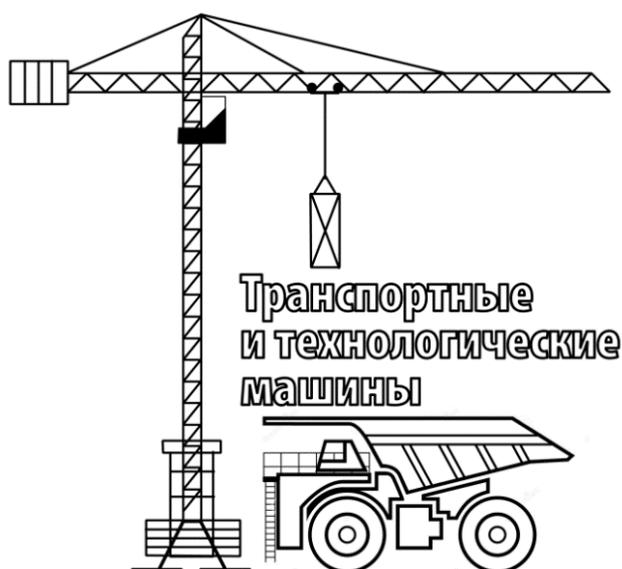


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Транспортные и технологические машины»

САПР САЕ СРЕДСТВА ВЫЧИСЛЕНИЙ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2025

УДК 658.012.011.56
ББК 30.2-5-05
С40

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Транспортные и технологические машины»
«24» декабря 2024 г., протокол № 5

Составитель ст. преподаватель Ю. С. Романович

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. Е. Науменко

Методические рекомендации разработаны в соответствии с учебной программой дисциплины «САПР САЕ средства вычислений» для студентов специальности 7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении» очной и заочной форм обучения и предназначены для использования при выполнении лабораторных работ.

Учебное издание

САПР САЕ СРЕДСТВА ВЫЧИСЛЕНИЙ

Ответственный за выпуск	И. В. Лесковец
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2025

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Подготовка геометрической модели к расчету методом конечных элементов.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Статический линейный анализ объемных конструкций.....	10
3 Лабораторная работа № 3. Статический линейный анализ тонкостенных конструкций.....	13
4 Лабораторная работа № 4. Анализ контактных взаимодействий в сборочных единицах.....	16
5 Лабораторная работа № 5. Анализ контактных взаимодействий в сборочных единицах.....	18
6 Лабораторная работа № 6. Анализ разъемных соединений. Методики моделирования болтовых соединений.....	22
7 Лабораторная работа № 7. Анализ разъемных соединений. Методики моделирования болтовых соединений.....	24
8 Лабораторная работа № 8. Статический нелинейный анализ конструкций. Задание нелинейных свойств материала.....	28
9 Лабораторная работа № 9. Частотный анализ конструкций.....	31
Список литературы.....	34

Введение

Целью учебной дисциплины «САПР САЕ средств вычислений» является подготовка специалистов, умеющих обоснованно и результативно применять существующие и осваивать новые программные продукты и технологии инженерного анализа в области наземных тягово-транспортных машин.

В результате изучения дисциплины обучающиеся формируют навыки постановки и решения задач методом конечных элементов (МКЭ), а также навыки использования современных программных комплексов, реализующих МКЭ.

Материал дисциплины изучается в лекционном курсе, закрепляется при выполнении лабораторных работ.

По результатам выполнения лабораторной работы оформляется отчет, содержащий титульный лист, цель работы, основные этапы постановки задачи, расчетные схемы, эпюры напряжений, перемещений и др., графики и выводы.

1 Лабораторная работа № 1. Подготовка геометрической модели к расчету методом конечных элементов

Цель работы: получить навыки подготовки геометрической модели к расчету; изучить этапы решения задачи методом конечных элементов.

1.1 Общие сведения

Этапы решения задачи с помощью метода конечных элементов можно описать схемой, приведенной на рисунке 1.1.

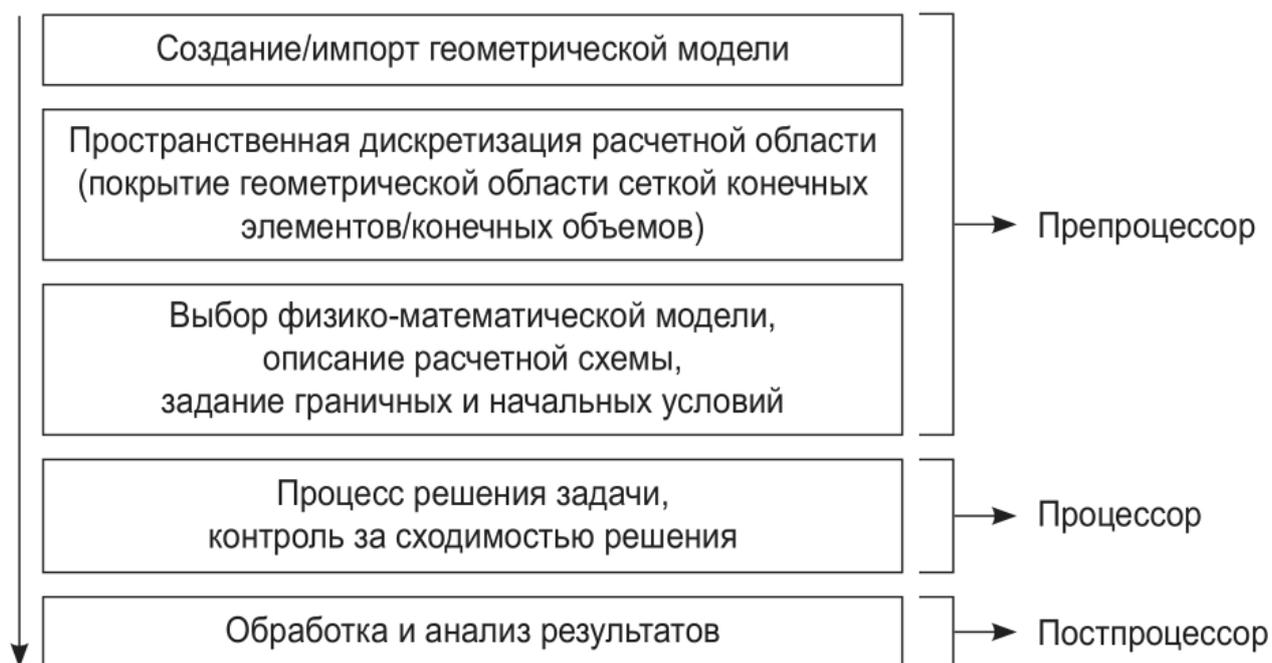


Рисунок 1.1 – Этапы решения задачи методом конечных элементов

Первым этапом решения задачи является создание геометрической модели или импорт готовой модели из сторонних CAD-систем. В Workbench для этого используется модуль Geometry, который позволяет вызвать приложение Design Modeler (DM) или SpaceClaim Direct Modeler (SCDM).

На втором этапе выполняется пространственная дискретизация расчетной области, которая соответствует исходной геометрической модели, полученной на предыдущем шаге. Построение расчетной сетки может быть выполнено с помощью модулей Meshing и ICEM CFD.

Далее в зависимости от типа анализа, который предполагается использовать в работе, производится описание математической модели и подбирается необходимый расчетный модуль. Например, для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции под действием статических нагрузок следует использовать модуль Static Structural. На данном этапе необходимо выбрать модель материала и задать его свойства, граничные и начальные условия задачи, выбрать методы расчета, настроить решатель в соответствии с принятой физико-математической моделью и задать требуемую точность расчета.

Процесс расчета является полностью автоматизированным, однако рекомендуется осуществлять контроль над процессом решения: следить за поведением решения и его соответствием критериям сходимости, выводить на экран дополнительные параметры, позволяющие оценить необходимые количественные характеристики решения, и т. д.

После завершения расчета необходимо проанализировать полученные результаты и, если есть возможность, сравнить их с имеющимися экспериментальными данными. Также следует помнить, что полученное решение не должно зависеть от размера сеточных элементов, что обычно достигается проведением серии расчетов на сетках различной плотности.

1.2 Порядок выполнения работы

Запустить ANSYS Workbench 2019R1.

Перетащить файл Aero_Bracket_V5.igs из проводника в рабочее окно проекта. В проекте автоматически появится подсистема Geometry.

Двойным щелчком по второй строке подсистемы открыть геометрический редактор SpaceClaim Direct Modeler (SCDM). После импортирования геометрической модели окно будет выглядеть, как показано на рисунке 1.2.

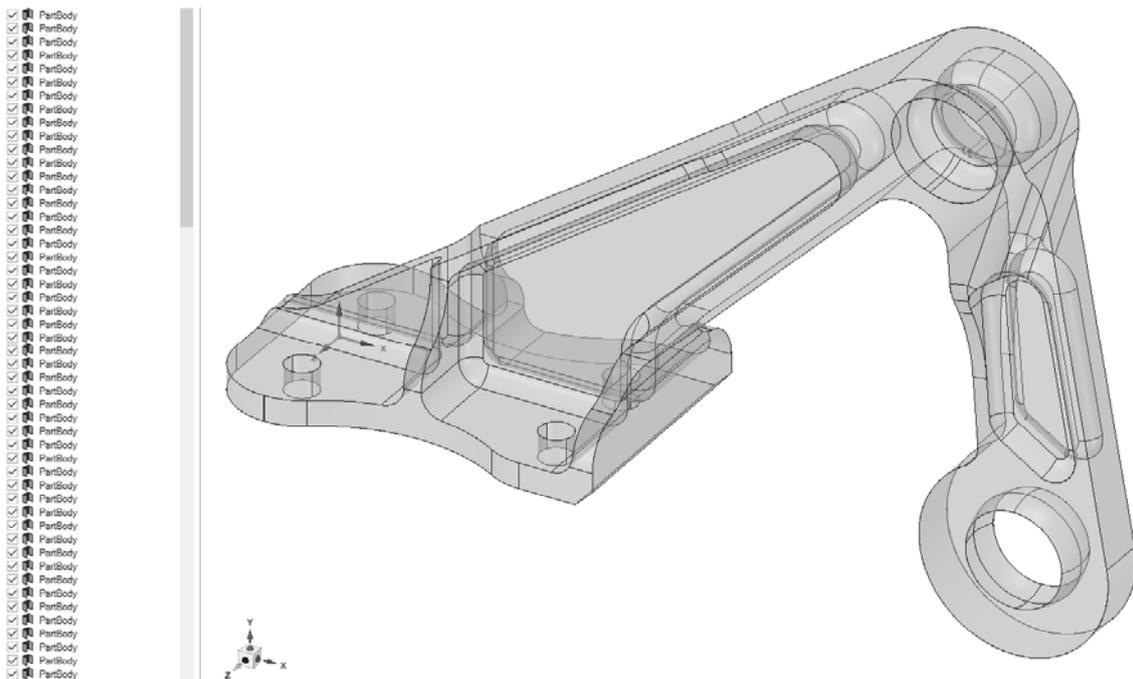


Рисунок 1.2 – Геометрическая модель после импортирования

Видно, что вместо одного твердого тела существует большое количество несшитых поверхностей. На это указывают прозрачный вид тел и фиолетовые значки в дереве слева.

Для превращения набора несшитых поверхностей в твердое тело можно воспользоваться инструментом «Сшить» (Stitch в англоязычной версии программы), который находится на закладке «Восстановить» (Repair) панели инструментов (рисунок 1.3).

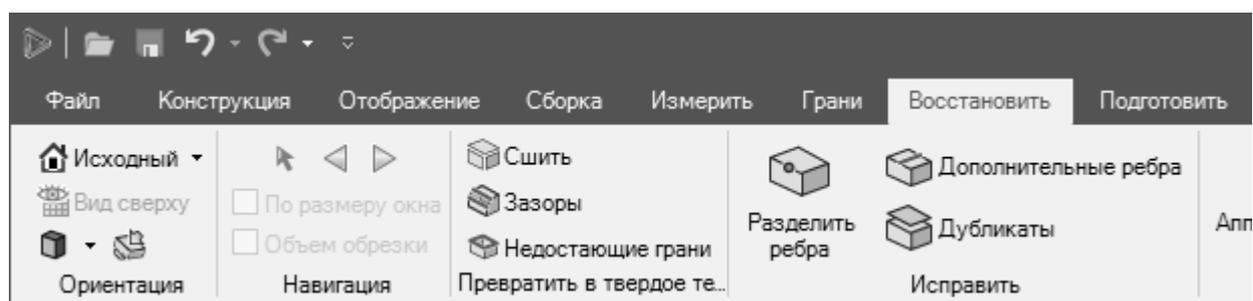


Рисунок 1.3 – Панель инструментов «Восстановить»

После выбора инструмента «Сшить» программа автоматически ищет нессшитые поверхности и подсвечивает их в графическом окне (рисунок 1.4).

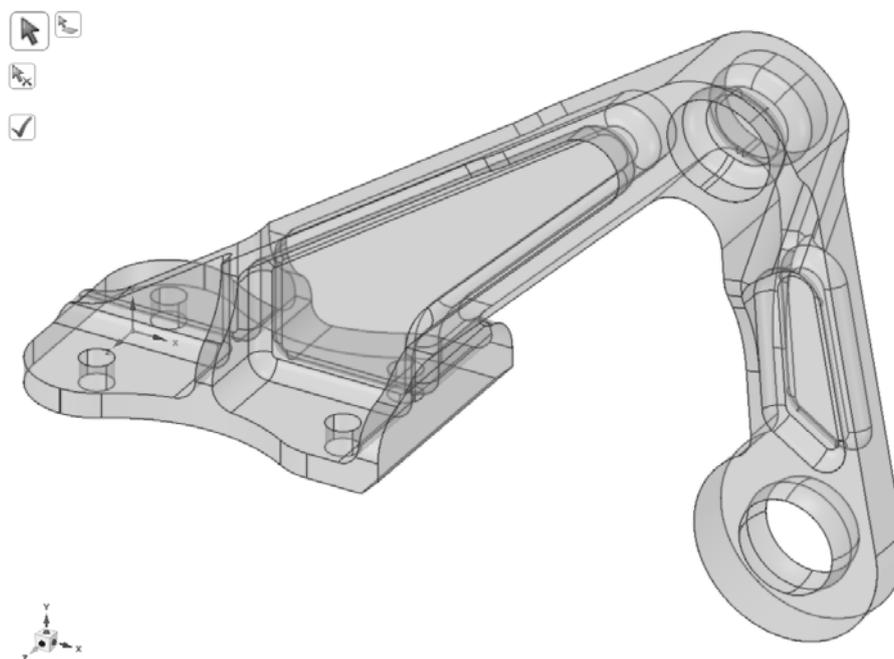


Рисунок 1.4 – Подсвеченные кромки нессшитых поверхностей геометрической модели

После нажатия кнопки с зеленым флажком происходит сшивание поверхностей и образуется твердое тело, на котором можно построить сетку из объемных конечных элементов.

Дополнительно можно поискать и удалить точки разделения ребер с помощью инструмента «Разделить ребра» (Split edges).

На этом подготовку геометрии к расчету можно считать законченной и закрыть геометрический редактор.

На главной странице проекта следует перетянуть мышью подсистему Static Structural на вторую строку подсистемы Geometry и отпустить левую клавишу мыши. Тем самым происходит связывание модулей подсистем (рисунок 1.5).

Двойным щелчком по четвертой строке подсистемы Static Structural (Model) запустить единую среду для подготовки расчетной модели, выполнения расчета и анализа результатов ANSYS Mechanical. После запуска в левой части появится

дерево проекта, состоящее из нескольких разделов (рисунок 1.6). Работа с деревом производится сверху вниз, в соответствующие разделы добавляются настройки для построения расчетной сетки, нагрузки, граничные условия, необходимые результаты и т. д. В контекстном меню, вызываемом правой клавишей мыши, каждого раздела дерева проекта можно найти необходимые команды.

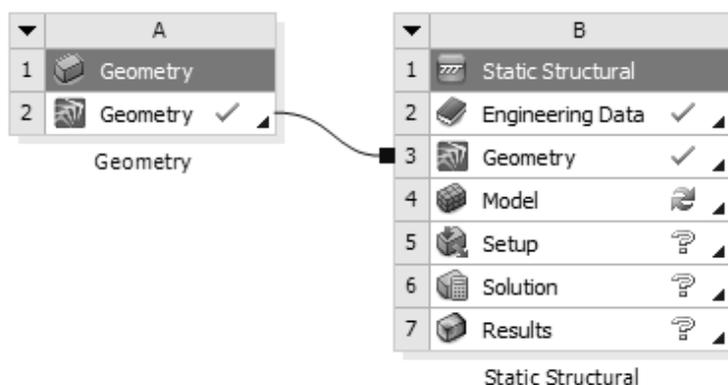


Рисунок 1.5 – Подключение расчетной системы Static Structural

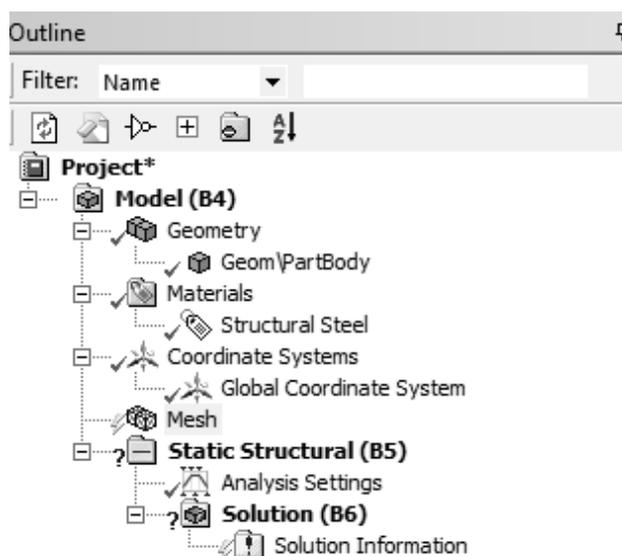


Рисунок 1.6 – Структура дерева проекта в среде ANSYS Mechanical

Построить сетку конечных элементов со средним размером 2...3 мм. Изучить основные настройки и параметры. Оценить размерность модели (количество элементов и узлов) в разделе Statistics (рисунок 1.7).

Закрепить модель по отверстиям и приложить силу величиной 1500 Н, направленную вертикально вниз (рисунок 1.8).

В качестве результатов построить эпюры эквивалентных напряжений, суммарных перемещений и максимальных главных напряжений. Сохранить проект в рабочей директории и запустить расчет.

По окончании расчета проанализировать заказанные результаты.

Изучить перечень возможных для визуализации результатов. По желанию создать дополнительные эпюры результатов и проанализировать их.

Сделать выводы, оформить отчет.

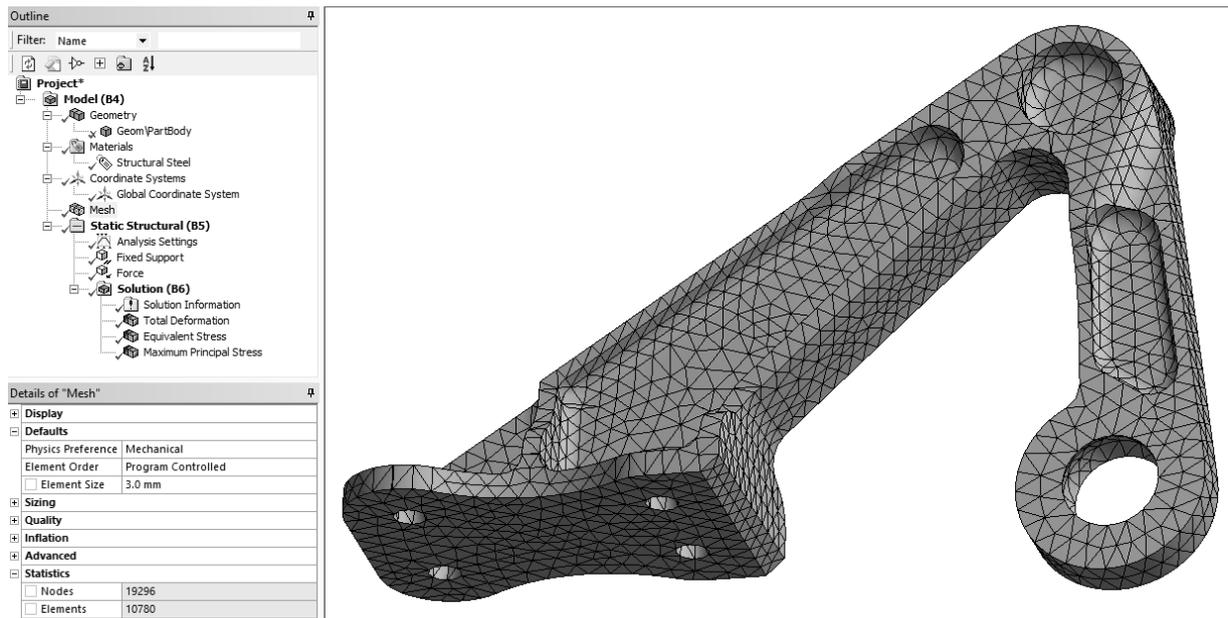


Рисунок 1.7 – Расчетная сетка конечных элементов и дерево проекта

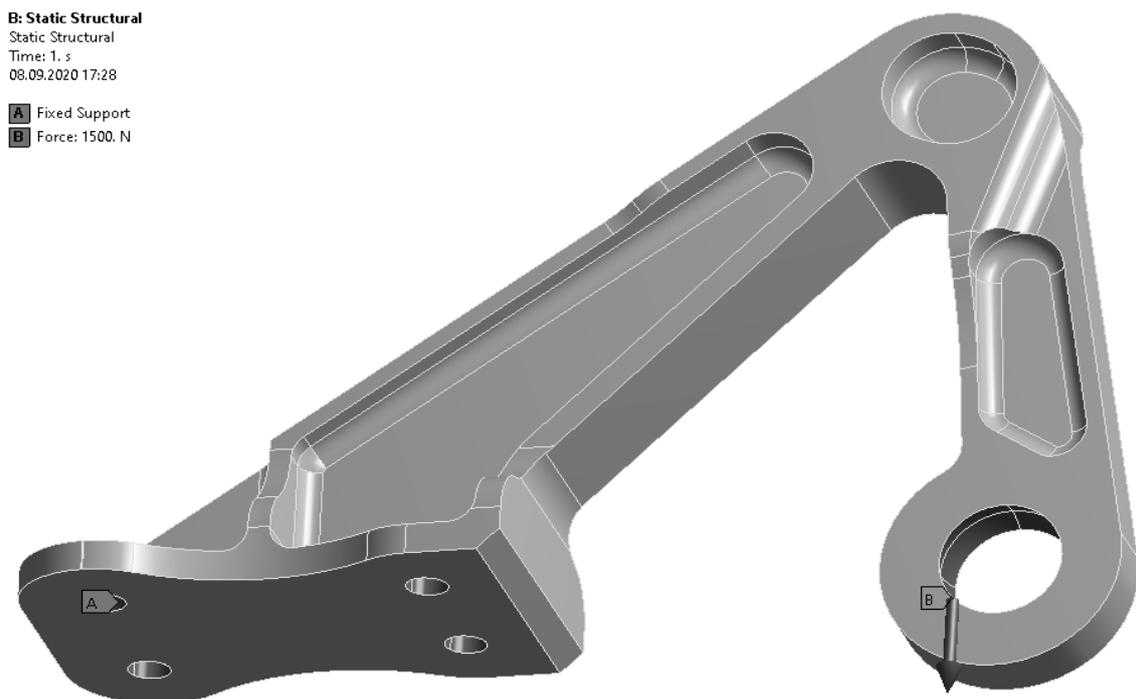


Рисунок 1.8 – Граничные условия и нагрузка

Контрольные вопросы

- 1 Какие этапы инженерного анализа реализуются в каждом элементе блока Static Structural?
- 2 Можно ли изменить вид инженерного анализа в блоке, не удаляя его?
- 3 Что показывают значки в правой части каждого элемента блока?
- 4 Как вызывается контекстное меню блока? Какие команды оно содержит?

2 Лабораторная работа № 2. Статический линейный анализ объемных конструкций

Цель работы: получить навыки подготовки и расчета конструкций с помощью объемных конечных элементов.

2.1 Общие сведения

Построение пространственной сетки – один из важнейших этапов в решении задач сплошной среды методами конечных объемов и конечных элементов. Качественная расчетная сетка в большинстве случаев является одним из ключевых аспектов получения достоверных результатов численного решения. Более того, расчет на сетке, которая недостаточно хорошо соответствует конкретной задаче, может привести к снижению точности решения, отсутствию сходимости, возникновению различного рода неустойчивостей и разрушению численного решения.

С уменьшением размеров элементов сетка более точно аппроксимирует геометрию расчетной области, что позволяет получить более точное решение исходной задачи. При этом следует учитывать, что чем меньше размеры сеточных элементов, тем выше затраты вычислительных ресурсов, необходимых для проведения расчета, поэтому необходимо искать оптимум между соотношением этих показателей.

Деформация сеточного элемента характеризуется степенью его отклонения от некоторого базисного элемента. Элементы сетки должны получаться из базисных с помощью взаимно-однозначного невырожденного преобразования. Характеристиками деформации сеточного элемента служат отношения длин ребер элемента, углы между соприкасающимися ребрами и т. д.

При построении расчетных сеток следует помнить, что наилучшей для расчета можно считать такую сетку, которая позволит достигнуть максимальной эффективности при вычислении искомых физических величин в заданной геометрии.

2.2 Порядок выполнения работы

Добавить в проект шаблон статического анализа Static Structural. Подключить файл геометрии SAPR_CAE_lab_02.scdoc. Модель представляет собой проушину гидравлического цилиндра.

Установить средний размер конечного элемента, равный 10 мм. Добавить метод построения сетки Tetrahedrons (Patch Conforming) и применить его к детали (рисунок 2.1).

Построить расчетную сетку. В разделе Statistics окна Details of Mesh посмотреть и записать количество конечных элементов и узлов.

Жестко закрепить переднюю грань проушины с помощью граничного условия Fixed Support.

К поверхности отверстия приложить нагрузку от подшипника Bearing Load величиной 480 кН. Нагрузка должна растягивать проушину (рисунок 2.2).

Выполнить расчет. Построить эпюры эквивалентных напряжений, суммарных перемещений. Записать максимальные значения результатов.

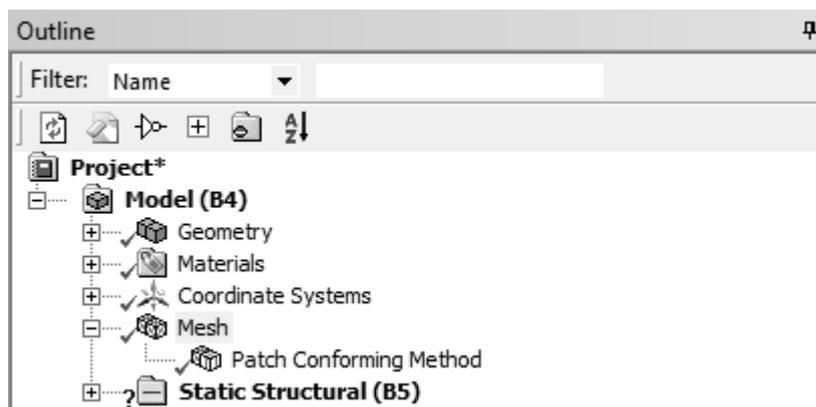


Рисунок 2.1 – Установка метода построения расчетной сетки

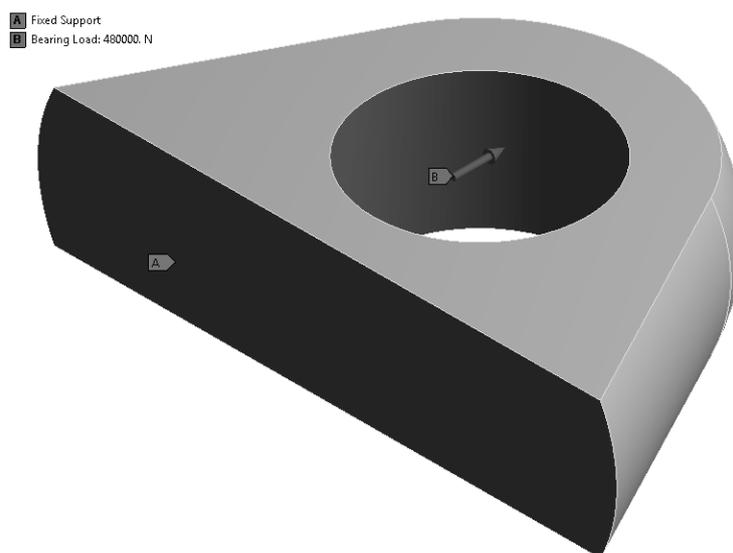


Рисунок 2.2 – Граничные условия и нагрузка

Изменить метод построения сетки на Hex Dominant и перестроить расчетную сетку (рисунок 2.3). Записать количество узлов и элементов. Повторить расчет. Записать максимальные значения результатов.

В разделе Quality окна Details of Mesh установить параметр Mesh Metric = Element Quality и оценить качество расчетной сетки (рисунок 2.4). Обратить внимание на тип конечных элементов, присутствующих в модели.

Удалить метод построения сетки. В этом случае сеточный генератор автоматически подберет подходящий тип конечного элемента. Перестроить сетку и оценить ее качество (рисунок 2.5).

Запустить расчет заново и записать максимальные значения результатов. Заполнить таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчетов

Метод построения сетки	Число узлов	Число элементов	u_{\max} , мм	σ_{\max} , МПа
Tetrahedrons				
Hex Dominant				
Automatic				

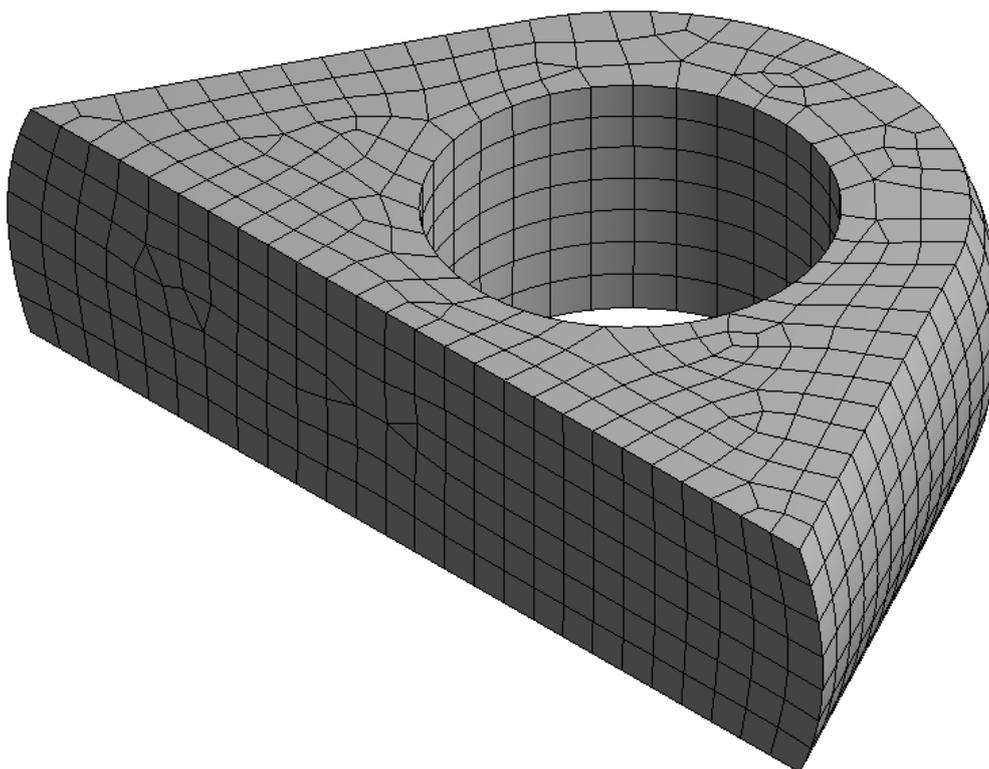


Рисунок 2.3 – Расчетная сетка, построенная методом Hex Dominant

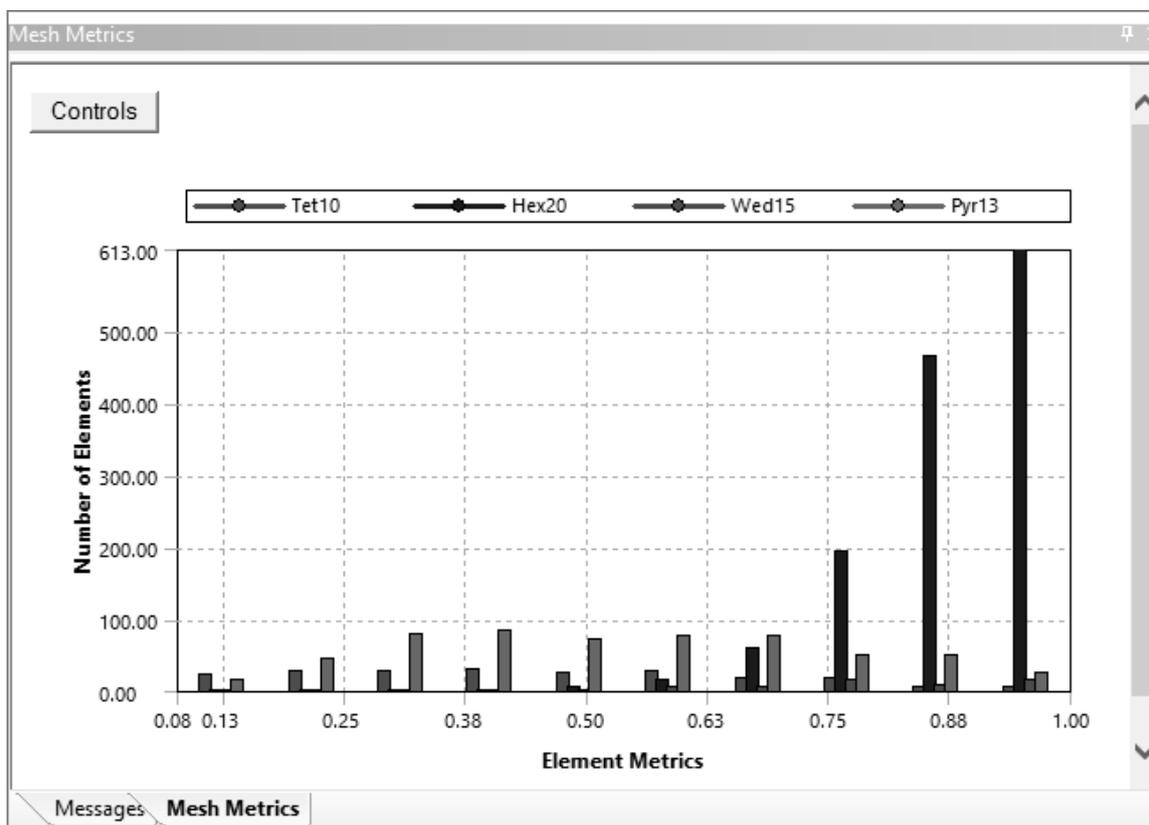


Рисунок 2.4 – Гистограмма качества расчетной сетки, построенной методом Hex Dominant

Сделать выводы, оформить отчет.

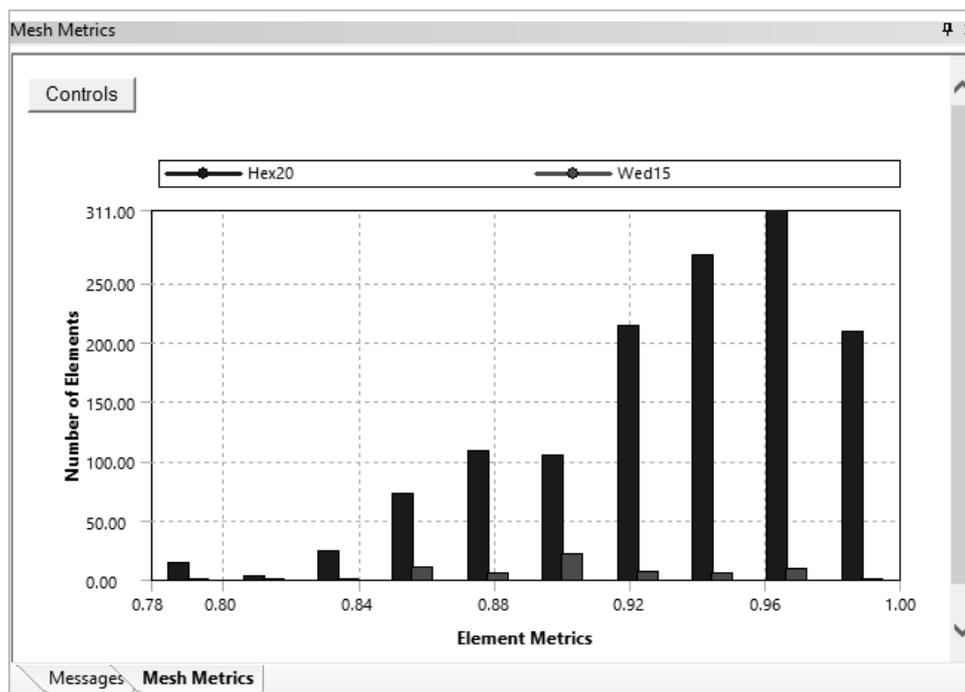


Рисунок 2.5 – Гистограмма качества расчетной сетки, построенной с настройками по умолчанию

Контрольные вопросы

- 1 Типы объемных конечных элементов. Понятие степени свободы конечного элемента.
- 2 Показатели оценки качества конечного элемента (метрики).
- 3 Методы построения расчетных сеток.
- 4 Глобальное и локальное управление размером конечного элемента.

3 Лабораторная работа № 3. Статический линейный анализ тонкостенных конструкций

Цель работы: получить практические навыки постановки и решения задачи линейного статического анализа тонкостенных конструкций с помощью оболочечных конечных элементов.

3.1 Описание модели

Модель представляет собой пространственную деталь из листового металла (рисунок 3.1). Подобные модели обычно имеют толщину, значительно меньшую по сравнению с двумя другими размерами, поэтому для их анализа удобно применять оболочечные конечные элементы (КЭ).

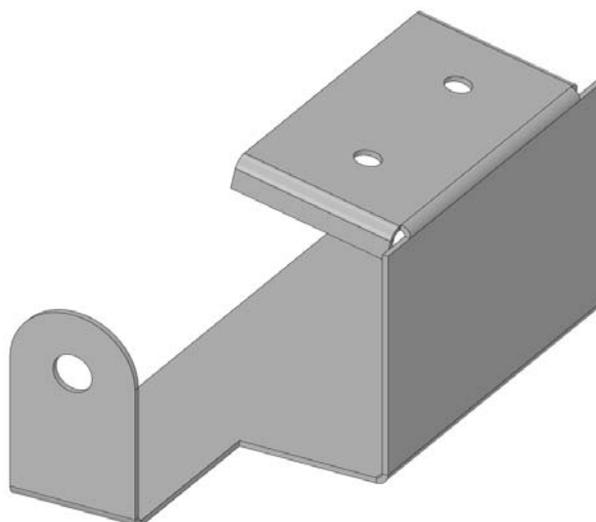


Рисунок 3.1 – Деталь из листового металла

3.2 Порядок выполнения работы

Восстановить проект из архива SAPR_CAE_lab_03.wbpz.

Для работы с оболочечными КЭ необходимо выделить срединные поверхности детали. Это можно выполнить с помощью инструмента «Средняя поверхность» (Midsurface) на панели инструментов «Подготовить» (Prepare) редактора SpaceClaim, настроив его параметры, как показано на рисунке 3.2, и выбрав тело детали в графическом окне.

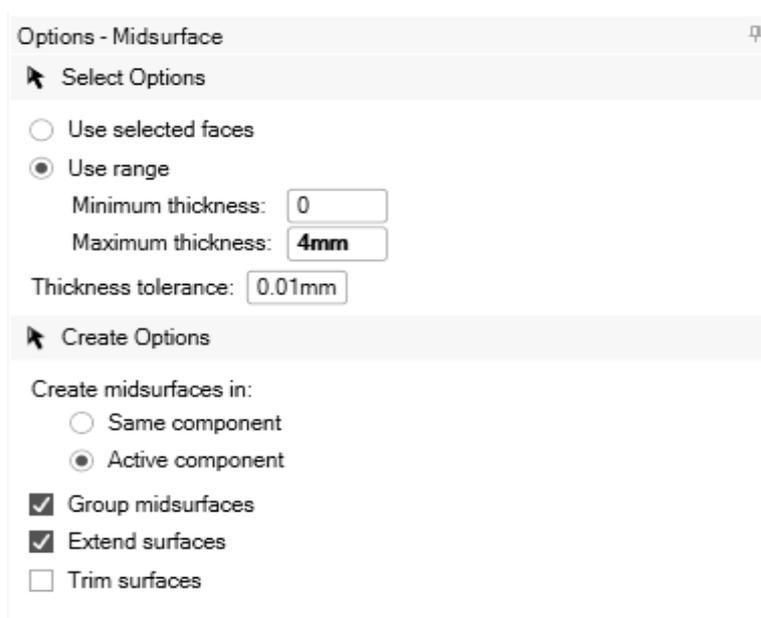


Рисунок 3.2 – Настройки для выделения срединных поверхностей детали

В результате выполнения этой операции в модели будет создано новое поверхностное тело, которому автоматически присвоится толщина, соответствующая исходной модели. Модель из листового металла будет автоматически погашена для решателя и скрыта из рабочей области.

Построить расчетную сетку, подобрав размер КЭ так, чтобы на закруглениях модели было как минимум три элемента. Использовать принудительную установку второго порядка конечного элемента (Element Order = Quadratic).

Жестко зафиксировать кромки всех отверстий. Приложить давление величины 6900 Па на грань модели, как показано на рисунке 3.3.

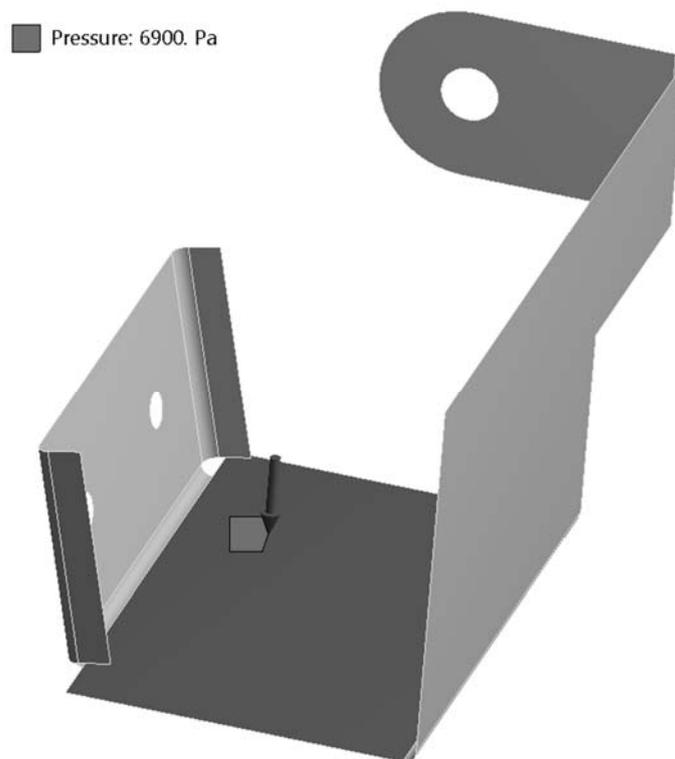


Рисунок 3.3 – Задание давления на грань модели

Выполнить расчет. Вывести эквивалентные напряжения на верхней, средней и нижней поверхностях оболочки. Определить величины и направления реакций в заделках отверстий.

Сделать выводы, оформить отчет.

Контрольные вопросы

- 1 Основные предпосылки для использования оболочечных конечных элементов.
- 2 Настройки инструмента «Средняя поверхность» для преобразования объемных моделей в оболочечные.
- 3 Виды оболочечных конечных элементов в ANSYS Workbench. Степени свободы конечных элементов.

4 Лабораторная работа № 4. Анализ контактных взаимодействий в сборочных единицах

Цель работы: получить практические навыки постановки и решения задачи анализа соединений с натягом в ANSYS Workbench.

4.1 Описание модели

Модель представляет собой полый вал наружным диаметром 50 мм. На вал напрессована втулка по посадке H7/p6. Наружный диаметр втулки – 75 мм. На рисунке 4.1 показана четверть расчетной модели.

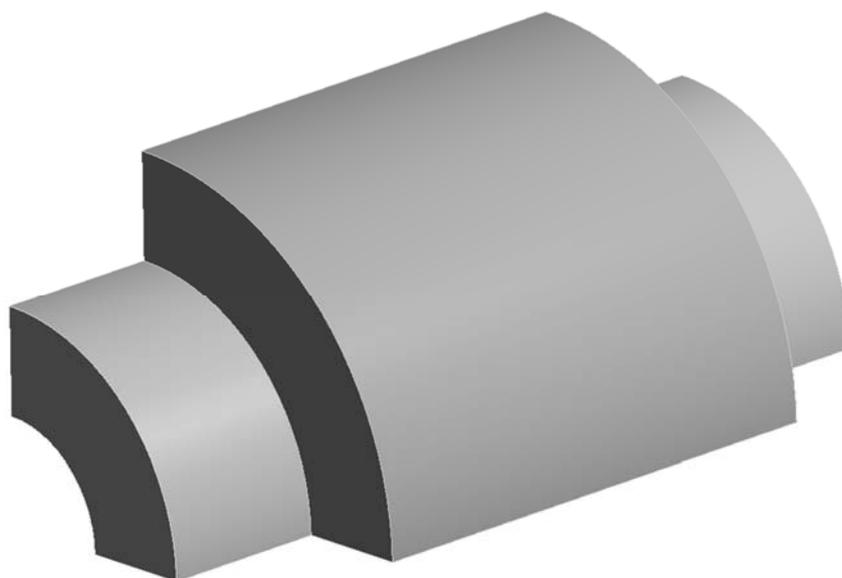


Рисунок 4.1 – Модель вала со втулкой для анализа посадки с натягом

Требуется определить распределение контактных напряжений по внутренней поверхности втулки и по наружной поверхности вала, а также найти максимальные радиальные напряжения во втулке.

4.2 Порядок выполнения работы

Вследствие круговой симметрии модели для экономии вычислительных ресурсов можно подвергнуть анализу угловой сектор величиной 10...30 град.

Создать геометрические модели вала и втулки в SpaceClaim, предполагая, что в соединении обеспечивается максимальный натяг, равный 0,042 мм. Длина вала равна 100 мм, втулки – 60 мм. Создать сборку из деталей, расположив втулку симметрично относительно длины вала.

Создать новый проект ANSYS Workbench, поместить в рабочую область шаблон статического анализа Static Structural. Материал обеих деталей оставить по умолчанию.

Задать необходимые граничные условия симметрии.

Задать контактное взаимодействие между поверхностями деталей, настроив параметры, как показано на рисунке 4.2.

+ Scope	
- Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0.12
Scope Mode	Automatic
Behavior	Asymmetric
Trim Contact	Program Controlled
Trim Tolerance	0.287228 mm
Suppressed	No
- Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Small Sliding	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Auto Detection Value
Auto Detection Value	0.287228 mm
Time Step Controls	None
+ Geometric Modification	

Рисунок 4.2 – Настройки контактного взаимодействия вала и втулки

В настройках решателя в разделе Solver Controls выставить параметры Solver Type = Direct и Weak Springs = On.

Построить сетку конечных элементов. Сохранить проект и запустить расчет.

После окончания расчета с помощью инструмента Contact Tool вывести и проанализировать эпюру распределения контактного давления на поверхностях вала и втулки.

Вывести на экран эпюру радиальных напряжений для вала и втулки. Для этого необходимо создать полярную систему координат и ориентировать ее так, чтобы ось Z совпадала с осями вала и втулки.

Построить и проанализировать график распределения радиальных напряжений по длине втулки, выбрав одну из ее кромок, расположенных в зоне контакта с валом (рисунок 4.3). Сделать вывод о характере распределения напряжений.

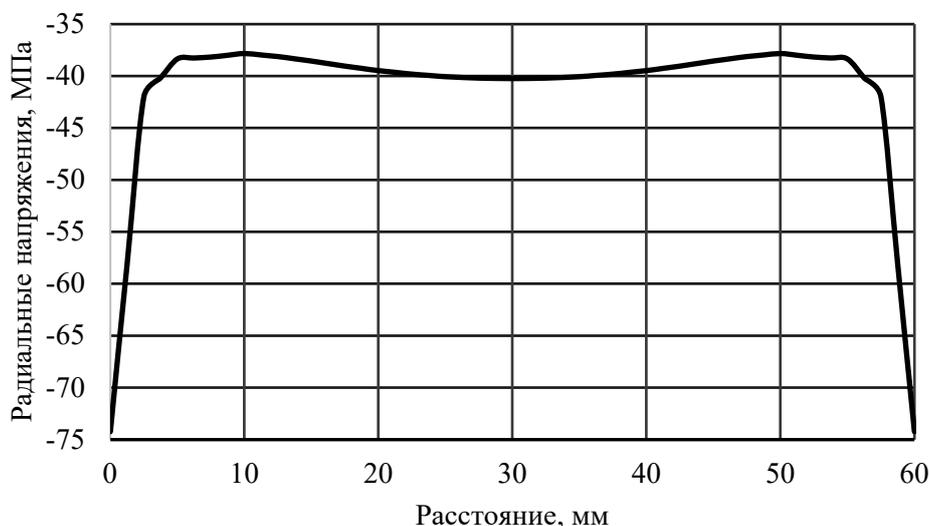


Рисунок 4.3 – Распределение радиальных напряжений по длине втулки

Оформить отчет.

Контрольные вопросы

- 1 Этапы постановки задачи анализа прессовых соединений.
- 2 Особенности учета контактных взаимодействий при анализе прессовых соединений.
- 3 Соответствие осей декартовой и полярной систем координат.
- 4 Особенности вывода результатов по граням и кромкам модели.

5 Лабораторная работа № 5. Анализ контактных взаимодействий в сборочных единицах

Цель работы: получить практические навыки постановки и решения многошаговых контактных задач.

5.1 Описание модели

Модель представляет собой цилиндр с уплотнительным кольцом и втулкой (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Модель цилиндра с уплотнительным кольцом и втулкой

Цилиндр жестко зафиксирован. Необходимо смоделировать процесс сборки уплотнительного узла. Для этого на первом этапе следует устранить интерференцию кольца и цилиндра, задав соответствующие настройки контакту, а на втором этапе переместить втулку вверх на 10 мм. Также нужно определить усилие, необходимое для сборки узла.

Для упрощения расчета задача будет решаться в осесимметричной постановке.

5.2 Порядок выполнения работы

Восстановить проект из архива SAPR_CAE_lab_05.wbpz и ознакомиться со свойствами материалов, заданными в разделе Engineering Data проекта.

Создать контакт между кромками уплотнительного кольца и цилиндра (рисунок 5.2), задав следующие параметры:

- Type = Frictional;
- Friction Coefficient = 0,2;
- Behavior = Asymmetric;
- Trim Contact = Off;
- Small Sliding = Off;
- Pinball Region = Radius;
- Pinball Radius = 2 mm;
- Interface Treatment = Add Offset, Ramped Effects.



Рисунок 5.2 – Задание контакта между кромками цилиндра и кольца

Создать контакт между кромками уплотнительного кольца и втулки (рисунок 5.3), задав аналогичные параметры.



Рисунок 5.3 – Задание контакта между кромками кольца и втулки

Построить расчетную сетку, выполнив необходимые настройки (рисунок 5.4).

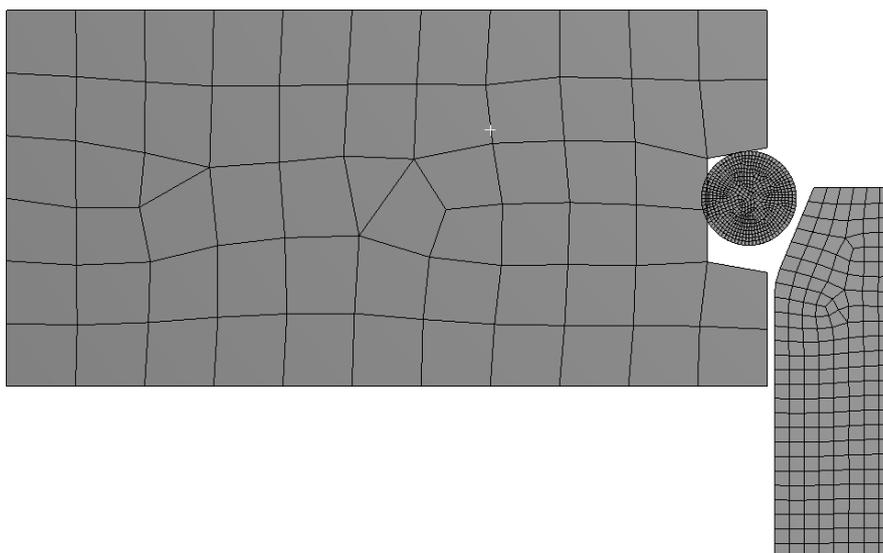


Рисунок 5.4 – Расчетная сетка (примерный вид)

Задать следующие настройки решателя в разделе Analysis Settings дерева проекта (рисунок 5.5):

- Number Of Steps = 2;
- Auto Time Stepping = On;
- Define By = Substeps;
- Initial Substeps = 5;
- Minimum Substeps = 3;
- Maximum Substeps = 10;
- Large Deflections = On;
- Newton-Raphson Option = Unsymmetric.

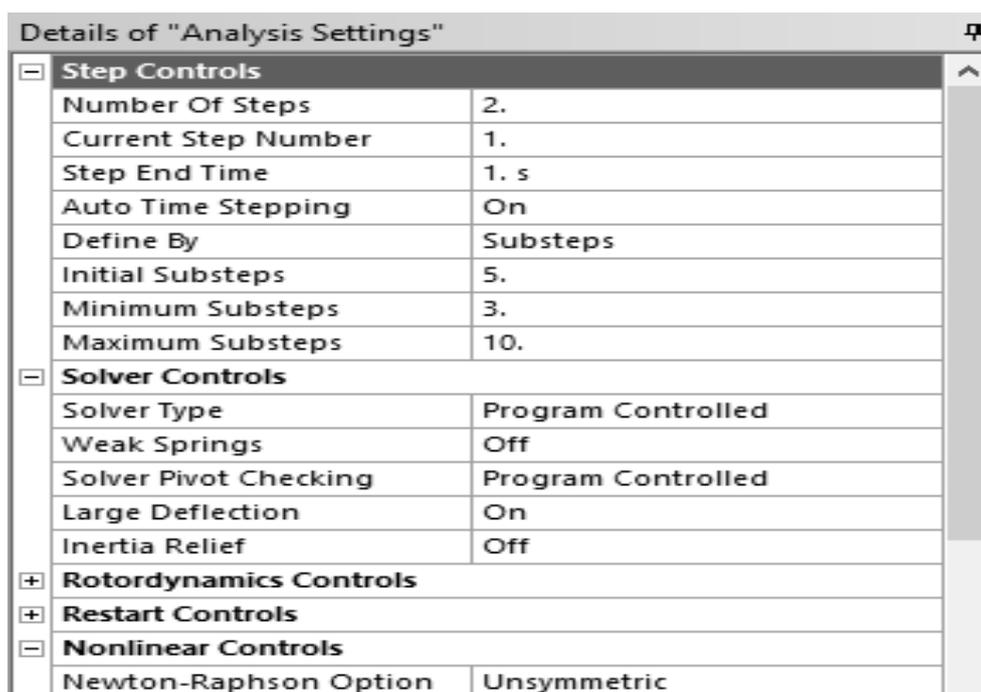


Рисунок 5.5 – Настройки решателя

Для второго шага решения (Current Step Number = 2) установить следующие значения параметров:

- Define By = Substeps;
- Initial Substeps = 25;
- Minimum Substeps = 5;
- Maximum Substeps = 1000.

Жестко зафиксировать грань цилиндра (Fixed Support).

Задать перемещение кромке втулки вдоль оси Y на 10 мм в течение второго шага решения (рисунок 5.6).

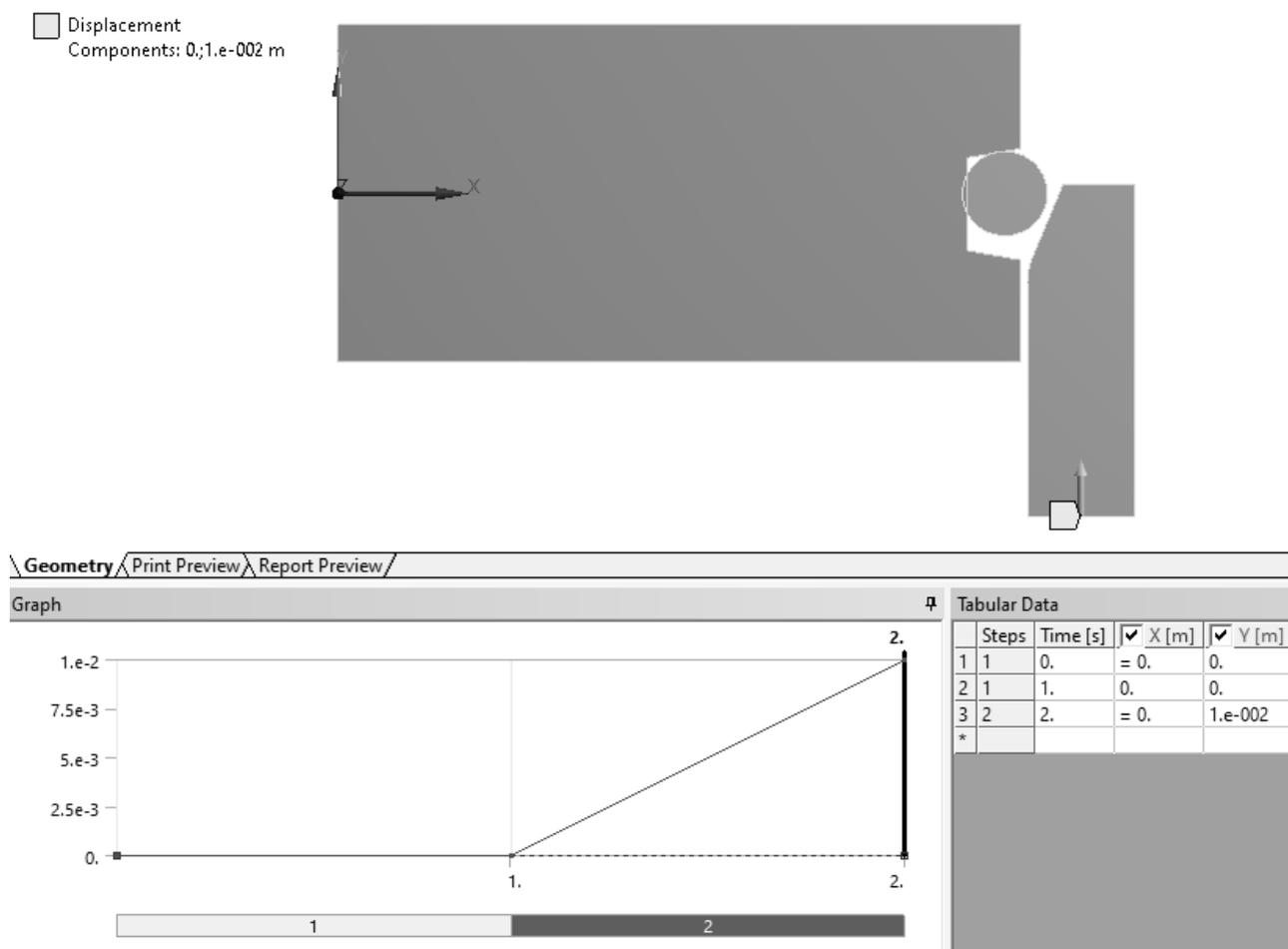


Рисунок 5.6 – Задание перемещения втулки на втором шаге решения

Сохранить проект и запустить расчет.

По окончании расчета построить и проанализировать эпюры перемещений и эквивалентных напряжений. С помощью инструмента Contact Tool построить и проанализировать эпюры состояния контактов, давления на поверхностях, величины взаимного проникновения поверхностей и т. д.

Построить и проанализировать график силы, требуемой для сборки узла.

Сделать выводы, оформить отчет.

Контрольные вопросы

- 1 Типы контактных взаимодействий в ANSYS Workbench.
- 2 Основные настройки для автоматического распознавания контактных пар.
- 3 Критерии назначения контактных и целевых поверхностей. Симметричный и несимметричный контакт.
- 4 Назначение параметра Pinball Region.
- 5 Анализ результатов решения контактных задач.

6 Лабораторная работа № 6. Анализ разъемных соединений. Методики моделирования болтовых соединений

Цель работы: получить практические навыки постановки и решения задачи анализа болтовых соединений с помощью ANSYS Workbench.

6.1 Описание модели

В качестве модели для анализа предлагается болтовое соединение проушины с основанием (рисунок 6.1).



Рисунок 6.1 – Болтовое соединение проушины и основания

Проушина крепится к основанию с помощью четырех болтов М10. Усилие предварительной затяжки каждого болта составляет 8500 Н.

На поверхность отверстия проушины действует нагрузка от подшипника (Bearing Load) с проекциями на оси глобальной системы координат, равными $F_y = 7000$ Н, $F_z = 2000$ Н.

Требуется определить напряженно-деформированное состояние проушины и болтов, а также распределение контактного давления в стыке для двух состояний: после затяжки болтов и после дополнительного действия внешней нагрузки.

Как правило, задачи анализа болтовых соединений решаются за два шага.

На первом к болтам прикладываются усилия предварительной затяжки (Bolt Pretension), а на втором затяжка болтов фиксируется (Lock) и прикладываются внешние нагрузки. При запуске расчета оба шага решаются последовательно в автоматическом режиме. По окончании расчета у пользователя есть возможность вывести и проанализировать результаты в конце каждого из шагов решения.

10.2 Порядок выполнения работы

Восстановить проект из архива с именем SAPR_CAE_lab_06.wbpz.

Подготовить геометрическую модель для расчета: разделить поверхности и/или тела, создать новые компоненты, изменить параметры совместного использования компонентов и т. д.

Обновить расчетную модель. Создать контактные взаимодействия между компонентами модели, настроив их параметры.

Создать расчетную сетку КЭ, задав, если необходимо, локальные настройки сеточного генератора: метод построения сетки, размер КЭ, тип разбиения поверхностей и т. д.

В настройках анализа (Analysis Settings/Step Controls) указать, что задача будет решаться за два шага (рисунок 6.2).

Step Controls	
Number Of Steps	2.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	Program Controlled
+ Solver Controls	
+ Rotordynamics Controls	
+ Restart Controls	
+ Nonlinear Controls	
+ Output Controls	
+ Analysis Data Management	
+ Visibility	

Рисунок 6.2 – Настройка количества шагов решения

На первом шаге задать болтам усилие предварительной затяжки, равное 8500 Н (рисунок 6.3). На втором шаге зафиксировать это усилие (параметр Define Bu = Lock на рисунке 6.4).

Задать модели граничные условия и нагрузки. Зафиксировать нижнюю грань основания. Приложить нагрузку от подшипника к поверхности отверстия проушины. Выполнить расчет.

Построить и проанализировать эпюры эквивалентных напряжений для проушины и болтов для каждого шага решения. С помощью инструментов Contact Tool и Bolt Tool проанализировать состояние стыка и нагрузку в болтах.

Сделать выводы. Оформить отчет.

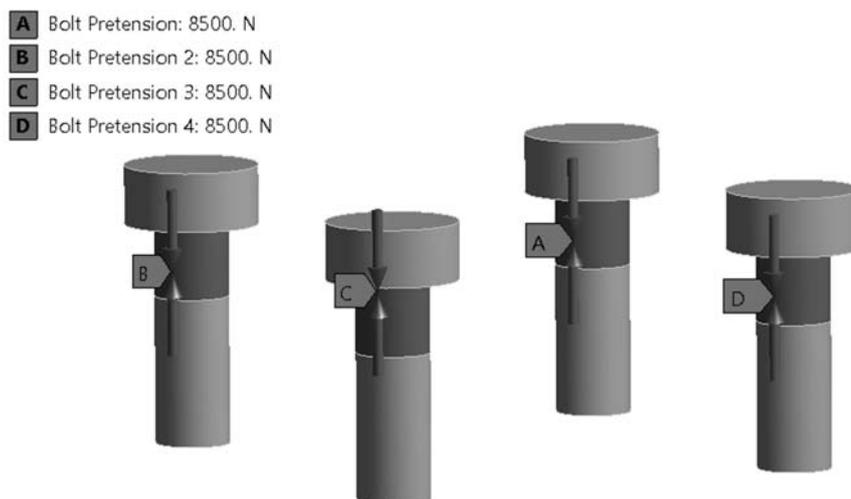


Рисунок 6.3 – Задание предварительной затяжки болтов на первом шаге

Tabular Data					
	Steps	<input checked="" type="checkbox"/> Define By	<input checked="" type="checkbox"/> Preload [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Preadjustment [mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Increment [mm]
1	1.	Load	8500.	N/A	N/A
2	2.	Lock	N/A	N/A	N/A
*					

Рисунок 6.4 – Фиксация предварительной затяжки болта на втором шаге

Контрольные вопросы

- 1 Этапы подготовки и решения задач с болтовыми соединениями.
- 2 Способы моделирования болтовых соединений, их преимущества и недостатки.
- 3 Особенности настройки контактного взаимодействия деталей в задачах с болтовыми соединениями.

7 Лабораторная работа № 7. Анализ разъемных соединений. Методики моделирования болтовых соединений

Цель работы: получить практические навыки постановки и решения задачи анализа болтовых соединений с помощью ANSYS Workbench.

7.1 Описание модели

Модель представляет собой фланцевое болтовое соединение с прокладкой (рисунок 7.1). В отличие от предыдущей работы болт смоделирован балочным элементом, что позволит упростить расчет. Кроме того, из-за симметрии конструкции моделируется сектор величиной 30°.

Болт в данном случае будет крепиться к фланцам с помощью двух шарниров

типа Fixed с определенными настройками, чтобы смоделировать передачу нагрузок на фланцы через головку болта и гайку.

Подробнее с методами моделирования болтовых соединений, их преимуществами и недостатками можно ознакомиться в [5].

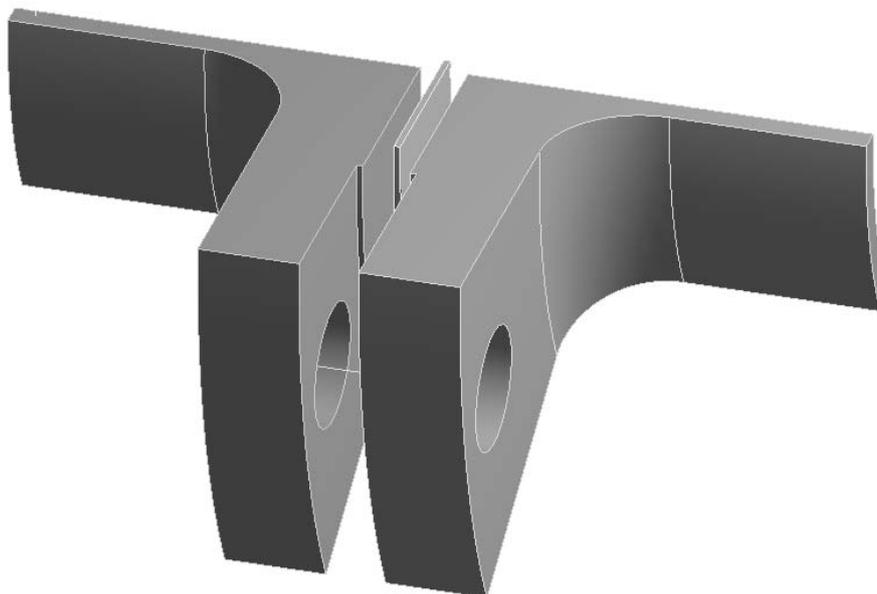


Рисунок 7.1 – Модель фланцевого соединения в разнесенном состоянии

7.2 Порядок выполнения работы

Восстановить проект из архива с именем SAPR_CAE_lab_07.wbpz. Ознакомиться с деревом проекта и выполненными предварительными настройками сеточного генератора, контактов, решателя и т. д. Обратит внимание, что один из контактов имеет тип Rough, что позволит ему раскрыться при отсутствии скольжения.

Задача будет решаться за три шага: на первом болт нагружается силой предварительной затяжки; второй шаг будет своеобразной «паузой», что даст возможность внутренним силам перераспределиться в стыке; на третьем шаге прикладываются внешние нагрузки – растягивающая сила и внутреннее давление. Кроме того, подобное разделение процесса решения на шаги дает возможность проводить анализ результатов в конце каждого из них.

К внутренним поверхностям фланцев приложено нормальное давление величиной 6,9 МПа (рисунок 7.2).

К торцу одного из фланцев приложена нормальная сила величиной 4600 Н (рисунок 7.3).

В раздел Connections дерева проекта добавить шарнир типа Fixed. В качестве опорного элемента (Reference) указать верхнюю вершину балочного элемента, а в качестве подвижного элемента (Mobile) – верхнюю грань верхнего фланца (рисунок 7.4). Ввести значение параметра Pinball Region, равное 10,2 мм, для моделирования головки болта.

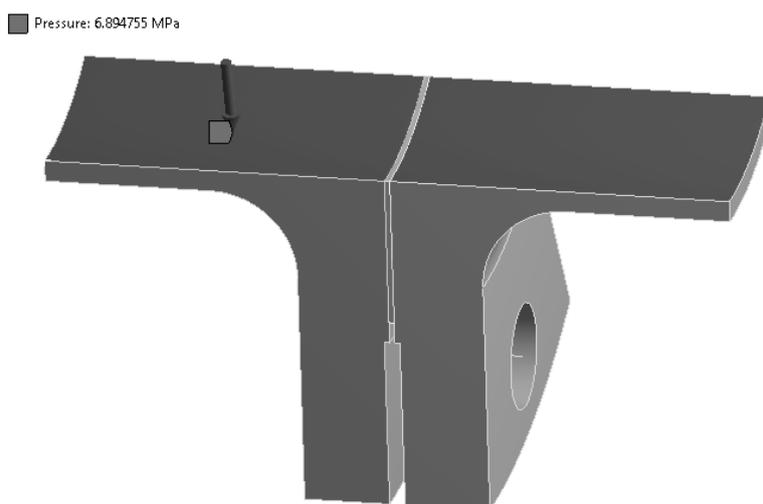


Рисунок 7.2 – Нормальное давление на внутренних поверхностях фланцев

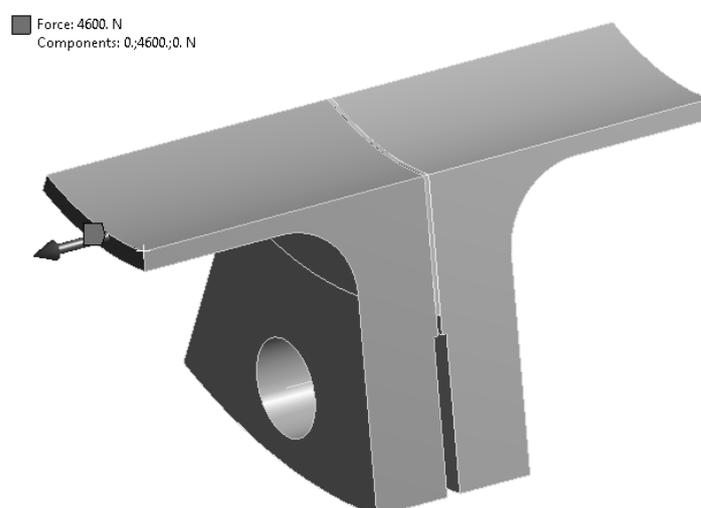


Рисунок 7.3 – Растягивающая фланцы сила

Details of "Fixed - Line Body To upper flange"	
Definition	
Connection Type	Body-Body
Type	Fixed
Solver Element Type	Program Controlled
Suppressed	No
Element APDL Name	
Reference	
Scoping Method	Geometry Selection
Applied By	Remote Attachment
Scope	1 Vertex
Body	Line Body
Coordinate System	Reference Coordinate System
Pinball Region	All
Mobile	
Scoping Method	Geometry Selection
Applied By	Remote Attachment
Scope	1 Face
Body	upper flange
Initial Position	Unchanged
Behavior	Rigid
Pinball Region	10.2 mm

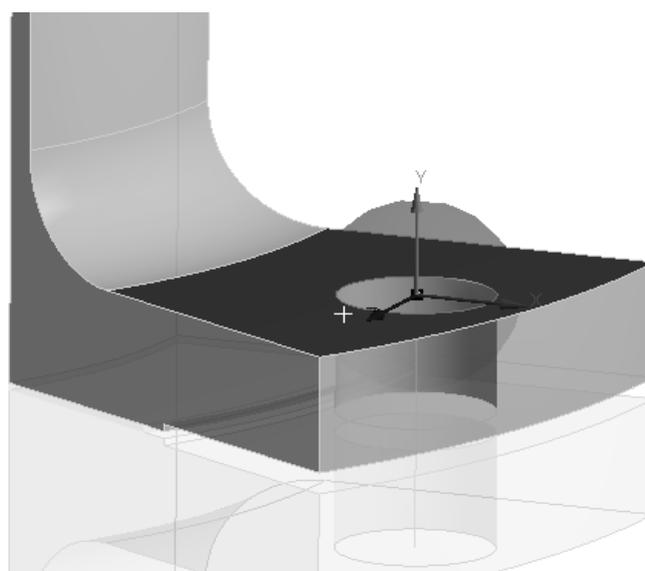


Рисунок 7.4 – Соединение вершины балочного элемента с гранью верхнего фланца шарниром

Добавить еще один шарнир и аналогичным образом смоделировать соединение гайки с поверхностью нижнего фланца.

Выбрать балочный элемент и задать на нем силу предварительной затяжки болта величиной 44500 Н на первом шаге (рисунок 7.5), на втором и третьем шагах зафиксировать ее (рисунок 7.6).

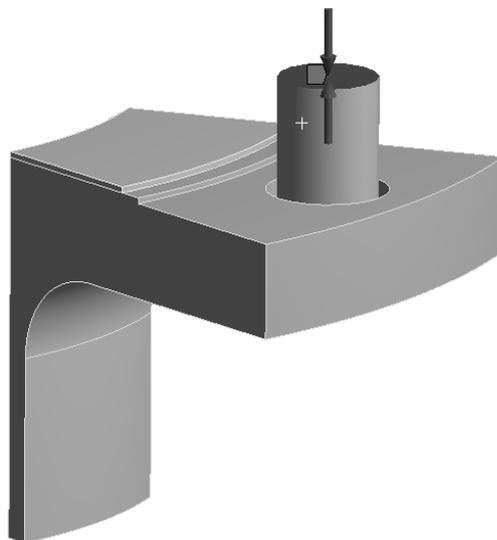


Рисунок 7.5 – Задание силы предварительной затяжки болта на первом шаге решения

Tabular Data					
	Steps	<input checked="" type="checkbox"/> Define By	<input checked="" type="checkbox"/> Preload [N]	<input checked="" type="checkbox"/> Preadjustment [mm]	<input checked="" type="checkbox"/> Increment [mm]
1	1.	Load	44500.	N/A	N/A
2	2.	Lock	N/A	N/A	N/A
3	3.	Lock	N/A	N/A	N/A

Рисунок 7.6 – Фиксация силы предварительной затяжки болта на втором и третьем шагах

Сохранить проект и запустить решение.

По окончании решения построить и проанализировать эпюры перемещений, эквивалентных напряжений. Измерить осевую нагрузку болта, объяснить характер ее изменения в ходе решения.

Построить эпюры состояния и давления в контактной паре типа Rough между прокладкой и верхним фланцем. Объяснить результат.

Сделать выводы. Оформить отчет.

Контрольные вопросы

- 1 Этапы подготовки и решения задач с болтовыми соединениями.
- 2 Способы моделирования болтовых соединений, их преимущества и недостатки.
- 3 Особенности настройки контактного взаимодействия деталей в задачах с болтовыми соединениями.

8 Лабораторная работа № 8. Статический нелинейный анализ конструкций. Задание нелинейных свойств материала

Цель работы: получить практические навыки постановки и решения задачи анализа конструкций с учетом нелинейностей материала.

8.1 Общие сведения

Нелинейности вынуждают конструкцию или ее составные части реагировать на приложенную нагрузку непропорционально ее величине. На самом деле все конструкции являются нелинейными, но иногда эффекты нелинейности достаточно малы, и ими можно пренебречь при анализе. Однако если установлено, что нелинейные эффекты сильно сказываются на поведении системы и ими нельзя пренебречь, задачу следует решать в нелинейной постановке.

Виды нелинейностей могут быть разделены на три группы:

- 1) геометрическая;
- 2) физическая (нелинейности поведения материала);
- 3) контактная или конструктивная (изменение статуса контакта).

8.2 Описание модели

Часть струбцины зафиксирована и нагружена, как показано на рисунке 8.1.

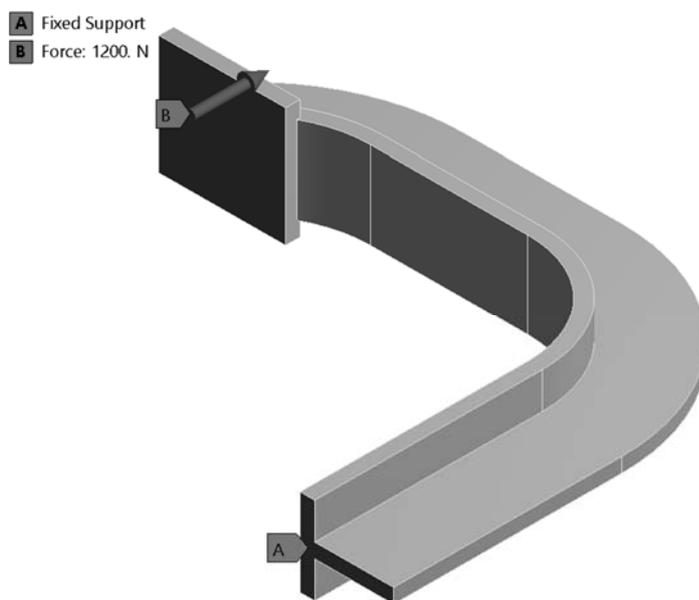


Рисунок 8.1 – Расчетная модель струбцины

Материал струбцины обладает нелинейными свойствами и имеет следующую кривую зависимости напряжения σ от деформации ε (рисунок 8.2).

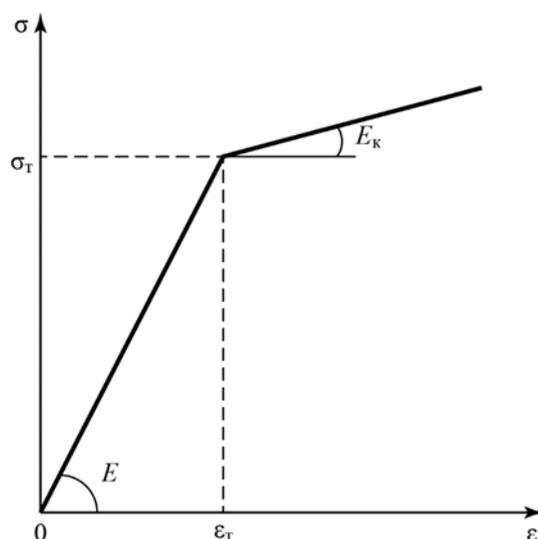


Рисунок 8.2 – Кривая «напряжение – деформация» материала струбцины

8.3 Порядок выполнения работы

Создать новый проект и поместить в него шаблон статического анализа Static Structural.

В модуле Engineering data создать новый материал, используя модель упрочнения Bilinear Isotropic Hardening. Задать параметры материала, как показано на рисунке 8.3.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	<input checked="" type="checkbox"/> Material Field Variables	Table			
3	<input checked="" type="checkbox"/> Density	1020	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
5	Derive from	Young's ...			
6	Young's Modulus	2.067E+11	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Poisson's Ratio	0.28			<input type="checkbox"/>
8	Bulk Modulus	1.56591E+11	Pa		<input type="checkbox"/>
9	Shear Modulus	8.07422E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
10	<input type="checkbox"/> Bilinear Isotropic Hardening			<input type="checkbox"/>	
11	Yield Strength	2.4821E+08	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Tangent Modulus	2.068E+07	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Рисунок 8.3 – Параметры материала с билинейным изотропным упрочнением

В модуль Geometry подключить файл с геометрической моделью nl_clamp.scdoc.

Создать расчетную сетку конечных элементов. Подобрать размер таким образом, чтобы по толщине полки и стойки струбцины было минимум два элемента.

Настроить параметры шага по времени, как показано на рисунке 8.4.

Задать нагрузки и граничные условия на модель. Величина нормальной

силы, действующей на площадку струбицы, – 1200 Н.

Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	Off
Define By	Time
Time Step	2.5e-002 s
+ Solver Controls	
+ Rotordynamics Controls	

Рисунок 8.4 – Настройки решателя

Выполнить расчет. По окончании решения вывести эпюры эквивалентных напряжений, суммарных перемещений, эквивалентной пластической деформации. Отметить зоны с напряжениями выше предела текучести материала. Дополнительно вывести эквивалентные напряжения в вершинах, показанных на рисунке 8.5, и отметить характер их изменения.

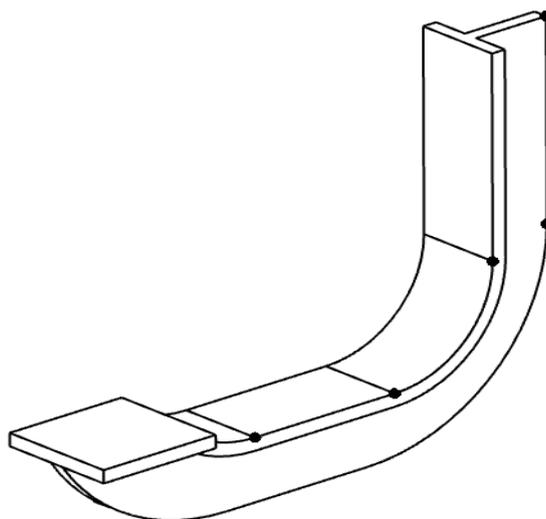


Рисунок 8.5 – Вершины модели для вывода результатов моделирования

Создать копию расчетной системы. В модуле Engineering data создать новый линейный материал и назначить его геометрической модели. Выполнить расчет модели с линейным материалом и сравнить результаты с предыдущими.

Сделать выводы. Оформить отчет.

Контрольные вопросы

1 Особенности постановки задачи исследования нелинейных конструкций. Виды нелинейностей.

2 Характерные точки кривой «напряжение – деформация» для различных материалов. Понятия предела пропорциональности, предела текучести материала.

3 Основные модели упрочнения материалов.

9 Лабораторная работа № 9. Частотный анализ конструкций

Цель работы: освоить методику постановки и решения задач анализа собственных частот и форм колебаний конструкций.

11.1 Описание модели

В качестве модели для анализа собственных частот и форм колебаний предлагается модель сварной конструкции из прокатных профилей – квадратных труб типоразмера $30 \times 30 \times 2,6$ и $40 \times 40 \times 4$ мм (рисунок 9.1).

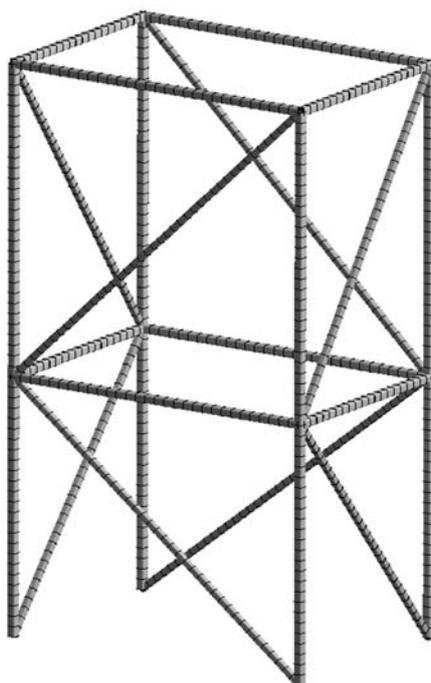


Рисунок 9.1 – Модель сварной конструкции

Объемная модель была преобразована в балочную с помощью инструмента Extract (Выделить) редактора SpaceClaim. Конструкция жестко зафиксирована по четырем нижним вершинам. Никаких внешних нагрузок нет, т. е. в результате частотного (модального) анализа будут получены частоты и формы свободных колебаний конструкции.

11.2 Порядок выполнения работы

Восстановить проект из архива с именем SAPR_CAE_lab_09.wbpz.

Следует обратить внимание на то, что в результате преобразования модели из объемной в балочную были выделены сечения профилей со своими геометрическими характеристиками (Cross Sections) и автоматически назначены соответствующим телам (рисунок 9.2).

Создать сетку конечных элементов.

В разделе настроек решателя указать количество искомых собственных ча-

стот и форм колебаний Max Modes To Find = 10 (рисунок 9.3). Тем самым программа будет искать десять первых собственных частот и форм колебаний конструкции.

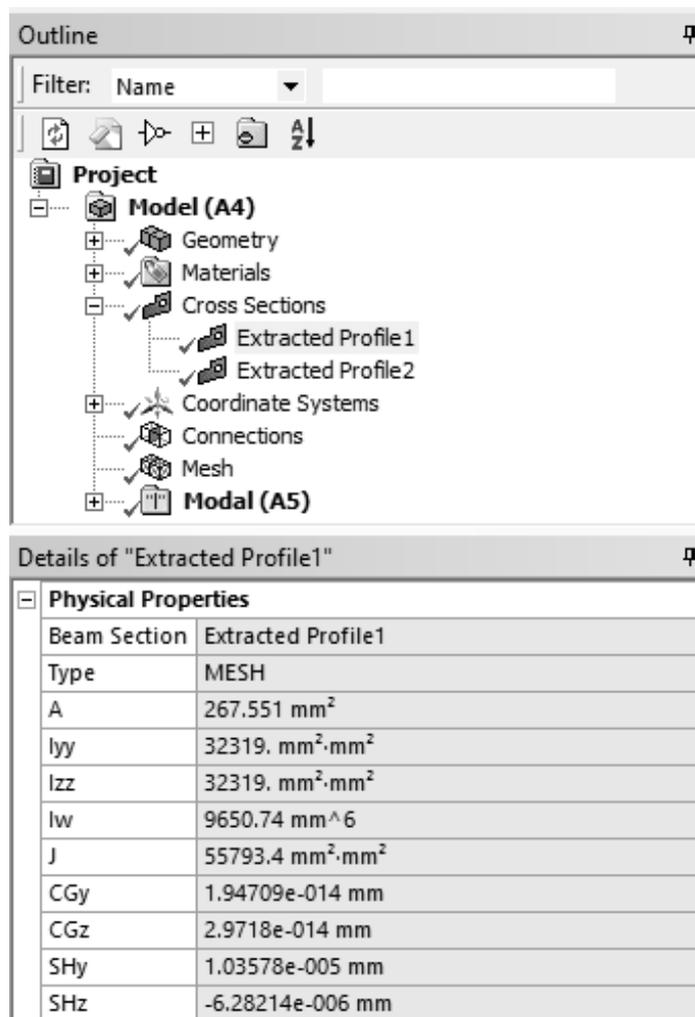


Рисунок 9.2 – Сечения профилей модели и их геометрические характеристики

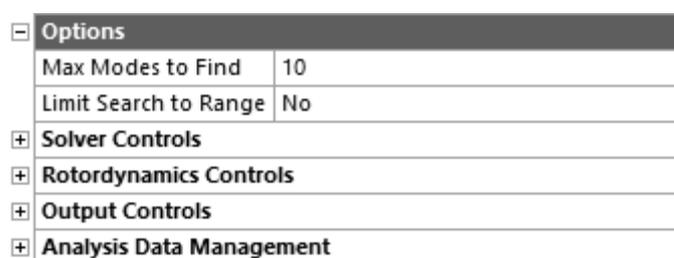


Рисунок 9.3 – Модель сварной конструкции

По окончании решения создать эпюры суммарных перемещений для всех форм и частот. Используя возможность анимации эпюры результата, проанализировать формы колебаний конструкции.

В разделе Solution Information найти таблицы коэффициента массового участия по каждой из осей системы координат (рисунок 9.4). Следует обратить внимание на сумму значений в последнем столбце таблицы. Это отношение так

называемой *эффективной массы* (масса, которая принимает участие в колебании) к полной массе конструкции. В идеале эта сумма должна быть равна единице, что свидетельствует о том, что исследован весь спектр собственных частот. Однако спектр собственных частот бесконечен, поэтому на практике ограничиваются значением суммы отношений масс не менее 0,75...0,80.

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** X DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC. FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	38.8789	0.25721E-01	0.87451E-02	0.056329	0.764776E-04	0.176724E-02	0.639602E-03
2	39.6179	0.25241E-01	0.0000	0.000000	0.000000	0.176724E-02	0.000000
3	39.8614	0.25087E-01	0.10057	0.647799	0.101148E-01	0.235499	0.845925E-01
4	39.9638	0.25023E-01	0.0000	0.000000	0.000000	0.235499	0.000000
5	48.4346	0.20646E-01	0.0000	0.000000	0.000000	0.235499	0.000000
6	49.2086	0.20322E-01	0.0000	0.000000	0.000000	0.235499	0.000000
7	49.4967	0.20203E-01	0.14310E-01	0.092173	0.204780E-03	0.240231	0.171263E-02
8	49.8473	0.20061E-01	-0.78406E-01	0.505022	0.614747E-02	0.382286	0.514129E-01
9	51.1151	0.19564E-01	-0.51268E-01	0.330223	0.262840E-02	0.443023	0.219820E-01
10	51.7814	0.19312E-01	0.15525	1.000000	0.241033E-01	1.000000	0.201582
-----					sum	0.432752E-01	0.361922

Рисунок 9.4 – Вычисление коэффициента массового участия для колебаний вдоль оси X

Последовательно увеличивая количество запрашиваемых частот и перезапуская расчет, необходимо добиться того, чтобы сумма отношений эффективной массы к полной была не менее 0,75 для всех направлений колебаний. Отметить формы колебаний, у которых это отношение не менее 0,1, и включить их в отчет. Проанализировать полученные результаты. Оформить отчет.

Контрольные вопросы

- 1 Задачи модального анализа. Особенности построения расчетной модели для выполнения модального анализа.
- 2 Понятие эффективной массы.
- 3 Физический смысл коэффициента массового участия.

Список литературы

1 Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.

2 Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособие: в 2 ч. / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова [и др.]. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – Ч. 1. – 271 с.

3 **Бруяка, В. А.** Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособие: в 2 ч. / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Я. В. Кураева. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – Ч. 2. – 149 с.

4 **Зенкевич, О.** Метод конечных элементов в технике: пер. с англ. / О. Зенкевич. – М. : Мир. – 1975. – 541 с.

5 Обзор методов моделирования болтовых соединений в ANSYS. – URL: <https://cae-club.ru/publications/obzor-metodov-modelirovaniya-boltovyh-soedineniy-v-ansys> (дата обращения: 08.01.2025).