

Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет



СОВРЕМЕННЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Методические указания
к практическим занятиям
для студентов специальности 8.07010601
"Автомобили и автомобильное хозяйство"
дневной и заочной формы обучения

Севастополь
2014

Современные компьютерные технологии. Методические указания к практическим занятиям / Разраб. А.А. Ветрогон. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2014. – 36 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам при выполнении практических занятий по курсу "Современные компьютерные технологии". Излагаются основные теоретические сведения, порядок выполнения и требования к оформлению отчетов.

Методические указания предназначены для студентов специальности 8.07010601 "Автомобили и автомобильное хозяйство" дневной и заочной формы обучения.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры Автомобильного транспорта.

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент: канд. техн. наук, доц. Балакин А.И.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Практическая работа №1. Твёрдотельное моделирование в КОМПАС-3D.....	4
2. Практическая работа №2. Поверхностное моделирование в КОМПАС-3D	8
3. Практическая работа №3. Статический расчет трехмерной детали.....	13
4. Практическая работа №4. Динамический анализ с явным типом интегрирования на примере лонжерона.....	21
5. Практическая работа №5. Динамический анализ с неявным типом интегрирования на примере рамы автомобиля	25
6. Практическая работа №6. Моделирование задачи теплопроводности и термоупругости на примере клапана.....	30
Библиографический список.....	35
Приложение А.....	36

1. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1. ТВЕРДОТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В КОМПАС-3D

Цель работы: Изучить принципы твердотельного моделирования в КОМПАС-3D

1.1. Теоретические сведения

Новое тело в модели можно создать с помощью одной из следующих операций:

- Выдавливание. Образует тело путем перемещения сечения вдоль прямолинейной траектории на заданное расстояние.
- Вращение. Образует тело путем поворота сечения вокруг оси на заданный угол.
- По сечениям. Образует тело путем соединения нескольких сечений.
- Кинематическая. Образует тело путем перемещения сечения вдоль произвольной траектории.
- Деталь-заготовка. Вставляет в модель тело, существующее в другой модели.
- Придание толщины. Образует тело путем добавления слоя материала на указанную поверхность.
- Листовое тело. Образует особый тип тела — листовое тело.
- Сшивка поверхностей. Образует тело, ограниченное указанными поверхностями.

После создания нового тела производится «приклеивание» к нему или «вырезание» из него дополнительных объемов, т.е. добавление или удаление материала тела.

При работе с моделью может потребоваться создание копий одинаковых объектов (например, операций или компонентов сборки), которые были бы определенным образом упорядочены — например, образовывали прямоугольную сетку с заданными параметрами или были симметричны относительно плоскости.

Для создания в модели упорядоченных групп из одинаковых объектов можно воспользоваться командами построения массивов. В КОМПАС-3D имеется возможность построения массивов следующих типов:

- по сетке,
- по концентрической сетке,
- вдоль кривой,
- по точкам,
- по таблице,
- зеркальный массив,
- по образцу.

Команды построения массивов расположены в меню Операции, а кнопки для их вызова находятся на панели Массивы.

1.2. Порядок выполнения работы

Для создания основания модели создаем в плоскости ZX Эскиз (рисунок 1.1). Затем создаем операцию вращения .

Создаем для ребер, указанных на рисунке 1.2, фаски . Длина фаски: для ребер 1 и 2 – 2 мм, для ребер 3 – 1 мм.

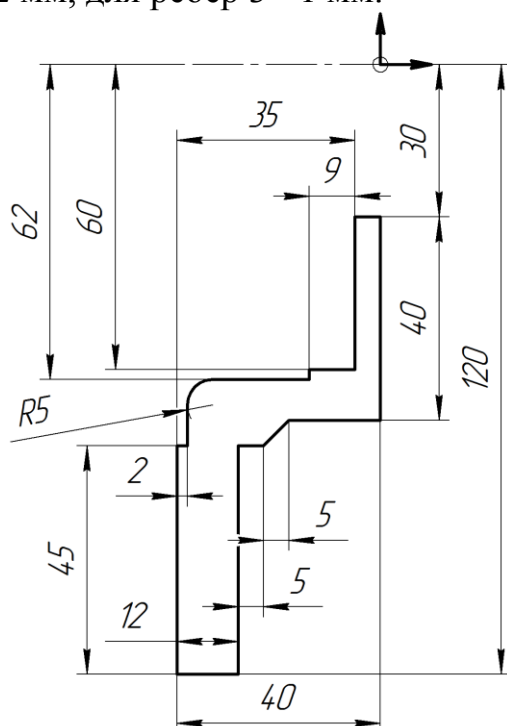


Рисунок 1.1 – Эскиз операции вращения

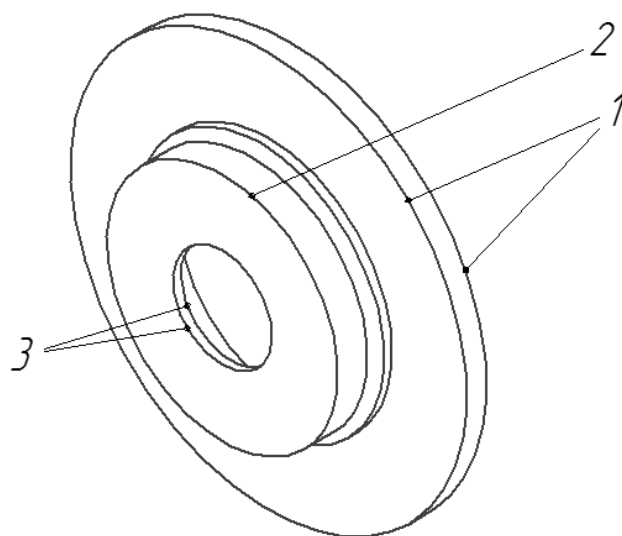


Рисунок 1.2 – Ребра для создания фасок

Создаем отверстие под колесный болт с помощью операции «Вырезать элемент выдавливанием» . Эскиз операции показан на рисунке 1.3. Копируем созданное отверстие с помощью команды «Массив по концентрической сетке» . В качестве оси операции указать ось x. Результат операции показан на рисунке 1.4.

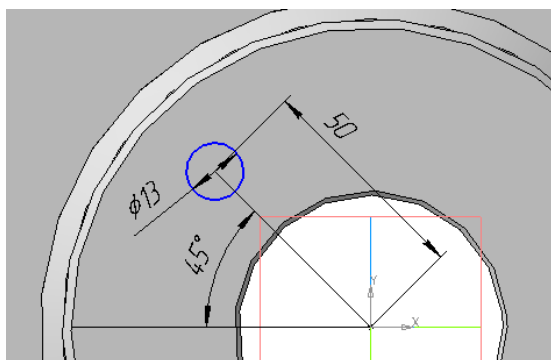


Рисунок 1.3 – Эскиз операции «Вырезать выдавливанием»

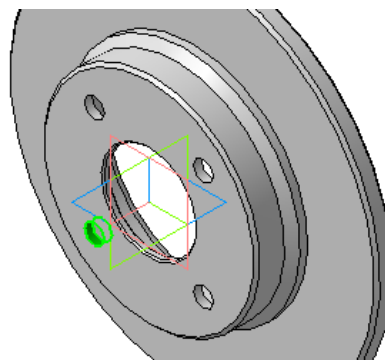


Рисунок 1.4 – Результат операции «Массив по концентрической сетке»

Аналогично создаем отверстие под болт крепления диска. Эскиз операции показан на рисунке 1.5. Второе отверстие создаем с помощью команды «Зеркальный массив» , указав в качестве плоскости симметрии плоскость ZX.

Для создания канавки воспользуемся операцией «Вырезать кинематический элемент» . Для создания этой операции необходимо 2 эскиза – эскиз траектории и эскиз сечения. Эскиз траектории, выполняемый на рабочей поверхности диска показан на рисунке 1.6.

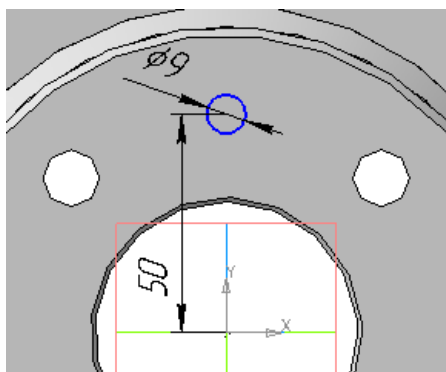


Рисунок 1.5 – Эскиз операции «Вырезать выдавливанием»

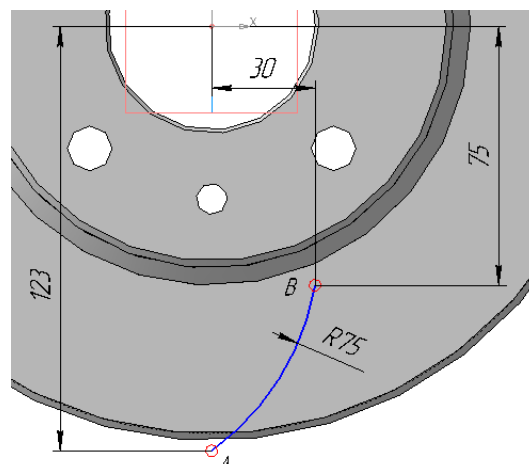


Рисунок 1.6 – Эскиз траектории для кинематической операции

Для создания эскиза сечения необходимо создать вспомогательную плоскость, проходящую через точку А (рисунок 1.6) перпендикулярно эскизу. Для этого воспользуемся командой «Плоскость через вершину перпендикулярно ребру» . Затем в созданной плоскости создаем эскиз сечения (рисунок 1.7). Результат операции «Вырезать кинематический элемент»  показан на рисунке 1.8.

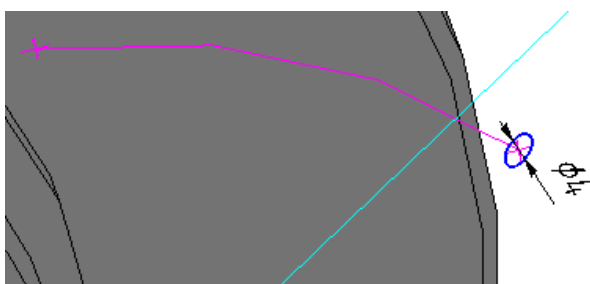


Рисунок 1.7 – Эскиз сечения для кинематической операции

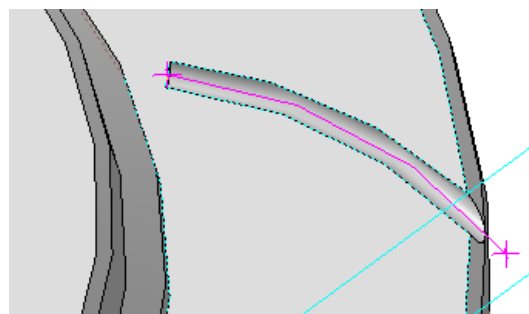


Рисунок 1.8 – Результат операции «Вырезать кинематический элемент»

Создаем эскиз для операции «Вырезать элемент вращения»  (рисунок 1.9). В качестве плоскости для эскиза выбираем торцевую поверхность канавки 1 (рисунок 1.10).

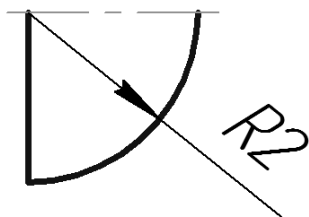


Рисунок 1.9 – Эскиз сечения для операции «Вырезать элемент вращения»

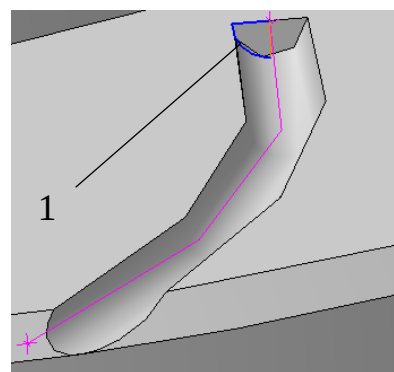


Рисунок 1.10 – Плоскость для эскиза

Результат операции «Вырезать элемент вращения» показан на рисунке 1.11. Копируем канавку с помощью команды «Массив по concentрической сетке». В качестве оси операции указать ось х. Результат операции показан на рисунке 1.12.

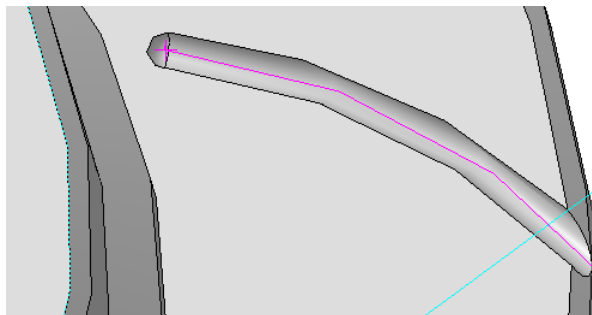


Рисунок 1.11 – Результат операции «Вырезать элемент вращения»

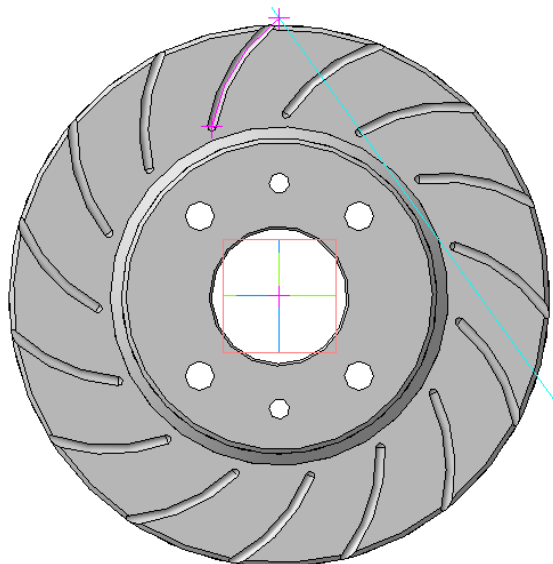


Рисунок 1.12 – Результат операции «Массив по concentрической сетке»

Для создания канавок на другой стороне диска необходимо создать вспомогательную плоскость с помощью команды «Средняя плоскость» , выбрав рабочие поверхности диска.

Затем, выбрав в дереве построения «Массив по concentрической сетке» создаем канавки на другой стороне диска с помощью команды «Зеркальный массив», указав в качестве плоскости симметрии созданную среднюю плоскость.

1.3. Содержание отчета

1. Основные теоретические сведения
2. Порядок построения модели
3. 3-D модель тормозного диска

1.4. Контрольные вопросы

1. Перечислите основные формообразующие операции в программе КОМПАС-3D.
2. Назовите требования к эскизам для основных формообразующих операций.
3. Перечислите дополнительные конструктивные элементы в программе КОМПАС-3D.
4. Назовите основные типы массивов элементов в программе КОМПАС-3D.
5. Что в КОМПАС-3D относится к вспомогательным элементам?

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2. ПОВЕРХНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В КОМПАС-3D

Цель работы: Изучить принципы поверхностного моделирования в КОМПАС-3D

2.1. Теоретическая часть

В файле модели КОМПАС-3D могут быть созданы следующие поверхности:

- выдавливания,
- вращения,
- по сечениям,
- кинематическая,
- «заплата»,
- линейчатая,
- по сети кривых,
- по сети точек,
- по пласту точек,
- эквидистантная,
- поверхность соединения.

Можно также импортировать в модель поверхности, записанные в файле формата SAT, IGES или STEP AP203.

Доступны следующие операции над поверхностями:

- усечение,
- разбиение,
- продление,
- сшивка.

Кроме того, существует возможность удаления отдельных граней поверхностей и тел.

Команды работы с поверхностями расположены в меню Операции — Поверхность. Кнопки для вызова этих команд находятся на панели Поверхности.

Помимо этого, возможно выполнение следующих действий с поверхностями:

- масштабирование;
- изменение положения;
- сохранение в файле новой детали.

Поверхности могут использоваться, например, для отсечения части модели или в качестве объекта, до которого производится выдавливание.

2.2. Порядок выполнения работы

Для создания основания модели создаем в плоскости ZX Эскиз (рисунок 2.1).

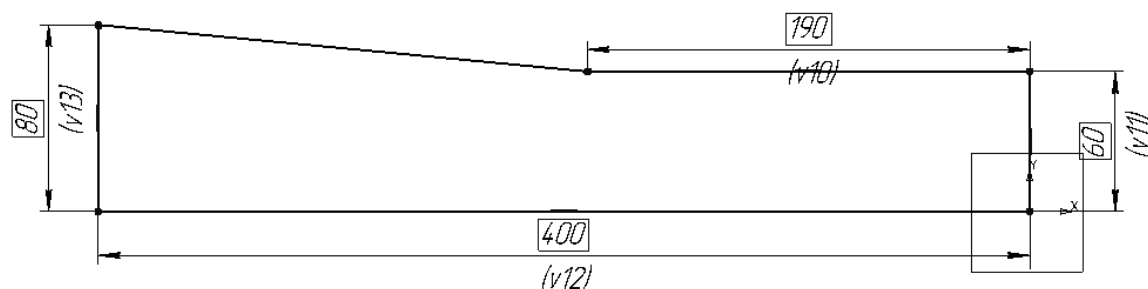


Рисунок 2.1 – Эскиз основания модели

Создаем заплатку .

Создаем эскиз для первой боковой стенки (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 - Эскиз для первой боковой стенки

Создаем поверхность выдавливания . Глубина выдавливания – 30 мм (рисунок 2.3).

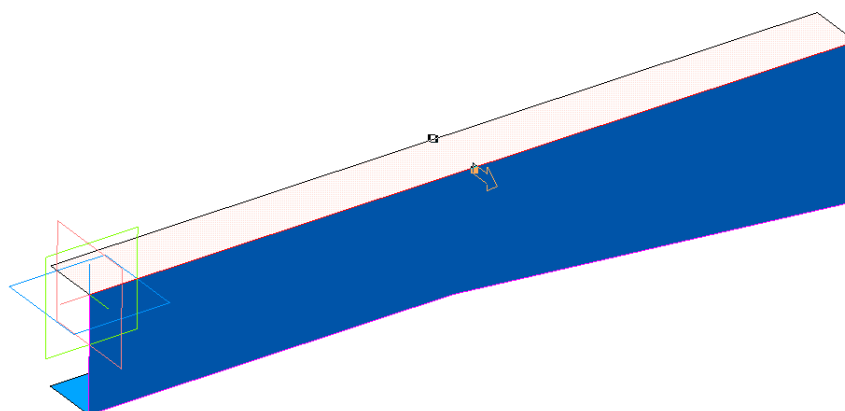


Рисунок 2.3 - Поверхность выдавливания

Создаем эскиз для второй боковой стенки.

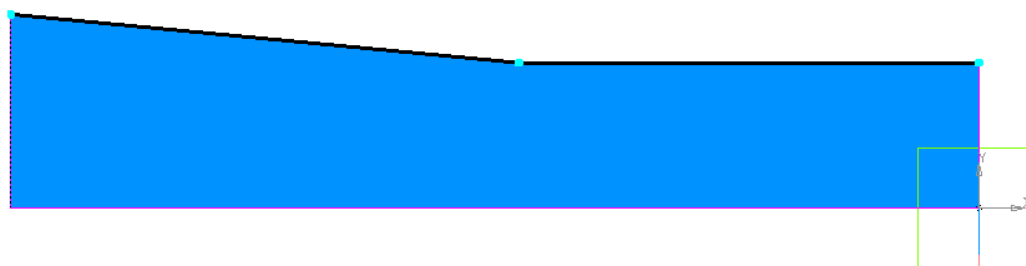


Рисунок 2.4 - Эскиз для второй боковой стенки

Создаем поверхность выдавливания . Глубина выдавливания – 30 мм.

Создаем эскиз и по этому эскизу выполняем усечение поверхности  (рисунок 2.5). Радиусы скруглений – 5 мм.

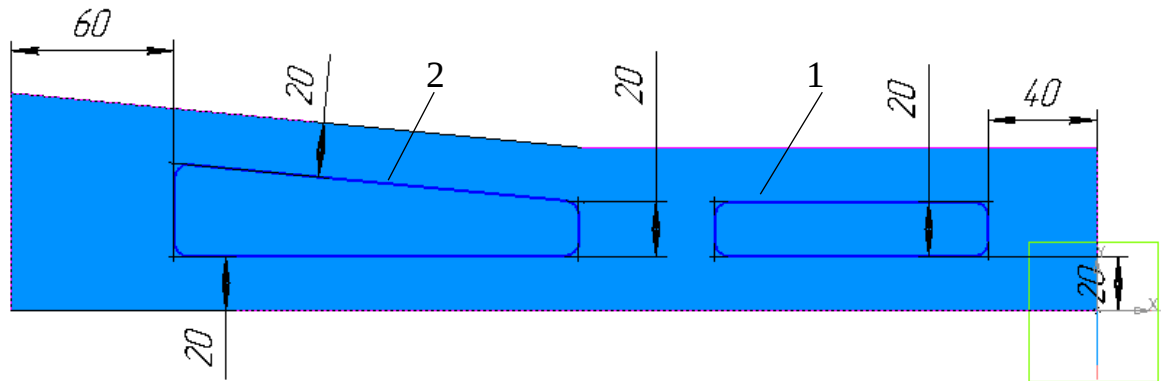


Рисунок 2.5 - Эскиз для усечения поверхности

Поочередно копируя эскизы 1 и 2 создаем поверхности выдавливания. Глубина выдавливания – 5 мм (рисунок 2.6).

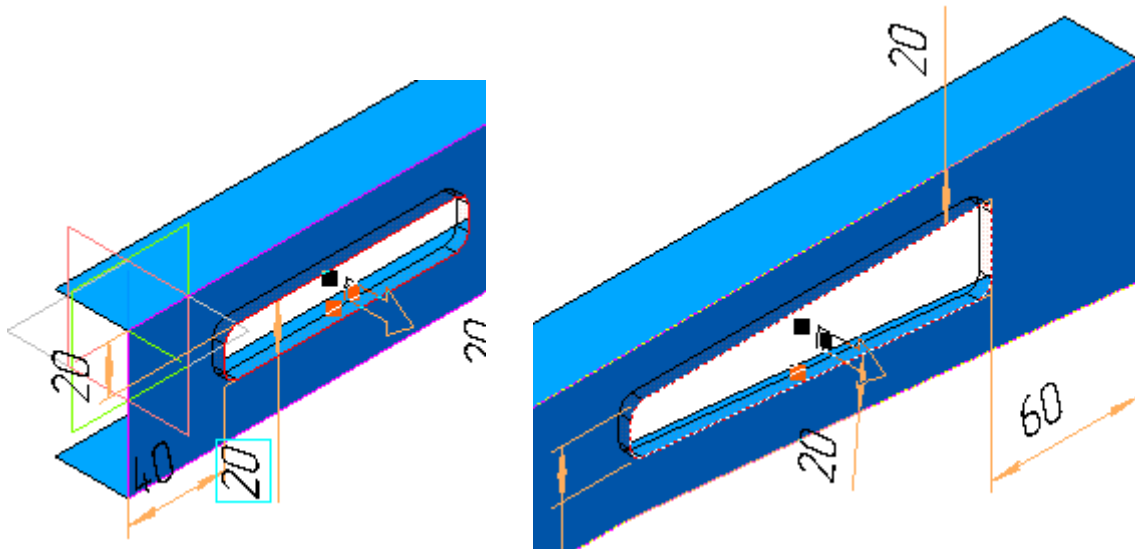


Рисунок 2.6 - Поверхности выдавливания

Создаем заплатки, выбирая ребра, образующие края отверстий (рисунок 2.7).

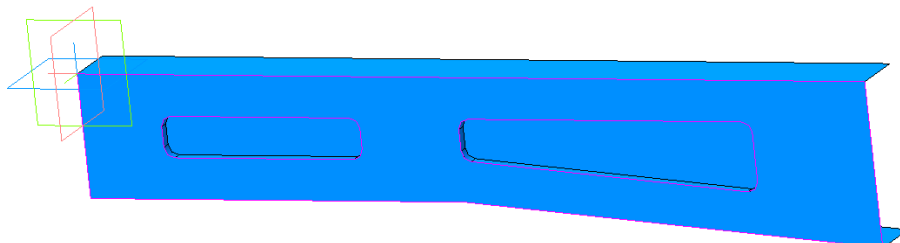


Рисунок 2.7 – Создание заплаток

Создаем вспомогательную плоскость на расстоянии 30 мм от плоскости ZX (рисунок 2.8).

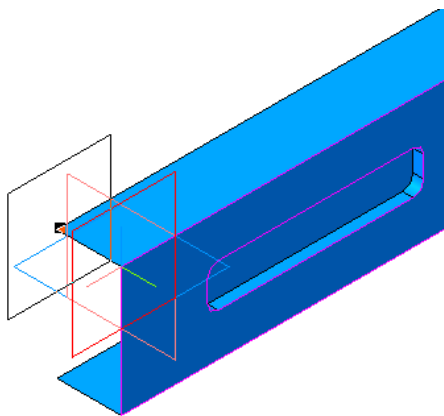


Рисунок 2.8 – Создание вспомогательной плоскости

В созданной вспомогательной плоскости выполняем эскизы и поочередно создаем заплатки (рисунок 2.9).

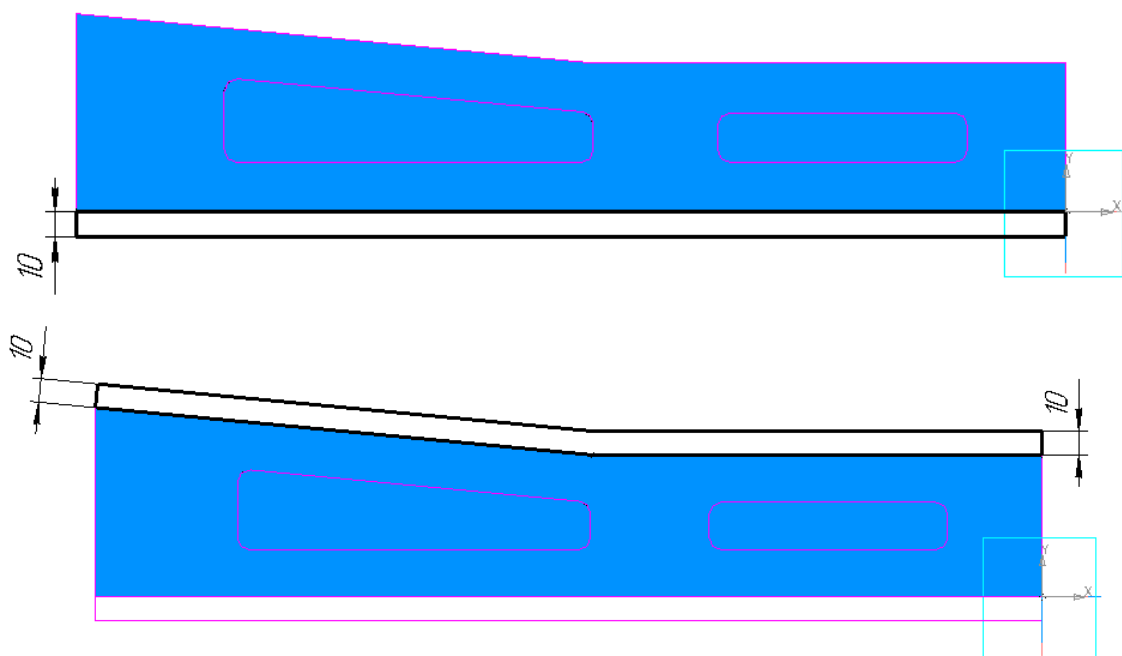


Рисунок 2.9 – Эскизы для заплаток

В плоскости ZY создаем эскиз и по нему заплатку (рисунок 2.10).

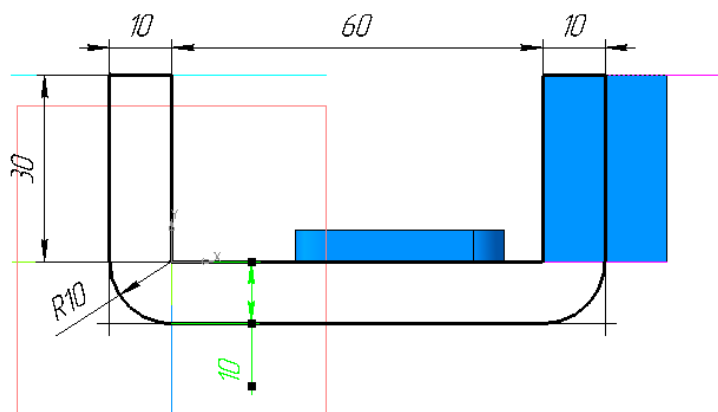


Рисунок 2.10 – Эскиз для заплатки

Сшиваем поверхности .

Создаем скругления радиусом 5 мм, как показано на рисунке 2.11.

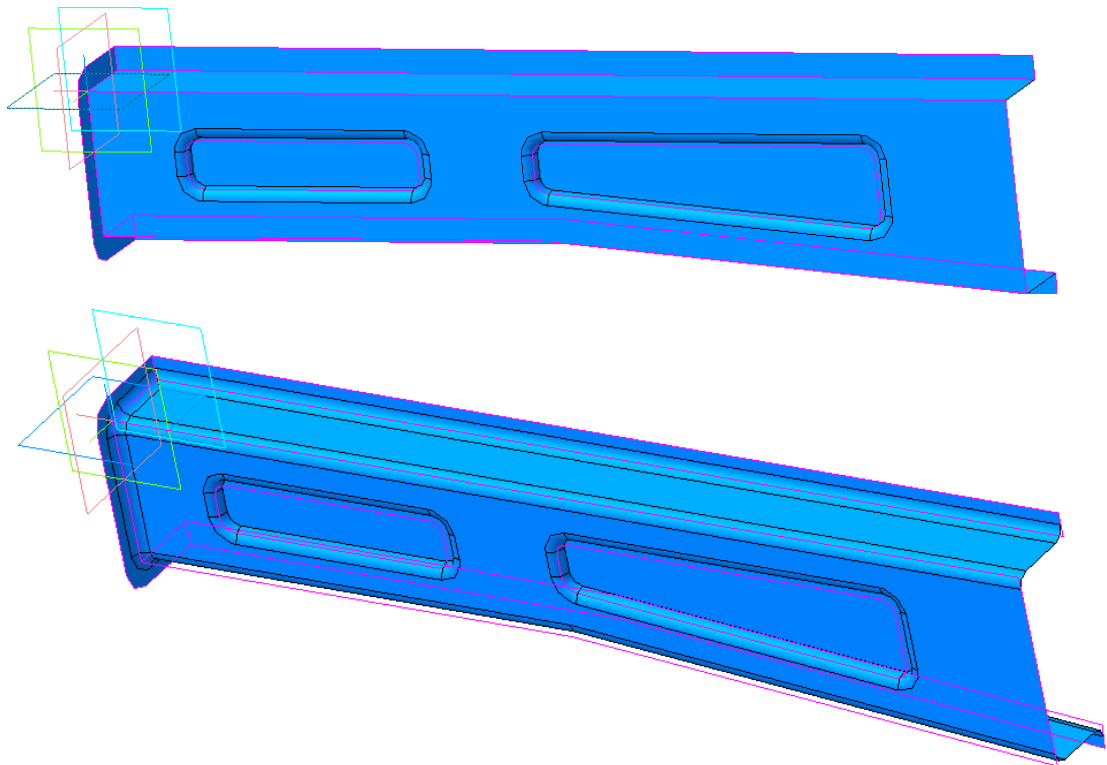


Рисунок 2.11 – Создание скруглений

2.3. Содержание отчета

1. Основные теоретические сведения
2. Порядок построения модели
3. 3-D модель лонжерона

2.4. Контрольные вопросы

1. Какие поверхности могут быть созданы в файле модели КОМПАС-3D?
2. Какие операции над поверхностями доступны?
3. Какие поверхности можно импортировать в модель?

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3. СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНОЙ ДЕТАЛИ

Цель работы: Изучить последовательность выполнения статического расчета в программе ABAQUS

3.1. Теоретическая часть

Перед началом работы в ABAQUS/CAE необходимо понимать структуру графического интерфейса пользователя. Общий вид интерфейса представлен на рисунке 3.1.

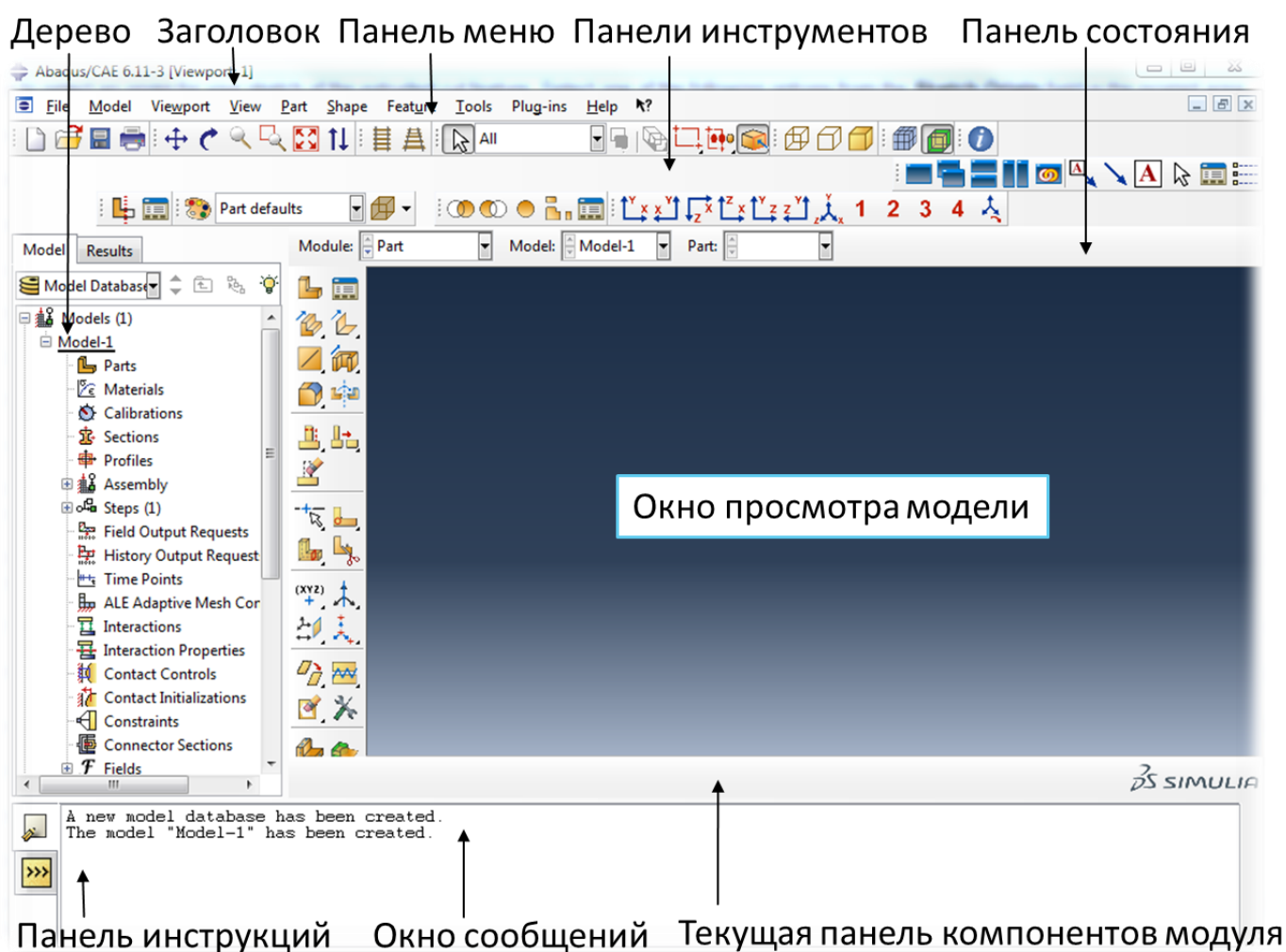


Рисунок 3.1 – Рабочее окно Abaqus

Верхняя панель – панель меню, ниже ее – панель инструментов, под ней – панель состояния. В центре – рабочее окно просмотра моделей Viewport, слева от него – текущая панель компонент модулей, под ним – панель инструкций и окно сообщений. Все это составляет графический интерфейс CAE, который изображен на рисунке 2.2. Размеры окна Viewport могут меняться, но общий вид всех панелей и их расположение неизменно.

Одной из особенностей ABAQUS является использование модулей, каждый из которых содержит некоторый набор действий, близких по значению и необходимых для построения конечно-элементной модели и дальнейших операций с ней. Это упрощает и делает более наглядной работу в ABAQUS. Для выбора модуля в левой части панели основных компонент есть ниспадающий список *Module*, показанный на рисунке 3.2.

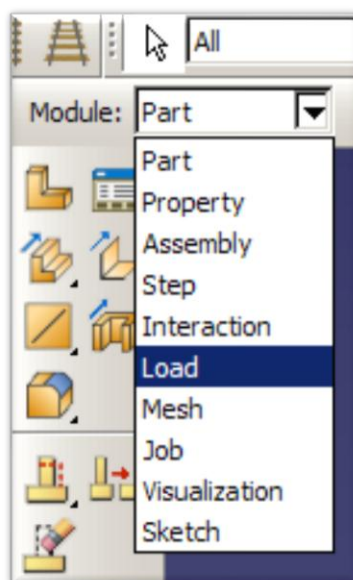


Рисунок 3.2 – Ниспадающий список *Module*

В нем представлены следующие модули:

Part – модуль, предназначенный для создания деталей, задания их геометрии, опорных точек и систем координат;

Property – модуль, предназначенный для определения материалов и сечений, применяемых в модели, а также для задания их физических характеристик;

Assembly – модуль, предназначенный для задания взаимного расположения деталей и сборки их в единую модель;

Step – модуль, предназначенный для создания шагов расчета и определения выходных данных по результатам;

Interaction – модуль, предназначенный для определения взаимодействий между деталями, контактными участками и их свойств;

Load – модуль, предназначенный для создания нагрузок, прикладываемых к модели, а также начальных и граничных условий для нее;

Mesh – модуль, предназначенный для построения сетки, фактически, в нем происходит преобразование геометрической модели в конечно-элементную;

Job – модуль, предназначенный для создания файла выходных данных, проверки построенной модели, запуска вычислительного процесса и контроля над ним;

Visualization – модуль, предназначенный для просмотра результатов расчета и обработки полученных данных;

Sketch – модуль, предназначенный для сохранения эскизов и чертежей полученной модели.

Также для работы с модулями и наглядного представления элементов модели в Abaqus/CAE используется дерево. Каждый элемент в дереве отвечает за работу с конкретным модулем и создание элемента модели. На рисунке 3.3 обозначены наиболее часто используемые элементы.

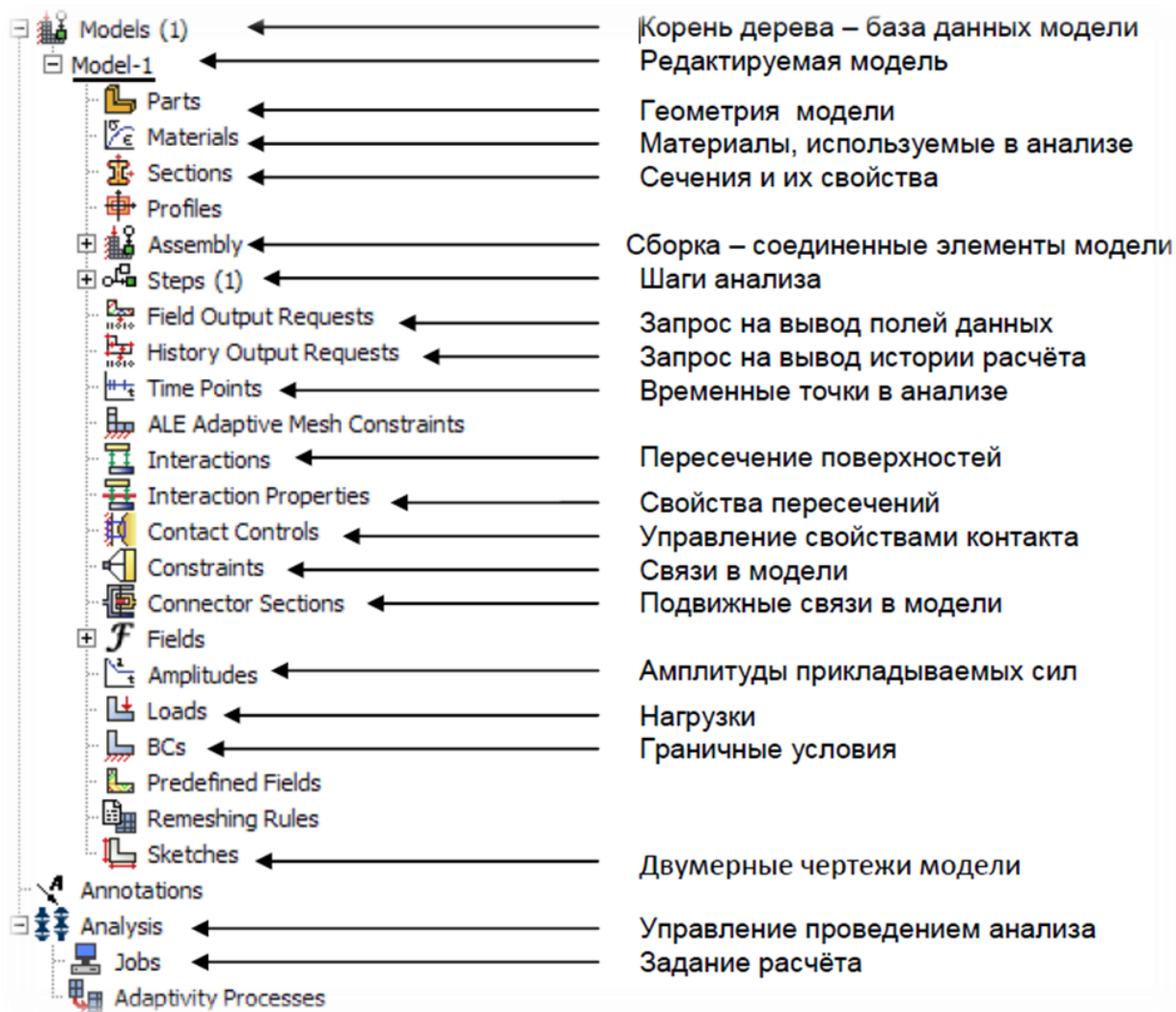


Рисунок 3.3 – Дерево модели

Перед началом построения любой модели, необходимо решить, какую систему единиц использовать. ABAQUS не имеет встроенной системы единиц. Все данные должны быть определены во взаимосвязанных единицах. Некоторые общие системы последовательных единиц приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Системы последовательных единиц

Величина	Система единиц	
	SI	SI (mm)
Длина	м	мм
Сила	Н	Н
Масса	кг	т
Время	с	с
Напряжения	Па (Н/м ²)	МПа (Н/мм ²)

Энергия	Дж	мДж
Плотность	кг/м ³	г/мм ³

3.1. Порядок выполнения работы

Выбираем систему единиц SI (mm).

Далее создаем новую базу данных модели. Для создания детали нажмите кнопку Create Part , или дважды щёлкните на значке в дереве модели. Создайте деталь, присвойте ей имя 3DBeam и в окне Create Part задайте новый тип детали, а именно – трехмерное деформируемое твердое тело, путем определения Modeling Space = 3D, Type = Deformable, Base Feature задайте Shape = Solid, Type = Extrusion, то есть объемный объект, полученный выдавливанием (также его можно построить вращением или протягиванием вдоль кривой). Обратите внимание на то, что размер рабочего окна Approximate Size надо задать равным 20. Нажав кнопку Continue, подтвердите свой выбор и приступайте к геометрическим построениям. На панели текущих инструментов модуля PART нажмите кнопку Create Lines:Rectangle либо воспользуйтесь командами меню Add – Line - Rectangle. Теперь можете строить сечение прямо на экране с помощью мыши или заданием углов прямоугольника -2.5, -0.5 и 2.5, 0.5. После нажатия клавиши Enter завершите построение сечения кнопкой Done, и в появившемся на панели инструкций окне задайте глубину выдавливания 100. В окне просмотра модели появится трехмерная балка в виде прямоугольного параллелепипеда.

Перейдите к следующему модулю Property. В модуле Property задается материал балки и свойства сечения. Для задания материалов можно воспользоваться либо элементом меню Material -> Create, кнопкой на текущей панели инструментов , или дважды щелкнуть на иконку Materials в дереве модели.

Задайте материал балки, дважды щелкнув по значку Materials в дереве модели. Появится окно Edit Material, показанное на рисунке 3.4.

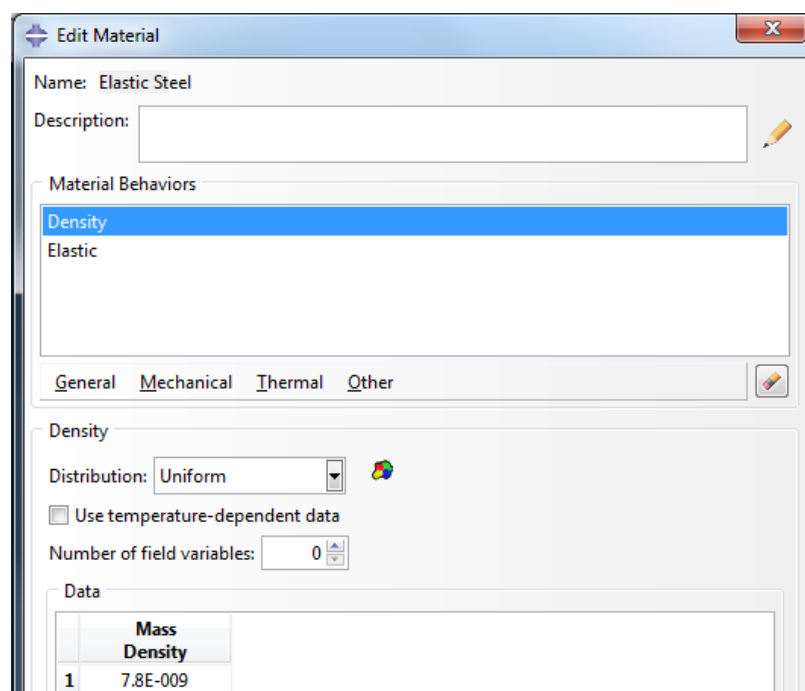


Рисунок 3.4 – Окно Edit Materia

Назовите материал *Metal*. В его верхней части указываются различные опции, из которых задайте только две: *General – Density* = $7.8 \cdot 10^{-9}$ (т/мм³) и *Mechanical – Elasticity – Elastic: Young's Modulus* = $2.1 \cdot 10^5$ (МПа), *Poisson's Ratio* = 0.3. Подтвердите ввод нажатием кнопки ОК. Материал создан. Далее необходимо создать сечение балки, присвоить ему заданный материал и только потом присвоить это сечение всей балке.

Создайте сечение при помощи кнопки Create Section . При создании сечения в окне Create Section укажите категорию Solid и тип Homogeneous, то есть однородное твердотельное сечение. Выбрав в окне Edit Section созданный заранее материал, и толщину сдвига в собственной плоскости *Plane stress/strain thickness* = 1, подтвердите ввод кнопкой ОК, после чего присвойте сечение балке дважды кликнув на элементе Section Assignment в дереве модели, или командой Assign Section, вызываемой из панели меню, либо с помощью соответствующей кнопки.

Теперь присвойте построенное сечение ранее созданной балке. Для этого раскройте элемент Parts в дереве модели, в нем раскройте Part-1 и дважды щелкните по элементу, или же используйте кнопку Assign Section в текущей панели инструментов, либо команды меню Assign – Section. С помощью мыши укажите на балку, она будет выделена красным цветом. Нажмите Done. В появившемся окне выберите сечение и подтвердите выбор нажатием кнопки ОК.

Перейдите к модулю Assembly. Модуль Assembly, служит для создания привязок (ссылок на детали) и объединения деталей в сборки. Несмотря на то, что в данной модели всего одна деталь, сборку все равно необходимо сформировать. Поскольку в нашем случае деталь всего одна, достаточно нажать кнопку Create Part Instance , либо в дереве модели раскрыть элемент и в нем дважды кликнуть на, либо воспользоваться командами меню Instance – Create. Появится окно со списком готовых деталей Parts. В нашем случае деталь всего одна, выберем ее – она будет выделена красным цветом, в разделе Instance Type укажите Independent и подтвердите выбор – цвет, обозначающий сборку, изменится на синий.

Следующая операция – выбор шагов анализа. В модуле Step задаются шаги анализа, определяются тип анализа - основной анализ (*General*) или анализ линейных возмущений (*Linear Perturbation Step*) и тип решения (статика, динамика, теплопередача и т.п.). Поскольку ABAQUS представляет собой пакет программ и использует разные решатели в зависимости от постановки задачи, необходимо определить, каким именно решателем мы будем пользоваться. Перейдите к модулю STEP и создайте шаг расчета с помощью кнопки Create Step , или дважды кликните элемент в дереве модели, либо с помощью команды меню Step – Create. Возникнет окно *Create Step*, в котором уже указан начальный шаг расчета *Initial*. Задайте следующий шаг *Static, General* и присвойте ему имя – Loading. Нажав на кнопку Continue, вызовите окно редакции шага расчета Edit Step, В графе Description укажите тип решаемой задачи - Console Beam. Активируйте опцию нелинейного анализа, указав Nlgeom=On, и нажмите ОК.

Перейдите к модулю Load. Необходимо приложить сосредоточенную силу к некоторой точке. Она должна располагаться на оси жесткости балки, но точки для нее пока не созданы. Для преодоления подобных затруднений в ABAQUS есть семейство команд разбиения Partition. Вызываются они из панели меню Tools – Partition или кнопкой на текущей панели инструментов Partition Face: Sketch . В появившемся окне Create Partition укажите тип разбиения Face и метод Sketch. После нажатия кнопки ОК на экране с помощью мыши выделите грань на свободном конце, к которой будет приложена нагрузка, и нажмите Done. В появившемся на панели инструкций окне выберите *horizontal and on the top* и выделите мышью соответствующее ребро грани, то есть верхнее горизонтальное. Используйте кнопку Create Lines Connected или команду меню Add – Connected Lines, чтобы построить на этой грани отрезок, разбивающий ее на две равные части. После нажатия кнопки Done вы увидите, что к грани добавилось новое ребро. Его тоже надо разбить пополам, чтоб получить точку точно в центре грани. Для этого нажмите кнопку Partition Edge: Enter Parameter , или воспользуйтесь командами меню Tools – Partition - в окне Create Partition задайте тип разбиения Edge и метод Enter Parameter. Укажите мышью вновь созданное ребро и в появившемся на панели инструкций окне задайте параметр разбиения, обозначающий расстояние от начала ребра до точки разбиения в долях от длины ребра, равным 0.5 и нажмите кнопку Create Partition. Подтвердите создания разбиения кнопкой Done. Теперь модель готова к приложению нагрузки.

Задайте сосредоточенную силу, действующую на конец балки, дважды кликнув по элементу дерева меню , или с помощью кнопки Create Load , либо команд меню Load – Create. Укажите шаг, на котором действует нагрузка (Loading), присвойте имя, *Tip Load*, определите категорию Category нагрузки *Mechanical* и тип нагружения Types for Selected Step как сосредоточенная сила Concentrated Force . Нажмите кнопку Continue и перейдите к следующему окну Edit Load. В нем укажите точку в центре торца балки и задайте величину сосредоточенной силы $CF2 = -100$. Нажатием кнопки ОК подтвердите выбор. Нагрузка на балку задана. Граничные условия задайте аналогично, закрепив неподвижно другой, ненагруженный конец. Для этого дважды щелкните по элементу дерева модели, или используйте кнопку Create BC  либо команды меню BC – Create. В появившемся окне Create Boundary Condition задайте на шаге Initial категорию граничного условия *Mechanical* и его тип Symmetry/Antisymmetry/Encastre. Присвойте заделке имя BeamBound. Нажмите кнопку Continue . Укажите на свободный конец балки, подтвердите выбор и, нажав кнопку Done, перейдите к следующему окну Edit Boundary Condition. В нем выберите последнюю графу Encastre, то есть нулевые линейные и угловые перемещения в указанной точке, и нажмите ОК.

Перейдите к модулю Mesh. Используйте команду меню Seed – Instance либо кнопку Seed Part Instance . Задайте минимальный размер элемента равным 1. Вдоль больших ребер балки возникло слишком много элементов, уменьшите их количество командами меню Seed – Edge By Size или нажмите кнопку Seed Edge By Size . Выделите все 4 образующие балки, удерживая клавишу Shift. В случае ошибки отмените выбор отдельной грани клавишей Ctrl. В появившемся на панели инструкций

окне задайте размер элемента вдоль указанных ребер равным 10. Нажмите кнопку Done. С помощью команды Mesh – Controls или соответствующей кнопки  задайте гексаэдрическую форму элемента Shape = Hex и структурный способ построения сетки Technique = Structured. С помощью команды Element Type или соответствующей кнопки  выберите тип элемента C3D8H, задав линейный порядок элемента, содержащегося в стандартной библиотеке, из разряда 3D Stress, то есть работающего во всех трех направлениях по своему объему в гибридной формулировке. Создайте сетку командами меню Mesh – Instance или соответствующей кнопкой на текущей панели инструментов модуля Mesh, подтверждая действие кнопкой Done.

Перейдите к модулю Job. С помощью кнопки Create Job  либо команд меню Job – Create, или дважды кликнув по элементу в дереве модели создайте файл данных с расширением *.odb, из которого после окончания расчета можно считать результаты. В появившемся окне Create Job, присвойте этому файлу имя Beam2D-Bending. Имя надо задавать уникальным, это позволит избежать путаницы, когда у вас накопится много файлов *.odb. Для продолжения нажмите кнопку Continue и в окне Edit Job, задайте тип вычисления Full Analysis, очередность выполнения Background и время на подтверждение Immediately. Можете также указать описание выполняемой работы, *Bending static*, это особенно полезно, когда к модели прикладываются различные нагрузки, задаются разные граничные условия или есть несколько шагов расчета. Подтвердите ввод нажатием кнопки OK. Вычислительный процесс сформирован. Чтобы запустить его, раскройте элемент дерева модели, кликните правой кнопкой по процессу Beam2D-Bending и выберите Submit, или же вызовите Job Manager соответствующей кнопкой  либо командами меню Job –Manager и нажмите на кнопку Submit. Надпись Running говорит о работе процесса, когда она сменится на Completed - нажимайте кнопку Results, чтобы просмотреть результаты расчета. Вы автоматически перейдете в модуль Visualisation. Кнопка Plot Deformed Shape  показывает вид деформированной модели, кнопка Plot Undeformed Shape  возвращает исходную модель, кнопка Plot Contours  отображает распределение по модели результирующей переменной, по умолчанию – напряжения по Мизесу, в виде цветовых градаций. Как обычно, все эти кнопки продублированы одноименными командами в меню Plot.

3.2. Содержание отчета

1. Порядок выполнения статического расчета.
2. Результаты статического расчета балки – распределения напряжений, перемещений и деформаций.

3.3. Контрольные вопросы

1. Опишите структуру графического интерфейса пользователя в программе ABAQUS.

2. Перечислите модули, используемые для создания расчетной модели в ABAQUS
3. Опишите общий порядок выполнения статического расчета в программе ABAQUS.

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №4. ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ С ЯВНЫМ ТИПОМ ИНТЕГРИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЛОНЖЕРОНА

Цель работы: Изучить последовательность выполнения динамического расчета в программе ABAQUS

4.1. Теоретическая часть

Движение сплошной среды (motion of continuum) может быть описано используя:

- закон сохранения массы (conservation of mass);
- закон сохранения импульса (conservation of momentum);
- закон сохранения энергии (conservation of energy);
- модель материала (material model);
- начальные условия (initial conditions);
- граничные условия (boundary conditions).

Математическая модель движения сплошной среды, описанная с использованием перечисленных выше уравнений, численно решается в Abaqus, используя явное интегрирование по времени (explicit time integration).

Модели материалов описывают:

- уравнение состояния (гидродинамика) (equation of state);
- модель описания напряженно-деформированного состояния (пластичность) (strength model);
- модель разрушения (failure model).

Численные методы решения, использующиеся в расчетном комплексе Abaqus, основываются на принципе разбиения сложной комплексной задачи на конечное число простых и малых по размеру задач. Этот процесс называется дискретизацией задачи. Уравнения, описывающие процессы, должны быть выражены дискретизацией (разбиение на элементарные составляющие) относительно:

- времени;
- пространства.

Временная дискретизация одинакова для различных решателей. Под подциклами подразумевается смешанное интегрирование по времени. Этот метод обычно применяется для ускорения расчета в случае, когда размеры элементов в расчетной модели сильно отличаются. Для элементов с малыми размерами, применяются временные шаги с меньшим значением, а для элементов с большим размером применяются временные шаги с большим значением.).

Отличия заключаются в дискретизации описания пространства (другими словами как задана геометрическая модель и как геометрические объекты взаимодействуют друг с другом в пространстве).

Продолжительность исследуемого процесса разбивается на заданное число временных шагов (обычно на тысячи или десятки тысяч). Из-за очень малого размера шага, динамический анализ с явным типом интегрирования на практике применяется только для расчета кратковременных процессов.

4.2. Порядок выполнения работы

Создаем новую базу данных модели. Для создания основания детали нажимаем кнопку Create Part. Задаем новый тип детали, а именно – трехмерная деформируемая оболочка, путем определения Modeling Space = 3D, Type = Deformable, Base Feature задаем Shape = Shell, Type = Extrusion. Размер рабочего окна Approximate Size задаем равным 100.

Создаем эскиз по размерам, приведенным на рисунке 4.1, а. Обратите внимание что начало координат должно располагаться в точке А. Завершаем построение сечения кнопкой Done. В появившемся окне задаем глубину выдавливания 200.

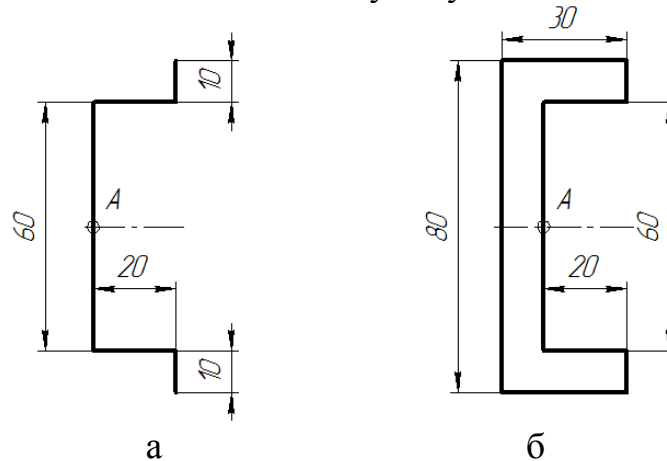


Рисунок 4.1 – Эскизы операций

Создаем вспомогательную плоскость нажав кнопку Create A Datum Plane: Offset From A Principal Plane  на расстоянии 200.

Создаем с помощью кнопки Create Shell: Planar  плоскую оболочку предварительно выбрав созданную ранее вспомогательную плоскость. Создаем эскиз по размерам, приведенным на рисунке 4.1, б.

Создаем вспомогательную плоскость нажав кнопку Create A Datum Plane: Offset From A Principal Plane на расстоянии 0.

Создаем зеркальное отображение созданных объектов с помощью кнопки Create Mirror  относительно созданной вспомогательной плоскости.

Создаем недеформируемую поверхность размером 200x200.

Для этого нажимаем кнопку Create Part. Задаем новый тип детали, а именно – трехмерная недеформируемая оболочка, путем определения Modeling Space = 3D, Type = Discrete rigid, Base Feature задаем Shape = Shell, Type = Planar. Размер рабочего окна Approximate Size задаем равным 300. Создаем эскиз – квадрат со сторонами 200 и центром в точке (0,0,0). В центре поверхностей создаем точку с помощью команды Tools–Reference Point.

Создаем материал со свойствами *General* – Density = 7.8e-09 (т/мм³); *Mechanical* – Elasticity – Elastic: Young's Modulus = 2.1e+05 (МПа), Poisson's Ratio = 0.3; *Mechanical* – Plasticity – Plastic.

Пластические свойства задаем как показано в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Пластические свойства материала

	Yield Stress	Plastic Strain
1	175	0
2	300	0.35

Создаем сечение при помощи кнопки Create Section. При создании сечения в окне Create Section укажите категорию Shell и тип Homogeneous. Толщину оболочки задайте равной 1.5. Присваиваем построенное сечение ранее созданной модели с помощью команды Assign Section .

В модуле Assembly создаем сборку, включающую 2 модели детали и поверхности, имитирующие боек и основание как показано на рисунке 4.2. При добавлении деталей в разделе Instance Type укажите Independent.

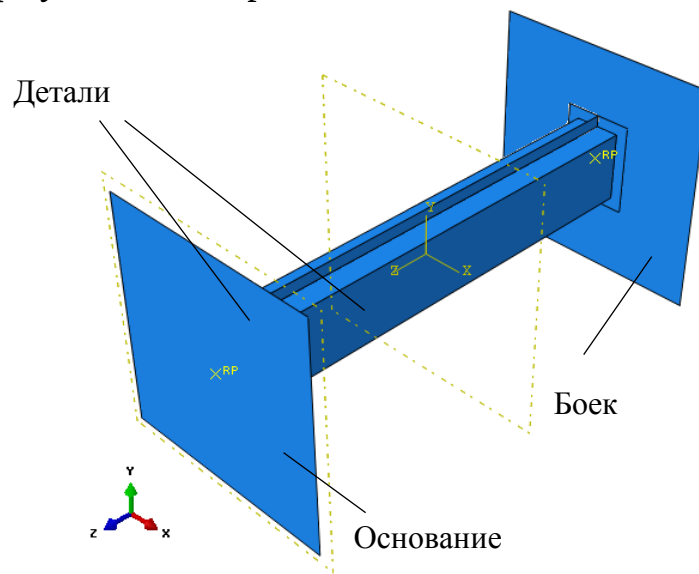


Рисунок 5.2 – Сборка

В точке Reference Point, созданной в центре поверхности, имитирующей боек стенда создаем точечную массу, равную 0.3, используя функцию Assembly - Engineering Feature – Inertias . Между деталью и основанием оставить зазор 1-2 мм.

В модуле Step создаем новый шаг. Тип шага - Dynamic, Explicit. Во вкладке Basic установить Time period равным 0.04.

В модуле Load создаем граничные условия. Для центра основания задаем категорию граничного условия Mechanical и его тип Symmetry/Antisymmetry/Encastre – т.е. основание мы закрепляем неподвижно. Для центра бойка выбрать тип Displacement/Rotation. Следует запретить вращения вокруг всех осей и перемещения вдоль двух осей установив нулевые значения. Оставить возможным перемещение вдоль оси, совпадающей с направлением движения детали.

Для шага Initial создаем предопределенное поле скоростей с помощью кнопки Create Predefined Field  для детали и центра бойка. Категория – Mechanical, Тип - Velocity. Установить значение скорости равным 5000 для оси, совпадающей с направлением движения детали. Для остальных осей установить нулевые значения.

В модуле Interaction задаем свойства взаимодействия с помощью команды Create Interaction Property . Выбираем тип Contact и определяем касательное и

нормальное взаимодействие добавив Mechanical – Tangential Behavior и Mechanical – Normal Behavior, соответственно. Для Tangential Behavior задаем формулировку Friction Formulation как Penalty, указываем направленность Directionality Isotropic изотропной и вводим коэффициент трения Friction Coefficient равный 0.3. Для Normal Behavior оставляем настройки, используемые по умолчанию. Далее следует создать новое взаимодействие с помощью команды Create Interaction , при этом следует выбрать тип General contact.

В модуле Mesh создаем сетку задав размер элемента равным 10 для детали и 20 для плоскостей.

Для закрепления детали создать в сборке набор точек (Set) в точках крепления детали к бойку (рисунок 4.3, а).

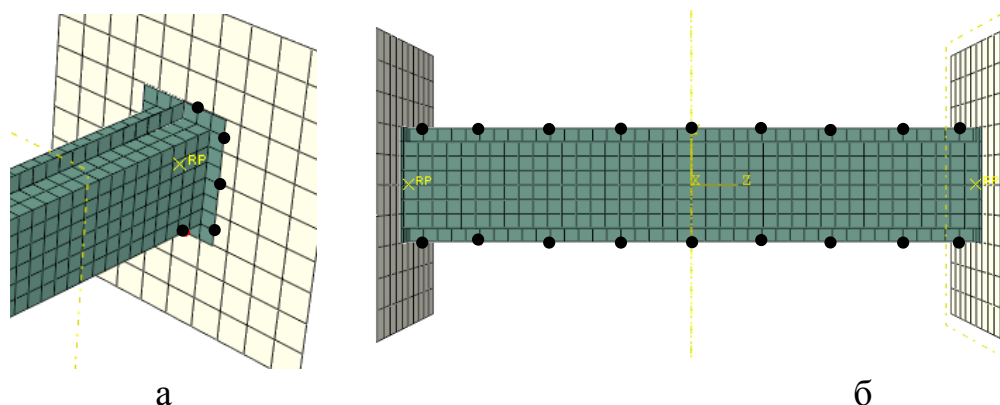


Рисунок 4.3 – Наборы точек для соединения и закрепления деталей

Затем в модуле Interaction с помощью команды Create Fasteners  создаем точки крепления, выбрав тип Point-Based. Во вкладке Property указать радиус точек крепления равный 4 мм и выбрать метод крепления Rigid MPC. Аналогично создаем точки сварки для соединения деталей (рисунок 4.3, б).

В модуле Job создаем новое задание для вычислений и отправляем его на расчет кнопкой Submit.

4.3. Содержание отчета

1. Порядок выполнения динамического анализа с явным типом интегрирования.
2. Результаты динамического анализа – распределение пластических деформаций, графики изменения энергии, скорости, ускорений.

4.4. Контрольные вопросы

1. Для решения каких задач используется динамический анализ с явным типом интегрирования.
2. Опишите общий порядок выполнения динамического анализа в программе ABAQUS.

5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №5. ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ С НЕЯВНЫМ ТИПОМ ИНТЕГРИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РАМЫ АВТОМОБИЛЯ

Цель работы: Изучить последовательность выполнения динамического расчета в программе ABAQUS

5.1. Теоретическая часть

Некоторые численные методы используют неявное интегрирование по времени, при этом:

- инерционные эффекты обычно не включаются (матрицы жесткости и масс не формируются);

- среднее ускорение - оценка перемещений для времени $t + \Delta t$.

Линейные задачи:

- безусловно устойчивое интегрирование при линейной матрице жесткости.

- допустимы большие шаги по времени

Нелинейные задачи:

- решение серий линейных аппроксимаций по Ньютону-Рафсону;

- необходимо обращение нелинейной матрицы жесткости;

- для достижения сходимости требуются малые шаги;

- в высоконелинейных задачах сходимость не гарантируется.

Переменные интегрируются по времени, основываясь на значениях, полученных на предыдущем временном шаге и начальном приближении значения для текущего временного шага. Метод экстраполирует результат последнего подшага для получения начальной точки следующего шага решения.

Эта схема более сложная в реализации и более затратная по отношению к вычислительным ресурсам, чем явная схема решения.

Для расчета явления распространения волны для получения приемлемой точности оба метода требуют практически одинаковый временной шаг.

Таким образом тип анализа Dynamic/Implicit в Abaqus используется для квазистатических задач и низкоскоростной динамики.

5.2. Порядок выполнения работы

Создаем новую базу данных модели. Для создания основания детали нажимаем кнопку Create Part. Задаем новый тип детали, а именно – трехмерная деформируемая оболочка, путем определения Modeling Space = 3D, Type = Deformable, Base Feature задаем Shape = Shell, Type = Planar. Размер рабочего окна Approximate Size задаем равным 5000.

Создаем эскиз по размерам, приведенным на рисунке 5.1. Обратить внимание что начало координат должно располагаться на пересечении осей симметрии, т.е. по центру эскиза. Сохраните эскиз с помощью кнопки Save Sketch As . Завершите построение сечения кнопкой Done.

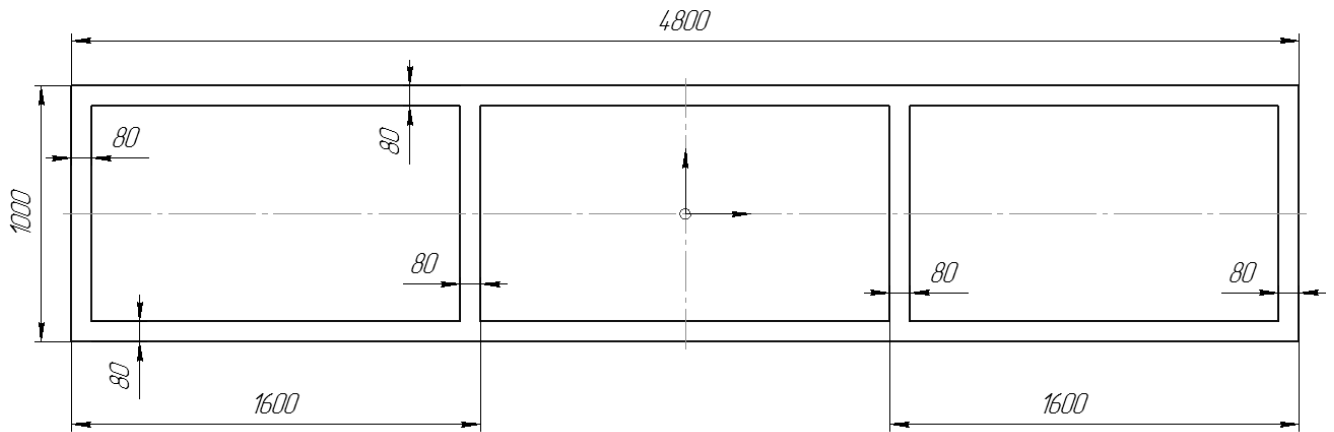


Рисунок 5.1 – Эскиз основания

Создаем боковые стенки операцией выдавливания, для чего нажимаем кнопку Create Shell: Extrude . Выбираем плоскость предыдущей операции и одно из ребер в качестве оси, после чего создаем эскиз, показанный на рисунке 5.2.

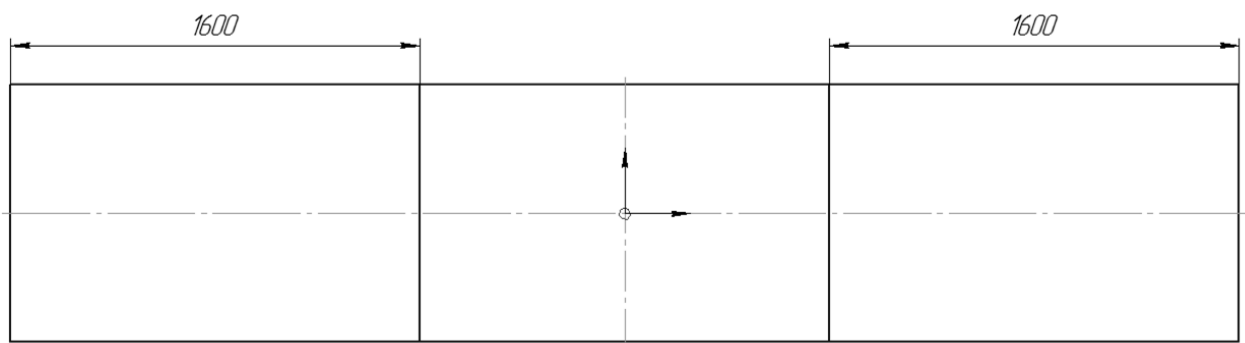


Рисунок 5.2 – Эскиз боковой стенки

Завершаем построение сечения кнопкой Done. В появившемся окне задаем глубину выдавливания 150.

Создаем вспомогательную плоскость нажав кнопку Create a datum plane: offset from a principal plane , на расстоянии 150.

Создаем с помощью кнопки Create Shell: Planar , плоскую оболочку предварительно выбрав созданную ранее вспомогательную плоскость. Загружаем сохраненный ранее эскиз с помощью кнопки Add Sketch .

Создаем вспомогательную плоскость нажав кнопку Create A Datum Plane: Offset From A Principal Plane на расстоянии 75.

Создать разбиение используя функцию Partition Faces: Use Datum Plane , для чего выбрать вторую созданную вспомогательную плоскость.

Разбить ребра 1-4 (рисунок 5.3) пополам с помощью функции Partition Edge: Enter Parameter .

В модуле Mesh создайте сетку задав размер элемента равным 80.

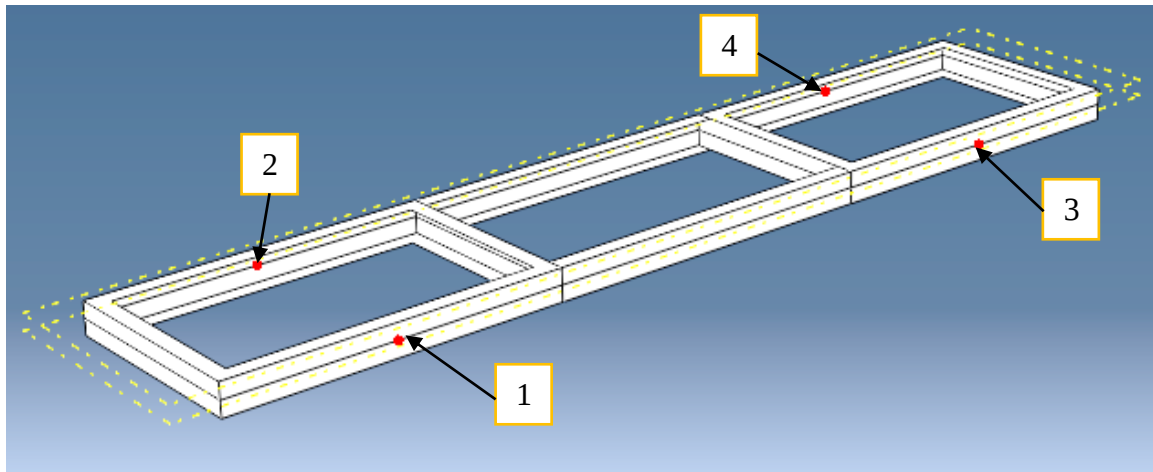


Рисунок 5.3 – Результат разбиения ребер.

Создайте материал со свойствами *General – Density* = $7.8e-09$ (т/мм³) и *Mechanical – Elasticity – Elastic: Young's Modulus* = $2.1e+05$ (МПа), *Poisson's Ratio* = 0.3.

Создайте сечение при помощи кнопки Create Section. При создании сечения в окне Create Section укажите категорию Shell и тип Homogeneous. Толщину оболочки задайте равной 10.

Присвойте построенное сечение ранее созданной модели.

Создайте сборку и добавьте в нее созданную модель.

Создайте в сборке четыре точки используя функцию Tools -Reference Point. Координаты точек – (1600,500,-300), (1600,-500,-300), (-1600,500,-300), (-1600,-500,-300).

В дереве модели создайте модели пружин и амортизаторов используя функцию Assembly - Engineering Feature - Springs/Dashpots. При создании этих элементов необходимо указать тип Connect two points и соединить точки полученные при разбиении ребер и точки созданные отдельно в сборке.

Задать жесткость пружины Spring stiffness равной 30, коэффициент сопротивления амортизатора Dashpot coefficient равным 2.5.

Создайте четыре точечные массы по 0,25 т используя функцию Assembly - Engineering Feature – Inertias. Массы необходимо создать в точках, указанных на рисунке 5.4.

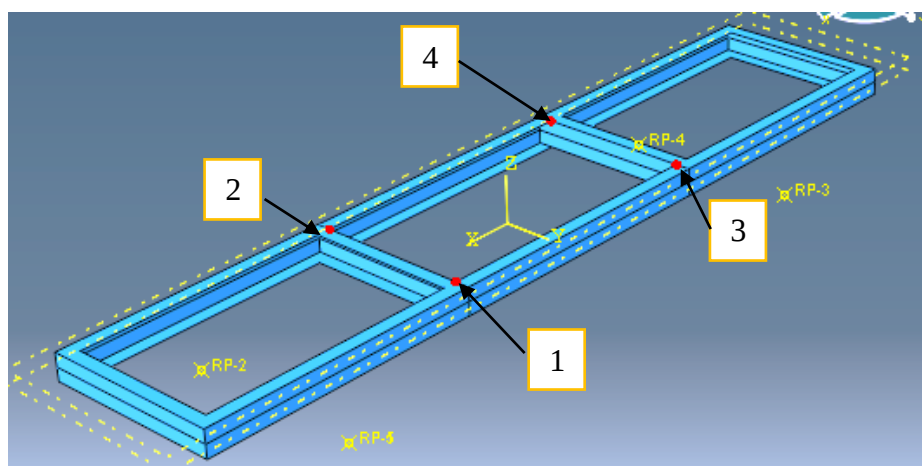


Рисунок 5.4 - Точки расположения точечных масс

Для сборки создать наборы точек (Set-1 и Set-2). В набор Set-1 включить точку 1, см. рисунок 5.4. Во второй набор Set-2 включить четыре созданные Reference Point.

В модуле Step создать новый шаг. Тип шага - Dynamic, Implicit. Во вкладке Basic установить Time period равным 3. Во вкладке Incrementation установить Type: Fixed; Maximum number of increments: 300; Increment size: 0.01.

В дереве построения во вкладке History Output Requests  для H-Output-1 задаем: Domain: Set: Set-1; Frequency: Every n increments; n: 1.

Выбираем параметры для вывода – для нас нужными параметрами являются перемещения и ускорения по оси z – U3 и A3 (вкладка Displacement/ Velocity/ Acceleration).

Аналогичные процедуры повторить для набора точек Set 2.

Во вкладке Field Output Requests  для F-Output-1 убрать «лишние» параметры, оставив галочки на Displacement/ Velocity/ Acceleration и Stresses.

Прежде чем создавать граничные условия, определим амплитуды колебаний. При создании амплитуд в дереве построения необходимо указать их тип. Выбираем Periodic. Параметры для каждой из четырех амплитуд (для каждого колеса) приведены в таблице 5.1.

В модуле Load создаем граничные условия. При создании выбрать тип Displacement/Rotation. Напротив U1, U2, U3 установить галочки, для U3 установить значение 20. Для переднего левого колеса выбрать амплитуду Amp-1, для заднего левого – Amp-2, для переднего правого – Amp-3, для заднего правого – Amp-4.

Таблица 5.1 - Данные для определения периодической амплитуды кривой

	Amp-1		Amp-2		Amp-3		Amp-4	
Circular frequency	15		15		12		12	
Starting time	0		0.25		0		0.25	
Initial amplitude	0		0		0		0	
n	A	B	A	B	A	B	A	B
1	0	0.65	0	0.65	0	0.3	0	0.3
2	0	0.5	0	0.5	0	0.75	0	0.75

После этого переходим к модулю Job. В нем создаем новое задание для вычислений и отправляем на расчет кнопкой Submit.

Для вывода графиков по времени необходимо воспользоваться элементом меню Result – History output или с помощью кнопки Create XY Data . В появившемся окне выбирается переменная, по которой требуется построить график. При нажатии на кнопку Plot на экран будет выведен график указанной переменной.

Для экспорта данных в Excel можно воспользоваться функцией Plug-ins>Tools>Excel Utilites.

Для просмотра колебательного процесса по времени в ABAQUS/CAE необходимо воспользоваться командами меню Animate – Time History либо кнопкой Time History Animate . Начнётся воспроизведение колебательного процесса. Для одновременного отображения возникающих в балке напряжений и

недеформированной детали воспользуйтесь кнопкой Allow Multiple Plot States  и после ее нажатия – Plot Contours on Deformed Shape .

5.3. Содержание отчета

1. Порядок выполнения динамического анализа.
2. Исходные данные для динамического анализа – графики колебаний точек крепления подвески к колесам.
3. Результаты динамического анализа – графики ускорений действующих на точечную массу 1, величина деформации рамы при движении по дороге с подобным профилем.

5.4. Контрольные вопросы

1. Для решения каких задач используется динамический анализ с неявным типом интегрирования.
2. Опишите общий порядок выполнения динамического анализа в программе ABAQUS.
3. Опишите способы вывода результатов анализа в программе ABAQUS.

6. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕРМОУПРУГОСТИ НА ПРИМЕРЕ КЛАПАНА

Цель работы: Изучить последовательность выполнения расчета теплопроводности и термоупругости в программе ABAQUS

6.1. Теоретическая часть

Теплопроводность – это процесс переноса внутренней энергии от более нагретых частей тела (или тел) к менее нагретым частям (или телам), осуществляемый хаотически движущимися частицами тела (атомами, молекулами, электронами и т. п.). Такой теплообмен может происходить в любых телах с неоднородным распределением температур, но механизм переноса теплоты будет зависеть от агрегатного состояния вещества.

В установившемся режиме плотность потока энергии, передающейся посредством теплопроводности, пропорциональна градиенту температуры:

$$\vec{q} = -\chi \text{grad}(T), \quad (6.1)$$

где $\vec{q}$ – вектор плотности теплового потока – количество энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной каждой оси;

χ – коэффициент теплопроводности (удельная теплопроводность);

T – температура.

Минус в правой части показывает, что тепловой поток направлен противоположно вектору $\text{grad}(T)$ (то есть в сторону скорейшего убывания температуры). Это выражение известно как закон теплопроводности Фурье.

В интегральной форме это же выражение запишется так (если речь идёт о стационарном потоке тепла от одной грани параллелепипеда к другой):

$$P = -\chi \frac{S \Delta T}{l}, \quad (6.2)$$

где P — полная мощность тепловых потерь;

S – площадь сечения параллелепипеда;

ΔT – перепад температур граней;

l – длина параллелепипеда, то есть расстояние между гранями.

Коэффициент теплопроводности измеряется в Вт/(м·К).

Способность вещества проводить тепло характеризуется коэффициентом теплопроводности (удельной теплопроводностью). Численно эта характеристика равна количеству теплоты, проходящей через образец материала толщиной 1 м, площадью 1 м², за единицу времени (секунду) при единичном температурном градиенте.

Теплоёмкость тела – физическая величина, определяющая отношение бесконечно малого количества теплоты δQ , полученного телом, к соответствующему приращению его температуры δT :

$$C = \frac{\delta Q}{\delta T}. \quad (6.3)$$

Единица измерения теплоёмкости – Дж/К.

Термоупругость – раздел механики деформируемого твёрдого тела, где изучаются зависимости между напряжениями, деформациями и температурой и разрабатываются математические методы расчёта температурных напряжений и деформаций, которые существенны для рационального проектирования машин и конструкций, работающих в сложных температурных режимах.

В пределах сохранения упругости материала компоненты тензора напряжений, тензора деформации и температура связаны линейными соотношениями:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \lambda \Theta + 2\mu \varepsilon_{11} - (3\lambda + 2\mu)\alpha T; \quad \sigma_{12} = 2\mu \varepsilon_{12}; \\ \sigma_{22} &= \lambda \Theta + 2\mu \varepsilon_{22} - (3\lambda + 2\mu)\alpha T; \quad \sigma_{23} = 2\mu \varepsilon_{23}; \\ \sigma_{33} &= \lambda \Theta + 2\mu \varepsilon_{33} - (3\lambda + 2\mu)\alpha T; \quad \sigma_{31} = 2\mu \varepsilon_{31}; \\ \Theta &= \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}. \end{aligned} \quad (6.4)$$

где λ и μ – постоянные Ламе;

α – температурный коэффициент линейного расширения;

T – разность между текущим значением температуры и температурой ненапряжённого состояния.

6.2. Порядок выполнения работы

6.2.1. Расчет теплопроводности

Создаем новую базу данных модели с именем Термо-1. Для создания основания детали нажимаем кнопку Create Part. Задаем новый тип детали, а именно – трехмерное деформируемое твердое тело, путем определения Modeling Space = 3D, Type = Deformable, Base Feature задайте Shape = Solid, Type = Revolution, то есть объемный объект, полученный вращением. Размер рабочего окна Approximate Size задаем равным равным 200.

Создаем эскиз по размерам, приведенным на рисунке 6.1. Ось вращения располагаем вдоль оси у.

Создаем материал со свойствами *General – Density* = 7.8e-09 (т/мм³); *Mechanical – Elasticity – Elastic: Young's Modulus* = 2.1e+05 (МПа), *Poisson's Ratio* = 0.3, *Expansion* = 1.1e-05; *Thermal – Conductivity* = 45 (Вт/(м·К)), *Specific Heat* = 0.462e+09 (мДж/(т·К)).

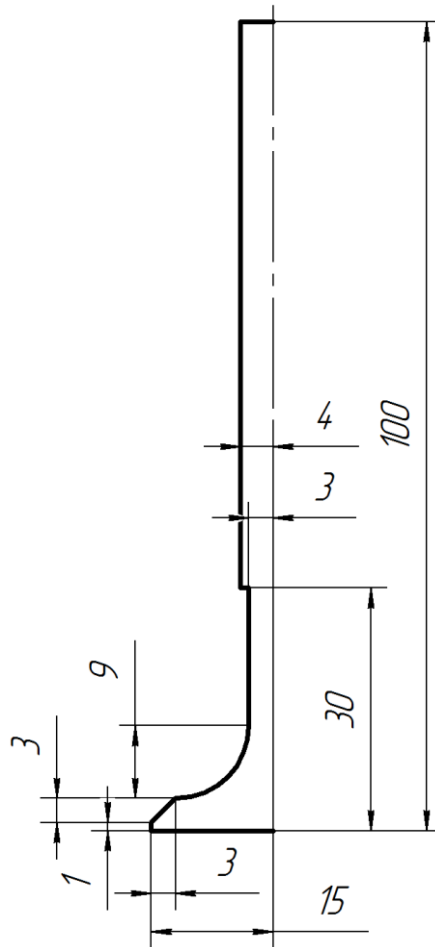


Рисунок 6.1 – Эскиз основания

Создаем сечение при помощи кнопки Create Section. При создании сечения в окне Create Section укажите категорию Solid и тип Homogeneous.

Присвойте построенное сечение ранее созданной модели.

Создайте сборку и добавьте в нее созданную модель. В разделе Instance Type укажите Independent.

В модуле Step создать новый шаг. Тип шага – Heat transfer. Во вкладке Basic установить Time period равным 20. Во вкладке Incrementation установить Type: Fixed; Maximum number of increments: 2000; Increment size: 0.1.

Во вкладке Field Output Requests  для F-Output-1 установить Frequency: Every n increments и n: 10.

Прежде чем создавать граничные условия, определим амплитуды температуры. При создании амплитуд в дереве построения необходимо указать их тип. Выбираем Tabular. Параметры приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Данные для определения амплитуды температуры

n	Time/Frequency	Amplitude
1	0	1
2	20	1

В модуле Load создаем граничные условия. При создании выбрать тип Temperature. Напротив Magnitude: установить значение 600, выбрать амплитуду Amp-1. При создании выбрать торец тарелки клапана и боковой пояс, как показано на рисунке 2.

Перейдите к модулю Mesh. Используйте кнопку Seed Part Instance. Задайте минимальный размер элемента равным 2. С помощью команды Mesh – Controls или соответствующей кнопки задайте тетраэдральную форму элемента Shape = Tet. С помощью команды Element Type или соответствующей кнопки выберите тип элемента DC3D4, задав линейный порядок элемента, содержащегося в стандартной библиотеке, из разряда Heat Transfer. Создайте сетку командами меню Mesh – Instance или соответствующей кнопкой на текущей панели инструментов модуля mesh, подтверждая действие кнопкой Done.

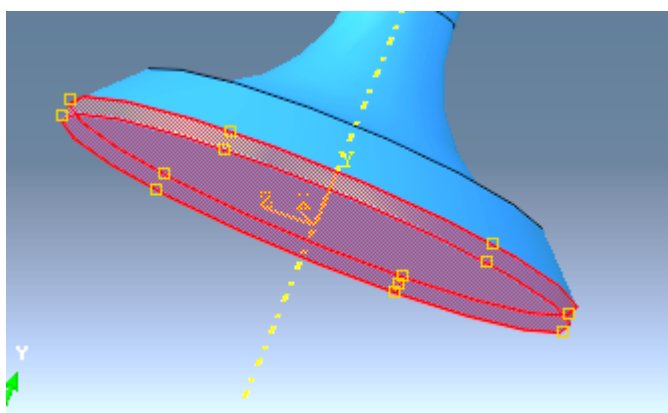


Рисунок 2 – Создание граничного условия

После этого переходим к модулю Job. В нем создаем новое задание для вычислений с именем Термо-1 и отправляем на расчет кнопкой Submit.

6.2.2. Расчет термоупругости

Копируем базу данных модели с именем Термо-1 и переименовываем ее в Термо-2. Удаляем шаг Step-1 и создаем новый. Тип шага - Static, General.

Удаляем граничное условие BC-1.

В модуле Mesh с помощью команды Element Type меняем тип элемента на C3D4, задав линейный порядок элемента, содержащегося в стандартной библиотеке, из разряда 3D Stress.

В модуле Load для шага Step-1 создаем предопределенное температурное поле с помощью кнопки Create Predefined Field. В графе Distribution: выбираем From results or output database file. В графе File name: выбираем ранее созданный odb-файл Термо-1.odb. Далее выбираем Begin step: 1, Begin increment: 20, End step: 1, End increment: 20.

После этого переходим к модулю Job. В нем создаем новое задание для вычислений с именем Термо-2 и отправляем на расчет кнопкой Submit.

Для вывода перемещений (расширения) относительно оси клапана в модуле Visualisation необходимо создать локальную систему координат с помощью кнопки Create Coordinate System выбрав Motion: Fixed system, Type: Rectangular. Далее выполняем преобразование выходных данных с помощью команды Result-Options. Во

вкладке Transformation выбираем Transform Type- User Specified, выбираем созданную локальную систему координат и ставим галочки Primary variable и Deformed variable.

6.3. Содержание отчета

1. Порядок выполнения расчета теплопроводности.
2. Порядок выполнения расчета термоупругости.
3. Результаты расчета теплопроводности – распределение температур.
4. Результаты расчета термоупругости – распределение деформаций (относительно оси клапана).

6.4. Контрольные вопросы

1. Что такое теплопроводность?
2. Что такое теплоемкость?
3. Что изучает термоупругость?
4. Опишите общий порядок выполнения расчета теплопроводности в программе ABAQUS.
5. Опишите общий порядок выполнения расчета термоупругости в программе ABAQUS.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудрявцев Е. М. КОМПАС-3Д: проектирование в машиностроении [Текст] / Е. М. Кудрявцев. - М. : ДМК Пресс, 2009. - 440 с. : ил.
2. Жарков Н. В. КОМПАС-3D V11: полное руководство [Текст] / Н. В. Жарков, М. А. Минаев, Р. Г. Прокди. - СПб. : Наука и техника, 2010. - 688 с.
3. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов [Текст] : справ. / Ред. В. И. Мяченков. - М. : Машиностроение, 1989. - 520 с.
4. Курков С. В. Метод конечных элементов в задачах динамики механизмов и приводов [Текст] / С. В. Курков. - СПб. : Политехника, 1992. - 224 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свойства стали 08 КП

Таблица А.1 – Физические свойства

Температура испытания, °С	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Модуль нормальной упругости, E , ГПа	203	207	182	153	141					
Плотность, ρ , кг/см ³	7871	7846	7814	7781	7745	7708	7668	7628	7598	7602
Коэффициент теплопроводности χ , Вт/(м·К)	63	60	56	51	47	41	37	34	30	27
Температура испытания, °С	20-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600	20-700	20-800	20-900	20-1000
Коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/К	12.5	13.4	14.0	14.5	14.9	15.1	15.3	14.7	12.7	13.8
Удельная теплоемкость, C , Дж/(кг·К))	482	498	514	533	555	584	626	695	703	695

Таблица А.2 – Механические свойства в зависимости от сечения

ГОСТ	Состояние поставки	Сечение, мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
			не менее			
1577-93	Полосы нормализованные	6-25	175	295	35	60
16523-70 (Образцы поперечные)	Листы горячекатаные	До 2	-	275-390	(24)	
		2-3,9			(26)	
	Листы холоднокатаные	До 2	-	275-390	(25)	
		2-3,9			(28)	

Заказ № _____ от «__» _____ 200____. Тираж _____ экз.
Изд-во СевНТУ