

КУРС ЛЕКЦИЙ-ПРЕЗЕНТАЦИЙ

по дисциплине

«Проектирование сварных конструкций»

лекция №17

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ:

к.т.н., ст. преп. кафедры «ОиТСП»

БЕНДИК Татьяна Ивановна

СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИИ

Тема 11. Современные технологии проектирования и графического моделирования.

- Принципы построения систем геометрического моделирования, выбор программных средств для решения задач.
- Назначение и методы моделирования процессов, протекающих в металле.
- Моделирование процессов в металлах сварных конструкций методом конечных элементов. Основные положения метода конечных элементов.
- Примеры численных расчетов на основе метода конечных элементов и их сравнение с аналитическими данными.

С развитием вычислительных средств практически все современные расчёты на прочность проводят, используя **метод конечных элементов** (МКЭ) в англоязычной литературе **finite element method (FEM)** или **finite element analysis (FEA)**.

Метод конечных элементов (МКЭ) — численный метод решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидро- и электродинамики.

Возникновение метода конечных элементов связано с решением задач космических исследований в [1950-х](#) годах .

Существенный толчок в своём развитии МКЭ получил в [1963 году](#) после того, как было доказано то, что его можно рассматривать как один из вариантов распространённого в строительной механике [метода Рэлея — Ритца](#), который путём минимизации потенциальной энергии сводит задачу к системе линейных уравнений равновесия. После того, как была установлена связь МКЭ с процедурой минимизации, он стал применяться к задачам, описываемым [уравнениями Лапласа](#) или [Пуассона](#). Область применения МКЭ значительно расширилась, когда было установлено (в [1968 году](#)), что уравнения, определяющие элементы в задачах, могут быть легко получены с помощью таких методов как [метод Галёркина](#) или [метод наименьших квадратов](#). Это сыграло важную роль в теоретическом обосновании МКЭ, так как позволило применять его при решении многих типов дифференциальных уравнений.

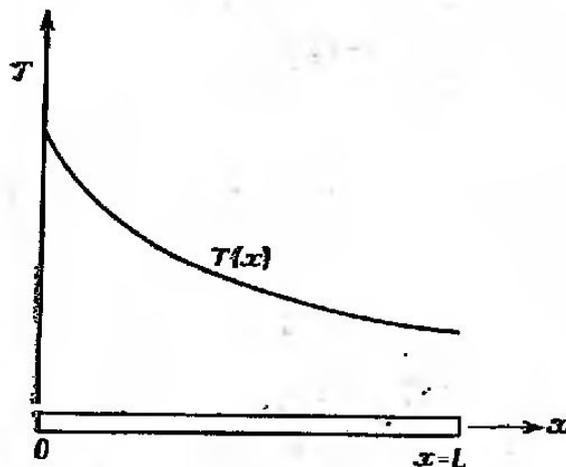
Таким образом, метод конечных элементов превратился в общий метод численного решения дифференциальных уравнений или систем дифференциальных уравнений. Фактически все современные прочностные расчеты проводятся на ЭВМ с использованием математических моделей, решаемых на основе МКЭ.

Основная идея МКЭ состоит в том, чтобы любую непрерывную величину, такую как температура, давление, перемещение можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей.

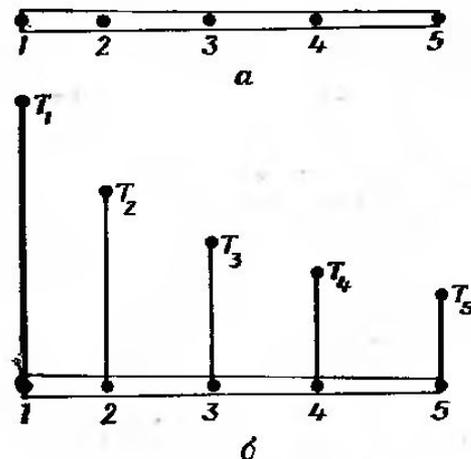
Построение дискретной модели включает:

1. В рассматриваемой области фиксируется конечное число точек (их называют узловыми точками или просто узлами (nodes))
2. Значение непрерывной величины в каждом узле считается переменной, значение которой нужно определить
3. Область определения непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами (elements)
4. Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе полиномом (уравнением), который определяется с помощью значений в узлах.

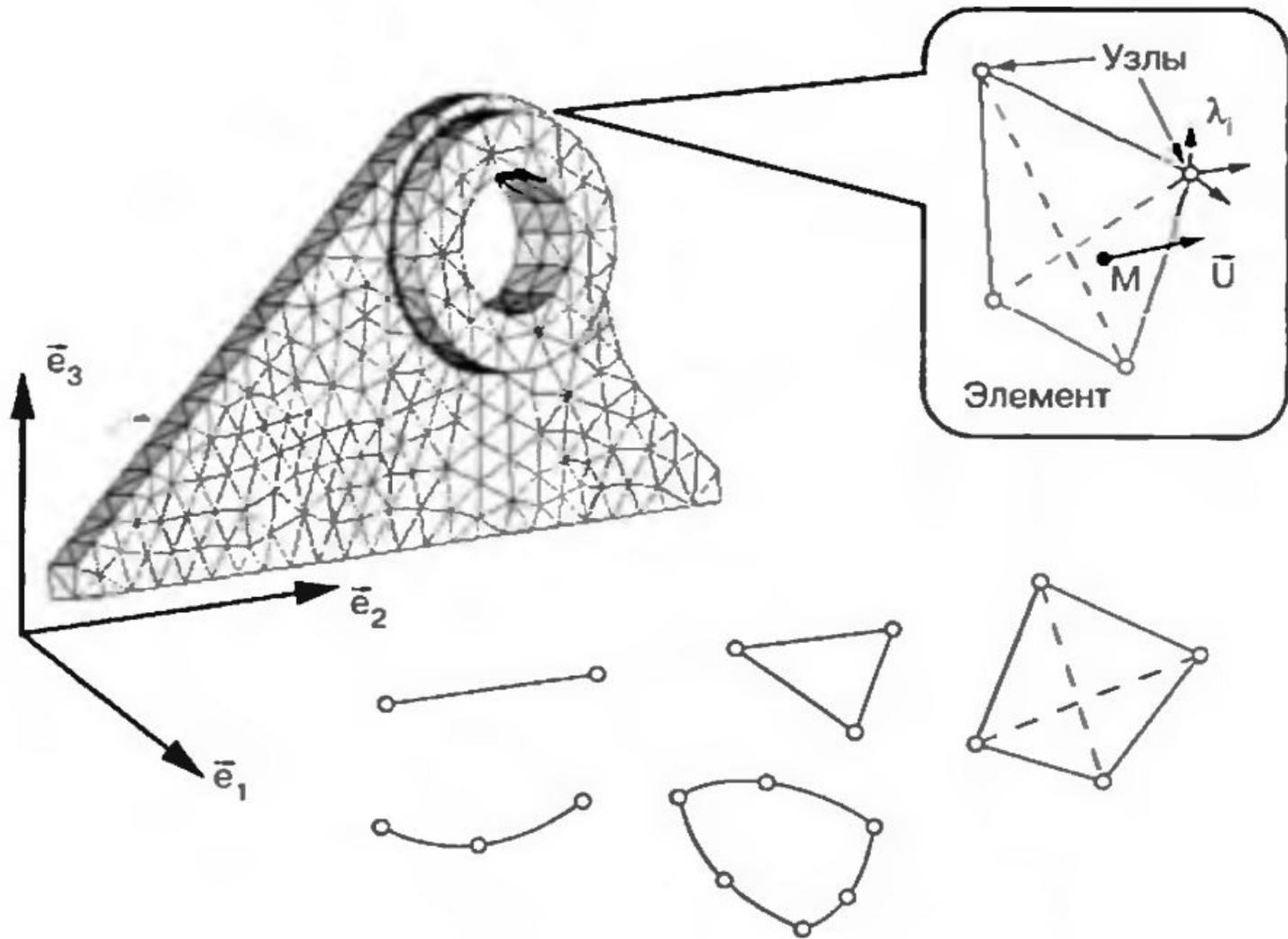
На рисунке показана непрерывная величина $T(x)$, область ее определения отрезок OL . Фиксированы и пронумерованы 5 точек (узлов).



Фиг. 1.1. Распределение температуры в одномерном стержне.



Фиг. 1.2. Узловые точки и предполагаемые значения $T(x)$.



В настоящее время область применения метода конечных элементов очень обширна и охватывает все физические задачи, которые могут быть описаны дифференциальными уравнениями. Наиболее важными преимуществами метода конечных элементов, благодаря которым он широко используется, являются следующие:

1. Свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одинаковыми. Это позволяет применять метод к телам, составленным из нескольких материалов.

2. Криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов или описана точно с помощью криволинейных элементов. Таким образом, методом можно пользоваться не только для областей с «хорошей» формой границы.

3. Размеры элементов могут быть переменными. Это позволяет укрупнить или измельчить сеть разбиения области на элементы, если в этом есть необходимость.

4. С помощью метода конечных элементов не представляет труда рассмотрение граничных условий с разрывной поверхностной нагрузкой, а также смешанных граничных условий.

Граничные условия — это сведения об искомым непрерывных функциях φ и (или) их производных на границе S области определения объекта Ω , характеризующие условия взаимодействия с окружающей внешней средой. *Начальные условия* — это значения этих же функций во всей области определения в начальный момент времени. Начальные условия задаются только при решении нестационарных задач (при исследовании переходных процессов).

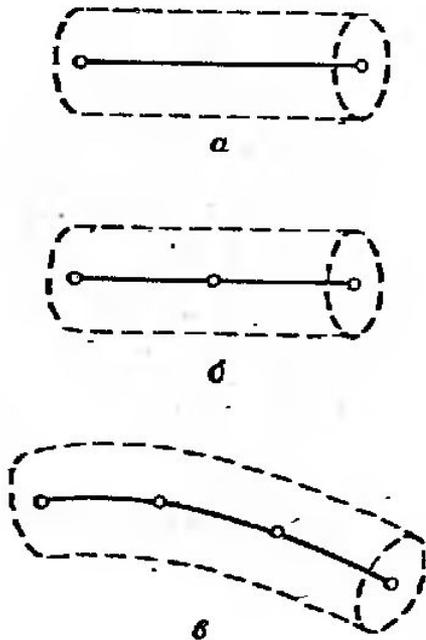
При решении **тепловой задачи** учитываются, как правило, следующие **начальные и граничные условия**: распределение температуры в начальный момент времени; изотермические границы с постоянной температурой; конвективный теплообмен между свободными поверхностями объекта и окружающей средой; теплопроводность в зоне контакта тел.

При решении **деформационных задач** учитываются, как правило, следующие **начальные и граничные условия**: отсутствие напряжений в исследуемой среде в начальный момент времени; распределенная или точечная внешняя механическая нагрузка (сила, давление); фиксированное перемещение или ограничение перемещения узлов модели (жесткая заделка, шарнирная опора и т.д.)

Дискретизация тела включает задание числа, размеров и формы КЭ. С одной стороны элементы должны быть достаточно малыми, чтобы получались точные результаты расчета, а с другой стороны, малые размеры КЭ приводят к увеличению их числа и увеличению вычислительных затрат.

При решении задач МКЭ используют КЭ различных типов. Выбор типа КЭ в основном определяется размерностью задачи (линейная, плоская, осесимметричная или объемная), а также видом анализа (тепловой, деформационный и т.д).

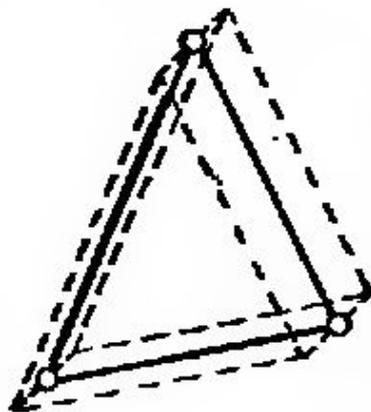
Простейшими являются одномерный КЭ. Схематически он изображается в виде отрезка, хотя имеет поперечное сечение (наиболее часто используется в строительной механике при расчете стержневых конструкций типа ферм).



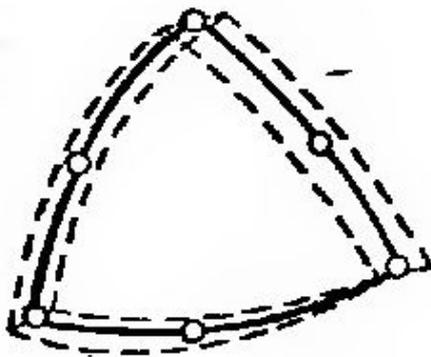
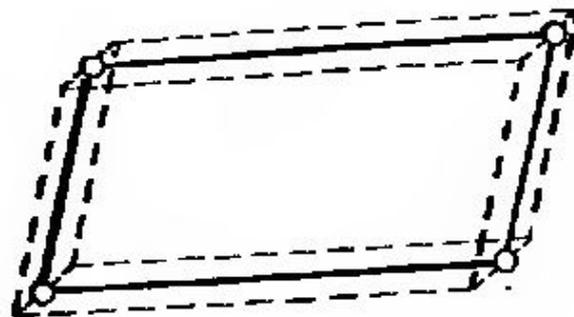
Одномерный элемент может быть 2-х узловым, 3-х и 4-х узловым
Ось может быть криволинейной.

Фиг. 2.1. Некоторые одномерные конечные элементы.

Для построения дискретной модели двумерной области используются 2 основных семейства элементов: треугольные и четырехугольные.

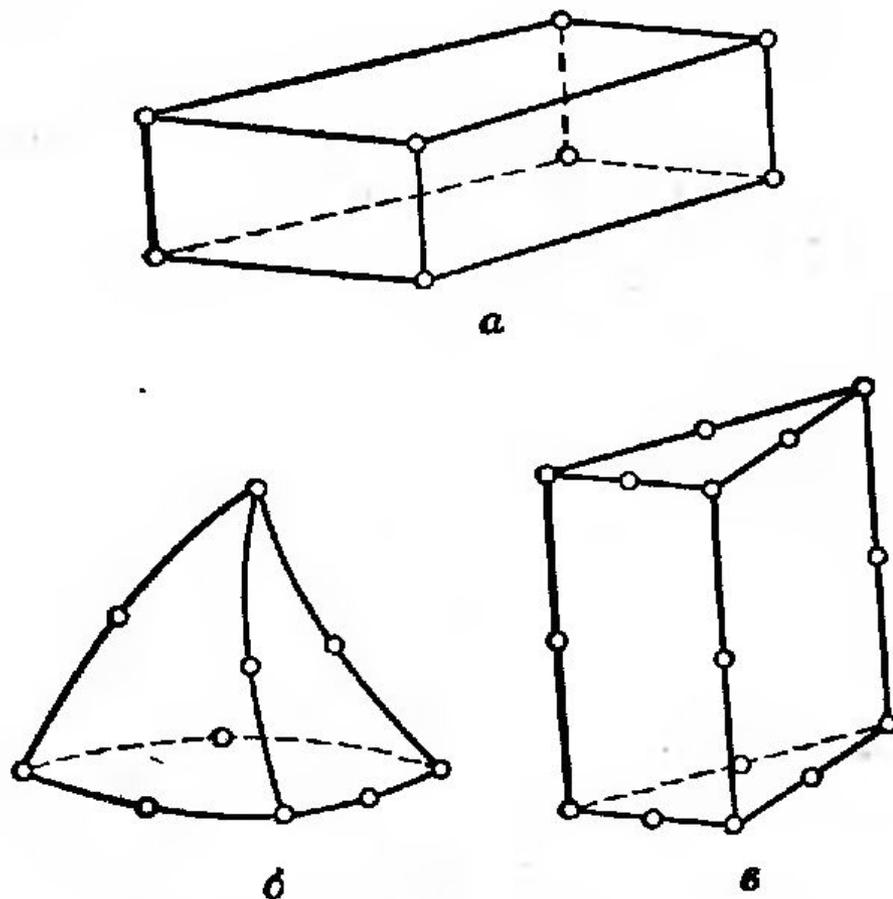


a



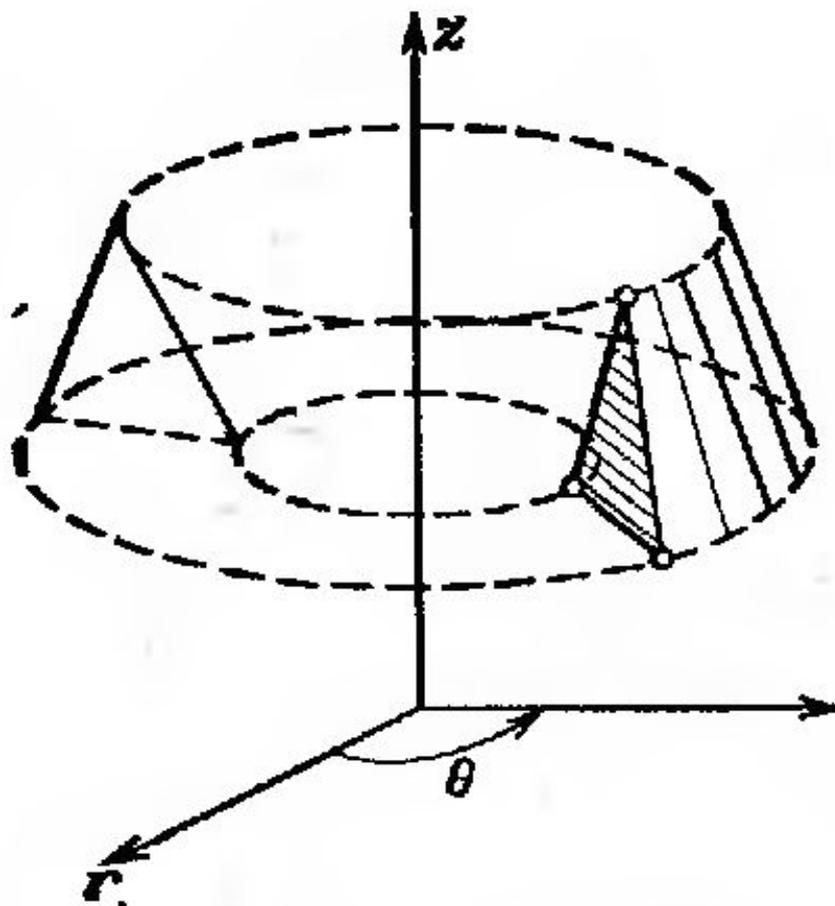
b

Наиболее часто встречающимися трехмерными элементами являются тетраэдр и параллелепипед. В качестве сторон КЭ выступают плоскости.

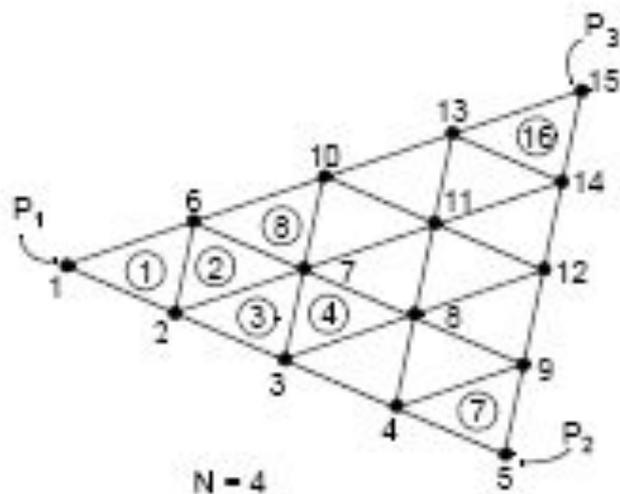


Фиг. 2.3. Некоторые трехмерные конечные элементы.

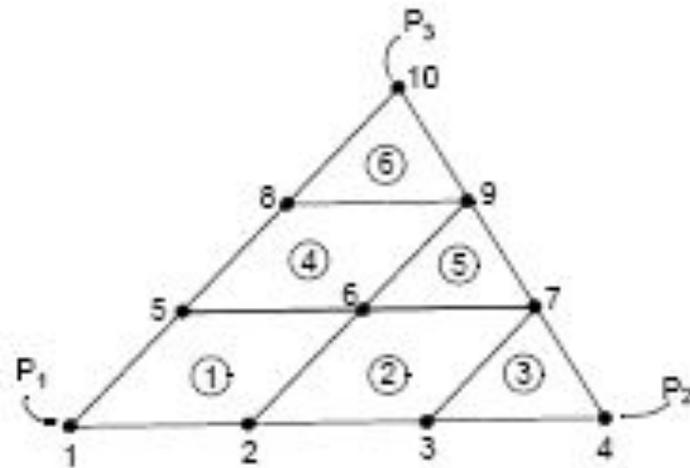
Для моделирования тел вращения широко используются осесимметричные КЭ, образующиеся поворотом треугольника или четырехугольника на 360°



Фиг. 2.4. Осесимметричный конечный элемент.



Triangular

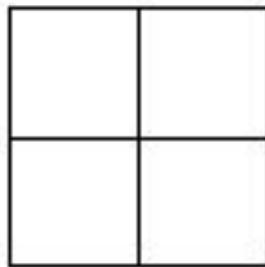


Quadrilateral

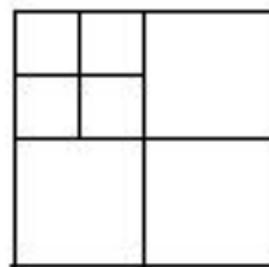
Figure 4-15 Block Type 3



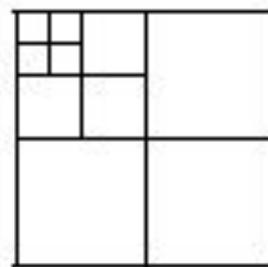
Original Element



Level 1 Refinement

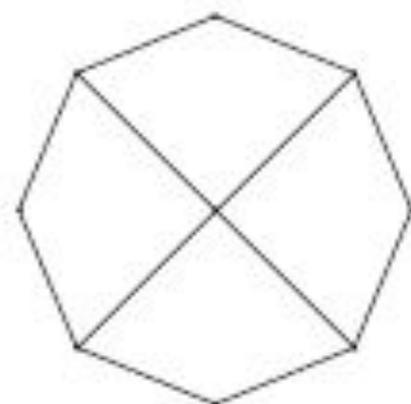


Level 2 Refinement

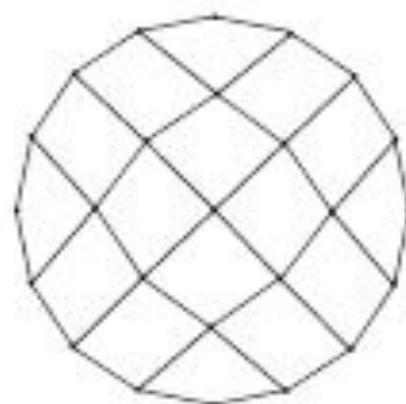


Level 3 Refinement

Figure 4-24 Single Quadrilateral Element Process



Level 1 Refinement



Level 2 Refinement

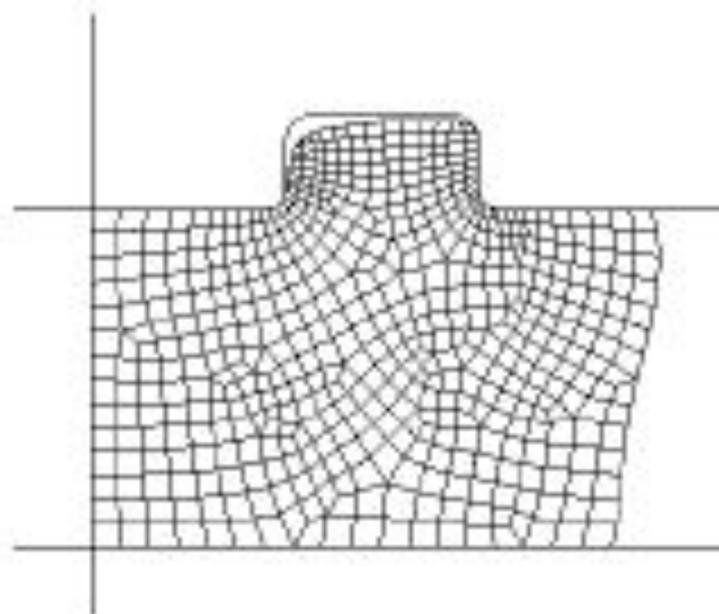


Figure 4-29 Advancing Front Meshing

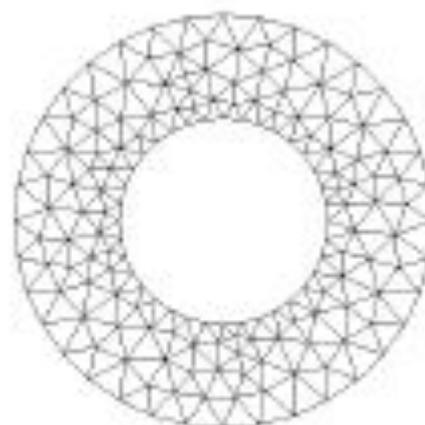


Figure 4-31 Meshing with Delauney Triangulation

6.9.4. Контроль параметров элементов

Distortion (Искажения) – команда, позволяющая найти в модели плоские или пространственные конечные элементы с «плохой» геометрией, приводящей к снижению точности конечно-элементной аппроксимации и расчета. Включением опций панели можно выбрать необходимые критерии для оценки геометрии элементов (рис. 6.111). Там же указаны предельные значения (по умолчанию) данных критериев, которые могут быть изменены.



Рис. 6.111

Aspect Ratio (Соотношение сторон элемента) – отношение наиболее длинной стороны элемента к наиболее короткой (рис. 6.112).

Taper (Сужение) – параметр, аналогичный Aspect Ratio применительно к противоположащим сторонам элемента (рис. 6.113): он используется только для плоских и пространственных элементов с прямоугольными гранями.

Alternate Taper (Альтернативное сужение) – параметр, характеризующий максимальное отклонение от среднего значения A_{cp} площадей A_i всех треугольников, образуемых сторонами и диагоналями прямоугольных граней элементов (рис. 6.114)

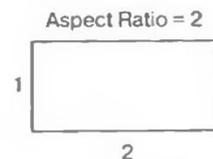


Рис. 6.112

$$Alternate\ Taper = \max \frac{A_i - A_{cp}}{A_{cp}},$$

где

$$A_{cp} = \frac{1}{4}(A_1 + A_2 + A_3 + A_4).$$

Internal Angles (Внутренние углы) – величина отклонения внутренних углов при вершинах граней элементов от оптимальных значений, составляющих 90° для прямоугольных и 60° для треугольных граней (рис. 6.115).

Warping (Искривление) – параметр, характеризующий искривление прямоугольных граней элемента: он вычисляется как максимальный из углов между нормальными ко всем треугольникам, образуемым сторонами и диагоналями прямоугольных граней элементов (рис. 6.116).

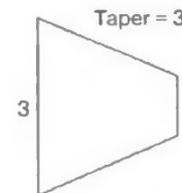
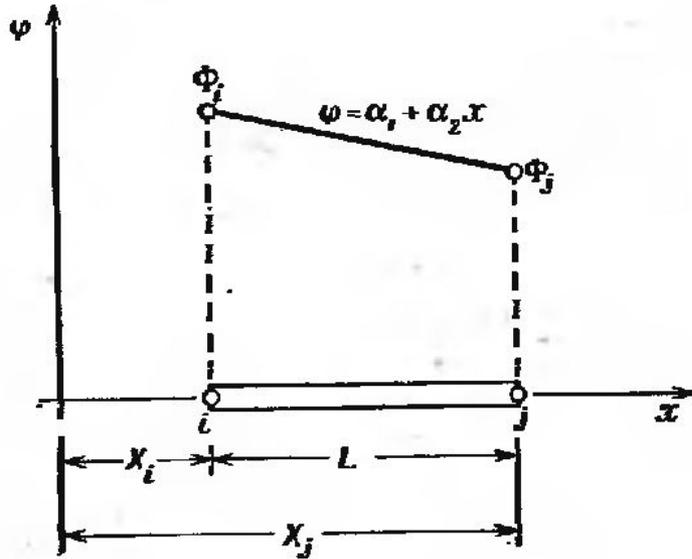


Рис. 6.113



Рассмотрим простейший пример решения задачи теплопроводности на примере линейного КЭ длиной L с двумя узлами i и j . Узловые значения температур равны Φ_i и Φ_j соответственно. Полиномиальная функция φ имеет вид:

$$\varphi = \alpha_1 + \alpha_2 x. \quad (3.3)$$



Коэффициенты α_1 и α_2 могут быть определены с помощью условий в узловых точках:

$$\varphi = \Phi_i \quad \text{при} \quad x = X_i$$

и

$$\varphi = \Phi_j \quad \text{при} \quad x = X_j.$$

Эти узловые условия приводят к системе двух уравнений

$$\Phi_i = \alpha_1 + \alpha_2 X_i,$$

$$\Phi_j = \alpha_1 + \alpha_2 X_j,$$

решение которой дает

$$\alpha_1 = \frac{\Phi_i X_j - \Phi_j X_i}{L} \quad (3.4a)$$

и

$$\alpha_2 = \frac{\Phi_j - \Phi_i}{L}. \quad (3.4b)$$

Подставляя найденные значения α_1 и α_2 в формулу (3.3), получаем для φ выражение

$$\varphi = \left(\frac{\Phi_i X_j - \Phi_j X_i}{L} \right) + \left(\frac{\Phi_j - \Phi_i}{L} \right) x,$$

которое может быть переписано в виде

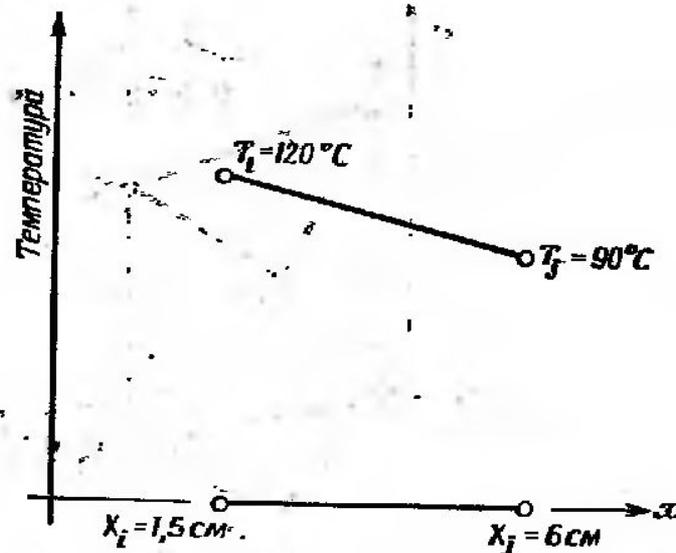
$$\varphi = \left(\frac{X_j - x}{L} \right) \Phi_i + \left(\frac{x - X_i}{L} \right) \Phi_j. \quad (3.5)$$

Линейные функции от x в формуле (3.5) называются функциями формы или интерполяционными функциями. Эти функции всюду обозначаются через N . Каждая функция формы должна быть снабжена нижним индексом для обозначения узла, к которому она относится. Произвольную функцию формы будем обозначать через N_r . В соотношение (3.5) входят следующие функции формы:

$$N_i = \frac{X_j - x}{L} \quad \text{и} \quad N_j = \frac{x - X_i}{L}.$$

Пример

7. Одномерный симплекс-элемент используется для аппроксимации распределения температуры в стержне. В результате решения задачи установлено, что температура в узлах i и j равна 120 и 90 °C соответственно. Требуется определить температуру в точке на расстоянии 4 см от начала координат и градиент температуры внутри элемента. Узлы i и j расположены на расстояниях 1,5 и 6 см от начала координат.



К задаче 7.

Температура t внутри элемента определяется соотношением

$$t = \left(\frac{x_j - x}{L} \right) T_i + \left(\frac{x - x_i}{L} \right) T_j$$

Данные элемента:

$$X_i = 1,5 \text{ см}, \quad T_i = 120^\circ\text{C},$$

$$X_j = 6,0 \text{ см}, \quad T_j = 90^\circ\text{C},$$

$$x = 4,0 \text{ см}, \quad L = X_j - X_i = 4,5 \text{ см}.$$

Подставляя исходные данные в формулу для температуры, получаем

$$\begin{aligned} t &= \left(\frac{6,0 - 4,0}{4,5} \right) 120 + \left(\frac{4 - 1,5}{4,5} \right) 90 = \\ &= \frac{2(120)}{4,5} + \frac{2,5(90)}{4,5} = 53,33 + 50 = 103,33^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Для градиента температуры имеем

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{1}{L} T_i + \frac{1}{L} T_j = \frac{1}{L} (T_j - T_i) = \frac{90 - 120}{4,5} = \frac{-30}{4,5} = \frac{-6,67^\circ\text{C}}{\text{см}}.$$

Решение задач теории упругости может быть проведено одним из двух методов. С помощью первого метода решают дифференциальные уравнения с заданными граничными условиями. Вторым методом заключается в минимизации интегральной величины, связанной с работой напряжений и внешней приложенной нагрузки. Для решения задач теории упругости методом конечных элементов используется последний подход. Если задача решается в перемещениях и на границе заданы их значения, то нужно минимизировать потенциальную энергию системы. Если задача решается в напряжениях с заданными на границе усилиями, то нужно минимизировать дополнительную работу системы. Общепринятая формулировка метода конечных элементов предполагает отыскание поля перемещений и тем самым связана с минимизацией потенциальной энергии системы при отыскании узловых значений вектора перемещений. После того как перемещения будут определены, можно вычислить компоненты тензоров деформаций и напряжений.

Важной процедурой МКЭ является выбор функционала, характеризующего качество используемой аппроксимации. Для механических систем в качестве такого функционала используют выражение потенциальной энергии (2.60). Минимизируя потенциальную энергию E_{Π} , находят вектор перемещений $\bar{U}(\bar{X})$. Деформации ϵ_{ij} связаны с перемещениями u_i соотношениями (2.54), что можно выразить в матричной форме

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{13} \\ \epsilon_{23} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2(\partial / \partial x_1) & 0 & 0 \\ 0 & 2(\partial / \partial x_2) & 0 \\ 0 & 0 & 2(\partial / \partial x_3) \\ \partial / \partial x_2 & \partial / \partial x_1 & 0 \\ \partial / \partial x_3 & 0 & \partial / \partial x_1 \\ 0 & \partial / \partial x_3 & \partial / \partial x_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad (2.90)$$

или более лаконично

$$\bar{\epsilon} = S\bar{U}(\bar{X}), \quad (2.91)$$

где S — матрица-оператор дифференцирования.

$$E_{\Pi} = 0,5 \int_{\vec{R}} \vec{Q}^T B^T D B \vec{Q} d\vec{R} - W,$$

где $B=SN$.

Обозначим

$$K = \int_{\vec{R}} B^T D B d\vec{R}. \quad (2.92)$$

Матрицу K называют *матрицей жесткости*. Тогда $E_{\Pi} = 0,5 \vec{Q}^T K \vec{Q} - W$. В соответствии с принципом Лагранжа дифференцируем E_{Π} по вектору \vec{Q} и приравниваем нулю. В результате получаем систему алгебраических уравнений

$$K \vec{Q} = \vec{P}, \quad (2.93)$$

где $\vec{P} = \partial W / \partial \vec{Q}$ — вектор правых частей, называемый *вектором нагрузок*.

Матрица жесткости K всей исследуемой детали составляется из матриц жесткости K_{ij} отдельных КЭ. Матрицы K_{ij} несут информацию о конфигурации и упругих свойствах материала конечных элементов и подсчитываются по формуле (2.92), в которой

В общем случае создание математической модели процесса включает следующие этапы:

- 1) постановка целей моделирования и выбор исходных данных для расчета;
- 2) разработка математической модели объекта с учетом основных физических процессов и игнорированием малозначимых второстепенных факторов, составление алгоритма реализации численного расчета, подготовка и задание исходных данных;
- 3) непосредственное проведение вычислительного эксперимента для всестороннего исследования процесса в соответствии с поставленной целью;
- 4) оценка точности и адекватности предлагаемой модели реальному физическому процессу.

Полный цикл анализа конструкций как в MSC/N4W, так и в других программах конечно-элементного расчета, включает следующие основные этапы:

- разработка геометрии конструкции – геометрическое моделирование;
- задание характеристик материалов элементов конструкции;
- выбор типов конечных элементов и ввод их параметров;
- разбиение конструкции на конечные элементы;
- задание граничных условий – связей, налагаемых на конструкцию;
- формирование системы нагрузок, задание их значений или функциональных зависимостей от параметров модели;
- проверка корректности разработанной модели и, при необходимости, редактирование ее характеристик;
- расчет конструкции – конечно-элементный анализ;
- анализ результатов расчета, форматирование их представления;
- вывод результатов на принтер, запись в файл или копирование в отчетные документы.

МКЭ позволяет учитывать нелинейность физических свойств материалов. Как правило, при анализе сварочных процессов нелинейность связана с заданием температурозависимых свойств металла

Тип анализа	Свойства материала
Деформационный анализ	Модуль Юнга $E(T)$ Коэффициент Пуассона $\nu(T)$ Предел текучести $\sigma_y(T)$ Коэффициент термического расширения $\alpha(T)$ Плотность
Тепловой анализ	Теплопроводность $K(T)$ Теплоемкость $C(T)$
Совмещенный термоэлектрический (Нагрев джоулевой теплотой)	Электрическое сопротивление $\rho(T)$
Гидродинамический нагрев	Вязкость $\mu(T)$

Прилагаемые нагрузки можно классифицировать следующим образом:

1. По природе воздействия

- 1.1 Силы и моменты (сосредоточенные и распределенные по длине, поверхности)
- 1.2 Кинематические (несиловые) воздействия (ускорения, скорости, перемещения)
- 1.3 Тепловые воздействия (температура, тепловой поток, конвективный поток, излучение)
- 1.4 Электромагнитные воздействия (разность потенциалов)

2. По способу приложения к объектам модели

- 2.1 Объемные нагрузки (ускорение, скорости, начальная температура и т.д.)
- 2.2 Узловые нагрузки (силы, моменты, температура)
- 2.3 Элементные нагрузки (распределенные силы на единицу длины КЭ, давление, температура, тепловыделение – тепловая энергия на единицу объема, тепловой поток – тепловая энергия, переносимая через единицу поверхности, конвективный поток)
- 2.4 Нагрузки, прикладываемые к геометрическим объектам модели (к точкам, линиям, поверхностям)

Все указанные типы нагрузок используются как при статическом, так и динамическом анализе конструкций. При динамическом анализе задается график изменения нагрузки во времени.

ВЫБОР ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МКЭ

В англоязычной литературе можно встретить аббревиатуру CAD/CAM/CAE системы. Под указанными терминами понимаю следующее:

CAD (Computer-Aided Design) – общий термин для обозначения всех аспектов проектирования с использованием средств вычислительной техники (обычно охватывает создание геометрических моделей изделия, генерацию чертежей изделия);

CAM (Computer-Aided Manufacturing) – общий термин для обозначения программных систем подготовки информации для станков с ЧПУ

CAE (Computer-Aided Engineering) – общий термин для обозначения информационного обеспечения автоматизированного анализа проекта (прочностные расчеты, термодинамический анализ и т.д.)

Большинство CAE систем осуществляют расчеты на основе МКЭ.

Анализ мирового рынка показывает, что существуют десятки коммерческих программных комплексов, реализующих МКЭ.

Наиболее известными вычислительными системами **универсального** назначения являются :

ANSYS — универсальная программная система конечно-элементного анализа, существующая и развивающаяся на протяжении последних 30 лет, является довольно популярной у специалистов в области компьютерного инжиниринга ([CAE](#)).

Осуществляет решение линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики

Программная система КЭ анализа **ANSYS** разрабатывается американской компанией [ANSYS Inc.](#). Предлагаемые фирмой ANSYS Inc. средства численного моделирования и анализа совместимы с некоторыми другими пакетами, работают на различных ОС.

Программная система ANSYS сопрягается с известными CAD-системами [Unigraphics](#), [SolidWorks](#), [Autodesk Inventor](#) и некоторыми другими.

Программная система ANSYS является довольно известной CAE-системой, которая используется на таких известных предприятиях, как [ABB](#), [BMW](#), [Boeing](#), [Caterpillar](#), [Daimler-Chrysler](#), [Exxon](#), [FIAT](#), [Ford](#), [Mitsubishi](#), [Siemens](#), [Shell](#), [Volkswagen-Audi](#) и др., а также применяется на многих ведущих предприятиях промышленности РФ.

ABAQUS— универсальная система общего назначения, предназначенная как для проведения многоцелевого инженерного многодисциплинарного анализа, так и для *научно-исследовательских и учебных целей* в самых разных сферах деятельности, в числе которых: автомобилестроение, авиастроение, металлургия и т.д.

Программный комплекс ABAQUS *изначально был ориентирован на решение самых сложных и ответственных задач, с учетом всех видов нелинейностей*, а также на проведение многодисциплинарного статического и динамического анализа в рамках единого алгоритма.

Одной из важнейших особенностей программного комплекса ABAQUS является его универсальность. Данный пакет может использоваться на всех этапах проектирования и создания современных изделий и практически всеми расчетными, проектными и технологическими службами предприятия. Это, несомненно, один из серьезных критериев при решении вопроса о покупке данного программного комплекса.

ABAQUS удовлетворяет стандарту качества ISO 9001 и стандарту качества, установленному Американской ядерной контрольной комиссией для проверки качества проектирования ядерных силовых установок (ANSI/ASME NQA-1, 1983).

Компания **MSC.Software** является разработчиком и поставщиком программных продуктов, систем и услуг в области информационных технологий, признанных повысить эффективность создания новых изделий и выпуска продукции. Пользователями программного обеспечения компании MSC.Software являются авиакосмические и автомобильные предприятия, производители электроники, предприятия других отраслей промышленности, высшие учебные заведения.

MSC.Marc представляет собой универсальную конечно-элементную программу для проведения углубленного анализа высоконелинейного поведения конструкций и решения задач теплопередачи. Marc широко используется для компьютерного моделирования технологических процессов прокатки, прессования, листового и объемного формования, производства шин, суперпластического формования и т.д.

MSC.NASTRAN обеспечивает полный набор методов и алгоритмов, включая методы расчета напряженно-деформированного состояния, собственных частот и форм колебаний, методы анализа устойчивости, решения задач теплопередачи, исследования установившихся и неустойчивых процессов, акустических явлений, нелинейных задач и нелинейных динамических переходных процессов, методы расчета критических частот и вибраций роторных машин, методы анализа частотных характеристик систем при воздействии случайных нагрузок. Предусмотрена возможность моделирования практически всех типов материалов, включая композитные и гиперупругие. Вес, напряжения, перемещения, собственные частоты и многие другие характеристики конструкции или машины могут рассматриваться либо в качестве целевых функций (в этом случае их можно минимизировать или максимизировать), либо в качестве ограничений.

Существуют специализированные ПК для решения сварочных и других технологических задач. На их создание были затрачены большие усилия, что обуславливает их высокую стоимость

(стоимость ежегодной лицензии порядка 25 000 евро)

SYSWELD является уникальной системой компьютерного 3D моделирования процессов сварки и термообработки. Программа была разработана в 70-х годах в недрах министерства атомной промышленности Франции. С помощью программы SYSWELD можно моделировать следующие процессы термообработки:

сквозная закалка; поверхностная закалка; закалка с последующим отжигом; отпуск. А так же химико-термическую обработку поверхности: цементация; азотирование.,

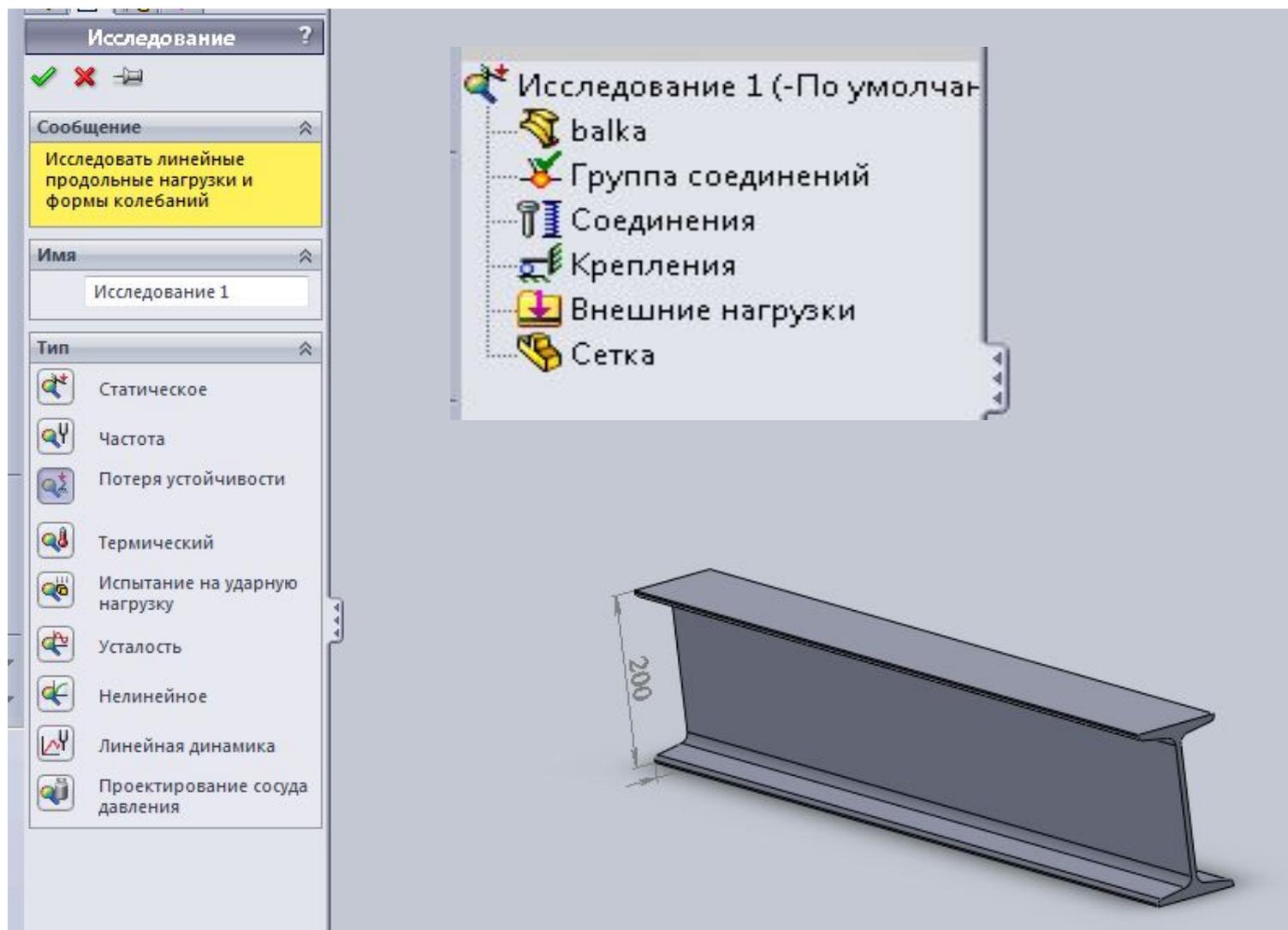
SYSWELD моделирует все физические эффекты, связанные с термической обработкой и сваркой.

В том числе: электромагнетизм (индукционный нагрев и т.п.); совмещенный термо – металлургический анализ; механический анализ; диффузию.

С помощью программы SYSWELD можно моделировать самые разнообразные технологии сварки: MIG ; TIG ; точечная сварка; сварка и резка лазерным лучом; сварка электронным лучом; сварка электродом; в среде защитного газа и т.д.

В результате расчета Вы получаете информацию: возникающие напряжения; распределение фаз в % (аустенит, мартенсит и т.д.); температурные поля; распределение твердости; деформация.

Рассмотрим пример создания модели в программной среде **Solid Simulation** (старое название **COSMOSWorks**)



- solidworks materials
 - Сталь
 - 1023 Листовая углеродистая сталь**
 - 201 Отожженная нержавеющая сталь
 - A286 Суперсплав на основе железа
 - AISI 1010 Сталь, горячекатанная по
 - AISI 1015 Сталь, холоднотянутая (SS)
 - AISI 1020
 - AISI 1020 Сталь, холоднокатаная
 - AISI 1035 Сталь (SS)
 - AISI 1045 Сталь, холоднотянутая
 - AISI 304
 - AISI 316 Отожженная нержавеющая ст
 - AISI 316 Нержавеющая сталь, лист (SS)
 - AISI 321 Отожженная нержавеющая ст
 - AISI 347 Отожженная нержавеющая ст
 - AISI 4130 Сталь, отожженная при 865C
 - AISI 4130 Сталь, нормализованная при
 - AISI 4340 Сталь, отожженная
 - AISI 4340 Сталь, нормализованная
 - AISI Тип 316L нержавеющая сталь
 - AISI Тип A2 Инструментальная сталь
 - Легированная сталь
 - Легированная сталь (SS)
 - ASTM A36 Сталь
 - Литая легированная сталь
 - Литая углеродистая сталь
 - Литая углеродистая сталь (SN)

Свойства материала
 Материалы в библиотеке по умолчанию не могут редактироваться. Необходимо скопировать материал в настроенную пользователем библиотеку и затем его

Тип модели:

Единицы измерения:

Категория:

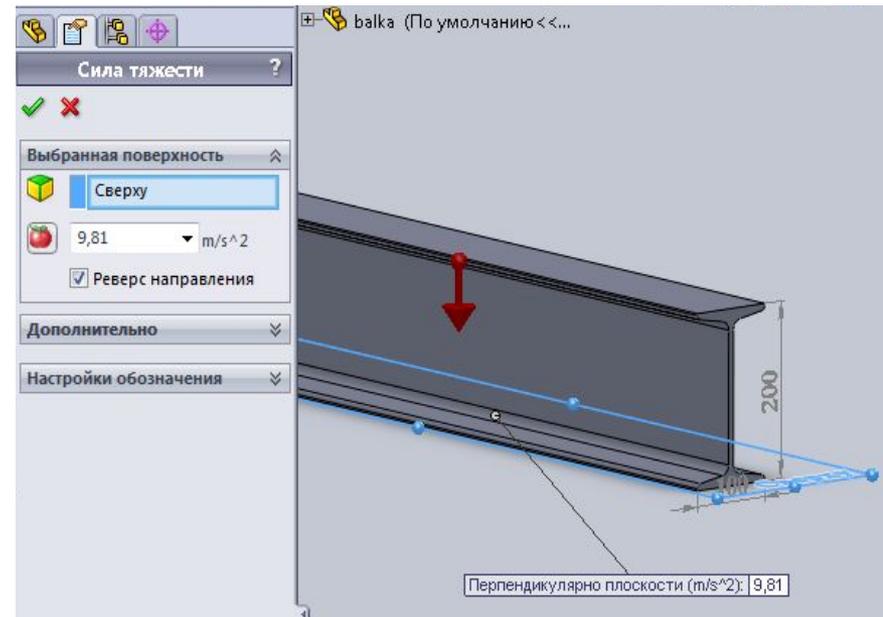
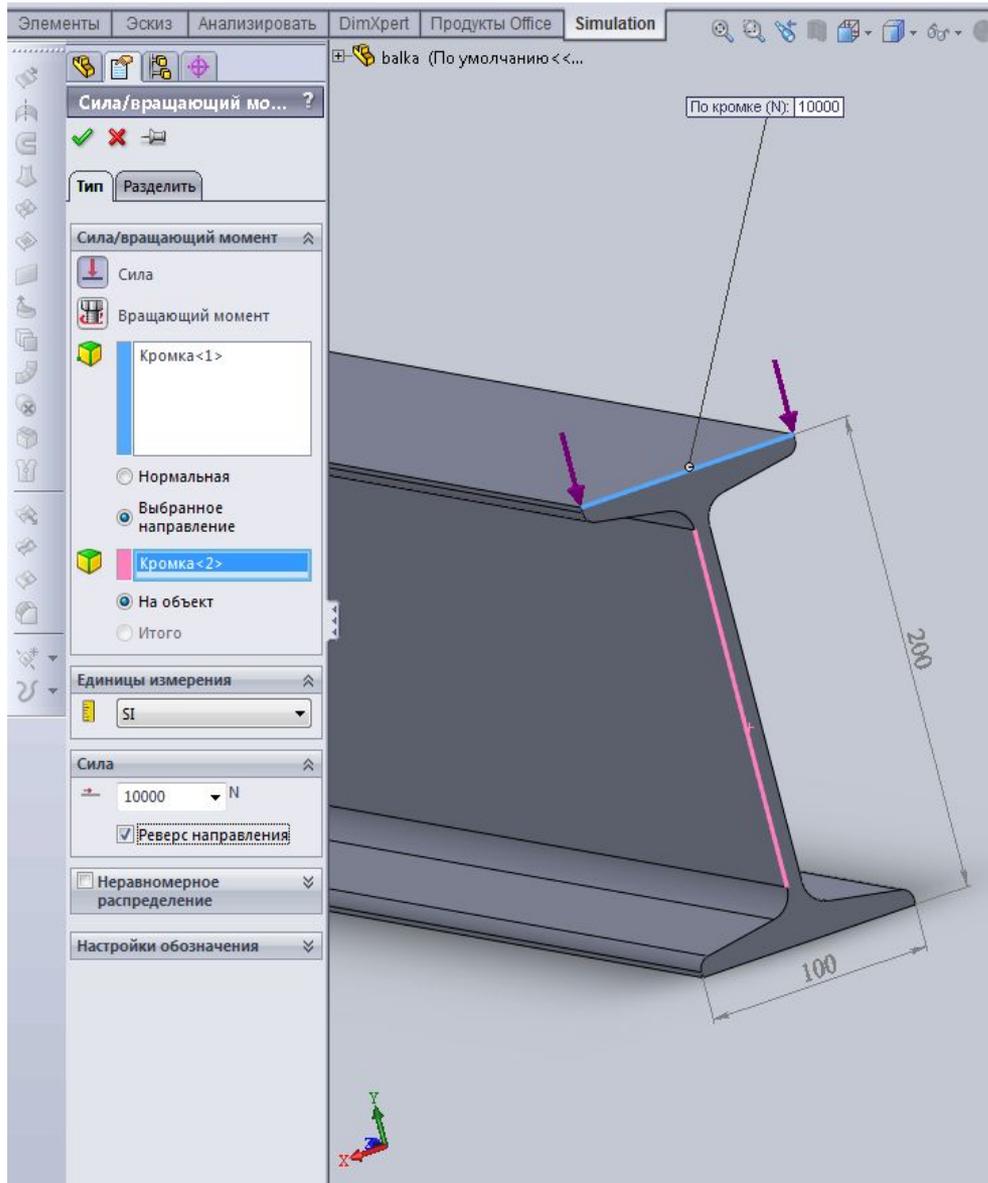
Имя:

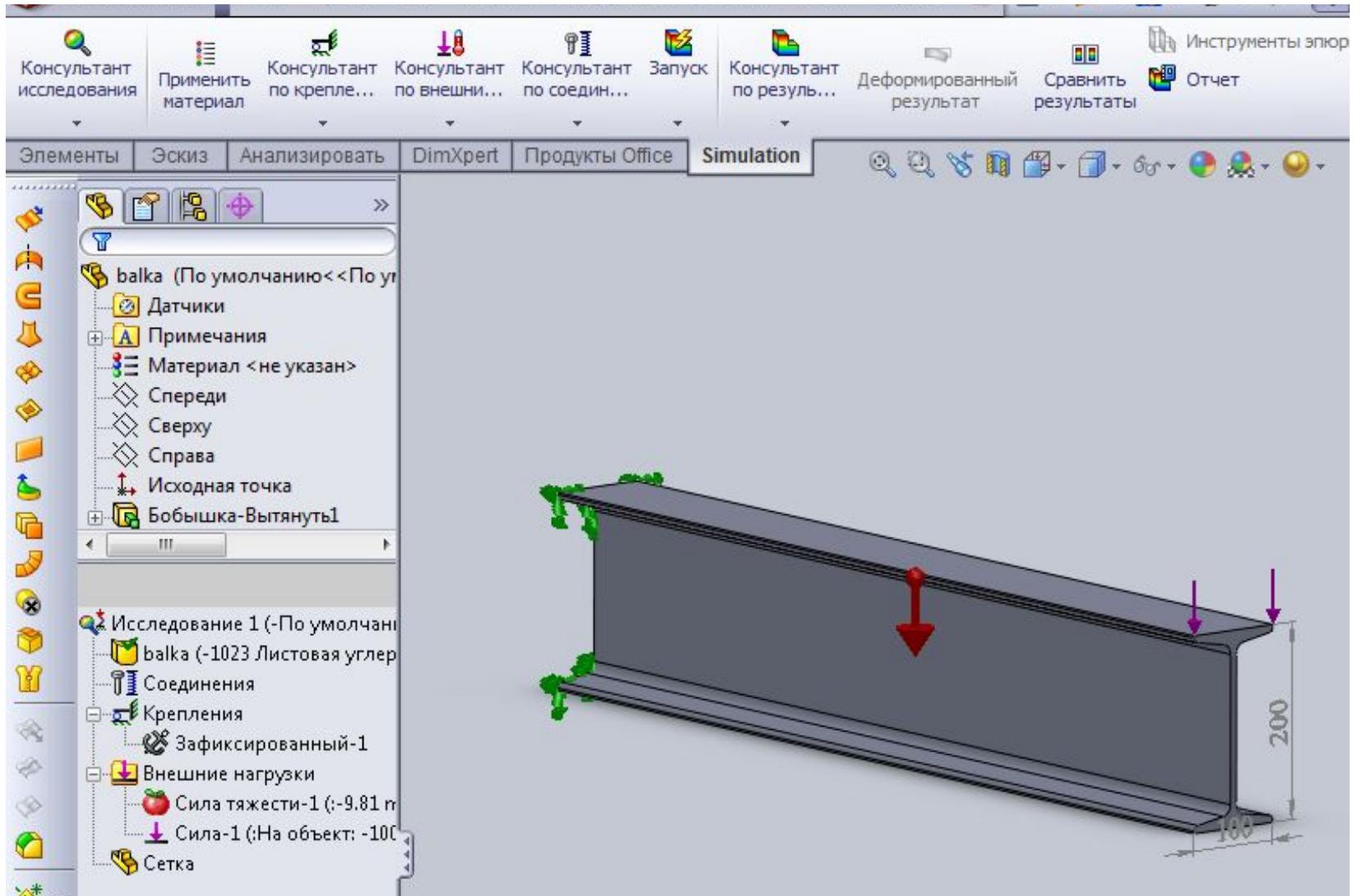
Критерий сбоя по:

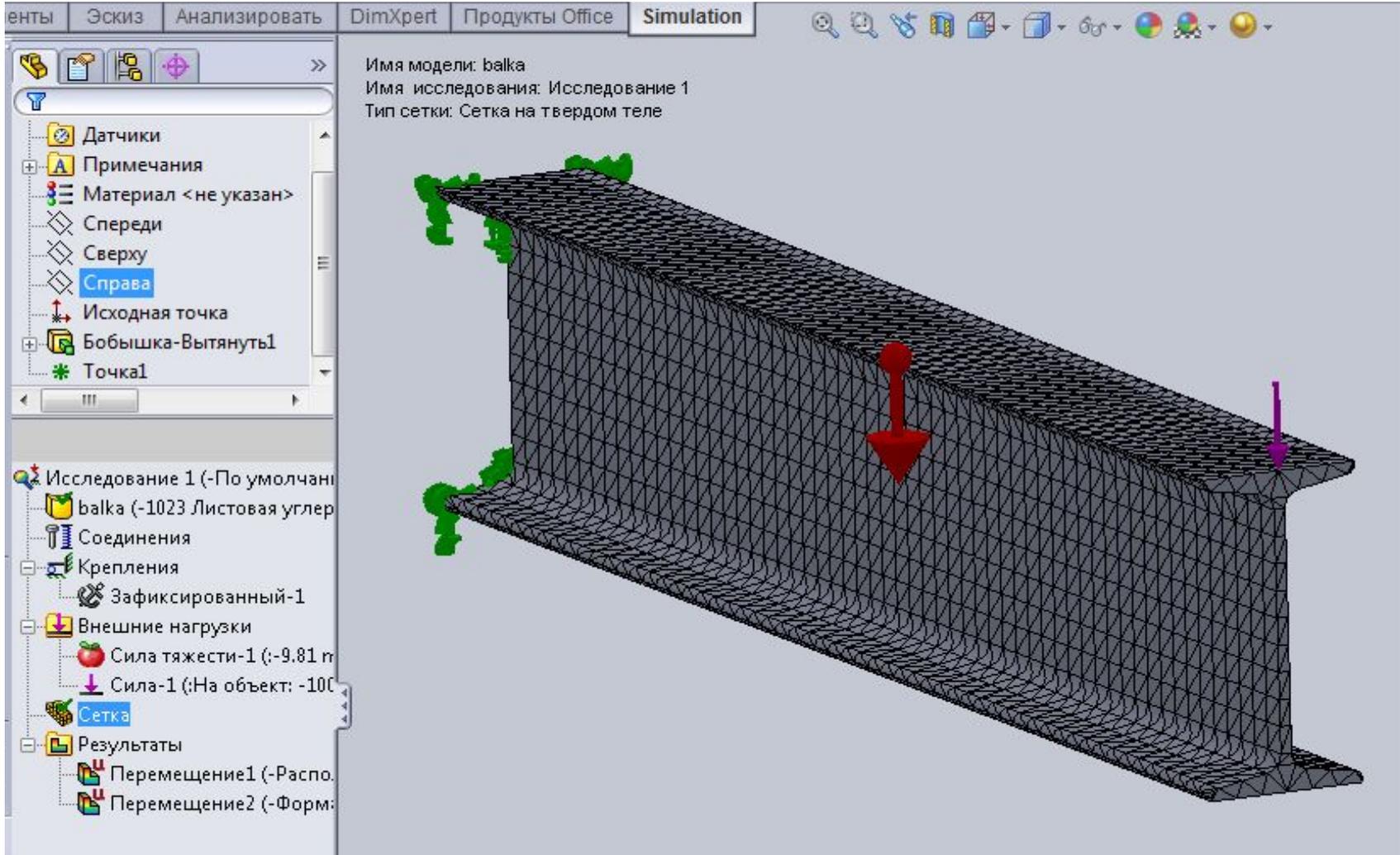
Описание:

Источник:

Свойство	Значение	Единицы измерен
Модуль упругости	2.049999984e+011	Н/м ²
Кoeffициент Пуассона	0.29	Не применимо
Модуль сдвига	7.999999987e+010	Н/м ²
Массовая плотность	7858	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	425000003.2	Н/м ²
Предел прочности при сжатии в X		Н/м ²
Предел текучести	282685049	Н/м ²
Кoeffициент теплового расширения	1.2e-005	/K
Теплопроводность	52	W/(м·K)
Удельная теплоемкость	486	J/(кг·K)







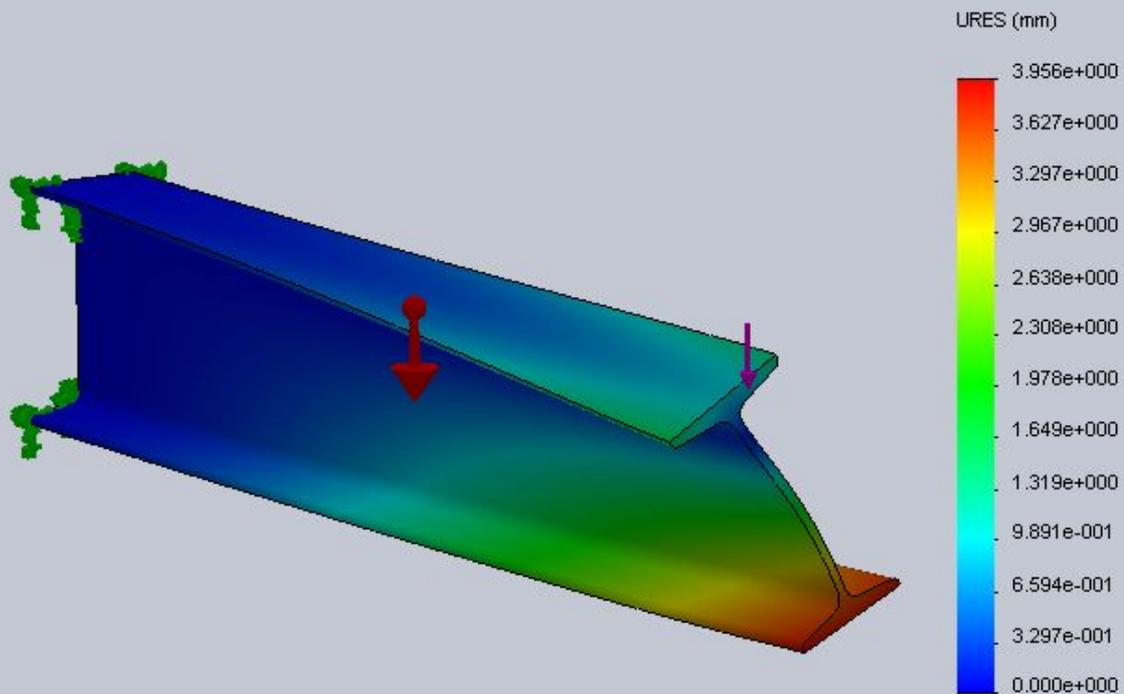
модели: balka

исследования: Исследование 1

опоры: Потеря устойчивости Перемещение1

на колебаний: 1 Коэффициент нагрузки = 14.148

максимальная деформация: 26.1158



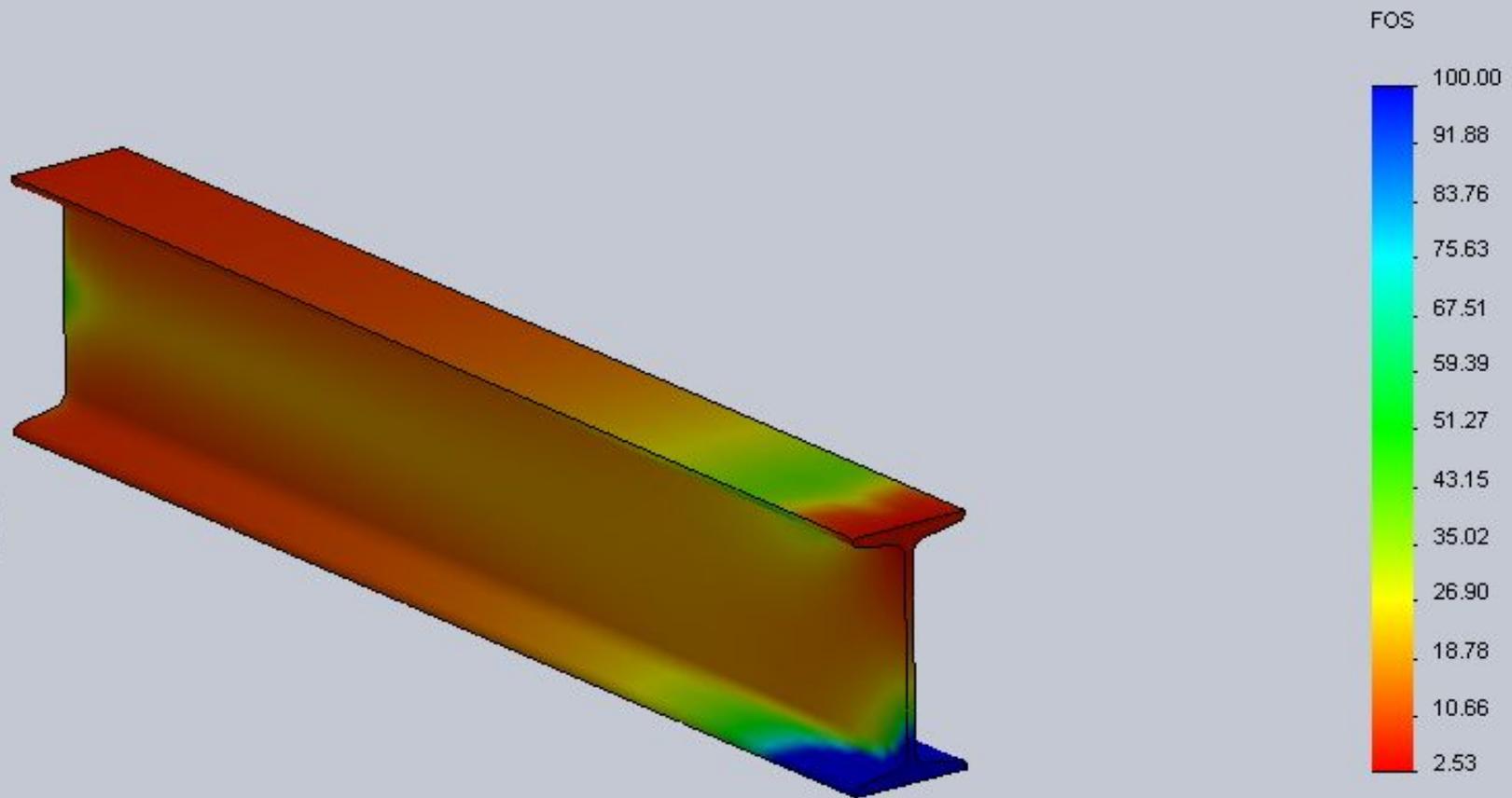
Имя модели: балка

Имя исследования: Исследование 2

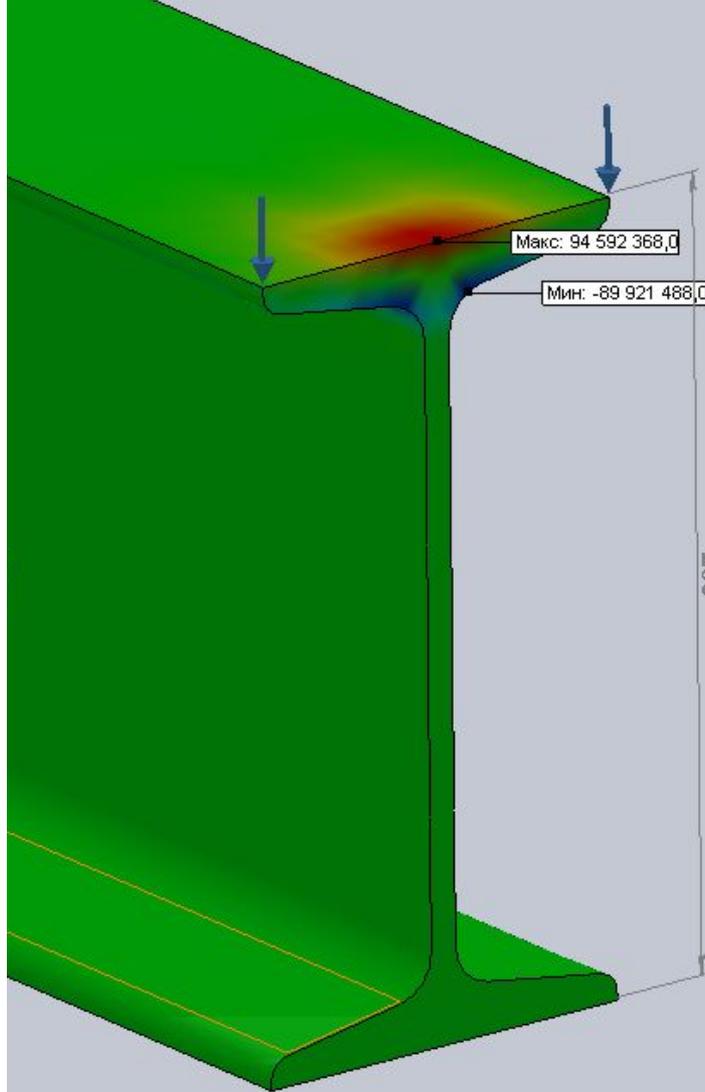
Тип элюры: Запас прочности Запас прочности1

Критерий: Авто

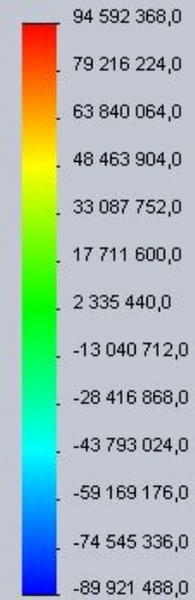
Распределение запаса прочности: Мин. коэффициент запаса прочности = 2.5



Имя модели: балка
Имя исследования: Исследование 2
Тип опоры: Статический узловое напряжение Напряжение3
Шкала деформации: 1



SX (N/m²)



Рассмотрим пример создания модели в программной среде **MSC.Marc**

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

КАКИЕ БУДУТ ВОПРОСЫ?