность ПММА

может быть легко сглажена путем облучения вакуумным ультрафиолетом (ВУФ).

Органическое стекло (Plexiglas) отражает звук в шумоизоляционных экранах, в шумоизоляционных барьерах на автомагистралях, мостах, пешеходных переходах, железнодорожных переездах, в коттеджных поселках, для шумоизоляции зданий и прочее. Например, установленная количественная величина звукоизоляции PLEXIGLAS SOUNDSTOP толщиной 12 мм – 32 дБ; толщиной 15 мм – 34 дБ; толщиной 20 мм – 36 дБ; толщиной 25 мм – 38 дБ.

Виды оргстекла. Прозрачное оргстекло. Бесцветный кристалльно прозрачный лист со светопропусканием 92–93 % (при толщине 3 мм), с идеально гладкой поверхностью, отличающейся сильным блеском с обеих сторон. Максимальная прозрачность, отсутствие искажений изображения. Применение: остекление зданий и сооружений (наружное и внутреннее), витрины, прозрачная защита приборов и механизмов.

В табл. 10.2 указаны основные свойства оргстекла.

Таблица 10.2

Свойства РММА

Показатели	Единица измерения	Литьевое оргстекло	Экструзионное без УФ защиты	Экструзионное с УФ защитой
Предел прочности при растяжении (23°C)	МПа	70		70
Модуль упругости при растяжении	МПа	3000		3500
Относительное удлинение при растяжении (23 °C)	%	4		5
Температура размягчения	°C	+95	+100	+105
Ударная вязкость (не менее) 2,5...4 мм	кДж/м ²	9	9	12
Ударная вязкость (не менее) 5...24 мм	кДж/м ²	13		
Максимальная температура эксплуатации	°C	+80	+80	+80
Температура формования	°C	+150...170	+150...155	+150...155
Удельный вес	г/см ³	1,19	1,19	1,19
Коэффициент светопропускания	%	92	92	92

Печать РММА может вызвать затруднения. Чтобы предотвратить усадку и обеспечить максимальную прозрачность, нужна высокая температура сопла. Желательно, чтобы 3D-принтер можно было закрыть корпусе для лучшей регулировки охлаждения.

Полиэстеры (FPE, полиэфиры) – высокомолекулярные соединения, получаемые поликонденсацией многоосновных кислот или их ангидридов с многоатомными спиртами. Известны природные (янтарь, древесная смола, шеллак и др.) и искусственные полиэфиры. Практическое применение получили глифталевые смолы, полиэтилентерефталат, полиэфирмалеинаты и полиэфиракрилаты.

Полиэфирное волокно – синтетическое волокно, формируемое из расплава полиэтилентерефталата или его производных. Достоинства – незначительная сминаемость, отличная свето- и атмосферостойкость, высокая прочность, хорошая стойкость к истиранию и к органическим растворителям; недостатки – трудность крашения, сильная электризуемость, жесткость – устраняется химическим модифицированием. Применяется, например, в производстве различных тканей, искусственного меха, канатов, для армирования шин, в качестве утеплительного материала. Основные торговые названия: лавсан, терилен, дакрон, тетерон, тергаль, тесил.

- В зависимости от вида выделяют следующие полиэфирные волокна:

- штапельные (волокна конечной штапельной длины, как правило не более 40–45 мм (волокна хлопковой штапельной диаграммы), используемые в текстильной промышленности для выработки пряжи;

- филаментные (они же: комплексные нити, непрерывные волокна) – представляют собой нити, состоящие из отдельных бесконечных полиэфирных нитей малой линейной плотности (десятые доли текса и ниже): характеризуются линейной плотностью (как правило – тексом – весом в граммах одного километра нити), филаментарностью – количеством элементарных нитей, из которых оно состоит, титром – средней линейной плотностью одного филамента;

- текстурированные – как правило филаментные волокна, подвергнутые специальному извитию филаментов для: придания объема – или – соединения (компактирования) филаментов вместе и т. п.;

- моонити;

- объемные нити (BCF).

В настоящее время в мировой текстильной промышленности полиэфирные волокна занимают доминирующую позицию среди волокон искусственного происхождения.

Как правило, формирование полиэфирных волокон происходит методом экструзии (продавливания через фильеры) из расплава полимера (полиэтилентерефталат) и воздушного охлаждения. Затем волокна подвергаются вытяжке для достижения необходимой штапельной линейной плотности и прочности. Для получения штапельных (дискретных) волокон осуществляется штапельирование волокнистого жгута путем резки или разрыва (на разрывно-штапельирующей машине, процесс «Тow-to-Тop»).

Применение гибких материалов в 3D печати можно считать огромным шагом для производства. За счет этого спектр возможных применений технологии значительно расширяется. Резиновый пластик FlexibelPolyEster (FPE) – один из материалов, позволяющих создавать гибкие изделия на обыкновенном настольном 3D принтере. Он сочетает в себе прочность, эластичность и термоустойчивость, благодаря чему у пользователей открывается доступ к целому ряду творческих и инженерных применений. Более того, FlexibelPolyEster совместим с другими видами материалов, что, при наличии 3D-принтера с двумя экструдерами, позволяет комбинировать пластики в единой структуре.

При желании печатать резиновым пластиком FlexibelPolyEster, не стоит забывать о том, что методика работы с гибкими материалами отличается от печати привычными пластиками. Причина этому кроется в конструкции экструдера и прижимного механизма современных настольных 3D принтеров. Потому, при печати гибкими материалами стоит помнить о таких правилах:

- не давить на нить пластика при подаче. Филамент просто согнется внутри экструдера;
- не выставлять высокую скорость печати: печатать нужно на небольших (20...40 мм/с) скоростях. В противном случае не избежать прогибания и проскальзывания нити между прижимным механизмом и колесом экструдера;
- между колесом экструдера и термобарьером (трубка в которую попадает пластиковая нить после колеса экструдера) не должно быть свободного пространства. Иначе нить пластика с большой вероятностью согнется и заполнит собой пустоты. При наличии подобной конструкции в 3D-принтере, в свободное пространство следует по-

местить тефлоновую трубку. Таким образом, на выходе из двигателя экструдера будет сразу попадать в трубку, минуя пустоту.

Технические характеристики полиэстера FPE и режимы настройки принтера приведены в табл. 10.3.

Два заметных аспекта FPE: хорошая адгезия между слоями и умеренно высокая стойкость к нагреву и различным химическим соединениям. Учитывая широкий диапазон филамента FPE для 3D-принтера, наиболее полезным способом отличить разные нити этого типа является значение Шора (например, 85A или 60D), где большее число указывает на меньшую гибкость.

Таблица 10.3

Характеристики полиэстера

Основной показатель	Значение
Предел прочности при растяжении	более 35 МПа
Растяжение	500%
Плотность	1200 кг/м ³
Температура экструдера	220...250 °С
Температура платформы	100...110 °С
Толщина слоя	0,1...0,3 мм
Толщина стенки	0,03 мм и больше
Скорость подачи пластика	20...50 мм/с
Технология 3D печати	FDM
Диаметр нити пластика	1,75 мм

Поликарбонатный ABS-сплав (PC-ABS) представляет собой прочный термопластик, сочетающий в себе прочность и термостойкость поликарбоната с гибкостью ABS. Обычно используется в авто-

мобильной промышленности, электронике и телекоммуникациях. Является одним из наиболее широко используемых промышленных термопластов в мире.

При использовании в качестве филамента для 3D-принтера в этой нити привлекают те же преимущества, но существует компромисс – это немного более сложный процесс печати. Во-первых, поскольку PC-ABS гигроскопичен, рекомендуется выпаривать его перед печатью. Во-вторых, требуется высокая температура печати (не менее 260°C). В-третьих, он имеет тенденцию к деформации, поэтому также необходима высокая температура печатного стола (по крайней мере, 100°C, может достигать 140°C).

PC/ABS-материалы отличаются следующими характеристиками:

- высокой стойкостью к ударным нагрузкам;
- оптимальной прочностью при растяжении и изгибе;
- климатической и химической устойчивостью;
- низким водопоглощением;
- сплав ПК/АБС – совмещает лучшие качества АБС-пластика и поликарбоната, чрезвычайно прост при переработке;
- сбалансированное соотношение ингредиентов позволяет материалу сочетать твердость и упругость.

Применение сплав поликарбоната и АБС-пластика:

- при оформлении интерьера и экстерьера транспортных средств (бампер, спойлер, радиатор, колпаки колес, воздухозаборник, облицовка дверей, панель управления, компоненты аккумулятора).
- в корпусах мобильных телефонов и бытовых приборов.
- при изготовлении станков и оборудования разного назначения.
- в деталях светотехники.
- в компьютерной промышленности и оптической индустрии.
- в производстве электроинструмента, спортивного инвентаря, медицинских товаров.

Акрилонитрил стирол акрилат (ASA, АСА) – одна из достойных альтернатив ABS пластику, идеально подходит для эксплуатации в условиях окружающей среды. В связи с этим основные сферы его использования – автомобилестроение, элементы ландшафтного дизайна, технические изделия для наружного применения, рекламы.

Кроме высоких твердости, жесткости и относительной простоты 3D-печати, ASA обладает хорошей химической стойкостью, тем-

пературостойкостью и, что самое важное, формо- и цветоустойчивостью под воздействием различных факторов окружающей среды. Изделия из ABS пластика имеют тенденцию к желтению со временем, особенно при эксплуатации в уличных условиях. В случае с ASA – подобные проблемы отсутствуют. Так что скворечники и садовые гномы будут выглядеть одинаково привлекательно и через полгода или год использования.

Еще одно небольшое преимущество ASA относительно ABS – меньшая усадка во время 3D-печати. Но все равно будьте аккуратны с режимами охлаждения – ASA может становиться хрупким после 3D-печати при слишком сильном охлаждении.

Пластик ASA находит свое широкое применение при изготовлении деталей в автомобилестроительной индустрии. Это оформление элементов интерьеров автомобилей, изготовление решеток для радиаторов, а также из этого пластика изготавливаются корпуса кондиционерного оборудования, дорожные указатели, пластиковые детали для производства мотоциклов и другие изделия. Особую популярность пластик ASA завоевал как исходный материал при производстве ламповых плафонов и изделий светотехники, особенно в группе, актуальных сегодня, антивандальных изделий, так как этот вид пластика отличается повышенной ударопрочностью.

К достоинствам пластика ASA относятся его влагонепроницаемые и водоотталкивающие свойства. Также этот пластик не поддается воздействию разбавленных кислот, минеральных, смазочных масел, ASA не изменяет своих свойств при контактах с горюче-смазочными материалами. Изделия изготовлены с пластика ASA способны сохранять свою форму и не разрушатся при значительных ударных нагрузках. При использовании на открытом воздухе полимерные изделия с ASA не желтеют и не отличаются хрупкостью, не коробятся при повышенных температурах, легко поддаются окрашиванию.

Применение ASA:

- наружные детали автомобиля, решетки радиаторов, корпус зеркала заднего вида, детали сельскохозяйственных машин, детали морских и речных судов;
- корпусные детали бытовой техники, корпуса телефонов, мобильных телефонов. корпусные детали кухонного оборудования (аппаратов для варки кофе, микроволновых печей, сырорезок и др.), корпуса электрических зубных щеток, решетки воздушных кондиционеров, корпусные детали вентиляторов;

- светотехника, плафоны ламп, датчики для применения вне помещения, наружные выключатели, выключатели для ванных комнат, корпусные детали электрооборудования для эксплуатации вне помещения;
- детали корпуса спутниковой антенны, садово-парковое оборудование, разбрызгиватели для полива, тележки, оборудование для пляжей, бассейнов;
- дорожные указатели, сигнальные огни, детали наружной рекламы, детали кресел, почтовые ящики, ящики для огнетушителей;
- аксессуары для гольфа, рекреационное оборудование, оборудование для ванных комнат, игрушки, модели машин и судов, спортивные товары, доски для серфинга.

Особенности 3D-печати ASA. Рекомендаций по 3D-печати ASA вы можете найти много различных вариантов. Но в этом разделе представлены результаты тестирования режимов 3D-печати ASA от MonoFilament.

Первое, что хотелось бы отметить, это то, что для 3D-печати ASA, как и ABS предпочтительно использовать 3D-печати с закрытой камерой, чтобы предотвратить растрескивание и усадку деталей при охлаждении. Температурные режимы экструдера (в нашем случае) оптимальные были от 250 до 255°C, на выбор температуры так же влияет скорость печати, чем выше скорость тем выше необходима температура. Если вы хотите получить хорошее качество печати и высокую адгезию между слоями, то печатать ASA нужно на низких скоростях 30...40 мм/с. Но не забывайте, что это только рекомендации, и все зависит от требований, предъявляемых к вашему изделию. Это связано с тем, что ASA при быстром охлаждении склонен к деламинации. Хотелось бы отметить, что для ASA температура экструдера может колебаться в диапазоне от 245 до 265°C в зависимости от расхождения точности показаний температуры на разных сборках 3D-принтеров. Температура платформы 115...125°C. При температуре платформы ниже 110 °C наблюдалась межслойная деламинация даже в закрытом принтере.

Несмотря на использование термоковрика для 3D-печати Bluepad от компании FLASHFORGE, присутствует отлипание модели от стола. Чтобы полностью защитить деталь от коробления мы сделали рафт с АБС+, что помогло избавиться от этой проблемы, а для печати на чистое стекло – лучше дополнительно использовать раствор ABS в ацетоне или другие адгезивы.

Если ваша модель требует использования поддержек и рафта, то при печати ASA отделить их будет очень сложно. Лучше всего в этом случае для поддержек использовать растворимые поддержки с HIPS пластика.

При печати маленького бокса (6x4x2см) с крышкой (это была одна модель) наблюдалась небольшая усадка около 0,8...1%, примерно, как и у ABS пластика.

Для получения изделия с высокими физико-механическими характеристиками и высокой межслойной адгезией стоит использовать высокие температуры 3D-печати – более 250 °С экструдера и 115...150°С платформы с низкой скоростью печати – 30...40мм/сек.

Напечатанные изделия очень хорошо шлифуются и обрабатываются парами ацетона или этилацетата (рис. 10.11).



Рис. 10.11. Внешний вид изделия из ASA пластика после окончательной обработки

Недостатком ASA пластика, по большому счету, можно считать присутствие запаха стирола при 3D-печати, и необходимым есть использование помещений с хорошей вентиляцией.

Carbon Fiber (угленасыщенный пластик) – это первая специальная разработка от европейской компании ColorFabb, предназначенная для изготовления деталей высокой жесткости. 3D пластик Carbon Fiber XT-CF20 представляет собой объединение углеродного волокна (20%) и композитного материала на основе сложного сополиэфира (PLA, ABS, PETG или нейлон). Такое сочетание обеспечивает высокую прочность, небольшой вес и приятную матовую поверхность печатных изделий. 3D пластик Carbon Fiber XT-CF20 обладает высокой ударной вязкостью и высокой прочностью расплава. За счет этих характеристик материал идеально подходит для применения в изготовлении функциональных моделей и прототипов, а также в создании готовых изделий. 3D пластик Carbon Fiber XT-CF20 от ColorFabb подходит для применения практически во всех моделях 3D-

принтеров, среди которых такие устройства, как Ultimaker, Makerbot, Leapfrog Creator, CreatBot, Prusa и т.д.

Представленный материал имеет ряд неоспоримых преимуществ. В частности, 3D пластик Carbon Fiber XT-CF20 отличается:

- чрезвычайно высоким модулем упругости на изгиб (в 2 раза превышает аналогичное значение для PLA пластика);
- умеренным удлинением на разрыв;
- прочностью;
- высокой температурой стеклования;
- очень высоким значением прочности расплава;
- высокой вязкостью расплава;
- хорошей размерной точностью и стабильностью;
- практически полным отсутствием запаха;
- легкостью в постобработке;
- приятной матовой поверхностью создаваемых изделий (рис. 10.12).

В табл. 10.4 приведены различные характеристики и параметры печати пластиком Carbon Fiber XT-CF20.

ColorFabb XT Clear является отличной альтернативой PLA пластику. XT пластик можно использовать даже на 3D-принтерах без подогрева стола. Основным компонентом ColorFabb XT Clear является знакомый многим пластик PETG, которой характеризуется огромной долговечностью и высокой температурой плавления.



Рис. 10.12. Внешний вид модели, напечатанной из углеродсодержащего пластика Carbon Fiber XT-CF20

Материал обладает определенной эластичностью, зависящей от толщины. Если напечатанную деталь гнуть, но не ломать, то она вер-

нется к прежней форме. Поверхность моделей выходит несколько глянцевой, что может быть весьма привлекательно в ряде случаев.

Таблица 10.4

Свойства пластика Carbon Fiber XT-CF20

Удельная плотность	1,35 гр/см ³
Литейная усадка	0,2 – 0,4%
Температура тепловой деформации (1,81 МПа)	65 °С
Поверхностное сопротивление	10 ⁹ Ом
Максимально допустимое содержание влаги	0,02%
Температура плавления	235 – 255 °С
Температура литья	60 – 75 °С
Предел прочности на разрыв	76 МПа
Относительное удлинение на разрыв	7,5%
Предел прочности на изгиб	110 МПа
Модуль упругости на изгиб	6,2 ГПа
Ударная вязкость по Изоду, с надрезом	6 кДж/м ²
Ударная вязкость по Изоду, без надреза	60 кДж/м ²
Температура печати	240 – 260 °С
Скорость печати	40 – 70 мм/с
Температура рабочей платформы	60 – 70 °С

Особенности ColorFabb XT Clear:

- прозрачный;
- прочный;
- немного гибкий (не рвется);
- имеет термоусадку сравнимую с PLA;
- можно использовать на принтерах без подогрева платформы;
- высокотемпературный (не боится бытового повышения температуры).

PLA-CCF (Carbon Fiber) – это материал с введением в PLA пластик 10% углеродных волокон для улучшения механических свойств изделий. Изделия, полученные из этого материала более жесткие, обеспечивают отличную структурную прочность и адгезию между слоями при очень низкой деформационной усадке. PLA-CCF жесткий и легкий по сравнению с обычным PLA, но он более хрупкий.

Этот материал не более прочный, а более жесткий, что означает увеличение структурной опоры конструкции, делая ее менее гибкой. Такие свойства материала делают его идеальным для создания таких изделий как корпуса дронов или радиоуправляемых машин, рам, кожухов, инструментов и других изделий которые не должны прогибаться.

PLA CCF (Carbon Fiber) оптимизирован для 3D-печати, углеродные волокна достаточно короткие, чтобы не забивать сопло экструдера принтера, но в то же время достаточно длинные, чтобы обеспечить жесткость изделий. Этот материал является достаточно абразивным, поэтому при длительном использовании может привести к износу сопла экструдера.

Тема 10.3. Анизотропия материалов аддитивного синтеза. Особенности металлических порошков для 3D-печати

Одно из самых важных преимуществ технологии 3D-печати металлами – возможность создавать изделие из практически любого сплава. Помимо стандартных металлов существует широкая номенклатура специальных сплавов – уникальных высокотехнологичных материалов, которые производятся под определенные задачи заказчика.

Наиболее прогрессивная и популярная из технологий 3D-печати металлами – селективное лазерное плавление (SLM - Selective Laser Melting). Она заключается в последовательном послойном сплавлении металлических порошков при помощи мощного излучения иттербиевого лазера.

Основные преимущества 3D-печати металлами:

- высокие показатели плотности: в 1,5 раза выше, чем при литье;
- возможность создания миниатюрных и геометрически сложных объектов и других неповторимых форм в виде закрытых бионических структур (рисунок 10.13);
- широкий выбор металлических сплавов, как стандартных, так и специальных;
- сокращение циклов производства и ускорение выхода готовой продукции.



Рис. 10.13. Примеры закрытой бионической структуры, созданные при помощи 3D-печати

Сферы применения:

- авиакосмическая индустрия;
- машиностроение;
- автомобилестроение;
- нефтегазовая отрасль;
- электроника;
- медицина;
- пищевая промышленность;
- исследования и экспериментальные работы в конструкторских бюро, научных и учебных центрах.

Особенности металлических порошков:

1. Металл для аддитивных установок выпускается в виде мелкодисперсных сферических гранул с величиной зерна от 4 до 80 микрон. Этот показатель определяет толщину объекта, который будет выращен в аддитивной установке. При создании порошка задается величина и состав зерна, так как необходимо соблюсти определенное процентное соотношение крупных и мелких зерен. Таким образом, определяется текучесть металла, проверяемая с помощью прибора Холла (воронки с калиброванным отверстием). Если у зерна будет слишком мелкая фракция, металл не будет течь через воронку и, соответственно, плохо подаваться на стол построения, а это напрямую влияет на равномерность получаемых слоев и качество выращиваемого изделия.

2. У каждой компании, производящей данный тип 3D-принтеров, свои требования к текучести в зависимости от принципа нанесения материала на платформу построения. В аддитивных уста-

новках SLM Solutions (технология SLM) металл на рабочий стол подается и сверху, из фидера (камеры с материалом), и переносится рекоутером. В этом случае текучесть очень важна для того, чтобы порошок поступал из фидера в рекоутер и слои наносились должным образом. Компания 3D Systems (технология DMP) использует немного другой принцип действия: емкость с порошком слегка приподнимается, при помощи валика он переносится на стол построения, затем емкость опускается. Благодаря такой конструкции показатели текучести не критичны (см. схемы построения изделий на рисунке 2).

3. Разным металлам требуется разная термообработка, и иногда для этого используются специально подогреваемые платформы. В процессе построения, при плавлении металла, вырабатывается большое количество тепла, которое нужно отводить. Роль радиаторов, отводящих тепло, выполняют поддержки, применяемые при построении изделий. В некоторых случаях сама деталь без поддержек приваривается к рабочему столу, как к радиатору.

4. Структура металлических изделий, полученных аддитивным способом, зависит как от технологии построения, так и от настроек оборудования. Ведущие производители добились плотности металла порядка 99,9% от теоретической. Наряду с селективным лазерным плавлением существуют и менее эффективные, уже устаревшие технологии, сходные с методом SLS, которые обеспечивают меньшую плотность.

5. Внутренняя структура металла – мелкозернистая. Если в дальнейшем мы собираемся уплотнить деталь, то есть воздействовать на нее физически, надо учитывать, что маленькое зерно сжать гораздо сложнее, чем большое. Но при этом мы очень близко подходим к прокатному металлу – т.е. к металлу, который уже уплотнили. Плотность изделий, напечатанных на 3D-принтере, на 10-15% ниже, чем при прокате, но примерно на 50% выше, чем у литейных металлов.

Виды металлических порошков, применяемых в аддитивном производстве

Современные аддитивные технологии предполагают использование около двадцати протестированных и готовых к эксплуатации материалов, в их числе – инструментальные, нержавеющей, жаропрочные сплавы, алюминиевые и титановые сплавы, медицинские кобальт-хром и титан.

Поскольку металлов очень много, и каждый из них обладает определенными свойствами, один металл можно заменить другим исходя из технологических задач. К примеру, если в технологической цепочке необходимо задействовать титановый сплав, то технолог сможет выбрать один из множества титановых сплавов с теми свойствами, которые нужны для производства конкретного изделия.

- Нержавеющие сплавы: 17-4PH (09X17H7Ю1), AISI 410 (12X13), AISI 304L (03X18H11), AISI 316L (03X17H14M3), AISI 904L (06XH28МДТ)

В эту категорию входят сложнолегированные стали с содержанием хрома (не менее 12%). Оксид хрома образует на поверхности металла коррозионностойкую пленку, которая может разрушаться под воздействием механических повреждений или химических сред, но восстанавливается в результате реакции с кислородом. Нержавеющие сплавы применяются при производстве клапанов гидравлических прессов, арматуры крекинг-установок, пружин, сварной аппаратуры, работающей в агрессивных средах, и изделий, используемых при высоких температурах (+550...800°C).

- Инструментальные сплавы: 1.2343 (4X5МФС), 1.2367 (4X5МЗФ), 1.2714 (5ХНВ)

Основное предназначение инструментальных сплавов – изготовление различных видов инструментов (режущих, измерительных, штамповых и др.), вкладок в пресс-формы при горячем деформировании конструкционных сталей и цветных сплавов на крупносерийном производстве, пресс-форм для литья под давлением сплавов алюминия, цинка и магния. Эти сплавы обладают повышенной твердостью, износостойкостью, вязкостью, теплопроводностью и прокаливаемостью.

- Никелевые сплавы: Inconel 625 (ХН75МБТЮ), Inconel 718 (ХН45МВТЮБР)

Никель обладает способностью растворять в себе многие другие металлы, сохраняя при этом пластичность, поэтому существует множество никелевых сплавов. Например, в соединении с хромом они широко применяются в авиационных двигателях, из них изготавливают рабочие и сопловые лопатки, диски ротора турбин, детали камеры сгорания и т.п. Наиболее жаропрочными являются литейные сложнолегированные сплавы на никелевой основе, которые выдерживают температуры до +1100°C в течение сотен и тысяч часов при высоких статических и динамических нагрузках.

•Кобальт-хром: CoCr (Biosil F)

CoCr представляет собой высококачественный кобальт-хромовый сплав для модельного литья, соответствующий современным техническим требованиям. Благодаря отличным механическим свойствам он хорошо подходит для изготовления корпусов сложной геометрии в электронике, пищевом производстве, авиа-, ракето- и машиностроении, а также кламмерных протезов.

•Медные сплавы: CuSn6 (БрОФ6,5-0,15)

CuSn6 – сплав из меди и 6% олова, который обладает высокими теплопроводящими свойствами и коррозионной стойкостью и идеален для создания уникальных систем охлаждения.

•Алюминиевые сплавы: AlSi12 (АК12ММгН)

Это наиболее дешевые из литейных сплавов. К их преимуществам относятся высокая коррозионная стойкость, жидкотекучесть, электро- и теплопроводность. В промышленности используются, как правило, для изготовления крупногабаритных тонкостенных отливок сложной формы.

•Титановые сплавы: Ti6Al4V (BT6), Ti6Al7Nb

Ti6Al4V – наиболее распространенный сплав титана с превосходными механическими свойствами. Считается самым прочным и жестким титановым сплавом, отличается особо высокой сложностью обработки. Имеет плотность 4500 кг/м³ и прочность на разрыв более 900 МПа. Сплав Ti6Al4V предоставляет неоспоримые преимущества в плане снижения веса изделий в таких отраслях, как аэрокосмическая промышленность, автомобилестроение и судостроение. Эти металлы применяются, в частности, при изготовлении вкладок в пресс-формы, турбинных лопаток, камер сгорания, а также изделий, предназначенных для работы при высоких температурах (до +1100°С).

Помимо указанных сплавов находят применение и другие металлические порошковые сплавы. Их композиции и области применения приведены в таблице 10.5.

Таблица 10.5

Области применения порошковых материалов

Компоненты порошка	Применение
Al-Ni-Co, Fe-Nd-B	Производство магнитов, магниты
Al-Si-Mg	Сплавы с термостабильной структурой
Al-Sn-Cu	Подшипники скольжения
Al-переходные лантаноиды	Сплавы с повышенной термопрочностью

Bi-Te, теллурид висмута	Устройства, использующие эффект Пельтье
Cr-Al	Защитные покрытия
Co-Cr	Сплавы для зубопротезирования
Cu-Ba, Cu-Y	Суперпроводники
Cu-Cr-Zr	Электропроводники без бериллия
Cu-In-GaSelenide	Фотогальванические материалы
Cu-Mn-Ni, Cu-Ti-Sn	Режущий инструмент
Au-Pt-Pd-Ag-In, Ni-Ti-Si-B, Ag-Cd-Zn-Cu	Сплавы для пайки
Au-Ag-Cu	Тонкопленочные покрытия
Fe-14%Cr-0,4%C	Специальный инструмент и оснастка
Fe-Mn	Износостойкие опоры прокатных станов
Fe-6%Si	Сердечники трансформаторов
Fe-Si-Al	Магнитные компоненты
Сплавы Mg	Металлические матрицы
Ni-алюмиды	Структурные компоненты и покрытия
Ni-Ce	Катализаторы
Ni-Cr-Fe-Si-B	Порошки для плазменного напыления
Ni-Cr-Mo-B	Антикоррозионные покрытия
Ni-лантаноиды	Топливные элементы
Нержавеющая сталь 304/316	MIM-технология
Сталь T42	Инструментальная оснастка
Tb-Fe	Оптико-электронные устройства

ЛИТЕРАТУРА

1. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования : учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 336 с.
2. САПР в автомобиле- и тракторостроении : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Ю. В. Дементьев, Ю. С. Щетинин ; под общ. ред. В. М. Шарипова. – М. : Академия, 2004. – 224 с.
3. Князева, М. Д. Алгоритмика: от алгоритма к программе: учеб. пособие / М. Д. Князева. – М. : Кудиц-образ, 2006. – 191 с.
4. Основные термины и определения в области автоматического проектирования : ГОСТ 22487–77.
5. Гельмерих, Р. Введение в автоматизированное проектирование / Р. Гельмерих, П. Швиндт ; пер. с нем. Г. М. Родова, Я. Е. Львовича ; под ред. В. Н. Фролова. – М. : Машиностроение, 1990. – 296 с.
6. Заикина, В. И. Основы автоматизированного проектирования в машиностроении: практикум : учеб. пособие / В. И. Заикина. – Минск : Выш. шк., 2008. – 247 с.
7. Болдин, А. Н. Основы автоматизированного проектирования: учебное пособие / А. Н. Болдин, А. Н. Задиранов. – М. : МГИУ, 2009. – 103 с.
8. Сиденко, Л. А. Компьютерная графика и геометрическое моделирование : учеб. пособие / Л. А. Сиденко. – СПб. : Питер, 2009. – 220 с.
9. Акулов, О. А. Информатика: базовый курс / О. А. Акулов, Н. В. Медведьев. – М. : Омега-Л, 2006.
10. Информатика : учебник ; под ред. Н. В. Макаровой. – М. : Финансы и статистика, 2000.
11. Попов, В. Б. Основы компьютерных технологий / В. Б. Попов. – М. : Финансыстатистика, 2002.
12. Журнал «САПР и графика».
13. Журнал «Компьютерные инструменты в образовании».
14. Расходные материалы для моделирования методом послойного наплавления (FDM/FFF). – Режим доступа: https://3dtoday.ru/wiki/FDM_materials/. – Дата доступа: 20.06.2019.
15. Пластик для 3D печати поддержки HIPS. – Режим доступа: <http://250041.ua.all.biz/plastik-dlya-3d-pechati-podderzhki-hips-g8707738>. – Дата доступа: 20.06.2019.

16. Этапы 3D-печати. Цифровая модель с поддерживающими конструкциями. – Режим доступа:<http://www.orgprint.com/wiki/3d-print/Jetaru-3D-print>. – Дата доступа: 20.06.2019.

17. Технологии лазерного аддитивного производства металлических изделий. – Режим доступа: <http://geektimes.ru/post/218271/>. – Дата доступа: 20.06.2019.

18. Выборочное лазерное спекание. – Режим доступа: http://3dtoday.ru/wiki/SLS_print/. – Дата доступа: 20.06.2019.

Список используемых сокращений

- CAD – Computer Aided Design
CAE – Computer Aided Engineering
CAM – Computer Aided Manufacturing
DMU – Digital Mock Up
ERP – Enterprise Resource Planning
FEA – Finite Element Analysis
PDM – Product Data Management
PLM – Product Lifecycle Management
UML – Unified Modeling Language
ЕИП – Единое информационное пространство
ЕСКД – Единая система конструкторской документации
ЕСТД – Единая система технологической документации
ЖЦИ – Жизненный цикл изделия
ИПИ – Информационная поддержка процессов жизненного цикла изделий
ИЭТР – Интерактивное электронное техническое руководство
КД – Конструкторская документация
КП – Конструкторское проектирование
КПр – Конструкторский проект
КТПП – Конструкторско-технологическая подготовка производства
НСО – Нестандартное оборудование
ОЗ – Операционная заготовка
ОТП – Операционный технологический процесс
САПР – Система автоматизированного проектирования
СТО – Средства технологического оснащения
ТД – Технологическая документация
ТП – Технологический процесс
ТПП – Технологическая подготовка производства
УП – Управляющая программа для станка с ЧПУ
ФИ – формообразующий инструмент
ФО – формообразующая оснастка
ЧПУ – Числовое программное управление

СОДЕРЖАНИЕ

Цель и задачи дисциплины.....	3
Раздел 1. Компьютерное моделирование и инженерный анализ.	
Актуальность и перспективы	5
Тема 1.1. Предмет и задачи дисциплины. Основные программные комплексы САПР. Идеология моделирования и производства сопутствующей документации.....	5
Тема 1.2 Культура моделирования и проектирования изделий	14
Тема 1.3 Настройка САПР. Интерфейс пользователя. Управление файлами.....	23
Раздел 2. Базовые инструменты моделирования твердых тел.....	40
Тема 2.1. Моделирование. Основные принципы разработки 3D-моделей	40
Тема 2.2. Создание элементов опорной геометрии.....	54
Тема 2.3. Создание геометрии эскиза.....	74
Раздел 3. Операции построения твердых тел. Трехмерное моделирование (3D)	102
Тема 3.1. Принципы создания объемных тел. Классификация объектов моделирования	103
Тема 3.2. Базовые операции трехмерного моделирования	111
Тема 3.3. Вспомогательные операции трехмерного моделирования, редактирование геометрии объемных тел.....	123
Тема 3.4. Операции копирования твердых элементов	134
Раздел 4. Моделирование кривых и поверхностей.....	139
Тема 4.1. Моделирование кривых.....	139
Тема 4.2. Моделирование, анализ и области применения поверхностей.....	143
Раздел 5. Моделирование сборок. Сборочные единицы (3D)	153
Тема 5.1. Основные инструменты ориентации, закрепления и соединения компонентов в сборке.....	153
Тема 5.2. Создание видов разнесенной сборки.....	175
Раздел 6. Параметризация и управление конструкторско-инженерным замыслом	185
Тема 6.1. Параметризация элементов модели и уравнения	185
Тема 6.2. Создание и управление слоями.....	193
Тема 6.3. Отношения «родитель-потомок» между элементами, порядок построения модели. Управление конструкторским замыслом	198

Раздел 7. Основы автоматизации проектирования изделий и конструкций деталей в CREO	208
Тема 7.1. Создание таблиц семейств и элементов пользователя	208
Тема 7.2. Выполнение чертежей деталей и сборок на основе их трехмерных моделей в автоматизированном режиме	217
Тема 7.3. Оформление конструкторской документации (КД).....	221
Раздел 8. Технологии трехмерного синтеза и оцифровки	232
Тема 8.1. 3D-печать. Подготовка модели изделия к печати	239
Тема 8.2. Сканирование и оцифровка натурального объекта	252
Раздел 9. Моделирование средств технологического оснащения.....	256
Тема 9.1. Классификация элементов и основных систем технологической оснастки.....	256
Тема 9.2. Создание параметрических пакетов узлов оборудования	271
Раздел 10. Моделирование основных технологических процессов и явлений при аддитивном синтезе	281
Тема 10.1. Процесс течения пластика при 3D-печати.....	281
Тема 10.2. Термоусадочные явления в области печати	310
Тема 10.3. Анизотропия материалов аддитивного синтеза	330
Литература	336

Грудина Наталия Владимировна

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ**

Пособие

**для студентов специальности 1-36 07 02
«Производство изделий на основе трехмерных
технологий» дневной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 28.07.22.

Рег. № 68Е.
<http://www.gstu.by>