

Решение задач механики деформируемого твердого тела








1. Основы работы в оболочке Workbench Mechanical
2. Работа с материалами в Engineering Data
3. Интерфейс приложения Workbench Mechanical
4. Создание расчетной модели в Workbench Mechanical
5. Макроязык описания расчетных моделей APDL
6. Моделирование конструкций с учетом нелинейностей
7. Примеры решения задач
8. Пользовательские подпрограммы

Интерфейс приложения Mechanical APDL и основные принципы проведения расчетов подробно описаны в:

- 1. Чигарев А. В. ANSYS для инженеров: справ. пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с.
- 2. Морозов Е. М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Е. М. Морозов, А. Ю. Муйземнек, А. С. Шадский. 2-е изд., испр. М.: ЛЕНАНД, 2010. 456 с.
- 3. Басов К. А. ANSYS: Справочник пользователя / К. А. Басов. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.
- 4. Басов К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS / К. А. Басов. М.: ДМК Пресс, 2006. 248 с.








Основы работы в оболочке Workbench Mechanical

a

	A	
1	 Static Structural	
2	 Engineering Data	✓
3	 Geometry	✓
4	 Model	✓
5	 Setup	✓
6	 Solution	✓
7	 Results	✓

Static Structural

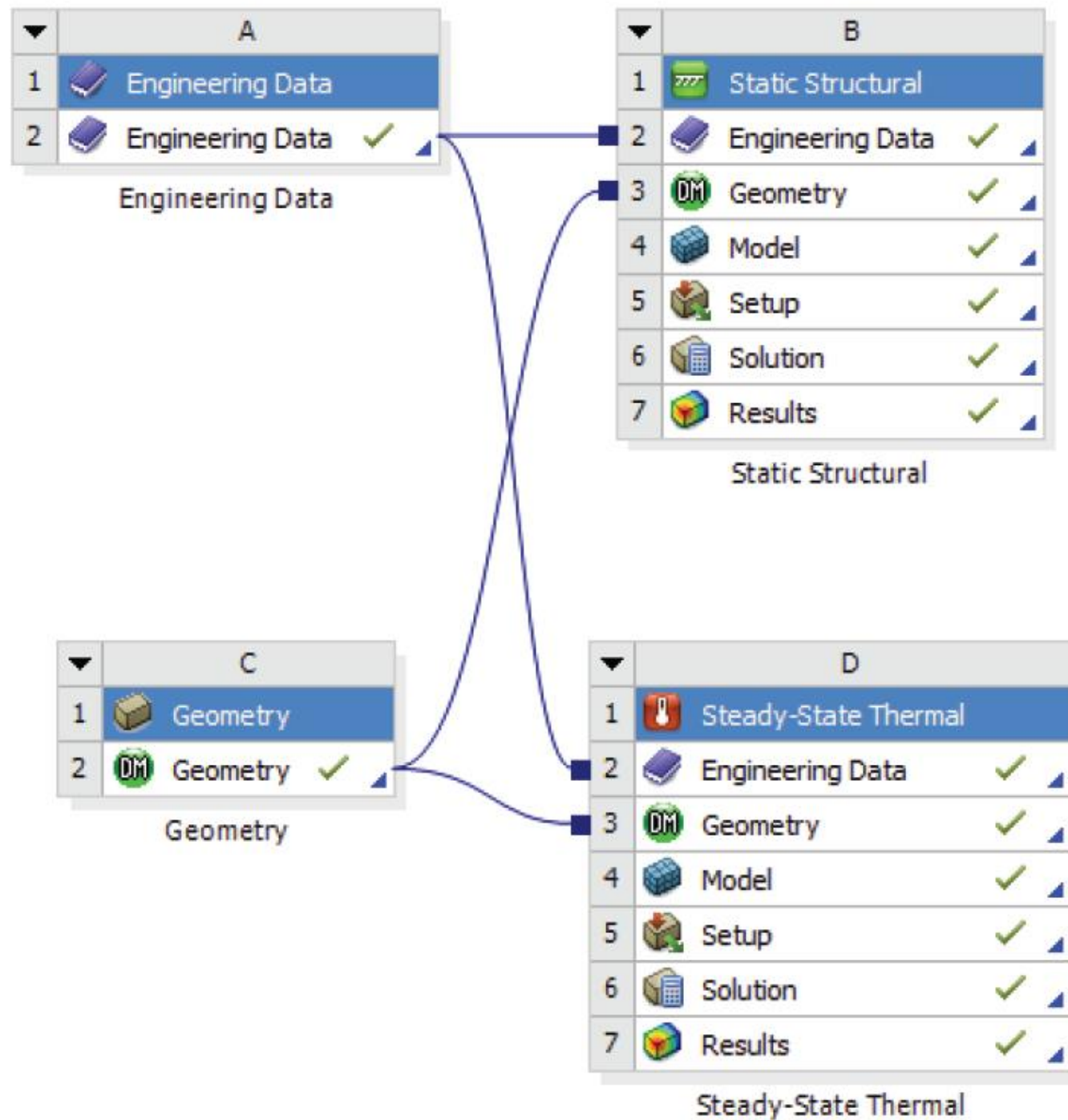
б

	B	
1	 Steady-State Thermal	
2	 Engineering Data	✓
3	 Geometry	✓
4	 Model	✓
5	 Setup	✓
6	 Solution	✓
7	 Results	✓

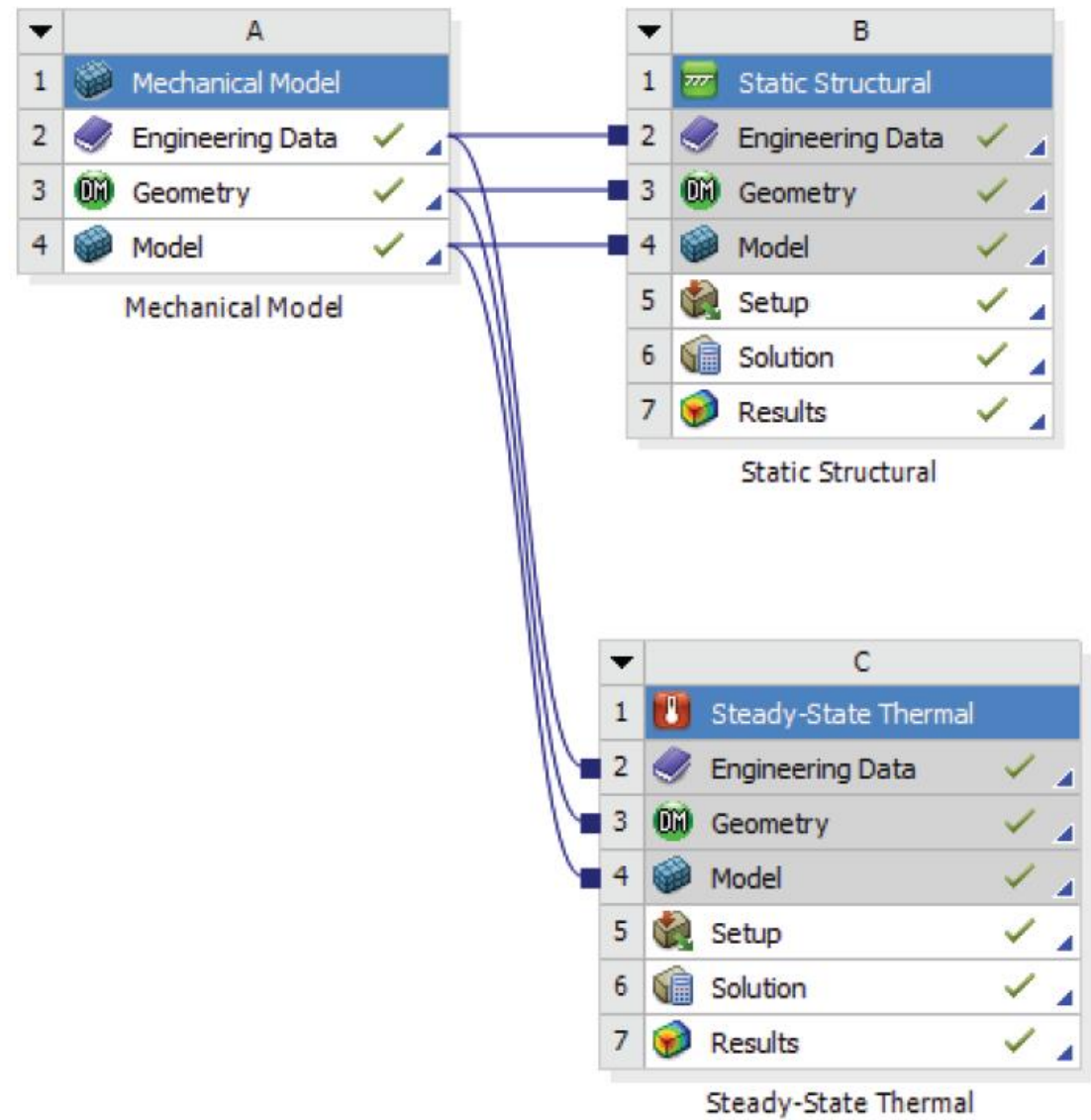
Steady-State Thermal

Шаблоны модулей *Static Structural* (а) и *Steady-State Thermal* (б) в Workbench

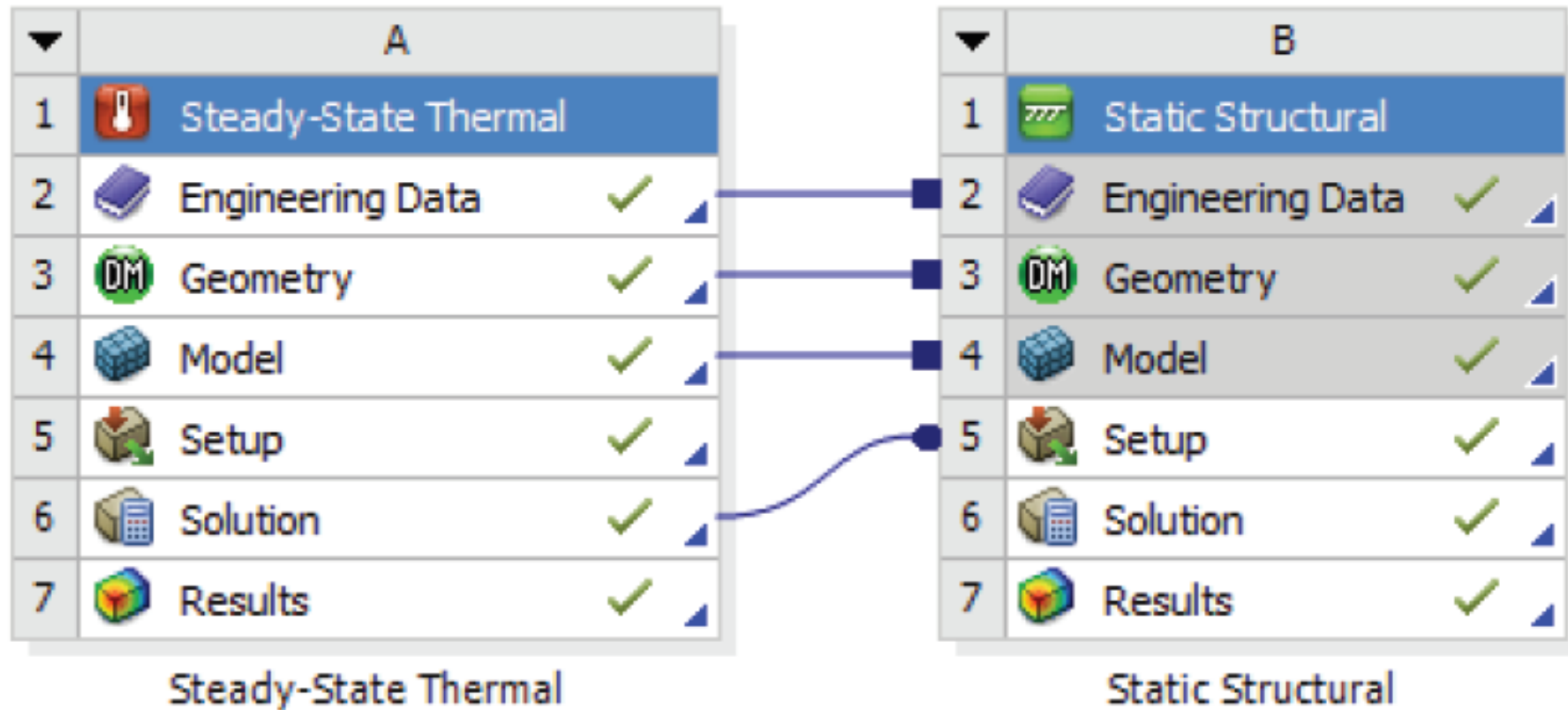
*Передача данных из модулей
Geometry и **Engineering Data**
в расчетные модули **Static
Structural** и **Steady-State Thermal**
для выполнения
расчета напряженно-
деформированного состояния и
расчета температур*



- Передача данных из **Mechanical Model** в **Static Structural** и **Steady-State Thermal** для выполнения расчета напряженно-деформированного состояния и расчета температур



- Расчетный шаблон из связанных модулей **Steady-State Thermal** и **Static Structural** для выполнения расчета температур и температурных напряжений и деформаций



Работа с материалами в Engineering Data

- Engineering Data – модуль, используемый для систематизации и хранения данных о материалах, описания свойств материалов и входных параметров математических моделей с помощью дополнительного интерфейса оболочки Workbench.

The screenshot displays the Engineering Data interface within ANSYS Workbench. The interface is divided into several panels:

- Physical Properties (1):** A tree view on the left showing various material property categories such as Linear Elastic, Hyperelastic, and Plasticity.
- Outline of Schematic A2: Engineering Data (2):** A table listing the contents of the engineering data, including 'Contents of Engineering Data', 'Material', and 'Structural Steel'.
- Table of Properties Row 9: Bilinear Isotropic Hardening (4):** A table showing material properties for Bilinear Isotropic Hardening, with columns for Temperature (C), Yield Strength (Pa), and Tangent Modulus (Pa).
- Properties of Outline Row 4: Structural Steel NL (3):** A table showing the properties of the selected material, including Density, Isotropic Elasticity, Bilinear Isotropic Hardening, and Specific Heat.
- Chart of Properties Row 9: Bilinear Isotropic Hardening (5):** A graph showing the stress-strain relationship for the Bilinear Isotropic Hardening model, with Stress (Pa) on the y-axis and Strain (m m⁻¹) on the x-axis.

Интерфейс *Engineering Data*

Toolbox

- Physical Properties
 - Linear Elastic
 - Isotropic Elasticity
 - Orthotropic Elasticity
 - Anisotropic Elasticity
 - Viscoelastic
 - Anisotropic Temperature Dependent
 - Anisotropic Temperature Dependent
 - Hyperelastic Experimental Data
 - Hyperelastic
 - Chaboche Test Data
 - Plasticity **1**
 - Creep
 - Life
 - Strength
 - Gasket
 - Viscoelastic Test Data
 - Viscoelastic
 - Shape Memory Alloy
 - Geomechanical
 - Damage
 - Cohesive Zone
 - Fracture Criteria
 - Thermal
 - Thermopower
 - Linear "Soft" Magnetic Material
 - Linear "Hard" Magnetic Material
 - Nonlinear "Soft" Magnetic Material
 - Nonlinear "Hard" Magnetic Material

View All / Customize...

Outline of Schematic A2: Engineering Data

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Structural Steel			General_Materials	
4	Structural Steel NL			General Materials	
*	Click here to add a new material				

2

Table of Properties Row 9: Bilinear Isotropic Hardening

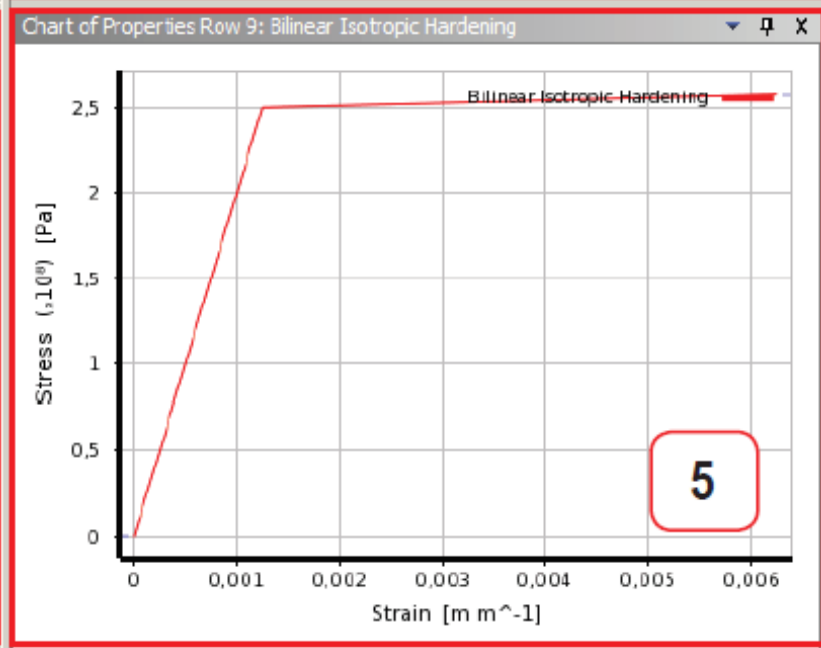
	A	B	C
1	Temperature (C)	Yield Strength (Pa)	Tangent Modulus (Pa)
2		2,5E+08	1,45E+09
*			

4

Properties of Outline Row 4: Structural Steel NL

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m...		
3	Isotropic Elasticity				
9	Bilinear Isotropic Hardening				
12	Specific Heat	434	J kg...		

3



Для определения упругих свойств анизотропного материала (Anisotropic Elasticity) требуется задать 21 коэффициент симметричной матрицы упругих свойств $[D]$:

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & & & & & & \\ d_{21} & d_{22} & & & & & \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & & & & \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} & & & \\ d_{51} & d_{52} & d_{53} & d_{54} & d_{55} & & \\ d_{61} & d_{62} & d_{63} & d_{64} & d_{65} & d_{66} & \end{bmatrix},$$

связывающей вектор напряжений $\{\sigma\}$ и вектор деформаций $\{\varepsilon\}$:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\}.$$

Toolbox

- Physical Properties
 - Linear Elastic
 - Isotropic Elasticity
 - Orthotropic Elasticity
 - Anisotropic Elasticity
 - Viscoelastic
 - Anisotropic Temperature Dependent
 - Anisotropic Temperature Dependent
 - Hyperelastic Experimental Data
 - Hyperelastic
 - Chaboche Test Data
 - Plasticity **1**
 - Creep
 - Life
 - Strength
 - Gasket
 - Viscoelastic Test Data
 - Viscoelastic
 - Shape Memory Alloy
 - Geomechanical
 - Damage
 - Cohesive Zone
 - Fracture Criteria
 - Thermal
 - Thermopower
 - Linear "Soft" Magnetic Material
 - Linear "Hard" Magnetic Material
 - Nonlinear "Soft" Magnetic Material
 - Nonlinear "Hard" Magnetic Material

[View All / Customize...](#)

Outline of Schematic A2: Engineering Data

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Structural Steel			General_Materials	
4	Structural Steel NL			General Materials	
*	Click here to add a new material				

2

Table of Properties Row 9: Bilinear Isotropic Hardening

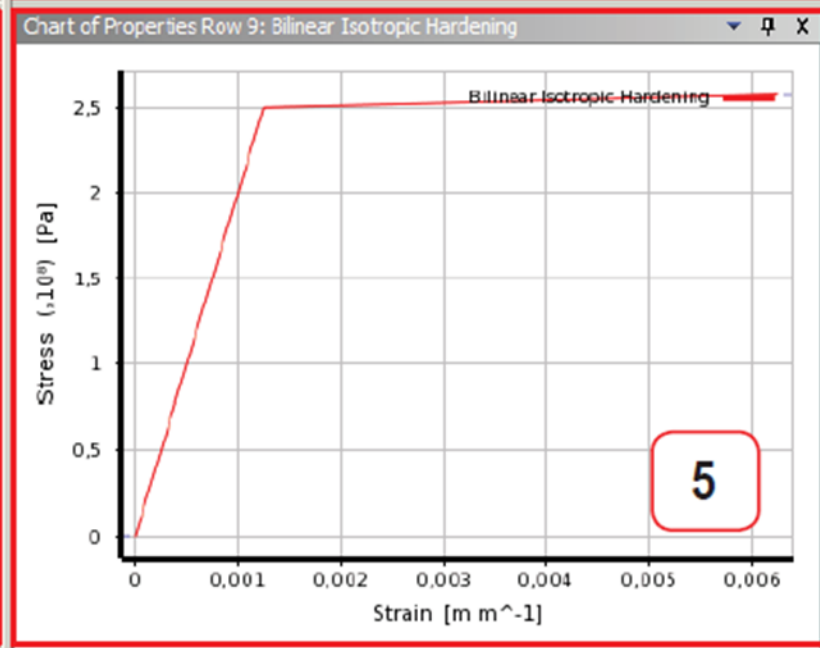
	A	B	C
1	Temperature (C)	Yield Strength (Pa)	Tangent Modulus (Pa)
2		2,5E+08	1,45E+09
*			

4

Properties of Outline Row 4: Structural Steel NL

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m...		
3	Isotropic Elasticity				
9	Bilinear Isotropic Hardening				
12	Specific Heat	434	J kg...		

3



Toolbox

- Physical Properties
 - Linear Elastic
 - Isotropic Elasticity
 - Orthotropic Elasticity
 - Anisotropic Elasticity
 - Viscoelastic
 - Anisotropic Temperature Dependent
 - Anisotropic Temperature Dependent
 - Hyperelastic Experimental Data
 - Hyperelastic
 - Chaboche Test Data
 - Plasticity **1**
 - Creep
 - Life
 - Strength
 - Gasket
 - Viscoelastic Test Data
 - Viscoelastic
 - Shape Memory Alloy
 - Geomechanical
 - Damage
 - Cohesive Zone
 - Fracture Criteria
 - Thermal
 - Thermopower
 - Linear "Soft" Magnetic Material
 - Linear "Hard" Magnetic Material
 - Nonlinear "Soft" Magnetic Material
 - Nonlinear "Hard" Magnetic Material

View All / Customize...

Outline of Schematic A2: Engineering Data

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Structural Steel			General_Materials	
4	Structural Steel NL			General Materials	
*	Click here to add a new material				

2

Properties of Outline Row 4: Structural Steel NL

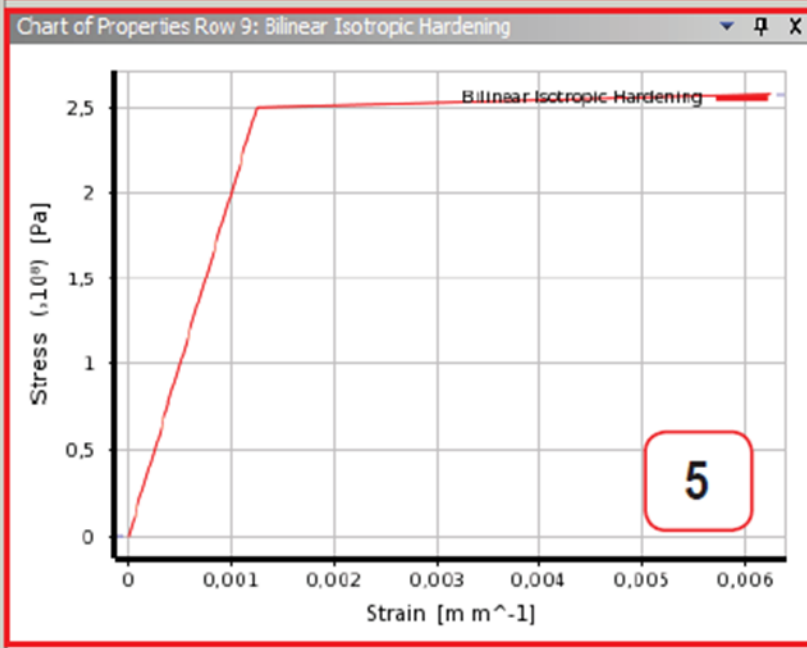
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m...		
3	Isotropic Elasticity				
9	Bilinear Isotropic Hardening				
12	Specific Heat	434	J kg...		

3

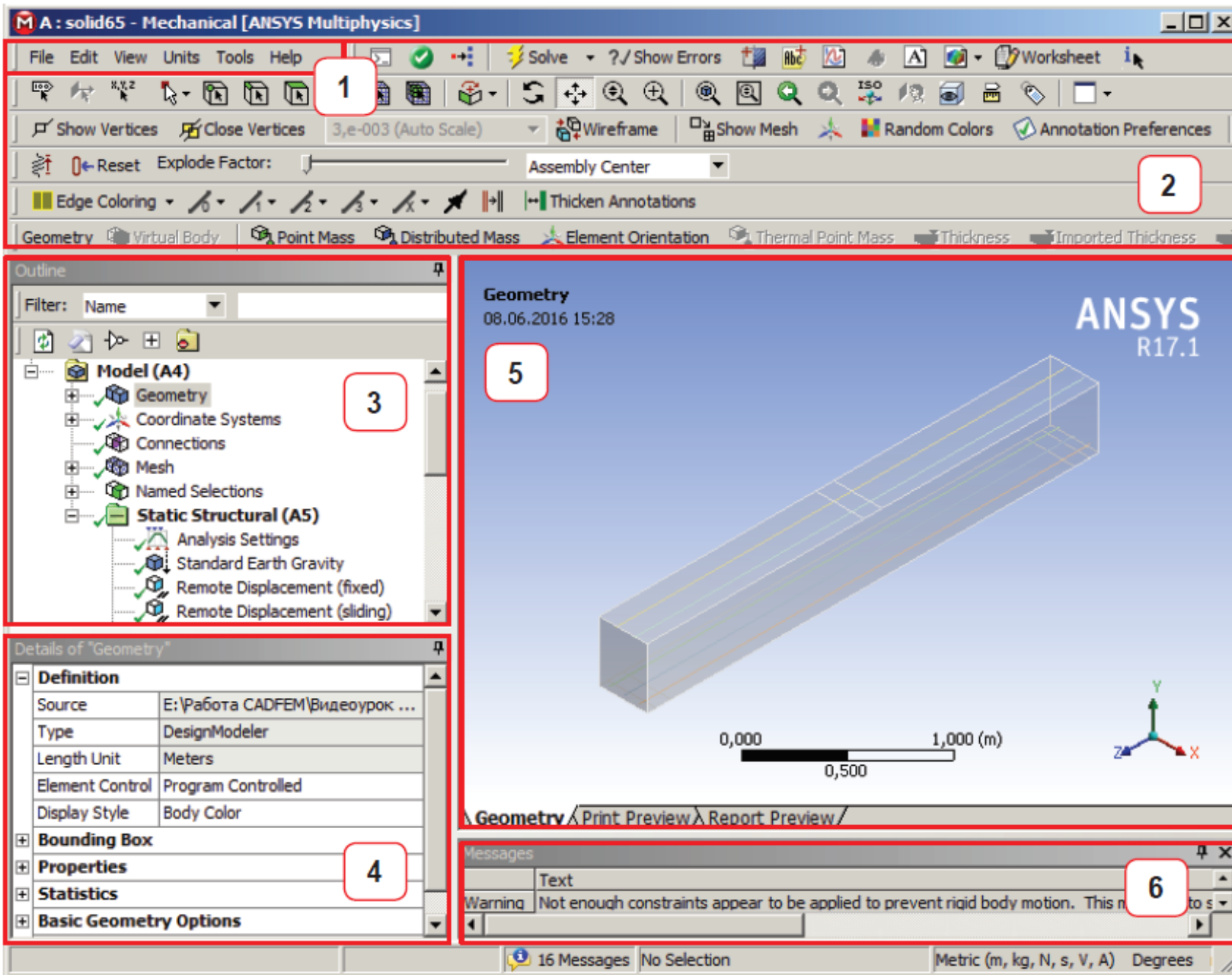
Table of Properties Row 9: Bilinear Isotropic Hardening

	A	B	C
1	Temperature (C)	Yield Strength (Pa)	Tangent Modulus (Pa)
2		2,5E+08	1,45E+09
*			




4



























Интерфейс приложения Workbench Mechanical















Интерфейс приложения
Workbench Mechanical
для модуля **Static
Structural**

Иконка	Действие
 Solve ▼	Кнопка запуска решения задачи; в выпадающем меню можно выбрать способ решения (интерактивный/фоновый режим) и расчетную станцию, на которой будет выполняться расчет
	Вызов окна интерфейса помощника в окне Mechanical Application Wizard ; позволяет решить задачу с использованием подсказок и советов
<i>Панель Model</i>	
 Connections	Описание типов взаимодействия и контактов между элементами геометрии











Иконка	Действие
 Symmetry	Добавление симметрии
 Remote Point	Описание удаленных точек
 Fracture	Описание трещин
 Mesh Edit	Редактирование сетки
 Mesh Numbering	Управление нумерацией узлов и элементов
 Solution Combination	Комбинирование результатов нескольких расчетов
 Construction Geometry	Вспомогательная геометрия

<i>Панель Geometry</i>	
 Point Mass	Добавление объекта точечной массы
 Distributed Mass	Добавление объекта распределенной массы
 Element Orientation	Изменения ориентации элементов
 Thickness	Задание толщины оболочки
 Layered Section	Описания сечения оболочки
<i>Панель Construction Geometry</i>	
 Path	Вспомогательная геометрия – линия
 Surface	Вспомогательная геометрия – плоскость
<i>Панель Coordinate Systems</i>	
	Создать новую координатную систему
 <p>             </p>	Кнопки редактирования координатной системы: смещение, поворот, смена направления осей, управление трансформациями, удаление созданных трансформаций

<i>Панель Connections</i>	
 Connection Group	Добавление группы контактов
 Contact ▼	Добавление контактного интерфейса
 Spot Weld	Добавление объекта точечной сварки
Иконка	Действие
 End Release	Добавление шарнира в балочную модель
 Body-Ground ▼	Добавление шарнира, связывающего тело с «землей»
 Body-Body ▼	Добавление шарнира, связывающего тела
 Body Views	Двухоконный режим отображения тел, связанных с помощью шарнира
 Sync Views	Синхронизировать графическое отображение тел
<i>Панель Joint Configure</i>	
 Configure	Запуск расчета траекторий движения для манипуляций в интерактивном режиме
 Set  Revert	Задать положение тел, сброс в исходное положение
 Assemble	Отображение позиций тел с учетом шарнирных связей

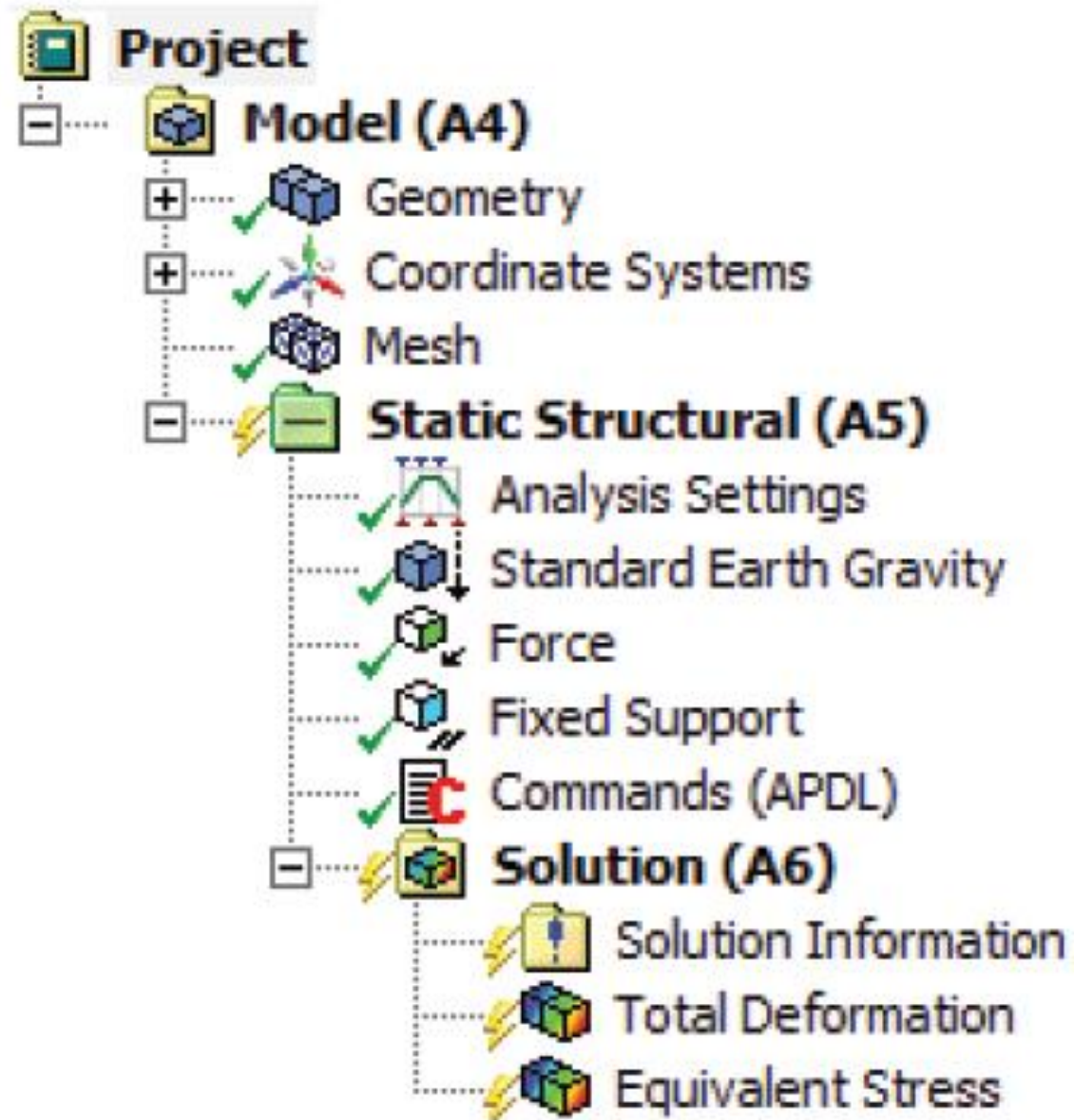
<i>Панель Environment (Раздел анализа)</i>	
 Inertial ▼	Инерционные нагрузки: ускорение, ускорение свободного падения (земная гравитация), угловая скорость
 Loads ▼	Список типов нагрузок
 Supports ▼	Список типов закреплений
 Conditions ▼  Coupling  Constraint Equation  Pipe Idealization  Nonlinear Adaptive Region	Условия: <ul style="list-style-type: none"> • связывание; • уравнение ограничения; • описание криволинейных участков балочной модели трубопровода с помощью конечных элементов ELBOW290; • область адаптивного перестроения сетки в задачах с большими деформациями
 Direct FE ▼	Прямое задание граничных условий для выборок узлов и элементов
<i>Панель Commands</i>	
 Export...	Экспорт команд
 Import...	Импорт команд
 Refresh	Обновление объекта команд

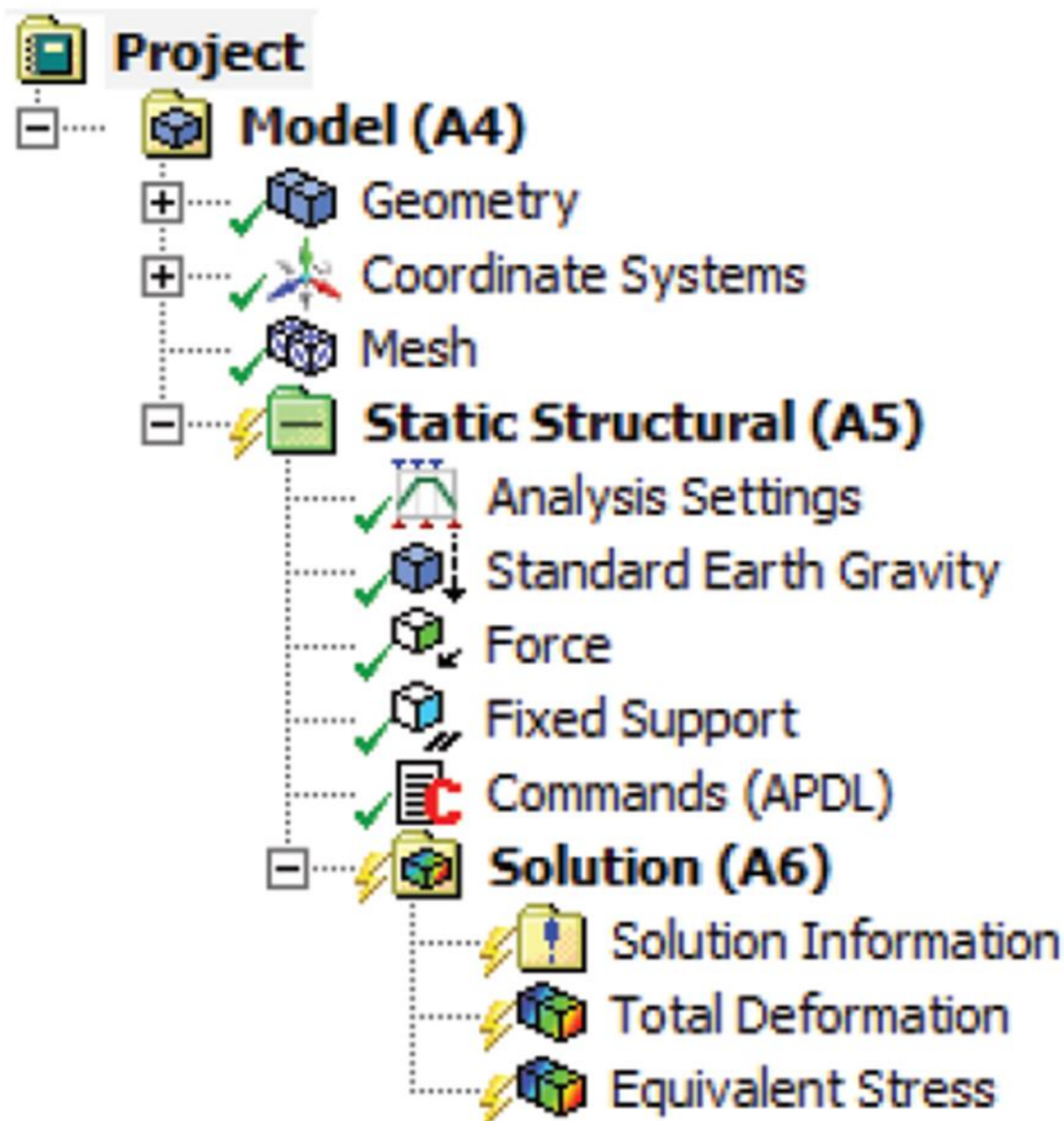
Панель **Solution** (для выбора параметров, описывающих результат)

 Deformation ▾	Перемещения
 Strain ▾	Деформации
 Stress ▾	Напряжения
Иконка	Действие
 Energy ▾	Энергия деформаций
 Damage ▾	Результаты для анализа с использованием моделей разрушения
 Linearized Stress ▾	Линеаризованные напряжения
 Probe ▾	Реакции опор
 User Defined Result	Пользовательские параметры
 Coordinate Systems ▾	Вывод информации об ориентации координатных систем элементов
 Beam Results ▾	Результаты расчета по балочной модели

**Создание расчетной
модели
в Workbench Mechanical**

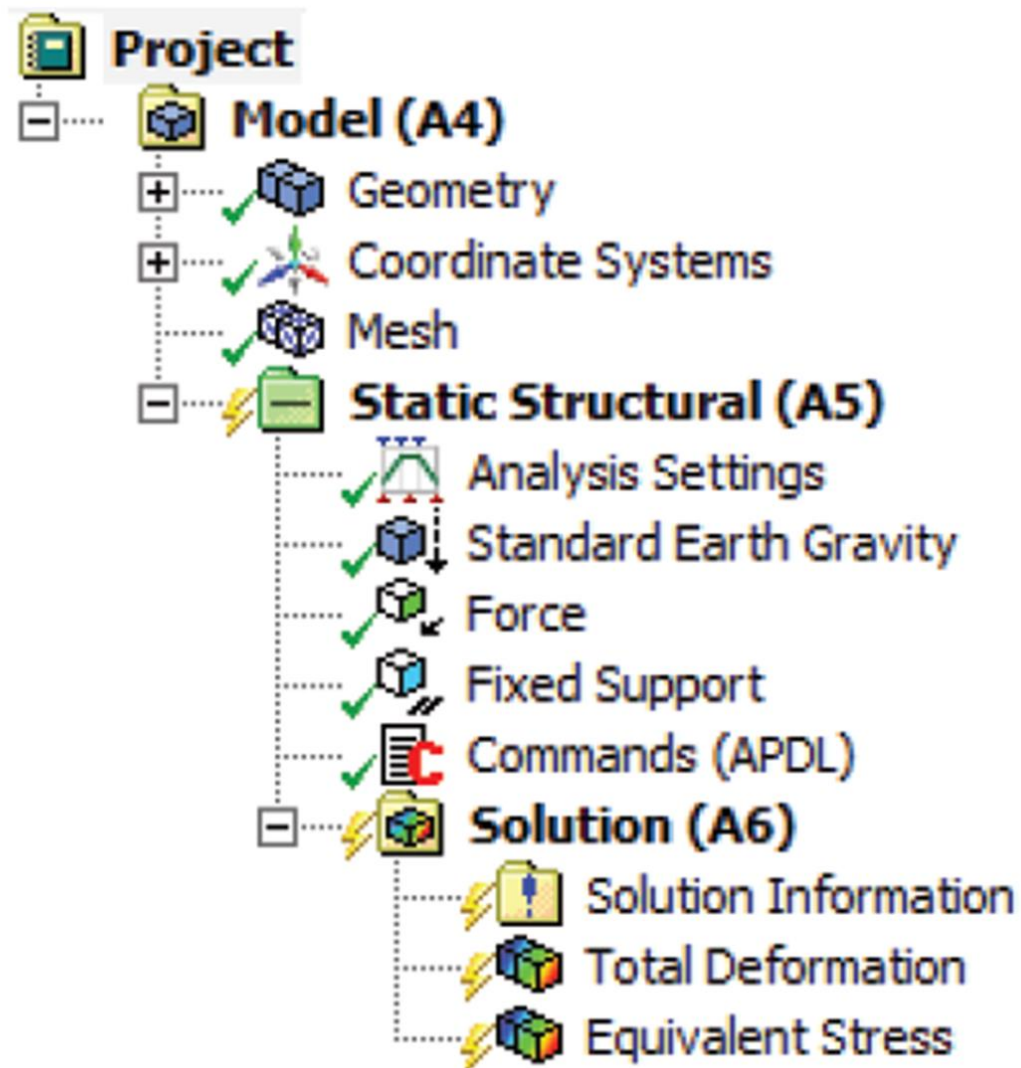
Дерево модели





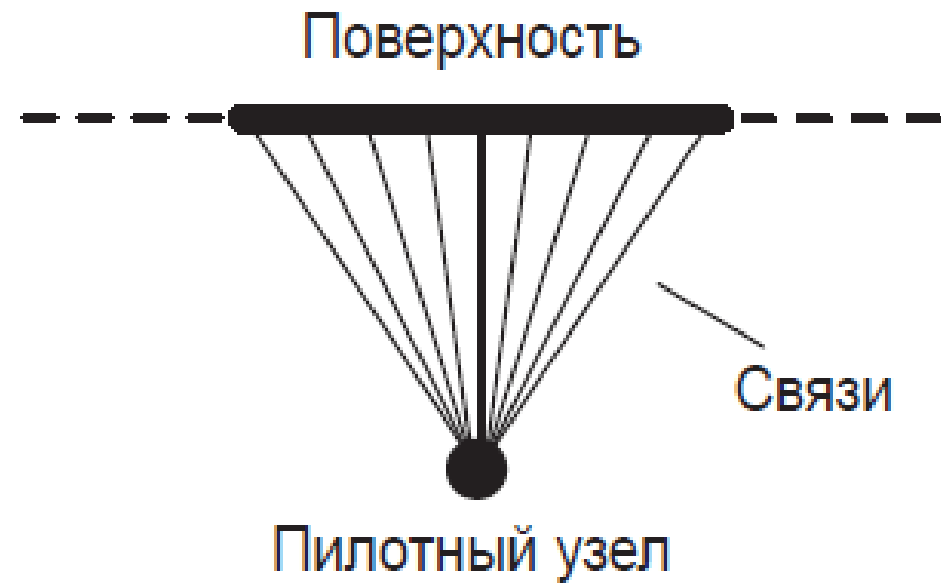
- В ANSYS Mechanical используется следующая классификация конечных элементов:
 - •• связи без изгибной жесткости, 3D-расчеты (LINK);
 - •• балочные элементы, 3D-расчеты (BEAM);
 - •• плоские, 2D-расчеты (PLANE);
 - •• оболочки, 3D-расчеты (SHELL);
 - •• объемные, 3D-расчеты (SOLID).
- Типы элементов именуются по аббревиатуре и следующему за ней номеру, например SOLID185, SHELL181, BEAM188 и т. д.

Задание граничных условий





- *Иллюстрация условия Remote Displacement*



- *Свойства объекта Remote Displacement*

Outline

Filter: Name

Project

- Model (A4)
 - Geometry
 - Coordinate Systems
 - Remote Points
 - Remote Point 1
 - Mesh
 - Static Structural (A5)
 - Analysis Settings
 - Fixed Support
 - Pressure
 - Remote Displacement
 - Solution (A6)
 - Solution Information

Details of "Remote Displacement"

Scope

Scoping Method	Remote Point
Remote Points	Remote Point 1
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Coordinate	1, m
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	0,5 m
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	0,5 m
Location	Click to Change

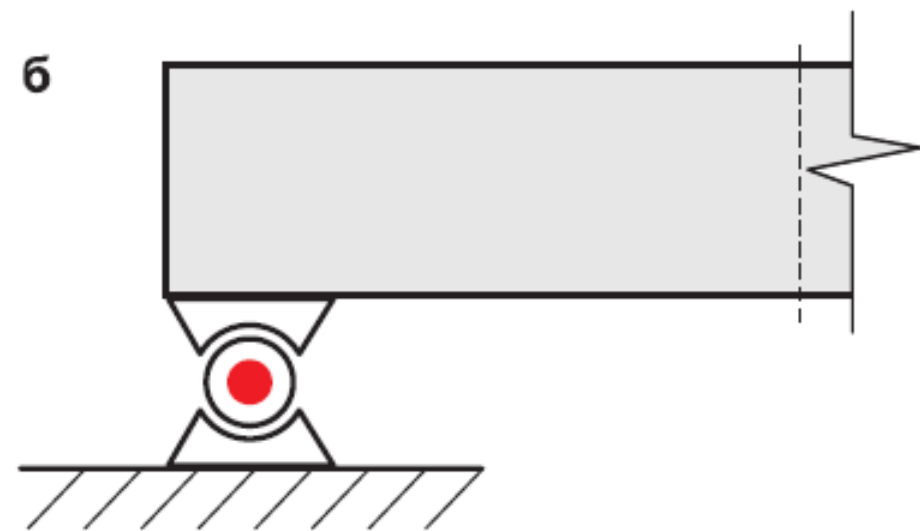
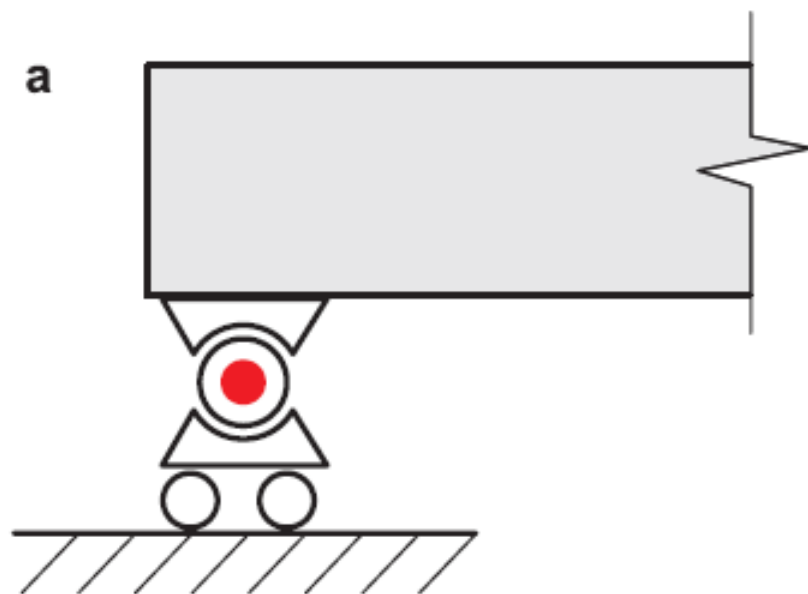
Definition

Type	Remote Displacement
<input type="checkbox"/> X Component	0, m (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	-0,3 m (ramped)
Z Component	Free
<input type="checkbox"/> Rotation X	45, ° (ramped)
Rotation Y	Free
<input type="checkbox"/> Rotation Z	0, ° (ramped)
Suppressed	No
Behavior	Deformable

Advanced

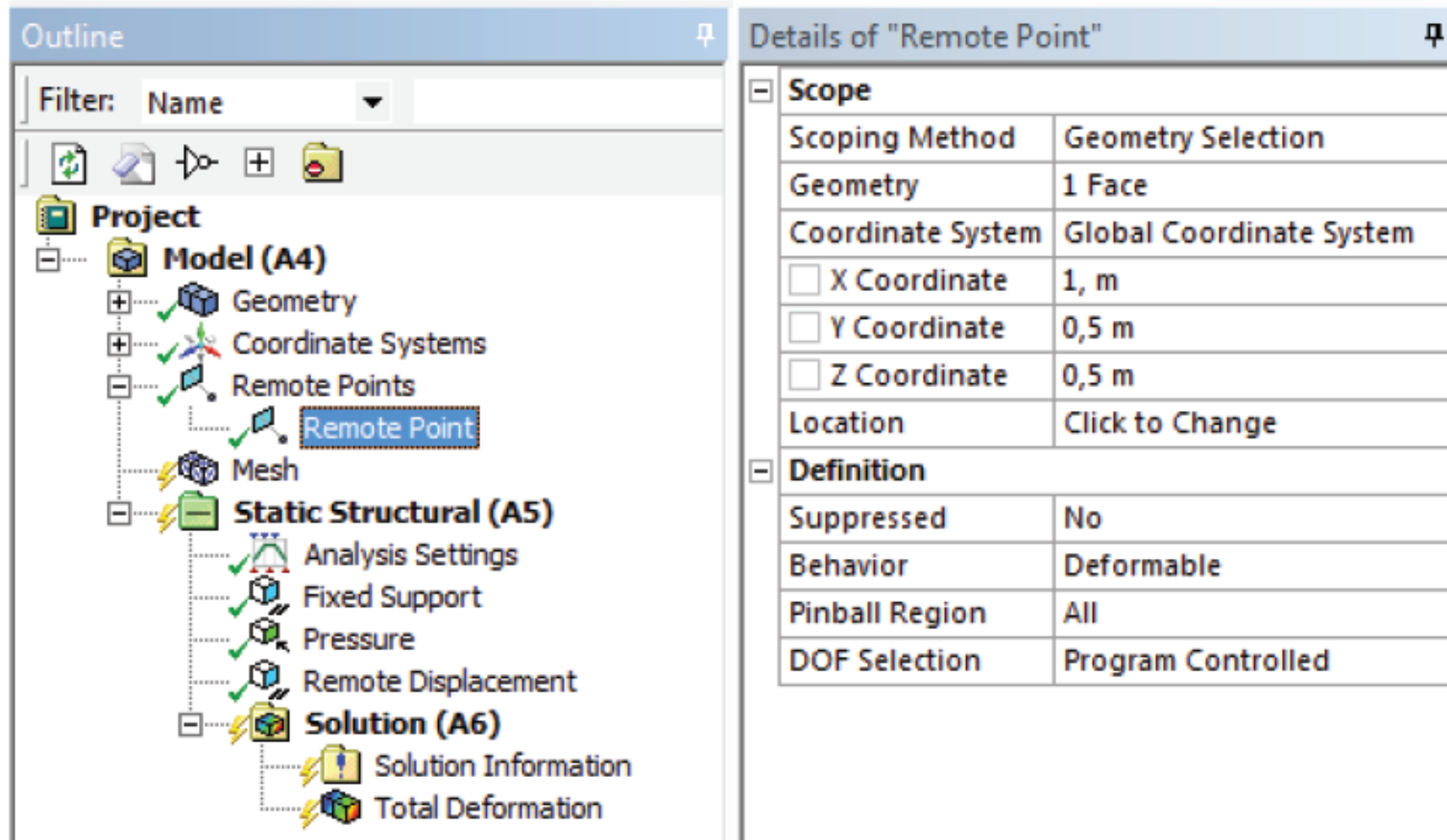
Pinball Region	All
----------------	-----

Пример шарнирно-опертой балки:
а) подвижная опора; б)
неподвижная опора



● – пилотный узел

Объект *Remote Point* и его свойства



The image displays two panels from the ANSYS Workbench software interface. The left panel, titled "Outline", shows a hierarchical tree structure of the project. The right panel, titled "Details of 'Remote Point'", shows the properties of the selected "Remote Point" object.

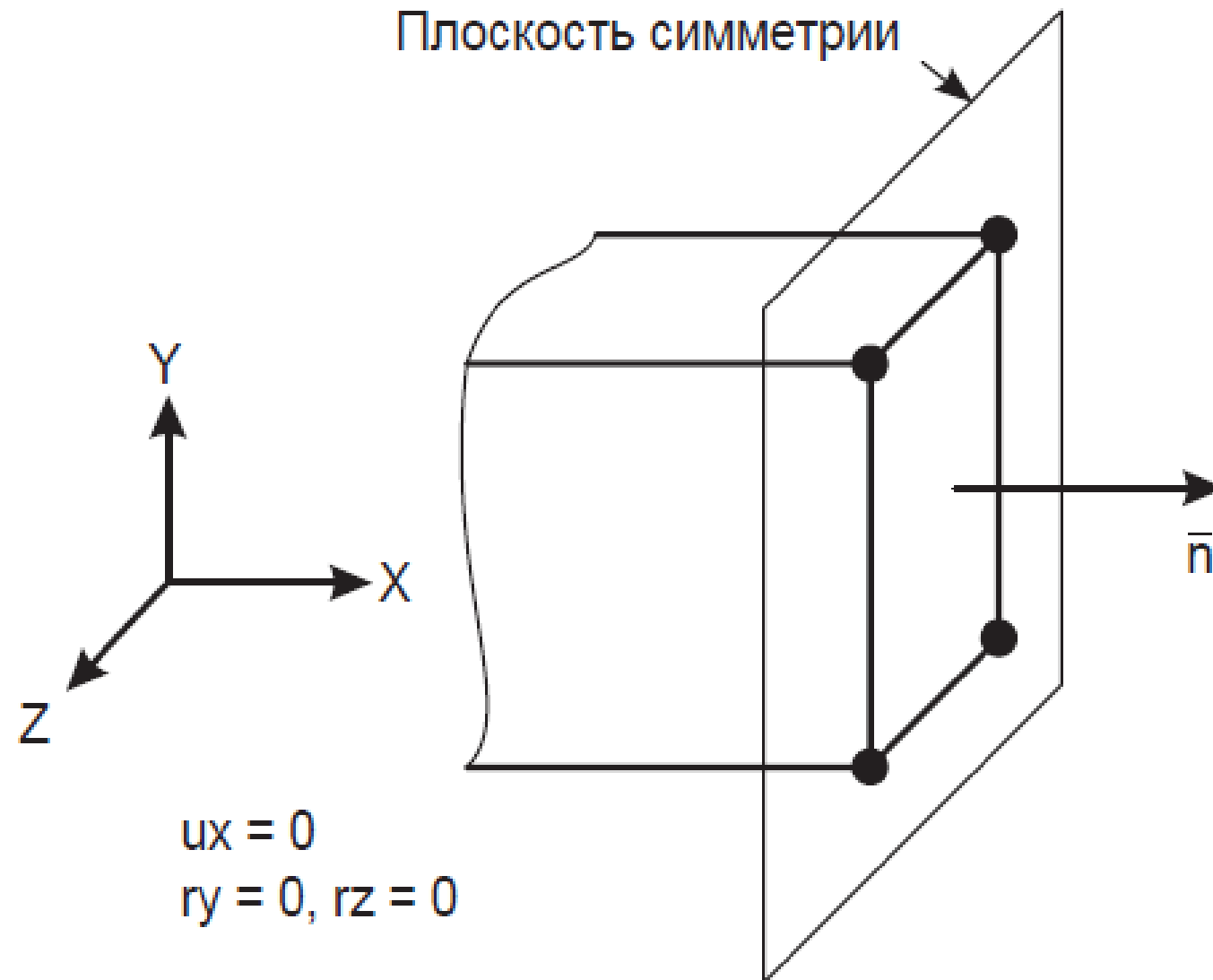
Outline Panel:

- Project
 - Model (A4)
 - Geometry
 - Coordinate Systems
 - Remote Points
 - Remote Point
 - Mesh
 - Static Structural (A5)
 - Analysis Settings
 - Fixed Support
 - Pressure
 - Remote Displacement
 - Solution (A6)
 - Solution Information
 - Total Deformation

Details of "Remote Point" Panel:

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Coordinate	1, m
<input type="checkbox"/> Y Coordinate	0,5 m
<input type="checkbox"/> Z Coordinate	0,5 m
Location	Click to Change
Definition	
Suppressed	No
Behavior	Deformable
Pinball Region	All
DOF Selection	Program Controlled

Условие симметрии



Математические модели и методы решения

- Модуль Static Structural позволяет решить систему уравнений теории упругости. По умолчанию задача решается в линейной постановке. В разделе **Analysis Settings** можно активировать опцию геометрической нелинейности (учета больших деформаций/перемещений/поворотов). Активация выполняется с помощью строки **Large Deflection**

Результаты расчетов

- Раздел **Solution** дерева проекта содержит инструменты обработки и представления результатов. В него добавляются объекты необходимых пользователю результатов расчета.
- Основным результатом расчета НДС, проводимого с помощью МКЭ в модуле Static Structural, являются перемещения (**Deformation**) узлов КЭ-модели

$$\vec{U} = \{u_x, u_y, u_z\}.$$

- Для вывода этой переменной используются следующие объекты:
- •• перемещение в направлении выбранной оси (**Directional Deformation**);
- •• суммарное перемещение (**Total Deformation**):

- По известным перемещениям вычисляются другие зависимые величины, например напряжения (**Stress**) и деформации (**Strain**). НДС в каждой точке расчетной области описывается тензором напряжений T_σ и тензором деформаций T_ε :

$$T_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}, \quad T_\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix}.$$

Так как тензор напряжений симметричен, систему координат можно повернуть таким образом, что все его сдвиговые компоненты окажутся равными нулю. Оставшиеся нормальные напряжения, расположенные на диагонали, называют главными напряжениями (**Principal Stress**). Их обычно располагают таким образом, чтобы $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

- Главные напряжения могут быть выведены с помощью следующих объектов, добавляемых в дерево проекта:
 - • • σ_1 – **Maximum Principal**;
 - • • σ_2 – **Middle Principal**;
 - • • σ_3 – **Minimum Principal**.
- Направление осей системы координат, в которой реализованы главные напряжения и деформации, может быть графически изображено с помощью объекта **Vector Principal**.
- Напряжения, действующие в направлении нормали к некоторой заданной площадке, называются нормальными и могут быть выведены с помощью объекта **Normal Stress**. Для вывода сдвиговых (касательных) компонент тензора напряжений используется объект **Shear Stress**. Максимальное сдвиговое напряжение определяется как полуразность главных напряжений:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}.$$

- Для оценки напряжений в элементах исследуемой конструкции удобно использовать эквивалентные напряжения (напряжения Мизеса), которые вычисляются по формуле

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}.$$

- Для вывода эквивалентных напряжений используется объект **Equivalent (vonMises)**. Эквивалентные напряжения всегда являются положительной величиной, поэтому по ним нельзя определить вид напряженного состояния (сжатие/растяжение).
- Интенсивность напряжений (**Stress Intensity**) позволяет определить вид преобладающего напряженного состояния (сжатие/растяжение) и вычисляется по формуле $\sigma_{int} = \sigma_1 - \sigma_3$.
- Энергия упругих деформаций (**Strain Energy**), вычисляемая для каждого КЭ путем интегрирования по объему, также может быть выведена как результат расчета.
- Для области, на которой задано граничное условие, например перемещение (**Displacement**) или закрепление (**Fixed Support**), может быть вычислена реакция-сила (**Force Reaction**) или реакция-момент (**Moment Reaction**).

- Для каждой отображаемой в результатах величины необходимо задать следующие свойства:
- • метод выбора области для вычисления на ней результата: элемент геометрии (**Geometry Selection**), именованная выборка (**Named Selection**), вспомогательная линия (**Path**) или плоскость (**Surface**);
- • геометрия, для которой вычисляются результаты (**Geometry**);
- • тип результатов (**Type**);
- • способ вывода результатов (**By**): по времени (**Time**), по набору результатов (**Result Set**), максимальный по времени (**Maximum over Time**), время максимального значения результата (**Time of Maximum**);
- • идентификатор результата (**Identifier**) – имя переменной, которое может быть использовано при вычислении величины по формуле, заданной пользователем;
- • способ отображения (**Display Options**).
- Список дополнительных результатов доступен в окне **Worksheet**. Для их отображения в раздел **Solution** дерева проекта необходимо добавить объект пользовательского результата (**User Defined Result**). Вызов окна **Worksheet** производится нажатием одноименной кнопки на панели инструментов.
- В свойствах объекта пользовательского результата может быть задано математическое выражение, содержащее переменные из колонки **Expression** окна **Worksheet**, например $LOCX + LOCY$, т. е. сумма перемещений по оси X и по оси Y.

- В свойствах раздела **Solution** производятся следующие настройки:
- •• управление процессом адаптивного сгущения сетки при решении нелинейной задачи:
- — количество стадий измельчения сетки (**Max Refinement Loops**),
- — глубина измельчения (**Refinement Depth**);
- •• источник сетки для обработки результатов (**Mesh Source**): модель/файл результатов;
- •• расчет результатов в сечении балок (**Calculate Beam Section Result**).
- Подраздел **Solution Information** отвечает за вывод различных результатов, связанных с процедурой решения задачи (например, график процесса сходимости и текстовая информация, выводимая в процессе решения). В настройках раздела (строка **Solution Output**) можно выбрать тип выводимых данных:
- •• информация, выводимая решателем (**Solver Output**);
- •• график процесса сходимости (см. п. 4.6.5):
- — сходимость по силам (**Force Convergence**),
- — сходимость по перемещениям (**Displacement Convergence**),
- — сходимость по моментам (**Moment Convergence**),
- — сходимость по вращениям (**Rotation Convergence**);
- •• максимальное приращение значения основной неизвестной (**Max DOF Increment**);
- •• параметр алгоритма линейного поиска (**Line Search**);
- •• изменение времени в процессе расчета (**Time**);
- •• изменение приращения времени в процессе расчета (**Time Increment**).
- Выводимая информация обновляется с частотой, заданной в строке **Update Interval**.

- График процесса сходимости при решении некоторых нелинейных задач может содержать очень большое количество точек. Задать количество отображаемых на графике точек можно в строке **Display Points**.
- Для управления отображением невязки при решении нелинейной задачи используется строка **Newton-Raphson Residuals**.
- Список свойств **FE Connection** позволяет настроить графическое отображение связей в КЭ-модели. В строке **Display** может быть выбран тип выводимых связей:
 - • все типы (**All FE Connectors**);
 - • уравнения связей (**CE Based**);
 - • балки (**Beam Based**);
 - • связи, генерируемые при активации опции «мягких пружин» (**WeakSprings**).
- Также можно задать цвет (**Line Color**), толщину (**Line Thickness**) и тип отображаемых линий (**Display Type**).