

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЁТА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности*

1-36 80 02 «Инновационные технологии в машиностроении»



Могилев 2020

УДК 621.791.7
ББК 30.61
К38

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства» «20» февраля 2020 г., протокол № 8

Составитель канд. техн. наук, доц. А. Н. Сеница

Рецензент Ю. С. Романович

Даны методические рекомендации к практическим занятиям по дисциплине «Конечно-элементные методы расчёта сварных конструкций».

Учебно-методическое издание

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЁТА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ответственный за выпуск	А. О. Коротеев
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная вёрстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 21 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, Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2020



Содержание

Введение	4
1 Практическое занятие № 1. Метод конечных элементов. Основные этапы практической реализации	5
1.1 Общие сведения о методе конечных элементов.....	5
1.2 Основные принципы SolidWorks Simulation.....	6
2 Практическое занятие № 2. Определение перемещений.....	14
3 Практическое занятие № 3. Метод Галёркина.....	20
4 Практическое занятие № 4. Решение краевой задачи Коши методом конечных элементов.....	26
5 Практическое занятие № 5. Численное решение краевой задачи.....	30
6 Практическое занятие № 6. Решение дифференциального уравнения в частных производных с помощью МКЭ на примере решения краевой задачи для уравнения Лапласа.....	41
Список литературы.....	48



Введение

Конкуренция в области производства сварных конструкций требует предельно коротких циклов разработки, низких цен и высокого качества продукции. Особую роль при этом играют быстрота профессиональной реакции на потребности рынка, скорость выполнения проектов и оказания высокотехнологичных услуг командами специалистов, обладающих компетенциями, оборудованием и технологиями мирового уровня.

CAE-системы (Computer-Aided Engineering) – системы автоматизации инженерных расчетов применяют разнообразные варианты современного, наиболее мощного и универсального численного метода – метода конечных элементов (МКЭ; Finite Element Analysis, FEA).

FEA (конечно-элементный анализ; КЭ-анализ) в первую очередь применим для эффективного решения задач механики деформируемого твёрдого тела, статики, колебаний, устойчивости, динамики и прочности машин, конструкций, приборов, аппаратуры, установок и сооружений.

С помощью различных вариантов МКЭ эффективно решают задачи механики конструкций, теплообмена, электромагнетизма и акустики, строительной механики, технологической механики (в первую очередь задачи пластической обработки металлов, задачи сварки и термообработки, литья металлов, литья пластмасс под давлением), задачи механики контактного взаимодействия и разрушения, задачи механики композитов и композитных структур.

Целью преподавания дисциплины является развитие у студентов представлений, знаний и умений по составу и возможностям современных прикладных программ для компьютерного моделирования процессов, имеющих место в сварочном производстве.

Задачами учебной дисциплины является формирование следующих знаний и умений:

- основные цели, задачи и этапы моделирования;
- основные методы компьютерного моделирования для задач в различных областях сварочного производства;
- современные прикладные программные продукты для компьютерного моделирования сварочных процессов;
- умение создавать математические и компьютерные модели сварочных процессов;
- умение использовать прикладные программные продукты для реализации указанных моделей.



1 Практическое занятие № 1. Метод конечных элементов. Основные этапы практической реализации

Цель работы

- 1 Изучить основные термины и базовые понятия численного моделирования.
- 2 Рассмотреть основные этапы практической реализации метода конечных элементов.

1.1 Общие сведения о методе конечных элементов

Основная идея *метода конечных элементов (МКЭ)* состоит в том, что любую непрерывную величину можно аппроксимировать дискретной моделью, состоящей из отдельных элементов (участков). На каждом из этих элементов исследуемая непрерывная величина аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией, которая строится на значениях исследуемой непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемого элемента. В общем случае непрерывная величина заранее неизвестна, и нужно определить значения этой величины в некоторых внутренних точках области. Дискретную модель очень легко построить, если сначала предположить, что известны числовые значения этой величины в некоторых внутренних точках области (эти точки называют «узлами»). После этого можно перейти к общему случаю.

При построении дискретной модели непрерывной величины поступают следующим образом. Область определения непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей (элементов). Эти элементы имеют общие узловые точки и в совокупности аппроксимируют форму области. В рассматриваемой области фиксируется конечное число точек. Эти точки принято называть узлами.

Основные этапы практической реализации. Согласно МКЭ модель конструкции сложной формы подразделяется на более мелкие части (конечные элементы) сравнительно простой формы, в пределах которых ищется приближенное решение. Результатом такого моделирования обычно является поле напряжений и перемещений в целой конструкции. Решение задачи с применением МКЭ состоит из следующих основных этапов:

- создание геометрии модели, пригодной для МКЭ;
- разбиение модели на сетку конечных элементов;
- приложение к модели граничных условий;
- численное решение системы уравнений (автоматически);
- анализ результатов.

Все дальнейшие занятия по практической реализации метода конечных элементов будут вестись с использованием ПО *SolidWorks Simulation*, полностью интегрированного с SolidWorks.



1.2 Основные принципы SolidWorks Simulation

1.2.1 Типы исследований.

Статические исследования. Статические исследования вычисляют перемещения, силы реакции, нагрузки, напряжения и распределения запаса прочности. Материал разрушается там, где нагрузки превысили определённый уровень. Вычисление коэффициента запаса прочности базируется на одном из четырёх критериев прочности.

Статические исследования позволяют избежать разрушения, вызванного высоким напряжением. Коэффициент запаса прочности меньше единицы означает разрушение материала. Большой коэффициент запаса прочности в смежной области свидетельствует о низком напряжении и о том, что, очевидно, можно убрать некоторое количество материала из этой области.

Частотные исследования. Тело, выведенное из состояния покоя, начинает колебаться на определенных частотах, так называемых собственных или резонансных частотах. Самая низкая собственная частота называется основной частотой. При каждой собственной частоте тело принимает определённую форму, которая называется формой колебаний. При частотном анализе рассчитываются собственные частоты и ассоциированные формы колебаний.

Теоретически у тела существует неопределённое количество форм (мод). При анализе конечного элемента (АКЭ) теоретически существует столько форм (мод), сколько степеней свободы (DOF). В практических исследованиях учитывается только несколько мод. Избыточные реакции возникают тогда, когда на тело воздействует динамическая нагрузка, и оно вибрирует на одной из собственных частот. Это явление называется резонансом. Например, машина с несбалансированными колёсами сильно дрожит на определённой скорости из-за резонанса.

Частотный анализ может помочь избежать разрушения, вызванного чрезмерными напряжениями, обусловленными резонансом.

Динамические исследования. Динамические исследования вычисляют реакцию модели, вызванную нагрузками, приложенными внезапно, или изменяющимися со временем или по частоте. Линейные динамические исследования базируются на частотных исследованиях. Программное обеспечение рассчитывает реакцию модели посредством сложения влияний каждой моды на среду нагрузки. В большинстве случаев только нижние моды вносят значительный вклад в реакцию. Влияние моды зависит от частотного спектра нагрузки, величины, направления, продолжительности и местоположения.

Цели динамического анализа включают разработку конструктивной и механической системы для работы без разрушения в динамической среде, а также сокращение влияния вибрации.

Исследования потери устойчивости. Потеря устойчивости связана с мгновенными большими перемещениями, вызванными осевыми нагрузками. Тонкие конструкции, подверженные воздействию осевых нагрузок, могут выйти из строя в результате потери устойчивости на уровнях нагрузки меньших, чем требуемые для возникновения разрушения материала. Потеря устойчивости

может появиться при разных режимах под воздействием различных уровней нагрузки. Во многих случаях только самая низкая критическая продольная нагрузка представляет собой интерес. Исследование потери устойчивости может помочь предотвратить разрушение вследствие потери устойчивости.

Термические исследования. Термические исследования подсчитывают температуры, градиент температуры и тепловой поток на основе тепловыделения, теплопроводности, конвекции и условий излучения. Термические исследования могут помочь избежать нежелательных термических условий (например, перегрева и плавления).

Исследования проектирования. Оптимизационные исследования проектирования автоматизируют поиск оптимальной конструкции, основанной на геометрических разработках. Программа оснащена технологией для быстрого обнаружения трендов и определения оптимального решения с использованием минимального количества прогонов.

Оптимизационные исследования проектирования чаще всего преследуют следующие цели:

- минимизация объёма или массы конструкции;
- выбор наиболее подходящих размеров всего объекта или его части;
- подбор условий, которым должна отвечать оптимальная конструкция.

Нелинейные исследования. Когда допущения линейного статического анализа нельзя применить, можно использовать нелинейные исследования для решения задачи. Основными источниками нелинейности являются большие перемещения, нелинейные свойства материала и контакт. Нелинейные исследования подсчитывают коэффициент смещения, силы реакции, нагрузки и напряжения при изменении уровня нагрузок по нарастающей, а также ограничения. В случае, если инерцией и силой демпфирования нельзя пренебречь, можно использовать нелинейный динамический анализ.

Нелинейные исследования относятся к нелинейным исследованиям конструкций. Для термических исследований программное обеспечение автоматически решает линейную или нелинейную задачи на основании свойств материала и термических ограничений и нагрузок.

Решение нелинейной задачи требует намного больше времени и ресурсов, чем решение подобного линейного статического исследования.

Принцип независимости действия сил не применим для нелинейных исследований. Например, если приложение силы F_1 вызывает напряжение S_1 , а приложение силы F_2 вызывает напряжение S_2 в точке, то приложение обеих сил не обязательно вызовет напряжение $(S_1 + S_2)$ в данной точке, как в случае для линейных исследований.

Нелинейные исследования помогают определить поведение конструкции за пределами статических ограничений и потерю ей устойчивости. Статические исследования предлагают нелинейное решение контактной проблемы, которая возникает, когда активизируется параметр большого перемещения.

Исследования на ударную нагрузку. С помощью упражнений испытаний на ударную нагрузку можно оценить эффект падения конструкции на твёрдый пол. Кроме силы тяжести, указывается высота сбрасывания или скорость во

время удара. Программа решает динамическую задачу в виде временной зависимости, используя эксплицитные методы интегрирования. Эксплицитные методы быстрые, но требуют использования малых временных инкрементов.

Исследования усталости (материалов). Переменные нагрузки со временем приводят к ослаблению объектов, даже если индуцированные напряжения намного меньше, чем допустимые. Количество циклов, требуемое для усталостного разрушения в местоположении, зависит от материала и колебаний напряжения. Настоящая информация для определённого материала обеспечивается кривой, называемой $S-N$ кривая. Кривая показывает количество циклов, которое вызывает разрушение на различных уровнях напряжения. При исследовании усталости вычисляют срок службы объекта, основанный на событиях усталости материалов и кривых $S-N$.

Исследования конструкции сосуда, работающего под давлением. Исследования конструкции сосуда, работающего под давлением, объединяют результаты статических исследований, используя линейную комбинацию в алгебраической форме или квадратный корень суммы квадратов (SRSS).

Исследование «Двумерное упрощение». Имеется возможность упростить некоторые трёхмерные модели путём их имитации в 2D. 2D-упрощение доступно для статических и термических нелинейных исследований. Кроме того, возможно исследование проектирования сосуда давления и оптимизации проектирования детали. Время на анализ можно сэкономить путём использования двумерного упрощения для соответствующих моделей. 2D-модели требуют меньшее количество элементов сетки и менее сложные условия контакта по сравнению с 3D-моделями. После запуска анализа можно создать эпюру результатов в 3D.

1.2.2 Типы сеток.

Тип сетки основан на геометрии элементов. Программное обеспечение автоматически назначает необходимый тип сетки для тел на основе элементов их геометрии.

Сетка на твёрдом теле. Для всех твердотельных моделей создаётся сетка с твердотельными (тетраэдральными) элементами.

Сетка оболочки. Для поверхностей и листового металла с одинаковой толщиной создаётся сетка с треугольными элементами оболочки (рисунок 1.1). В исследовании «Испытание на ударную нагрузку» для листового металла создаётся сетка твердотельных элементов.

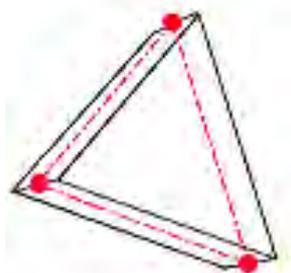


Рисунок 1.1 – Элемент оболочки с узлами на серединной поверхности

Для оболочек программа располагает сетку на поверхности (средняя поверхность оболочки). Толщина оболочки t задаётся в Менеджере свойств (рисунок 1.2).

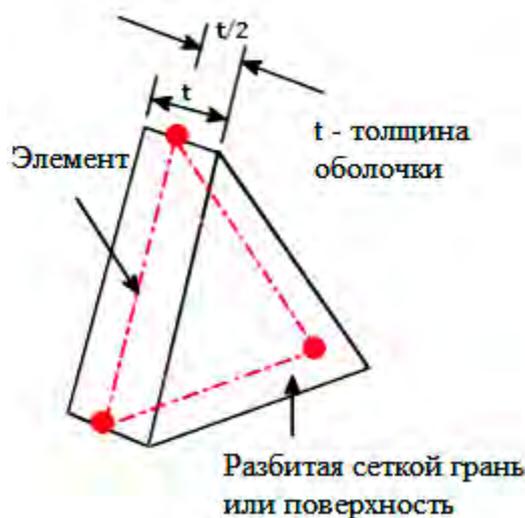


Рисунок 1.2 – Параметры сеток

Сетка балок. Программа автоматически применяет сетку балок и определяет соединения для касающихся или интерферирующих элементов конструкции и не касающихся элементов конструкции на заданном расстоянии (допуск). Балочный элемент является линейным элементом, определённым двумя конечными точками и поперечным сечением. Балочные элементы способны сопротивляться осевым, изгибающим, деформационным и торсионным нагрузкам. Стержни сопротивляются только осевыми нагрузками. При использовании со сварными деталями программное обеспечение определяет свойства поперечного сечения и обнаруживает сочленения.

Комбинированная сетка. Когда в одной модели сочетаются разные геометрические формы, создаётся комбинированная сетка.

1.2.3 Шаги анализа.

Количество шагов, необходимых для выполнения анализа, зависит от типа исследования. Для завершения исследования выполните следующие шаги:

- 1 Создайте исследование, определяя тип анализа и его параметры.
- 2 Определите параметры исследования. Параметром может быть размер модели, свойства материала, значение силы и т. д.
- 3 Определите свойства материала. Этот шаг не обязателен, если свойства материала были определены в системе САПР. Исследования усталости материала и оптимизации используют справочные исследования для определения материала.

4 Задайте ограничения и нагрузки. Исследования усталости материала и оптимизации используют справочные исследования по ограничениям и предельным нагрузкам. Исследования на ударную нагрузку позволяют определять

ограничения и предельные нагрузки только по заданным при установке параметрам.

5 Определите контакт компонентов и наборы контактов.

6 Создайте сетку модели для её разделения на много малых частей, называемых элементами. Исследования усталости материала и оптимизации используют сетки в справочных исследованиях.

7 Запустите исследование.

8 Просмотрите результаты.

1.2.4 Свойства материала.

Прежде чем запустить исследование, необходимо определить все свойства материала, запрашиваемые соответствующим типом анализа и определённой моделью материала. Модель материала описывает поведение материала и определяет требуемые свойства материала. Линейные изотропные и ортотропные модели материала доступны для всех конструкционных и термических исследований. Другие модели материалов доступны для нелинейных исследований напряжения. Пластичная модель по Мизесу может подвергаться исследованиям на ударную нагрузку. Свойства материала могут быть заданы в качестве функции температуры.

В диалоговом окне **Материал** выделяются обязательные и не обязательные свойства. Описание красным цветом указывает, что свойство является обязательным, на основе типа активного исследования и модели материала. Описание синим цветом указывает, что свойство не обязательно.

В сборках каждый компонент может иметь различный материал.

Для моделей оболочек каждая оболочка может быть представлена различным материалом и толщиной.

Для моделей оболочек материал детали используется для всех оболочек.

В балочных моделях каждая балка может иметь различный материал.

В моделях с комбинированной сеткой необходимо определить свойства требуемого материала отдельно для твёрдого тела и оболочки.

Существует три способа определить свойства материала:

1 Использовать материалы, назначенные деталям в системе САПР.

2 Выбрать материал из библиотек материалов.

3 Указать значения требуемых свойств вручную.

По умолчанию программное обеспечение использует материал, назначенный для моделей в системе САПР.

1.2.5 Крепления и нагрузки.

Крепления и нагрузки определяют условия среды модели. Для нелинейных и переходных термических исследований крепления и нагрузки определяются в качестве функции времени.

Соединитель. Соединитель имитирует поведение устройства, не требуя создания подробных форм. Программное обеспечение позволяет определить такие соединители как жёсткий, пружинный, штифт, болтовые соединители, а также соединители сварных точек и подшипниковые соединители.

Задание направлений. Задание направлений часто необходимо во время уточнения модели и просмотра результатов. При определении модели используются направления для уточнения ортотропных свойств материала, ограничений и нагрузок.

1.2.6 Просмотр результатов.

После запуска анализа программное обеспечение создаёт эпюры результатов, настраиваемые по умолчанию. Можно просматривать эпюру при двойном нажатии её значка в дереве исследования Simulation.

1.2.7 Панели инструментов Simulation.

Панели инструментов Simulation представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Панели инструментов Simulation

Инструмент (команда)	Назначение
<i>Панель инструментов «Главная»</i>	
Новое исследование	Определение нового исследования
Применить материал	Назначает материал выбранного объекта в дереве исследования Simulation
Создание сетки	Создаёт сетку твёрдого тела/оболочки для активного исследования
Запуск	Запускает решающую программу для активного исследования
Применить элемент управления	Определяет управление сеткой для выбранных объектов
Глобальный контакт	Устанавливает условие глобального контакта
Набор контактов	Определяет контактные наборы (грань, кромку, вершину)
Настройка испытания на ударную нагрузку	Определяет настройку испытания на ударную нагрузку
Параметры результатов	Редактировать Определить параметры результатов
<i>Панель инструментов «Крепления/Внешние нагрузки»</i>	
Крепления	Определяет крепления на выбранных объектах для активных конструктивных исследований (статического, частотного, потери устойчивости или нелинейного исследования)
Сжатие	Определяет давление на выбранные объекты для активных конструктивных исследований (статического, частотного, потери устойчивости или нелинейного исследований)
Сила	Определяет силу, вращающий момент или момент выбранных объектов для активных конструктивных исследований (статического, частотного, потери устойчивости или нелинейного исследований). Заданная величина применима к каждому выбранному объекту

Продолжение таблицы 1.1

Инструмент (команда)	Назначение
Притяжение	Определяет нагрузки от действия силы тяжести для активных конструктивных исследований (статического, частотного или потери устойчивости)
Центробежная сила	Определяет центробежные силы(угловые скорости ускорения) для активных конструктивных исследований (статического, частотного, потери устойчивости или нелинейного)
Удалённая нагрузка/масса	Определяет удалённую нагрузку/массу в наборе граней относительно системы координат для активного исследования
Жёсткая связь	Определяет соединители набора граней относительно другого набора граней разных компонентов для активных конструктивных исследований
<i>Панель инструментов «Инструменты результатов»</i>	
Запас прочности	Выполняет построение графика распределения запаса прочности на модели для активного статического исследования
Напряжение	Выполняет построение контуров/векторов напряжения на модели для активного статического исследования
Перемещение	Выполняет построение контуров/векторов перемещения на модели для активного исследования
Напряжение	Выполняет построение графика распределения деформации на модели для активного исследования
Термические	Выполняет построение графика распределения температуры, теплового потока и градиента температуры на модели для активного термического исследования
Design Insight	Создаёт эпоху design insight для текущего исследования
Отчёт	Генерирует отчёт формата Microsoft Word для текущего аналитического исследования
Включить изображение в отчёт	Помещает изображение модели в отчёт
Анимировать	Выполняет анимацию текущей эпохи результата на экране
Ограничение сечения	Динамически перемещает поверхности ограничения эпох сечения
Ограничение Iso	Динамически перемещает поверхности ограничения для эпох изометрической поверхности
Настройки эпохи	Измените текущие настройки последующей обработки эпохи
Зонд	Зондирование текущей эпохи результата путем нажатия в необходимом месте
Выбранный список	Отображает результаты посредством выбора необходимых объектов модели
Сохранить как	Сохраняет активную эпоху на экране в форматах eDrawings, bitmap, JPEG, VRML, XGL или ZGL
Отобразить/Скрыть результат	Переключает видимость между геометрией модели и активной эпохой результатов
Сравнить результаты	Сравнивает совместно несколько результатов
Деформированный результат	Отображение модели в её деформированном состоянии
<i>Панель инструментов «Термические нагрузки»</i>	
Температура	Определяет температуру на выбранных объектах для активного исследования



Окончание таблицы 1.1

Инструмент (команда)	Назначение
Конвекция	Определяет конвекцию на выбранных гранях для активного термического исследования
Тепловой поток	Определяет тепловой поток на выбранных объектах для активного термического упражнения
Излучение	Определяет излучение на выбранных объектах для активного термического исследования
<i>Панель инструментов «Вывод списков результатов»</i>	
Сила противодействия	Рассчитывает силу реакции на выбранных объектах для активного статического исследования
Список сил контакта	Рассчитывает силу контакта на выбранных объектах для активного статического исследования
Сила шпильки болта/подшипника	Рассчитывает силу штифта/болта на выбранных объектах для активного статического исследования
Список резонансных частот	Отображает частоты режимы (моды) колебаний для активного исследования
Временная диаграмма	Определить построение временной диаграммы
<i>Панель инструментов «Динамические»</i>	
Возбуждение однородного основания	Определяет возбуждения однородного основания для активного линейного динамического исследования
Возбуждение выбранного основания	Определяет возбуждения выбранного основания для активного линейного динамического исследования
Глобальное демпфирование	Определяет глобальное демпфирование для активного линейного динамического исследования

Задание на практическое занятие

- 1 Ознакомиться с типами исследований SolidWorks Simulation.
- 2 Ознакомиться с типами сеток SolidWorks Simulation.
- 3 Ознакомиться с шагами анализа SolidWorks Simulation.
- 4 Ознакомиться с порядком задания свойств материала SolidWorks Simulation.
- 5 Ознакомиться с типами креплений и нагрузками SolidWorks Simulation.

Вопросы для самопроверки

- 1 Дайте определение термину МКЭ.
- 2 Основные этапы практической реализации МКЭ.
- 3 Типы исследований SolidWorks Simulation.
- 4 Типы сеток SolidWorks Simulation.
- 5 Шаги анализа SolidWorks Simulation.
- 6 Свойства материала SolidWorks Simulation.
- 7 Крепления и нагрузки SolidWorks Simulation.



2 Практическое занятие № 2. Определение перемещений

Цель работы. Ознакомиться со следующими процедурами: назначение материала детали; создание исследования статического анализа; применение фиксированного ограничения и приложение нагрузки; настройка параметров и создание сетки детали; запуск исследования; просмотр основных результатов статического анализа; оценка перемещений конструкции; оценка прочности конструкции.

Пример выполнения анализа

Кронштейн, изготовленный из легированной стали, зафиксирован в двух отверстиях и нагружен давлением 6,9 МПа (рисунок 2.1).

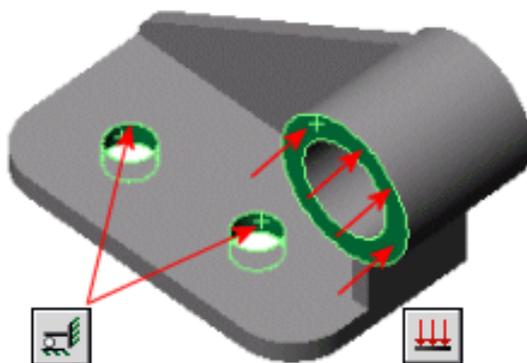


Рисунок 2.1 – Пример фиксации и нагружения кронштейна

Чтобы назначить легированную сталь из библиотеки материалов, необходимо выполнить действия, перечисленные ниже.

1 Нажмите **Редактировать материал** (панель инструментов Стандартная SolidWorks). Появится диалоговое окно **Материал**.

2 В левой панели нажмите на знак «плюс» рядом с **Материалами SolidWorks**, затем на знак «плюс» рядом с разделом **Сталь** и выберите **Легированная сталь**.

Механические характеристики легированной стали появятся в окне **Свойства**.

3 Нажмите **Применить** и затем **Заккрыть**. Название назначенного материала появится в дереве FeatureManager.

Чтобы создать статическое исследование:

1 Нажмите стрелку вниз в разделе **Консультант исследования** (Simulation CommandManager) и выберите пункт **Новое исследование**.

2 В окне PropertyManager в поле **Имя** введите **Static-1**.

3 В разделе **Тип** нажмите **Статическое**. Программное обеспечение создаст исследование в дереве исследования Simulation.

Для статического анализа необходимо применить достаточные фиксирующие ограничения, чтобы стабилизировать модель. Зафиксируйте два отверстия на основании детали.

Чтобы зафиксировать эти отверстия:

1 Нажмите кнопку со стрелкой вниз в поле **Консультант по креплениям** и выберите **Зафиксированная геометрия** либо нажмите правой кнопкой мыши **Крепления** в дереве исследования и выберите **Зафиксированная геометрия**. Появится вкладка PropertyManager **Крепление**.

2 В графической области выберите поверхности двух отверстий на основании детали. Программное обеспечение фиксирует поверхности двух отверстий и создаёт значок, названный **Зафиксированный-1** в папке **Крепления** в дереве исследования Simulation.

Приложите давление 6,9 МПа перпендикулярно круговой поверхности кронштейна.

Чтобы приложить давление:

1 Нажмите кнопку со стрелкой вниз в поле **Внешние нагрузки** и выберите **Давление**.

2 В PropertyManager на вкладке **Тип** в разделе **Тип** выберите **Перпендикулярно выбранной грани**.

3 В графической области выберите плоскую грань втулки детали в разделе **Грани для давления**.

4 В разделе **Значение давления** выберите **МПа** в поле **Единицы измерения**, затем введите **6,9** в поле **Значение давления**. Программное обеспечение применяет давление 6,9 МПа и создаёт значок с именем **Давление-1** в папке **Внешние нагрузки** дерева исследования Simulation.

Создание сетки зависит от активных параметров формирования сетки.

Чтобы задать параметры формирования сетки:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши **Сетка** и выберите **Создать сетку** либо нажмите кнопку со стрелкой вниз в поле **Запуск** и выберите **Создать сетку**.

2 В PropertyManager примените следующие настройки в поле **Параметры сетки**:

- стандартная сетка: выбрана;
- глобальный размер: вычислено программой;
- допуск: вычислено программой;
- автоматический переход: не выбран.

В окне **Дополнительно** необходимо задать следующие параметры:

- меню проверки Якобиана установить на четыре точки;
- сетка чернового качества: не выбрана;
- автоматические пробы для твёрдых тел: выбран Число проб: 3.

При создании сетки программное обеспечение использует активные параметры создания сетки.

Чтобы создать сетку детали и запустить статическое исследование:

1 Нажмите, чтобы принять значения. Откроется окно **Процедура создания сетки**. После завершения создания сетки модель с сеткой появится в графической области.

2 Щёлкните **Выполнить** (Simulation CommandManager).



Будет выполнен анализ и папка **Результаты** отобразится в дереве исследования Simulation.

Для отображения информации о сетке:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши значок **Сетка** и выберите **Сведения**.

2 Закройте окна списка **Сведения о сетке**. Чтобы скрыть или показать сетку нажмите **Отобразить/скрыть сетку** на панели инструментов Simulation.

Чтобы построить эпюру напряжений по Мизесу:

1 В дереве исследований Simulation откройте папку **Результаты**.

2 Дважды щёлкните **Напряжение (-von Mises-)** для отображения эпюры.

На рисунке 2.2 представлено изображение распределения напряжений при статическом исследовании кронштейна.

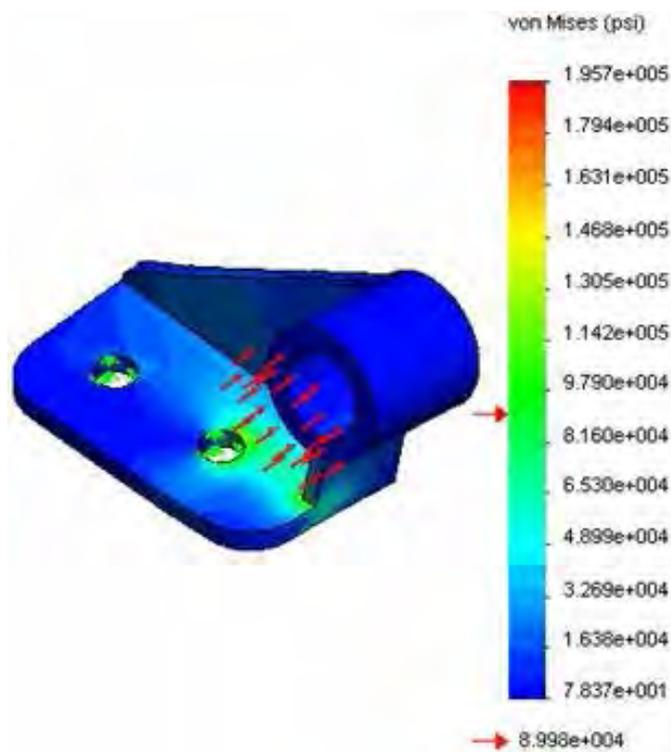


Рисунок 2.2 – Распределение напряжений при статическом исследовании кронштейна

Эпюра напряжений создаётся на деформированной форме. Чтобы показать деформированную форму, программное обеспечение масштабирует максимальную деформацию на 10 % диагонали граничной рамки модели.

Чтобы построить график результирующего перемещения:

1 В дереве исследований Simulation откройте папку **Результаты**.

2 Дважды щёлкните **Перемещение (-Расположение результата-)** для отображения эпюры. На рисунке 2.3 представлено изображение перемещений при статическом исследовании кронштейна.

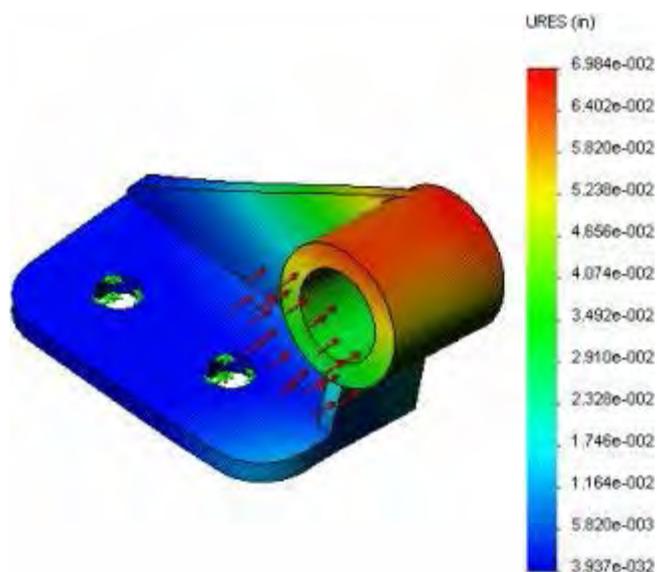


Рисунок 2.3 – Перемещения при статическом исследовании кронштейна

Чтобы построить график эквивалентных деформаций элементов:

- 1 В дереве исследований Simulation откройте папку **Результаты**.
- 2 Дважды щёлкните **Деформация (-эквивалентная)** для отображения эпюры. На рисунке 2.4 представлено изображение эквивалентных деформаций при статическом исследовании кронштейна.

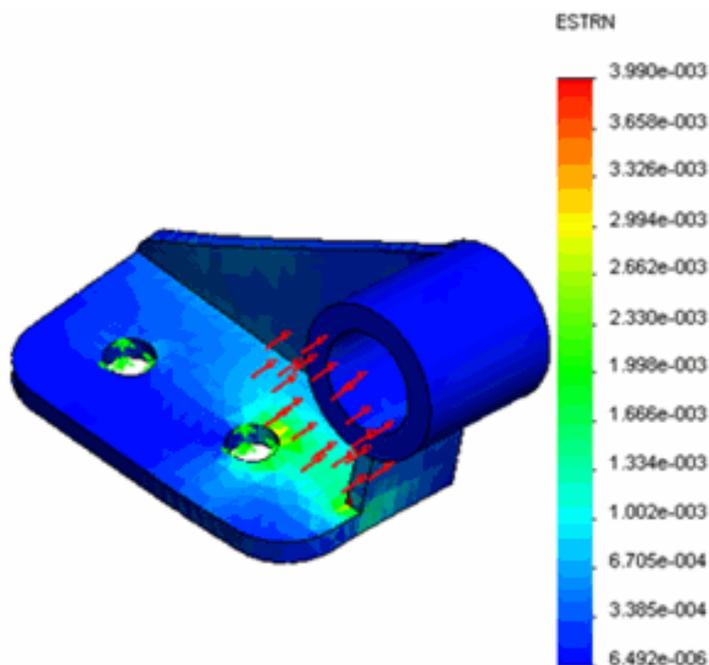


Рисунок 2.4 – Эквивалентные деформации при статическом исследовании кронштейна

Коэффициент запаса прочности поможет оценить прочности конструкции. Чтобы просмотреть распределение в модели коэффициента запаса прочности (FOS):

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши на папку **Результаты** и выберите **Определить эпюру коэффициентов запаса прочности**. Появится окно PropertyManager **Запас прочности**.

2 В окне PropertyManager в разделе **Шаг 1 из 3** выберите **Максимальное напряжение von Mises** в поле **Критерий**.

3 Щёлкните **Далее**.

4 В разделе **Шаг 2 из 3** выберите **Для предела текучести**.

Обратите внимание, что отображены упругие свойства материала детали и максимальное напряжение по Мизесу.

5 Нажмите кнопку **Далее**.

6 В разделе **Шаг 3 из 3**, выберите **Распределение запаса прочности**.

7 Щёлкните **Готово**.

На рисунке 2.5 представлено изображение распределения коэффициента запаса прочности (FOS) при статическом исследовании кронштейна.

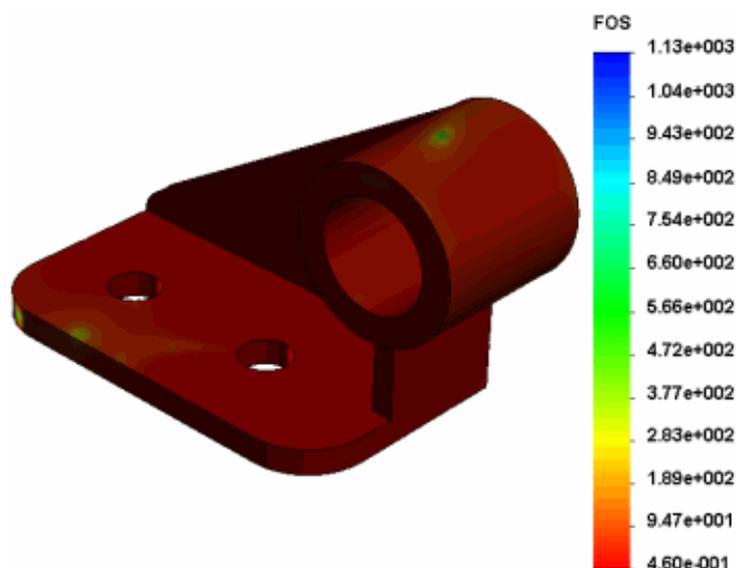


Рисунок 2.5 – Распределение коэффициента запаса прочности (FOS) при статическом исследовании кронштейна

Чтобы построить график критических областей детали:

1 Нажмите стрелку вниз в разделе **Консультант по результатам** и выберите **Новая эпюра, Запас прочности**.

2 В окне PropertyManager в разделе **Шаг 1 из 3** выберите **Максимальное напряжение von Mises** в поле **Критерий**.

3 Щёлкните **Далее**.

4 В разделе **Шаг 2 из 3** выберите **Для предела текучести**.

5 Нажмите кнопку **Далее**.

6 В разделе **Шаг 3 из 3** выберите **Области ниже запаса прочности** и введите **1** в поле **Запас прочности**.

7 Щёлкните **Готово**.

Области с запасом прочности меньше 1 (опасные области) отображаются красным цветом. Области с более высоким коэффициентом за-

паса прочности (прочные области) отображаются синим цветом.

Задание на практическое занятие

Получить у преподавателя чертёж сварной конструкции и выполнить статический анализ.

Вопросы для самопроверки

- 1 Порядок назначения материала детали.
- 2 Порядок применения фиксированного ограничения и приложение нагрузки.
- 3 Порядок настройки параметров и создание сетки детали.
- 4 Инструменты просмотра основных результатов статического анализа.
- 5 Порядок оценки перемещений конструкции.
- 6 Порядок оценки прочности конструкции.



3 Практическое занятие № 3. Метод Галёркина

Цель работы. Ознакомиться со следующими процедурами: использование алгоритма управления по длине дуги; создание графика перемещения в зависимости от коэффициента нагрузки.

Метод Галёркина применяют для решения дифференциальных уравнений с частными производными и для формирования основы метода конечных элементов. Этот метод в 1915 г. был предложен русским учёным Борисом Григорьевичем Галёркиным. В литературе метод иногда называют методом Бубнова – Галёркина, т. к. его применял в своих инженерных расчётах известный российский кораблестроитель, математик и механик И. Г. Бубнов. В 1942 г. метод теоретически обоснован советским математиком М. В. Келдышем.

Ниже разобран пример потери/восстановления устойчивости цилиндрического листа под нагрузкой.

Нежесткий цилиндрический лист подвергается воздействию сосредоточенной нагрузки в центре, как показано на рисунке 3.1. Изогнутые кромки свободны, а прямые кромки неподвижны, но могут вращаться вокруг кромки. Требуется определить потерю/восстановление устойчивости цилиндрического листа под нагрузкой. Вследствие симметрии задачи анализируется только четверть модели.

$R = 2540$ мм, $b = 254$ мм, $q = 0,10$ рад, толщина $h = 6,35$ мм, $n = 0,30$; исходная нагрузка $P = 10$ Н.

С такими размерами лист выглядит подобно плоской поверхности.

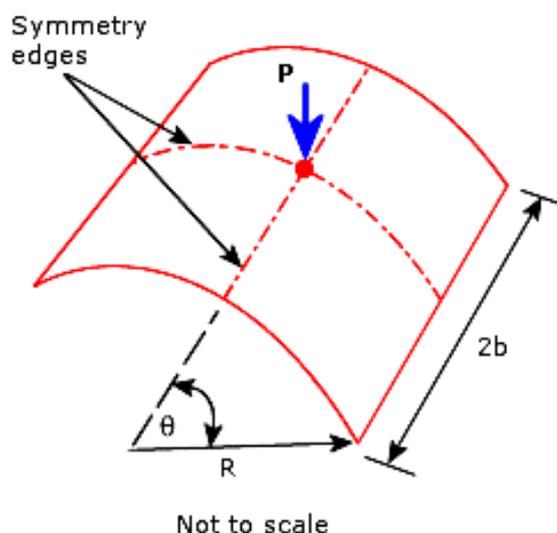


Рисунок 3.1 – Схема нагружения цилиндрического листа

Чтобы создать нелинейное аналитическое исследование:

1 Нажмите на стрелку вниз в разделе **Консультант исследования** и выберите **Новое исследование**.

2 В Менеджере свойств выполните следующие действия:

- в поле **Имя** введите имя исследования;
- в поле **Тип** нажмите **Нелинейный**;
- в разделе **Параметры** следует выбрать **Статический**;
- щёлкните **ОК**.

Программа автоматически определяет оболочку для рельефа поверхности.

Чтобы определить модель оболочки:

1 В дереве исследований Simulation нажмите правой кнопкой мыши значок оболочки и выберите параметр **Редактировать определение**.

2 В Менеджере свойств выполните следующие действия:

- убедитесь, что в разделе **Тип** выбрано **Тонкая**;
- установите единицы измерения на **мм**, затем введите **6** в качестве **Толщины оболочки**;
- щёлкните **ОК**.

Назначьте следующие свойства материала:

- модуль упругости ($3,10275 \cdot 10^9$ Н/м²);
- коэффициент Пуассона (0,3).

Для этого в диалоговом окне **Материал** выполните следующее:

1 Нажмите правой кнопкой мыши на папку **Материалы** пользователя и выберите параметр **Новая категория**.

2 Нажмите правой кнопкой мыши на новую категорию и выберите **Новый материал**.

3 В окне **Свойства материала** выполните следующие действия:

- установите Тип модели на **Линейный упругий изотропный**;
- выберите СИ – Н/м² (Па) в меню **Единицы измерения**;
- в поле **Имя** введите название материала, например, **Материал 4**.

3 В таблице свойств выполните следующие действия:

- введите $3,10275e9$ в окне **Значения EX** (Модуль упругости);
- введите 0,3 в окне **Значения NUXY** (Коэффициент Пуассона);
- введите значение **Массовой плотности**, например, 9800;
- нажмите **Применить** и **Заккрыть**.

Методы управления **Сила**, а также **Деформация** будут работать неудовлетворительно в окрестностях критических точек для моделей этого типа. Метод управления длиной дуги является естественно подходящим и будет использоваться в настоящей задаче.

В методе управления длиной дуги закономерность приложенных нагрузок является пропорционально прирастающей (используя множитель сосредоточенной нагрузки) для достижения равновесия под управлением заданной длины (длины дуги) равновесной траектории. Длина дуги будет автоматически вычисляться программой. Не требуется кривой «времени».

Чтобы задать свойства исследования:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши значок исследования и выберите **Свойства**.



2 В диалоговом окне **Нелинейное статическое** на вкладке **Решение** проверьте следующие настройки:

- **Автоматически (автоинтервал)** в окне **Временной инкремент**;
- **0,01** установлено в поле **Начальный временной инкремент**;
- **Мин.** установлен на **1e-008** и **Макс.** установлен на **0,1**;
- **Использовать постановку задачи для большого смещения** установлено в **Параметрах нелинейности геометрии**.

3 В окне **Решающая программа** убедитесь, что выбрана программа **Direct Sparse**.

4 Перейдите на вкладку **Решение** и нажмите **Дополнительные параметры**.

5 На вкладке **Дополнительно**, в окне **Метод** установите **Управление** на **Длину дуги** и убедитесь, что **NR (Ньютон-Рафсон)** установлено на **Итерационный**.

6 В разделе **Параметры завершения длины дуги** выполните следующие действия:

- убедитесь, что **Коэффициент максимального распределения нагрузок** установлен на **1e8**;
- введите **1e8** в поле **Максимальное смещение (для смещения DOF)**;
- введите **45** в поле **Максимальное число интервалов дуги**.

7 В разделе **Параметры интервала/допуска** установите **Допуск сходимости** на **0,0001**.

8 Нажмите **ОК**.

Чтобы задать параметры вывода результатов:

1 В дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши значок **Параметры результатов** и выберите **Определить/Редактировать**.

2 В **Менеджере свойств** выполните следующие действия:

– в окне **Сохранить результаты** нажмите **Для указанных шагов решения**.

– установите флажок на **Шаги решения – Набор1** и выполните следующие действия:

- а) убедитесь, что **Начало** установлено на **1**;
- б) убедитесь, что **Окончание** установлено на **1000**;
- в) в поле **Инкремент** введите **1**;
- г) в окне **Эпюры ответных реакций** выберите **<Ready – Nonlinear> – Nonlinear** в **Списке датчиков**;
- д) щёлкните **ОК**.

На рисунке 3.2 представлено изображение с экрана монитора цилиндрического листа.

Одна из прямых кромок (Edge 3 на рисунке 3.2) ограничена во всех направлениях, кроме вращения вокруг оси Z. Другая прямая кромка (Edge 1) и изогнутая кромка (Edge 2) имеют симметричные ограничения.



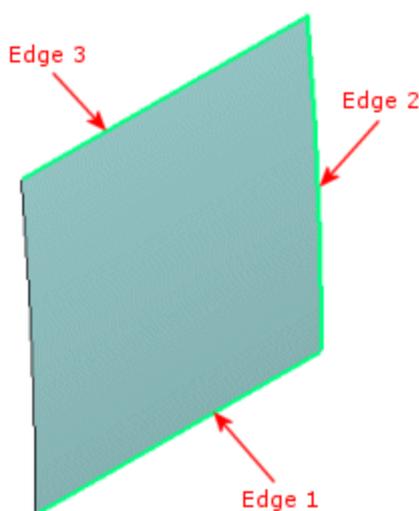


Рисунок 3.2 – Кромки цилиндрического листа

Следует зафиксировать прямую кромку (Edge 1). Для этого выполните следующие действия:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши значок **Крепления** и выберите **Расширенные крепления**.

2 Установите **Тип** на **Использовать справочную геометрию**.

3 Выберите окно **Грани, Кромки, Вершины для крепления**, затем нажмите Edge 1 в графической области.

4 Выберите окно **Грань, кромка, плоскость, оси для направления**, затем выберите **Переднюю плоскость** в плавающем дереве конструирования FeatureManager.

5 Нажмите **Вдоль плоскости – направление 2** в разделе **Перемещения**; **Вдоль плоскости – направление 1** и **Перпендикулярно плоскости** в разделе **Вращения**. Убедитесь, что во всех кнопках, которые вы щёлкнули, появились нули.

6 Щёлкните **ОК**.

Чтобы приложить силу:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши значок **Внешние нагрузки** и выберите пункт **Сила**.

2 В Менеджере свойств выполните следующие действия:

– в окне **Сила/вращающий** выбрать **Сила**;

– выберите окно **Грани, Кромки, Вершины, Справочные точки для силы**, затем выберите вершину модели;

– выберите параметр **Выбранное направление**;

– выберите окно **Грань, Кромка, Плоскость для направления**, затем выберите **Переднюю плоскость** в плавающем дереве конструирования FeatureManager;

– задать для параметра **Единицы измерения** значение **СИ**;

– в окне **Сила (на объект)** нажмите **Вдоль плоскости – направление 1** и введите **-6,35** в поле его значений;

– щёлкните **ОК**.

Чтобы создать сетку модели:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши значок **Сетка** и выберите пункт **Создать сетку**.

2 В **Менеджере свойств** выполните следующие действия:

– в окне **Плотность сетки**, перетащите бегунок в крайнее левое положение (**Грубо**);

– в поле **Параметры сетки** выберите **Стандартная сетка**»;

– в окне **Дополнительно** выберите **Сетка черного качества**;

– установите флажок **Запуск (решение) анализа**;

– щёлкните **ОК**.

Постройте эпюру перемещения в зависимости от коэффициента нагрузки в центре оболочки. Для этого:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши папку **Результаты** и выберите **Определить эпюру хронологии**.

2 В Менеджере свойств выполните следующие действия:

– убедитесь, что в разделе **Реакция** выбраны **Предопределенные положения**;

– убедитесь, что выделена **Вершина 1**;

– в окне **Ось X** установите **Компонент** на **URES: Результирующее перемещение**;

– в окне **Ось X** убедитесь, что **Единицы измерения** установлены на **мм**;

– щёлкните **ОК**.

На рисунке 3.3 представлено изображение с экрана монитора зависимости коэффициента нагрузки (ось Y) от результирующего перемещения **URES**.

3 Наведите указатель мыши на первую точку перегиба рисунка 3.3 и посмотрите её координаты внизу графического окна. Оболочка начинает изгибаться при коэффициенте нагрузки 57,7 или усилие примерно 144 Н ($2,5 \cdot 57,7 = 144,25$).

Создадим исследование продольного изгиба и решим ту же задачу при линейаризованном анализе продольного изгиба. Исследование изгиба будет проводиться с типом сетки **Оболочка**.

Порядок действий следующий:

1 Перетащите папку **Оболочки** из нелинейного исследования в исследование потери устойчивости.

2 Перетащите **Крепления**, **Внешние нагрузки** и **Сетку** в исследование потери устойчивости.

3 Запустите исследование продольного изгиба.

4 После завершения анализа дважды щёлкните значок в папке **Результаты** (или нажмите правой кнопкой мыши папку **Результаты** и выберите **Показать коэффициенты критической продольной нагрузки**). Вычисленный коэффициент критической продольной нагрузки, равный примерно 122, показывает, что оболочка будет изгибаться при нагрузке примерно $2,5 \cdot 122 = 305$ Н.



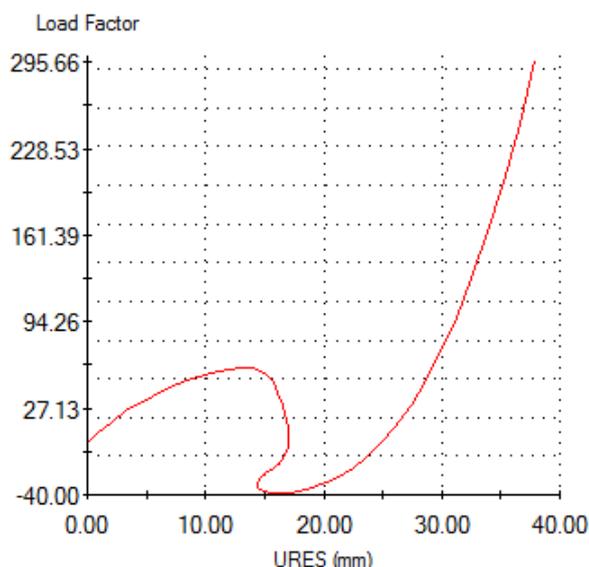


Рисунок 3.3 – Изображение с экрана монитора, отражающее поведение после продольного изгиба оболочки

Вывод. Линеаризованный анализ продольного изгиба даёт более, чем в 2 раза завышенную критическую продольную нагрузку по сравнению с фактической, рассчитанной нелинейным анализом. Настоящий пример показывает преимущество использования нелинейного анализа и что линеаризованный анализ продольного изгиба может давать завышенные значения коэффициента критической продольной нагрузки (в этом случае 2,1).

Задание на практическое занятие

Получить у преподавателя чертёж сварной конструкции и выполнить анализ потери устойчивости.

Вопросы для самопроверки

- 1 Сущность анализа потери устойчивости.
- 2 Особенности задания свойств материала при анализе потери устойчивости.
- 3 Преимущества использования нелинейного анализа перед линеаризованным.
- 4 Порядок настройки параметров и создание сетки детали.
- 5 Инструменты просмотра основных результатов анализа потери устойчивости.



4 Практическое занятие № 4. Решение краевой задачи Коши методом конечных элементов

Цель работы. Ознакомиться со следующими процедурами: создание исследования частотного анализа; назначение материалов и применение креплений (ограничений); запуск частотного анализа; просмотр результатов частотного анализа; вывод списка коэффициентов массового участия; оценка точности результатов.

Пример выполнения анализа

Частотный анализ, также называемый модальный или динамический анализ, рассчитывает резонансные (собственные) частоты и соответствующие формы (моды) колебаний. Рассмотрим сборку вала (рисунок 4.1).

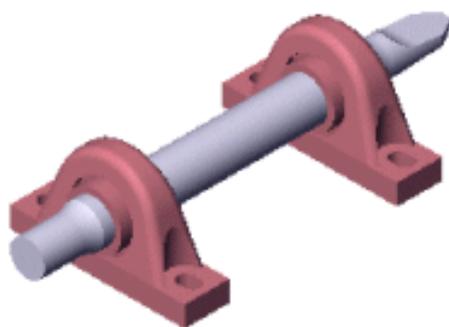


Рисунок 4.1 – Модель сборки вала

Чтобы создать исследование частотного анализа выполните следующее:

- 1 Нажмите стрелку вниз в разделе **Консультант исследования** и выберите пункт **Новое исследование**.
- 2 В окне PropertyManager в разделе **Имя** выберите **Freq-1**.
- 3 В разделе **Тип** нажмите **Частота**.
- 4 Щёлкните **Готово**.

Сборка вала изготовлена из стали AISI 1020 (аналог стали 20). Чтобы назначить сталь AISI 1020 всем компонентам выполните следующее:

- 1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши папку **Детали** и выберите **Применить материал ко всем**.
- 2 В диалоговом окне **Материал** выполните следующее:
 - разверните **Материалы SolidWorks**;
 - выберите **AISI 1020** в списке **Сталь**;
 - нажмите **Применить**;
 - нажмите кнопку **Заккрыть**.

Программное обеспечение назначает сталь AISI 1020 всем компонентам сборки. Появится флажок на каждой значке в папке **Детали**. Зафиксируйте поверхности, показанные на рисунке 4.2. Для этого:

- 1 Нажмите стрелку вниз в разделе **Консультант креплений** и выберите **Зафиксированная геометрия**.

2 В графической области выберите две поверхности. Грань<1> и Грань<2> появятся в **Грани, кромки, вершины для крепления**.

3 Щёлкните **Готово**.

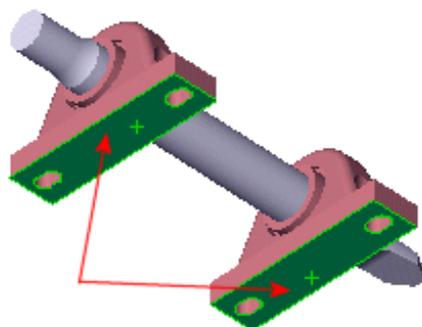


Рисунок 4.2 – Выбор граней для фиксации

Чтобы задать эпюры по умолчанию для частотного исследования выполните следующее:

1 Нажмите **Simulation, Параметры**.

2 На вкладке **Настройки по умолчанию** выберите **Результаты исследования по частотам/потере устойчивости**.

3 В окне **Создать эпюру для** выберите **Для первых 5-ти форм колебаний**.

4 В поле **Тип результатов** выберите **Перемещение** и **URES: Результирующее перемещение** для генерации эпюр перемещения.

5 Нажмите **ОК**.

Чтобы создать сетку модели и запустить исследование выполните следующие действия:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши пункт **Сетка** и выберите **Создать сетку** либо нажмите кнопку со стрелкой вниз в поле **Запуск** и выберите **Создать сетку**.

2 В PropertyManager примените **следующие настройки**.

3 В разделе **Параметры** выберите **Запуск (решение) анализа**.

4 Нажмите **ОК**, чтобы принять значения.

Чтобы вывести список резонансных частот:

1 Нажмите стрелку вниз в разделе **Результаты** (Simulation CommandManager) и выберите **Список резонансных частот**.

В окне **Список мод** перечислены номер моды, резонансная частота (в радианах в секунду и герцах) и соответствующий период в секундах.

2 Для сохранения перечисленных результатов в файле Excel:

– нажмите кнопку **Сохранить**;

– введите **Frequency1** в поле **Имя файла**;

– нажмите кнопку **Сохранить**.

3 Нажмите кнопку **Заккрыть**.

Чтобы вывести список массового участия:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши на

папку **Результаты** и выберите **Показать массовое участие**.

В окне **Массовое участие** отобразятся номера форм колебаний (мод), частоты и массовое участие в X-, Y- и Z-направлениях. Например, массовое участие моды номер 1 является незначительным в направлении X, приблизительно 0,009 в направлении Y и приблизительно 0,065 в направлении Z.

2 Нажмите кнопку **Заккрыть**.

Чтобы проверить погрешность предыдущих результатов, повторно создайте сетку модели, используя меньший глобальный размер элемента и перезапустите исследование. Для этого выполните следующие действия:

1 В дереве исследования нажмите правой кнопкой мыши значок **Сетка** и выберите **Создать сетку**. Появится предупреждающее сообщение о том, что создание сетки заново удалит существующие результаты.

2 Нажмите **ОК**. Появится окно **PropertyManager Сетка**.

3 В разделе **Параметры сетки** установите для параметра **Единицы измерения** значение **дюймы** и установите для параметра **Глобальный размер** значение **0,25**.

4 В разделе **Параметры** выберите **Запуск (решение) анализа**.

5 Щёлкните **ОК**.

Чтобы вывести список новых резонансных частот:

1 Нажмите стрелку вниз в разделе **Результаты** (Simulation CommandManager) и выберите **Список резонансных частот**.

2 В диалоговом окне обратите внимание, что мода номер 1 сейчас имеет частоту приблизительно 3364 Гц и мода номер 2 имеет частоту приблизительно 3383 Гц.

3 Нажмите кнопку **Заккрыть**.

Сравнение с предыдущими результатами показывает максимальное изменение примерно на 0,3 %, указывающее, что предыдущие результаты являются достаточно точными. Текущие результаты являются более точными, т. к. для сетки используется меньший размер элемента.

Чтобы просмотреть основную форму (моду) колебаний выполните следующие действия:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши на папку **Крепления** и выберите **Скрыть все**, чтобы скрыть обозначения креплений.

2 Разверните папку **Результаты** и нажмите правой кнопкой мыши на **Деформация1 (-Расположение результата-Форма моды1-)** и выберите **Редактировать определение**.

3 В PropertyManager в разделе **Деформированная форма** очистите параметр **Отобразить цвета**.

4 Примите остальные настройки, затем нажмите **ОК**.

Деформированный вал представлен на рисунке 4.3.

Для отображения первоначальной (недеформированной) модели в основной форме (моде) колебаний выполните следующие действия:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши **Деформация (-Расположение результата-Форма моды1)** и выберите **Настройки**.

2 В окне PropertyManager в разделе **Параметры эпюры деформации:**



- выберите **Поместить модель на деформированную форму**;
 - выберите в списке **Полупрозрачный (один цвет)**;
 - нажмите на параметр **Редактировать цвет**, выберите ярко-голубой цвет и нажмите **ОК**;
 - переместите бегунок **Прозрачности** на 0,75.
- 3 Щелкните **ОК**.

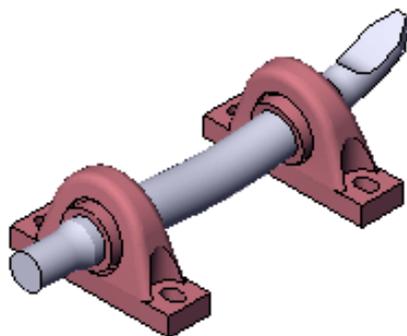


Рисунок 4.3 – Форма колебаний вала

Отобразится недеформированная модель в основной форме (моде) колебаний, как показано на рисунке 4.4.

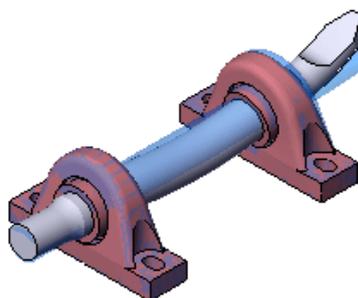


Рисунок 4.4 – Недеформированная модель вала

Задание на практическое занятие

Получить у преподавателя чертёж сварной конструкции и выполнить частотный анализ.

Вопросы для самопроверки

- 1 Сущность частотного анализа.
- 2 Особенности назначения материалов и применение креплений (ограничений) при частотном анализе.
- 3 Порядок просмотра результатов частотного анализа.
- 4 Порядок оценки точности результатов частотного анализа.

5 Практическое занятие № 5. Численное решение краевой задачи

Цель работы. Ознакомиться со следующими процедурами: создание термического исследования установившегося состояния; задание свойств материала; определение зависящих от температуры свойств материала; определение термических нагрузок и граничных условий; просмотр и зондирование результатов температуры; создание эпюры изолиний температуры; создание исследования переходного термического процесса; использование «перетащить и оставить», чтобы определить свойства материала и термические нагрузки; определение зависящий от времени термической нагрузки посредством импортирования предопределённой кривой времени; вычерчивание графиков результатов относительно времени.

Пример выполнения анализа

В настоящем примере анализируется теплопередача в сборке кристалла, показанная на рисунке 5.1.

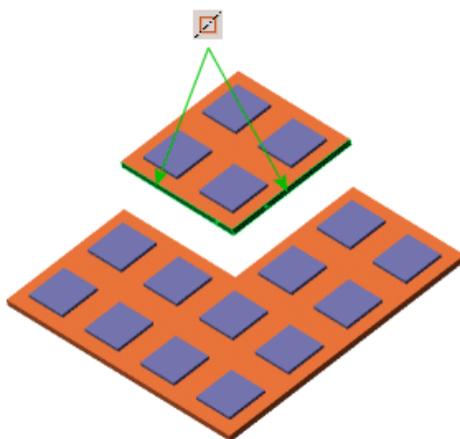


Рисунок 5.1 – Модель кристалла

Сборка изготовлена из квадратной подложки (керамический фарфор) размером 40 мм и толщиной 1 мм. На подложке размещены 16 квадратных кристаллов размером 6 мм и толщиной 0,5 мм.

Каждый кристалл выделяет максимальную тепловую мощность 0,2 Вт. Тепловая мощность увеличивается от нуля в начальный момент времени ($t = 0$) и достигнет максимального значения (0,2 Вт) через 60 с ($t = 60$). Коэффициент теплопроводности кристалла изменяется с температурой.

Тепло из подложки рассеивается посредством конвекции. Коэффициент конвективной теплопередачи (коэффициент пленки) равен $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а объёмная (окружающей среды) температура равна 300 К.

Вследствие наличия двух плоскостей симметрии анализируется одна четверть модели (см. рисунок 5.1).

1 Нажмите стрелку вниз в разделе **Консультант исследования** и выберите пункт **Новое исследование**.

2 В окне PropertyManager в поле **Имя** введите **SteadyState**.

3 В разделе **Тип** нажмите **Термическая**.

4 Щёлкните **ОК**.

Для проверки типа термического исследования:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши значок исследования и выберите **Свойства**.

2 В диалоговом окне на вкладке **Параметры**, в списке **Тип решения** проверьте, что выбрано исследование **Установившееся состояние**.

3 Нажмите **ОК**.

Подложка изготовлена из керамического фарфора. Назначьте этот материал подложке из библиотеки материалов. Для этого:

1 В дереве исследований нажмите правой кнопкой мыши значок **Substrate-1** в разделе **Детали** и выберите **Применить/редактировать материал**.

2 В диалоговом окне разверните папки **Материалы SolidWorks**, **Другие неметаллы** и выберите **Керамика фарфор**.

3 Нажмите **Применить**.

4 Нажмите кнопку **Заккрыть**.

Введите приведённые свойства материала кристалла вручную:

- модуль упругости: $4,1 \cdot 10^{11}$ Н/м²;
- коэффициент Пуассона: 0,3;
- массовая плотность: 1250 кг/м³;
- теплопроводность: зависит от температуры;
- коэффициент теплового расширения: 10^{-6} К⁻¹;
- удельная теплоёмкость: 670 Дж/(кг · К).

Коэффициент теплопроводности (КХ) кристаллов зависит от температуры. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры материала кристалла задана в таблице 5.1.

Таблица 5.1 –Значения коэффициента теплопроводности и температуры

Температура, К	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)
100	390
150	260
200	195
250	156
300	130
350	110

Чтобы назначить свойства материала кристаллов:

1 В дереве Simulation выберите четыре кристалла.

2 Нажмите **Применить материал** (Диспетчер команд Simulation).

3 В диалоговом окне нажмите правой кнопкой мыши **Материалы**



пользователя и выберите **Новая категория**.

4 Нажмите правой кнопкой мыши папку **Новая категория** и выберите **Новый материал**. Затем выберите только что определённый материал.

5 В окне **Свойства материала**:

- выберите **Линейный упругий изотропный** в **Тип модели**;
- выберите **SI – Н/м²** в разделе **Единицы измерения**;
- введите **Материал кристалла** в поле **Имя**.

6 В таблице свойств материала нажмите внутри окна **Значение** для каждого из свойств материала, показанных выше (за исключением КХ) и введите его значение.

7 Чтобы назначить зависимый от температуры коэффициент теплопроводности выполните следующие действия:

- в поле **Значение** свойства **Теплопроводность** выберите **Температурно-зависимо**;
- на вкладке **Таблицы и кривые** выберите **Теплопроводность в X** в сравнении с температурой в поле **Тип**;
- в окне **Данные таблицы** установите **Единицы измерения** на **К** (кельвин) и **Вт/(м · К)**. Введите пары данных «температура – теплопроводность», согласно данным таблицы 5.1.

В области **Предварительный просмотр** отображается кривая во время ввода данных. Чтобы просмотреть фактическую кривую, выберите **Вид**.

8 Нажмите **Применить** и затем **Заккрыть**.

Примените термические нагрузки и граничные условия к сборке:

- тепловую мощность (объем теплоты) к четырём кристаллам;
- конвекцию на тыльную поверхность подложки и на поверхности, показанные на рисунке 5.2.

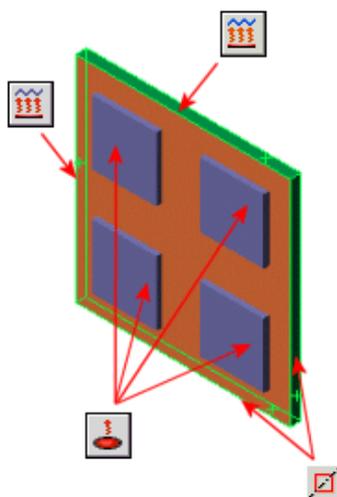


Рисунок 5.2 – Поверхности нагрева и охлаждения

Примените тепловую мощность к объёму каждого кристалла модели:

1 Нажмите **Термические нагрузки** и выберите **Тепловая мощность**. Появится **Тепловая мощность** PropertyManager (Менеджера свойств).

2 В графической области щелкните для раскрытия плавающего дерева конструирования FeatureManager.

3 Выберите значки **Chip** (кристалл)<1>, **Chip**<2>, **Chip**<3> и **Chip**<4>. Chip-1, Chip-2, Chip-3 и Chip-4 появятся в окне **Грани, Кромки, Вершины, Компоненты для тепловой мощности**.

4 В окне **Тепловая мощность** выполните следующие операции:
 – установите для параметра **Единицы измерения** значение **СИ**;
 – установите **Тепловая мощность** на **0,2**.

5 Щелкните **ОК**.

Примените конвекцию на нижнюю поверхность подложки, Грань 1 и Грань 2.

Чтобы применить конвекцию:

1 Нажмите **Термические нагрузки** (Simulation CommandManager) и выберите **Конвекция**. Появится окно PropertyManager **Конвекция**.

2 В графической области выберите тыльную поверхность подложки, Грань 1 и Грань 2, как показано на рисунке 5.3. Грань<1>, Грань<2> и Грань<3> появятся в окне **Грани для конвекции**.

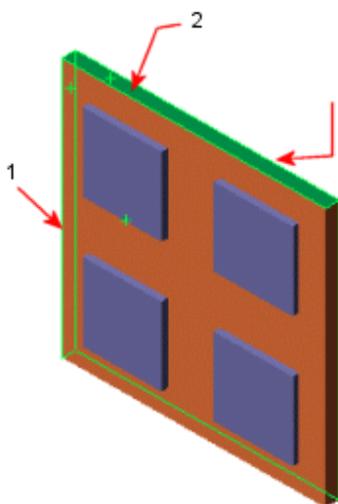


Рисунок 5.3 – Применение конвекции на грани кристалла

3 Установите для параметра **Единицы измерения** значение **СИ**.

4 Установите **Коэффициент конвективной теплоотдачи** на **25**.

5 Установите **Массовая температура окружающей среды** на **300**.

6 Щелкните **ОК**.

Программное обеспечение применяет конвекцию к трём выбранным поверхностям и создаёт один значок в папке **Термические нагрузки**. Обозначения конвекции появятся также на трёх выбранных поверхностях модели.

Чтобы создать сетку модели и запустить исследование:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши значок **Сетка** и выберите **Создать сетку**.

2 В PropertyManager примените следующие настройки.

3 В разделе **Параметры** выберите **Запуск (решение) анализа**.

4 Нажмите **ОК**, чтобы принять значения.

Распределение температуры является эпюрой по умолчанию для термического анализа.

Чтобы просмотреть распределение температуры на поверхности модели кристаллов:

1 В дереве исследований Simulation откройте папку **Результаты**.

2 Дважды щёлкните **Термическое1 (-Температура-)** для отображения эпюры.

На рисунке 5.4 представлено изображение распределения температуры на поверхности кристалла при термическом исследовании.

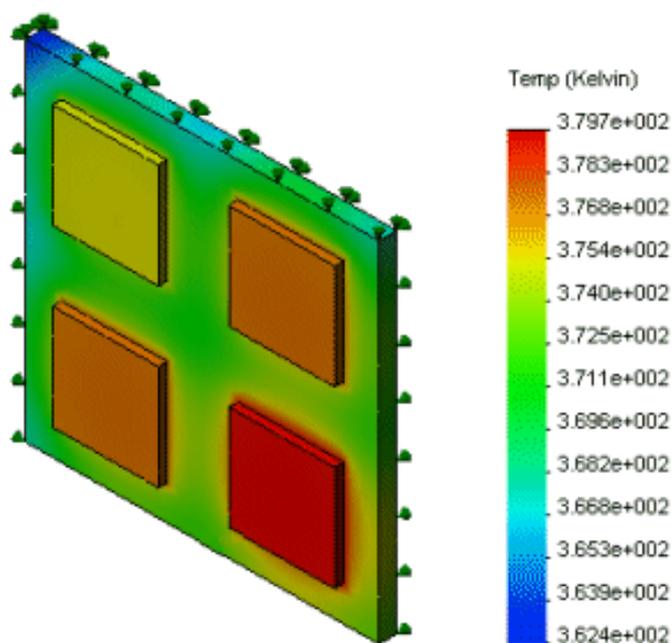


Рисунок 5.4 – Распределение температуры на поверхности кристалла

Угол кристалла является самым холодным, а самое горячее место находится внутри кристалла вследствие конвекции.

Используйте инструмент **Зонд**, чтобы вывести список температур на конкретном местоположении модели. Для этого:

1 При необходимости активизируйте **Термическое1 (-Температура-)** двойным щелчком по его значку.

2 Нажмите **Инструменты эпюры** и выберите **Зондирование**.

3 Выберите вершины, показанные на рисунке 5.5, начиная с нижнего правого угла (местоположение 1).

4 В окне PropertyManager в папке **Результаты** просмотрите температуры и X-, Y-, Z-координаты выбранных вершин в глобальной системе координат.

5 В списке **Параметры отчета** нажмите **Эпюра**.

Появится диалоговое окно **Результат зондирования** с графиком температур в кельвинах на выбранных вершинах относительно номеров узлов на этих вершинах. Заметим, что номера узлов могут не совпадать с изображением.

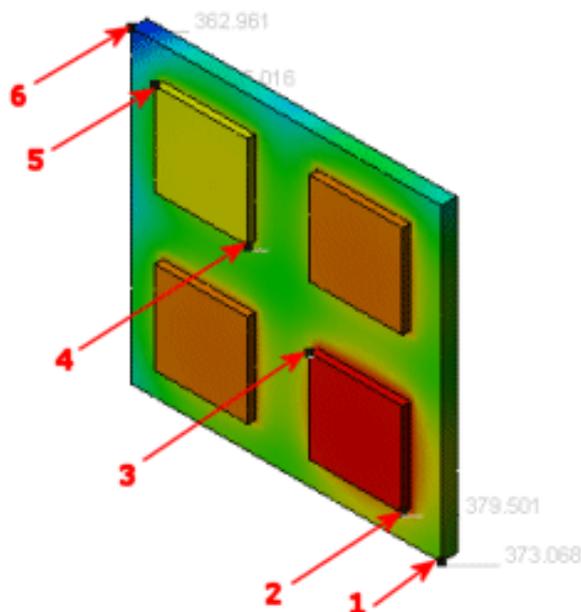


Рисунок 5.5 – Использование зонда

На рисунке 5.6 представлено изображение графика температур диалогового окна **Результат зондирования**, полученное с экрана монитора при термических исследованиях.

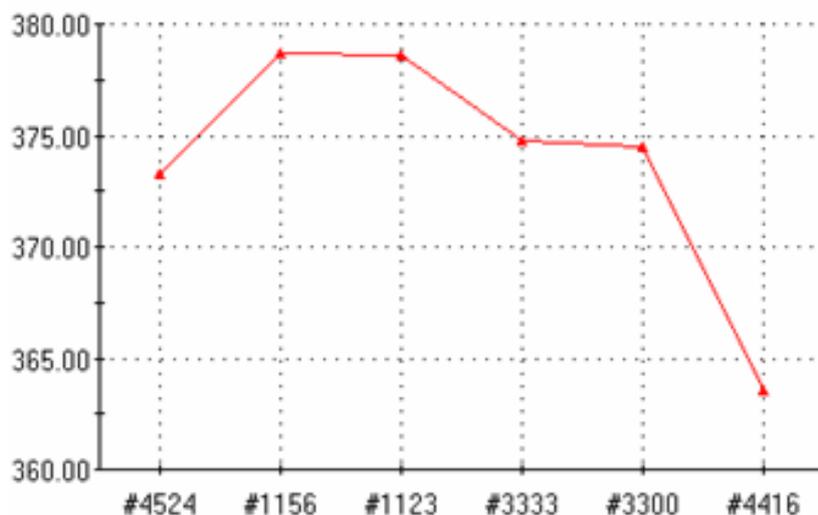


Рисунок 5.6 – Изображение графика температур в точках зондирования

6 В диалоговом окне **Результат зондирования** нажмите **Файл, Заккрыть**.

7 Щёлкните **ОК**.

Эпоуры изолиний температур представляют собой эпоуры изолиний поверхности заданного значения температуры. Используя эпоуры изолиний, можно определять области максимальной температуры модели.

Для получения эпоуры изолиний температур:

1 Нажмите правой кнопкой активной термической эпоуры в дереве

исследования Simulation и выберите **Ограничение Iso**.

2 В окне PropertyManager (Менеджер свойств) в разделе **Iso 1** перетащите ползунок **Значение Iso** по направлению к правому концу шкалы.

3 В окне группы **Параметры** выберите **Этюра только на изоповерхности**.

4 Щёлкните **ОК**.

Отобразится изоповерхность с заданной температурой, как указано на рисунке 5.7.

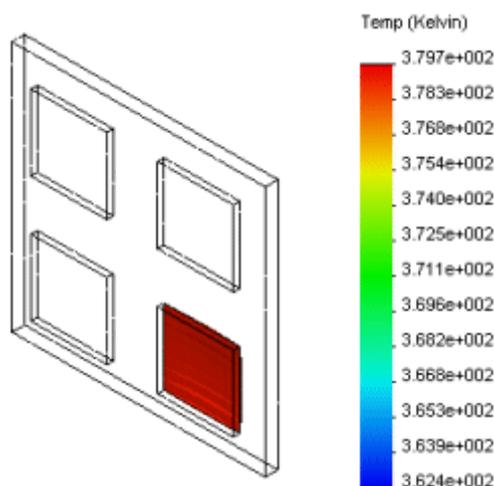


Рисунок 5.7 – Изоповерхность с заданной температурой

В установившемся состоянии тепловая энергия, поступающая в систему, должна быть равна тепловой энергии, выходящей из неё. Полная тепловая мощность, выделяемая кристаллами, равна 0,8 Вт. Тепловая энергия выходит из системы через поверхности при конвекции.

Чтобы вывести список тепловой энергии, выходящей из системы путём конвекции:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши на **Результаты** и выберите **Список тепловых мощностей**.

2 В разделе **Единицы измерения** выберите **Ватт**.

3 Выберите три грани, на которых Вы задали конвекцию для параметра **Грани, кромки или вершины**.

4 Нажмите кнопку **Обновить**.

Тепловая мощность, покидающая систему через выбранные грани, записана в разделе **Сводка** как **-0,8 Ватт**. Отрицательный результат означает, что тепловая мощность выходит из системы.

5 Щёлкните **ОК**.

Учтём время в решении этой же задачи. Определим время, требуемое для достижения установившегося состояния.

Чтобы создать исследование переходного термического процесса:

1 Нажмите на стрелку вниз в разделе **Консультант исследования** (Simulation CommandManager) и выберите **Новое исследование**.

2 В окне PropertyManager в разделе **Имя** выберите **Transient (Переходный процесс)**.

3 В разделе **Тип** нажмите **Термическая** и щёлкните **ОК**.

Чтобы определить свойства исследования переходных процессов:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши значок **исследования переходных процессов** и выберите **Свойства**. Появится диалоговое окно **Термический**.

2 В окне **Тип решения** выполните следующие действия:

- выберите **Transient (Переходный процесс)**;
- установите **Общее время** на **900 с**;
- установите **Временной инкремент** на **30 с**.

3 Нажмите **ОК**.

Назначьте начальную температуру 300 К всем компонентам сборки.

Для этого:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши значок **Термические нагрузки** в исследовании переходных процессов и выберите **Температура**.

Появится **Температура PropertyManager (Менеджера свойств)**.

2 В окне **Тип** выберите **Начальная температура**.

3 Выберите все компоненты сборки, появившиеся в плавающем дереве конструирования FeatureManager.

Выбранные компоненты появятся в окне **Грани, Кромки, Вершины, Компоненты для температуры**.

4 В разделе **Температура** введите **300** в поле значений и выберите **Кельвин** в качестве единиц измерения.

5 Щёлкните **ОК**.

Программа назначает указанные температуры и создает значок в папке **Термические нагрузки**.

Тепловая мощность начинается с нулевого значения при $t = 0$ и достигнет максимума 0,2 Вт через 60 с. Изменение во времени тепловой мощности определяется файлом данных кривой. Чтобы включить эту зависимость от времени, отредактируйте условия тепловой мощности.

Чтобы добавить функциональную кривую:

1 Нажмите **Simulation, Параметры**.

2 На вкладке **Параметры системы** выберите **Библиотека по умолчанию**.

3 Выберите **Библиотеки функций кривых** в **Отобразить папки для**.

4 Нажмите кнопку **Добавить** и перейдите в каталог $\langle Examples_dir \rangle \backslash Thermal$.

5 Дважды щёлкните **ОК**.

Чтобы отредактировать условие тепловой мощности:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши значок **Тепловая мощность-1** в папке **Тепловые нагрузки** и выберите **Редактировать определение**.

2 В окне PropertyManager в разделе **Тепловая мощность** нажмите **Использовать кривую времени**, затем нажмите **Редактировать**.



3 В диалоговом окне **Кривая времени** нажмите **Получить кривую**.

4 В диалоговом окне **Открыть** выберите **HeatPower_time_curve.cwcur** и щелкните **Открыть**.

5 В диалоговом окне **Кривые функций** нажмите **Кривая времени-1** в списке **Кривая времени**. Данные кривой появятся в окне **Данные кривой**. Чтобы просмотреть кривую времени, выберите **Вид**.

6 Дважды щёлкните **ОК**.

7 Нажмите **ОК** для завершения определения зависящей от времени тепловой мощности.

Перед запуском исследования переходных процессов требуется иметь сетку. Также необходимо иметь совместимую сетку между двумя связанными компонентами.

Чтобы определить совместимую сетку для связанных компонентов:

1 В дереве исследований Simulation нажмите правой кнопкой мыши **Глобальный контакт (-Связанный)** и выберите параметр **Редактировать определение**.

2 В PropertyManager в разделе **Параметры** выберите **Совместимая сетка**.

3 Щёлкните **ОК**.

Чтобы создать сетку модели и выполнить исследование переходных процессов:

1 В дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши значок **Сетка** и выберите **Создать сетку**.

2 В PropertyManager в разделе **Параметры** воспользуйтесь параметром **Стандартная сетка с Глобальным размером 1,50 мм**.

3 В разделе **Параметры** выберите **Запуск (решение) анализа** и нажмите **ОК**.

Анализ переходного процесса предоставляет профили температуры в требуемые моменты времени решения. Чтобы просмотреть температуры на 30-й секунде:

1 В дереве исследований Simulation откройте папку **Результаты**.

2 Дважды щёлкните **Термическое (-Температура-)** для отображения эпюры. Если эпюра не существует, **создайте эту эпюру**.

3 Нажмите правой кнопкой мыши **Термическое (-Температура-)** и выберите **Редактировать определение**.

4 В окне PropertyManager в разделе **Отобразить** выберите **Кельвин** в меню **Единицы измерения**.

5 В разделе **Шаг эпюры** установите значение **1**.

6 Щёлкните **ОК**.

Отобразится профиль температур в кельвинах на 30-й секунде (первый временной шаг), как показано на рисунке 5.8.

Чтобы просмотреть температуры на 900-й секунде:

1 Нажмите стрелку вниз в разделе **Консультант по результатам (Simulation CommandManager)** и выберите **Термическая** в списке **Новая эпюра**.



2 В окне PropertyManager в разделе **Отобразить** выберите **Кельвин** в меню **Единицы измерения**.

3 В разделе **Шаг эюры** установите значение **30**.

4 Щёлкните **ОК**. Отобразится профиль температур на 900-й секунде (последний временной шаг).

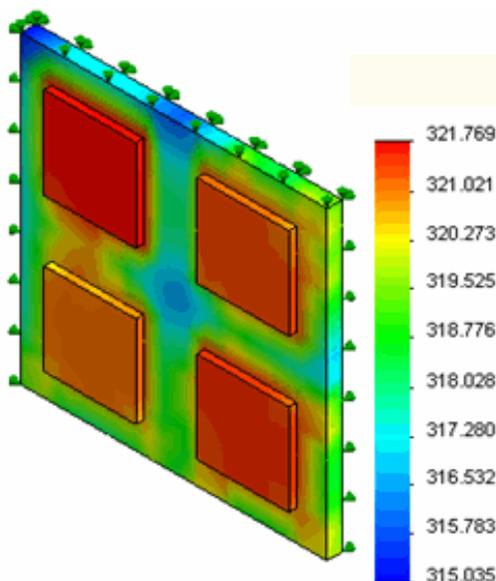


Рисунок 5.8 – Профиль температур на 30-й секунде

Профиль температур на 900-й секунде близок (отличие на 0,4 %) к решению установившегося состояния, полученному в первой части практического занятия. Чтобы получить точные результаты, увеличьте плотность сетки для использования размера сетки по умолчанию.

Используйте инструмент **Зонд**, чтобы построить кривую «температура – время» в желаемом местоположении поверхности модели следующим образом:

1 В дереве исследования Simulation активизируйте **Thermal1 (Температура)** двойным щелчком по его значку.

2 Нажмите **Инструменты эюры** (Simulation CommandManager) и выберите **Зондирование**.

3 Выберите вершину, показанную на рисунке 5.9.

На рисунке 5.10 представлено изображение зависимости температуры (ось y) выбранной вершины относительно номера временного шага (ось x), полученное с экрана монитора при термических исследованиях.

На рисунке 5.10 видно, что условие установившегося состояния достигается приблизительно через 600 с (соответствует 20-му временному шагу).

5 Закройте окно графика, нажимая **Файл, Заккрыть**.

6 Щёлкните **ОК**.

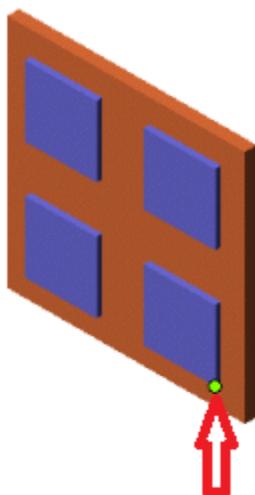


Рисунок 5.9 – Выбор вершины для зондирования

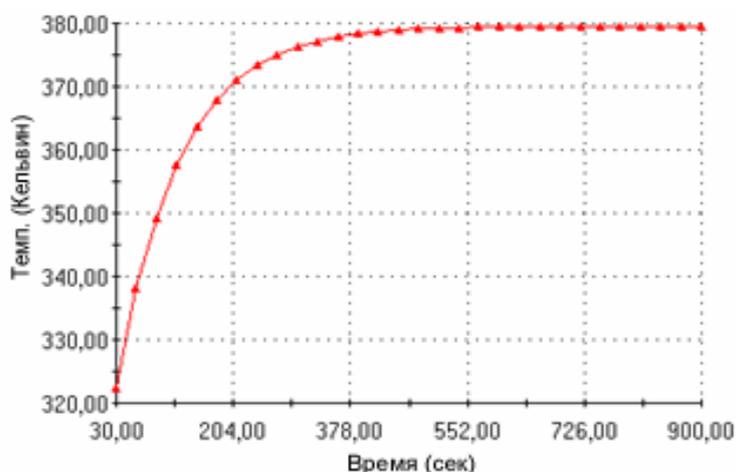


Рисунок 5.10 – Изображение графика «температура – время», полученное с экрана монитора при термических исследованиях

Задание на практическое занятие

Получить у преподавателя чертёж сварной конструкции и выполнить термический анализ.

Вопросы для самопроверки

- 1 Сущность термического исследования установившегося состояния.
- 2 Особенности задания свойств материала при термическом анализе.
- 3 Порядок определения зависящих от температуры свойств материала.
- 4 Порядок определения термических нагрузок и граничных условий.
- 5 Порядок создания эпюры изолиний температуры.
- 6 Порядок исследования переходного термического процесса.
- 7 Порядок определения зависящей от времени термической нагрузки посредством импортирования предопределённой кривой времени.
- 8 Создание графиков термических результатов относительно времени.

6 Практическое занятие № 6. Решение дифференциального уравнения в частных производных с помощью МКЭ на примере решения краевой задачи для уравнения Лапласа

Цель работы. Ознакомиться со следующими процедурами: создание оптимизационного исследования проектирования; определение переменных, ограничения и целей; просмотр результатов процесса оптимизации; создание графиков локальной тенденции.

Пример выполнения анализа

Консольный кронштейн поддерживается и нагружен, как показано на рисунке 6.1. Выполнить оптимизацию для изменения размера центрального выреза. Цель – минимизировать объем без превышения максимального напряжения и значения деформаций. Минимальная собственная частота должна быть в пределах установленного диапазона.

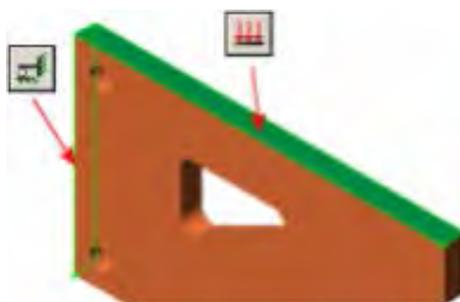


Рисунок 6.1 – Модель кронштейна с ограничениями и нагрузкой

Исследование проектирования позволяет автоматизировать процесс оптимизации, используя параметрические и моделирующие функции программы, а также её способности автоматической регенерации.

Деталь примера включает два начальных исследования.

1 **ReadyStatic**. Включает материал из легированной стали, давление $5 \cdot 10^6$ Н/м² и ограничение **Фиксированный**, как показано на рисунке 6.1.

2 **ReadyFrequency**. Включает материал из легированной стали и ограничение **Фиксированный**, как показано на рисунке 6.1.

Оптимизационные исследования проектирования требуют наличия исходных исследований, если датчики используются в качестве ограничений или целей. Требуемые исходные исследования зависят от целей и ограничений, которые задаёт пользователь. Например, для минимизации значения резонансных частот необходимо определить исходное частотное исследование. Для этого:

1 Нажмите вкладку исследования **ReadyStatic**, затем в дереве исследования Simulation нажмите правой кнопкой мыши **ReadyStatic** и выберите **Запуск**.

Статический анализ показывает максимальное напряжение по Мизесу (VON) приблизительно $1,21 \cdot 10^8$ Н/м² и максимальное перемещение (URES)

примерно 0,08244 мм.

2 Нажмите вкладку исследования **ReadyFrequency**, затем в дереве исследования **Simulation** нажмите правой кнопкой мыши **ReadyFrequency** и выберите **Запуск**.

Частотный анализ показывает наименьшую собственную частоту приблизительно 366,01 Гц. Наилучшим вариантом является запуск первичного исследования и получение оценки ожидаемых результатов. Также можно выбрать экстремальные значения для всех размеров модели и запустить выбранные исследования, чтобы убедиться в отсутствии ошибок построения.

Далее создаётся Оптимизационное исследование проектирования. Для этого:

1 Нажмите правой кнопкой мыши вкладку **ReadyFrequency** и выберите пункт **Создать новое исследование проектирования**.

Также можно использовать другие вкладки исследования для создания Исследования проектирования.

2 Нажмите правой кнопкой мыши вкладку Исследования проектирования и выберите **Переименовать**. Назовите исследование **MinVolume (МинОбъем)**.

3 На вкладке **MinVolume** выберите **Параметры исследования проектирования**.

4 В PropertyManager в разделе **Качество исследования проектирования** выберите **Высокое качество (медленнее)**.

Программа находит оптимальное решение, используя множественные проходы (конструкция **Box-Behnken**), и отображает исходный сценарий, оптимальный сценарий и все проходы.

5 Щёлкните **ОК**.

Необходимо определить размеры модели, которые могут изменяться как параметры. Эти параметры будут использоваться в качестве переменных для Исследования проектирования. Можно определить любые параметры **Simulation** и управляющие глобальные переменные в качестве переменных.

Параметр **DV1** предварительно определён в файле примера. Чтобы выполнить описанную ниже процедуру, удалите предварительно определённый параметр в диалоговом окне **Параметры**.

Чтобы определить параметр **DV1**:

1 На вкладке **Вид переменной** вкладки исследования **MinVolume (МинОбъем)** в разделе **Переменные** выберите **Добавить параметр**.

2 В диалоговом окне **Параметры** введите **DV1** в поле **Имя** внизу столбца.

3 Установите для параметра **Категория** значение **Размеры модели**.

4 В графической области выберите размер **D11**, показанный на рисунке 6.2.

5 Нажмите кнопку **ОК**, чтобы закрыть диалоговое окно **Параметры**.

6 Нажмите кнопку, чтобы закрыть окно PropertyManager **Размер. Параметры DV2 и DV3** определены в файлах примеров с использованием похожей процедуры.



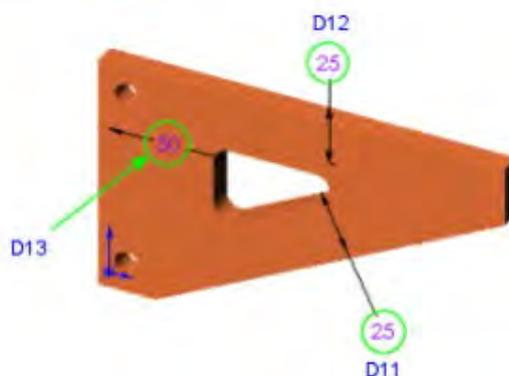


Рисунок 6.2 – Переменные размеры кронштейна

Определите три параметра **DV1**, **DV2** и **DV3** в качестве переменных. Для этого:

1 На вкладке **Вид переменной** вкладки исследования **MinVolume (МинОбъем)** в разделе **Переменные** выберите **DV1** (D11@Sketch1 в эскизе). Выбранная переменная отобразится в разделе **Переменные**.

2 Для переменной **DV1** выберите **Диапазон**.

Программа определяет параметр как непрерывную переменную для оптимизации. Непрерывная переменная – это переменная, которая может принимать любое значение внутри пределов. Например, 14,1567 мм является допустимым значением между минимальным значением 10 мм и максимальным значением 25 мм.

3 В поле **Мин** введите **10 мм**, а в поле **Макс** – **25 мм**. Программа варьирует размеры модели между 10 и 25 мм для нахождения оптимального значения для переменной.

4 Повторите пп. 1–3 для добавления параметра **DV2** (D12@Sketch1 в эскизе) в качестве переменной. Используйте те же минимальные и максимальные значения, как для **DV1**.

5 Повторите пп. 1–3 для добавления параметра **DV3** (D13@Sketch1 в эскизе) в качестве переменной. Введите 20 и 50 для параметров **Мин** и **Макс** соответственно.

Раздел **Переменные** содержит три переменных проекта. Необходимо определить датчики для их использования в качестве ограничений в Исследовании проектирования. Исследование проектирования запускает соответствующее исходное исследование Simulation для обновления значения датчика. Например, оно запускает частотное исследование для отслеживания значений резонансных частот.

Определите датчик для отслеживания напряжения по Мизесу:

1 На вкладке **Вид переменной** вкладки исследования **MinVolume (МинОбъем)** в разделе **Ограничения** выберите **Добавить датчик**.

2 В окне PropertyManager в разделе «Тип датчика» выберите **Данные моделирования**.

3 В окне **Данные количественной величины** в разделе «Результаты» выберите **Напряжение**.

4 Установите Компонент на **VON: напряжение по Мизесу**.

5 В разделе «Свойства» в поле **Единицы измерения** выберите значение **Н/мм² (МПа)**.

6 В поле **Критерий** выберите **Макс модели** и нажмите **ОК**.

Посмотрите датчики **URES**, **Частота** и **Объем1**, которые отслеживают результирующее перемещение, минимальную собственную частоту и объем кронштейна соответственно. Ограничение применяется к максимальному напряжению по Мизесу, которое не должно превышать значение 300 МПа.

Для определения ограничений в исследовании проектирования «оптимизация» можно использовать любой датчик или любую управляемую глобальную переменную. Для этого:

1 Убедитесь, что созданный датчик напряжения выбран на вкладке исследования проектирования **MinVolume**, в разделе **Ограничения**.

2 В поле «Ограничение» выберите значение **Меньше чем**.

3 В поле **Макс.** введите **300 Н/мм²**.

Программа автоматически выбирает исследование **ReadyStatic**, используемое для запуска и отслеживания значения датчика, поскольку определено только одно статическое исследование. Максимальная результирующая деформация не должна превышать 0,21 мм. Тогда:

1 На вкладке Исследования проектирования **MinVolume** в разделе **Ограничения** в списке выберите **URES**. Датчик отобразится в разделе **Ограничения**. Этот заранее определённый датчик отслеживает значение результирующего перемещения.

2 В поле **URES** выберите значение **Меньше чем**.

3 В поле **Макс** введите значение **0,21** мм. Программа автоматически выберет исследование **ReadyStatic** для запуска и отследит значение датчика. Наинизшая собственная частота должна быть в диапазоне от 260 до 400 Гц.

4 На вкладке Исследования проектирования **MinVolume** в разделе **Ограничения** в списке выберите **Частота**. Датчик отобразится в разделе **Ограничения**. Этот датчик отслеживает значение наинизшей собственной частоты.

5 Для параметра **Частота** выберите значение **В диапазоне**.

6 В поле **Мин** введите **260** Гц, а в поле **Макс** введите **400** Гц. Программа автоматически выберет исследование **ReadyFrequency** для запуска и отследит значение датчика. Вы определили три ограничения.

Целью настоящего Оптимизационного исследования проектирования является минимизация объёма детали. Тогда:

1 На вкладке Исследования проектирования **MinVolume** в разделе **Цели** в списке выберите датчик **Объем1**. Датчик отобразится в разделе **Цели**.

2 В поле **Объем1** выберите **Минимизировать**.

Можно также определить несколько целей в Оптимизационном исследовании проектирования. Можно присвоить значимость каждой из целей. Чем выше вес цели, тем более важную роль он играет при оптимизации цели. Программа изменяет окончательный вес цели следующим образом: (введённая пользователем значимость цели) / (сумма значимостей введённых пользователем целей).

На вкладке Исследования проектирования **MinVolume** выберите **Запуск**.



Программа выполняет 13 итераций (исключая исходный и оптимальный сценарии) после определения исследования **Высокого качества** и трёх расчётных переменных. После выполнения экспериментов программа рассчитывает оптимальные расчётные параметры путём создания функции отклика, относящейся к цели переменных.

На вкладке **Просмотр результатов** исследования проектирования **MinVolume** выполните следующие действия:

1 Выберите столбец **Начальное**. В графическом окне к модели будут применены начальные размеры, как показано на рисунке 6.3.

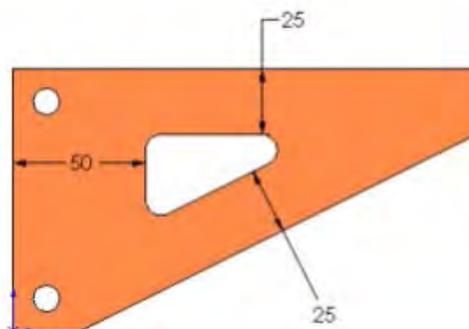


Рисунок 6.3 – Начальные расчётные параметры кронштейна

2 Просмотрите столбец **Iteration 4** (рисунок 6.4). Этот столбец выделен красным цветом, поскольку нарушены ограничения, касающиеся напряжения по Мизесу и перемещения.

Можно выбрать любой повтор и просмотреть соответствующий проект в графическом окне.

Iteration 4		Optimal	
DV1	10mm	DV1	10.15358mm
DV2	10mm	DV2	21.91673mm
DV3	35mm	DV3	20.22934mm
Stress1	692.98 N/mm ²	Stress1	265 N/mm ²
Displacement1	0.81315mm	Displacement1	0.20565mm
Frequency1	315.76682 Hz	Frequency1	275.0127 Hz
Volume1	64022.28483mm ³	Volume1	70744.73193mm ³

Рисунок 6.4 – Отражение на экране монитора оптимальных расчётных параметров кронштейна

3 Взгляните на столбец **Optimal** (см. рисунок 6.4). Этот столбец выделен зелёным цветом, поскольку оптимизация выполнена успешно.

4 Выберите столбец **Optimal** (см. рисунок 6.4).

В графическом окне к модели (рисунок 6.5) будут применены оптимальные размеры.

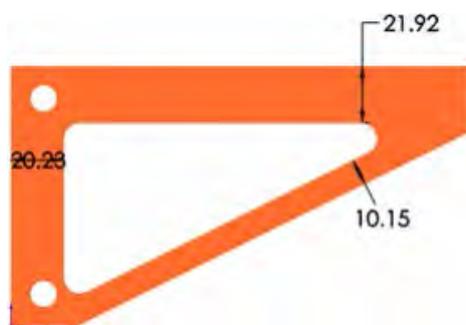


Рисунок 6.5 – Оптимальные расчётные параметры кронштейна на модели

Можно создать графики локальной тенденции для просмотра вариаций ограничения или цели и расчётного параметра. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1 В левой рамке вкладки Исследование проектирования нажмите правой кнопкой мыши папку **Результаты и графики** и выберите **Определить график локальной тенденции**.

2 В окне PropertyManager в разделе **Ось X** выберите **DV2**.

3 В PropertyManager в разделе **Ось Y** выберите **Ограничение** и в **Ограничении** выберите **По Мизесу**.

4 В разделе **График локальной тенденции** выберите **Оптимальный**.

5 Нажмите **ОК**.

Программа создаёт график вариации максимального напряжения по Мизесу по сравнению с расчётной переменной **DV2** (рисунок 6.6). Тенденция отображается с двумя другими расчётными параметрами, установленными на оптимальные значения, как показано в столбце **Оптимальный**. Единицы измерения – мегапаскаль и миллиметр для осей Y и X соответственно.

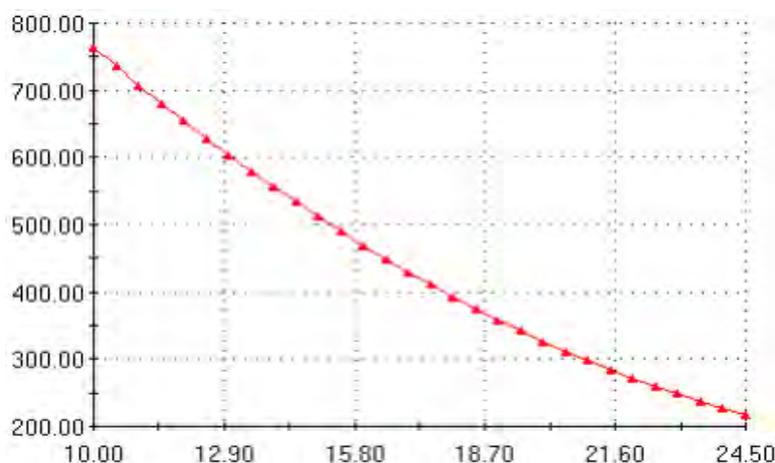


Рисунок 6.6 – Изображение на экране монитора графика вариации максимального напряжения по Мизесу по сравнению с расчётной переменной **DV2**

6 Закройте график.

Для целей производства при определении непрерывных расчётных параметров следует округлить их до ближайшего числа, которое может быть измерено с точностью процесса изготовления. Для окончательных чертежей округлить расчётные параметры, перестроить модель, создать сетку и запустить статическое исследование.

В качестве альтернативы можно использовать дискретные значения для переменных, которые должны соответствовать стандартам процесса изготовления, и выполнить оптимизацию.

Задание на практическое занятие

Получить у преподавателя чертёж сварной конструкции и выполнить исследование с целью минимизации её веса.

Вопросы для самопроверки

- 1 Сущность оптимизационного исследования проектирования.
- 2 Порядок определения переменных, ограничения и целей.
- 3 Порядок просмотра результатов процесса оптимизации.
- 4 Порядок создания графиков локальной тенденции.



Список литературы

1 **Алямовский, А. А.** Solidworks Simulation и FloEFD : практика, методология, идеология / А. А. Алямовский. – 2-е изд. – Москва : ДМК Пресс, 2020. – 657 с.

2 **Алямовский, А. А.** Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – 2-е изд. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 464 с.

3 **Кондаков, А. И.** САПР технологических процессов: учебник для вузов / А. И. Кондаков. – 3-е изд., стер. – Москва : Академия, 2010. – 272 с.

