

Министерство образования Республики Беларусь  
Белорусский государственный университет

**А.С. Кравчук, С.А. Пронкевич, А.И. Кравчук**

**Электронная библиотека механики и физики.  
Лекции по ANSYS с примерами решения задач  
в пяти частях**

Часть 5.

**Примеры решения связанных задач механики твердого тела**

Минск  
2013

УДК 539.3:004.4(075.8)(076.1)

Решение о депонировании документа вынес  
совет механико-математического факультета (протокол № 6 от 07.05.2013 г.)

Авторы:

**А.С. Кравчук, С.А. Пронкевич, А.И. Кравчук**

Рецензенты:

**Босяков С.М.**, канд. физ-мат. наук, доцент, доцент кафедры теоретической и прикладной механики БГУ

**Недзьведь А.М.**, канд. тех. наук, ведущий научный сотрудник отдела интеллектуальных информационных систем Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси.

**Кравчук А. С.** Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач [Электронный ресурс] : курс лекций для студ. мех.-мат. фак. обучающихся по специальности 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)» : в 5 ч. Ч. 5: Примеры решения связанных задач механики твердого тела / А. С. Кравчук, С. А. Пронкевич, А. И. Кравчук. – Электрон. текстовые дан. – Минск : БГУ, 2013. – 105 с.: ил. – Библиогр.: с. 102 . – Загл. с тит. экрана. – № 001628052013. Деп. в БГУ 28.05.2013.

Данный раздел курса лекций посвящен решению связанных термомеханических задач, имеющих прикладное значение.

Авторы выражают благодарность представительству CAD-FEM GmbH в СНГ за разрешение использовать ANSYS 10 ED при написании данного раздела.

## Пример 1. Деформирование биметаллических конструкций при остывании

### Создания геометрической модели в ANSYS

Проведение двойного анализа (*coupled-field analyses*) необходимо при решении задач, объединяющих в себе явления из разных физических областей, в данном случае – конвективный теплообмен и температурные деформации, возникающие в теле в результате этого воздействия. Для данного типа анализа применяются специальные элементы из раздела *Coupled Field*, специально предназначенные для проведения данного вида анализа, и обладающие необходимыми степенями свободы.

В данном разделе излагаются методы построения геометрической модели в ANSYS. В примере 1 рассматривается метод построения модели «сверху вниз». Поскольку задача является осесимметричной, то рассматривается плоское осевое сечение конструкции. Температура биметаллической конструкции постоянна, деформация происходит из-за различных коэффициентов расширения материала.

#### *Шаг 1. Создание сечения конструкции с помощью прямоугольников*

Создаем два прямоугольника в первом квадранте координатной плоскости ( $X \geq 0$ ,  $Y \geq 0$ ), имитирующих сечение биметаллической пластины.

*Пункт главного меню*

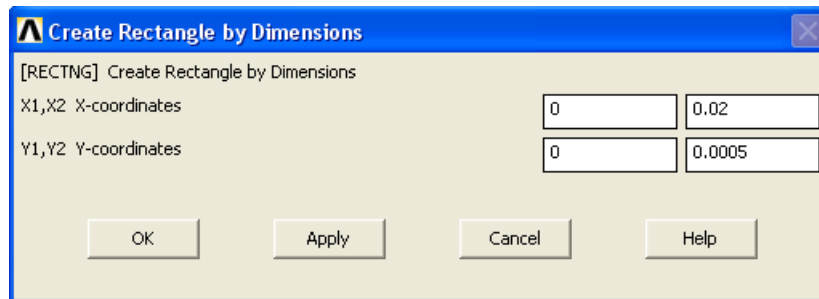
**Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By Dimensions**

В полях ввода появившегося диалогового окна **Create Rectangle By Dimensions:**

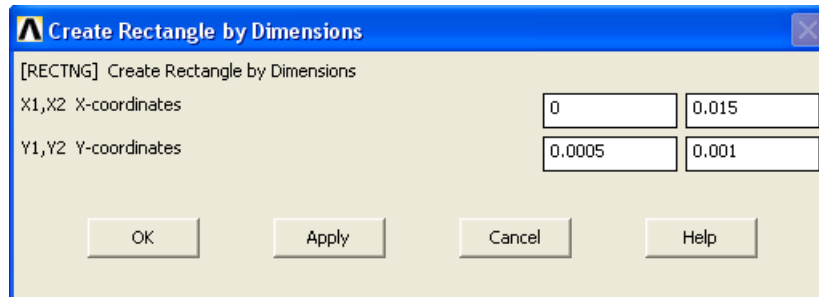
- Вводим координаты двух ключевых точек определяющих первый прямоугольник (Таблица 1, Рисунок 1).
- Нажимаем кнопку **Apply**.
- Вводим координаты двух ключевых точек определяющих второй прямоугольник (Таблица 1, Рисунок 2).
- Нажимаем кнопку **OK**.

**Таблица 1. Таблица координат прямоугольников**

<i>Первый прямоугольник</i>		<i>Второй прямоугольник</i>	
<i>X-координаты</i>	<i>Y-координаты</i>	<i>X-координаты</i>	<i>Y-координаты</i>
<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0.0005</i>
<i>0.02</i>	<i>0.0005</i>	<i>0.015</i>	<i>0.001</i>



**Рисунок 1. Создание 1-го прямоугольника**



**Рисунок 2. Создание 2-го прямоугольника**

*Список команд*

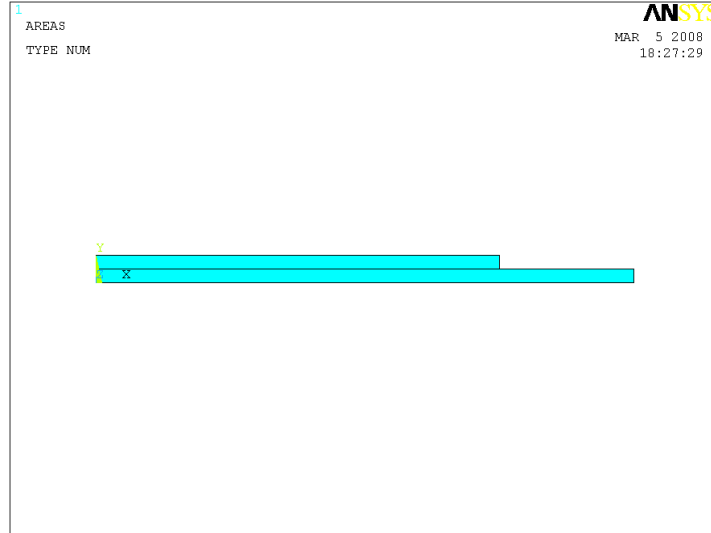
***/PREP7***

***RECTNG,0,0.02,0,0.0005***

***RECTNG,0,0.015,0.0005,0.001***

После каждой команды необходимо нажать ***Enter*** на клавиатуре.

*Результаты выполнения шага 1.*



**Рисунок 3. Результат создания осевого сечения биметаллической конструкции**

*Шаг 2. «Склеивание» прямоугольников*

Эта логическая операция позволяет создать общую границу между двумя прямоугольниками.

*Пункт главного меню*

***Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Glue > Areas***

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора ***Glue Areas***. В этом случае необходимо нажать кнопку ***Pick All***.

*Список команд*

***AGLUE,ALL,,,,,,,,***

После команды необходимо нажать ***Enter*** на клавиатуре.

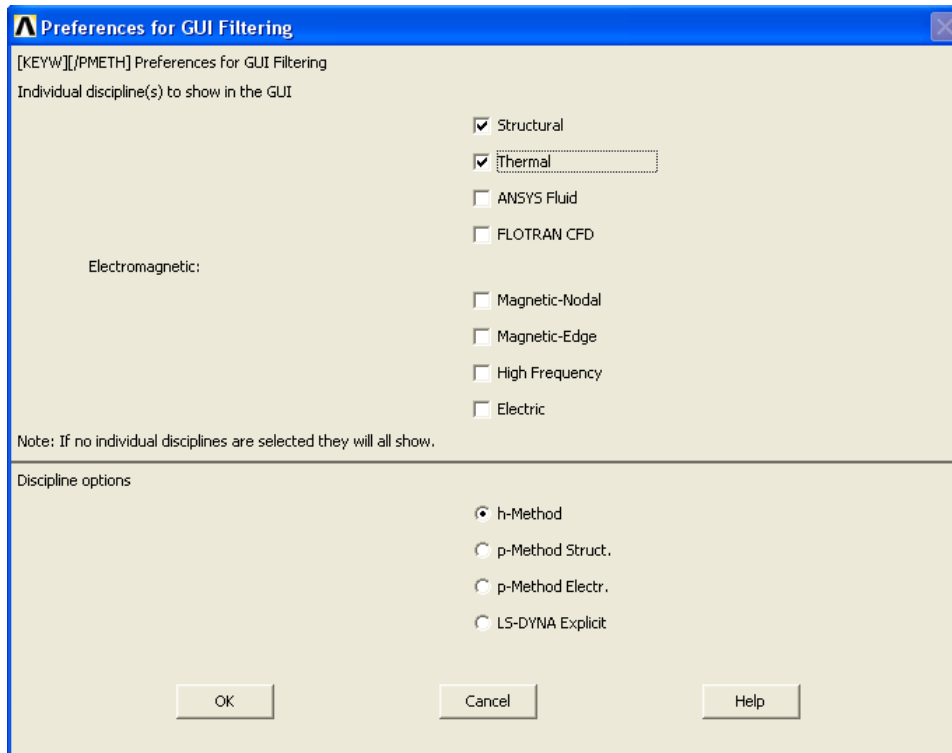
**Определение физических констант материалов, участвующих в решении задачи**

*Шаг 1. Определение типа решаемой задачи*

***Main Menu > Preferences...***

При его использовании появляется окно *Preferences for GUI Filtering*.

- Устанавливаем флажок  в полях с метками *Structural* и *Thermal*.
- Нажимаем кнопку **OK** для подтверждения выбора (Рисунок 4).



**Рисунок 4. Окно *Preferences for GUI Filtering***

*Шаг 2. Последовательность действий при определении свойств материала биметаллической пластины*

Для определения свойств материала необходимо воспользоваться пунктом главного меню.

***Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models***

При его использовании появиться окно *Define Material Model Behavior* (Рисунок 5), в котором следует выбрать необходимые пункты.

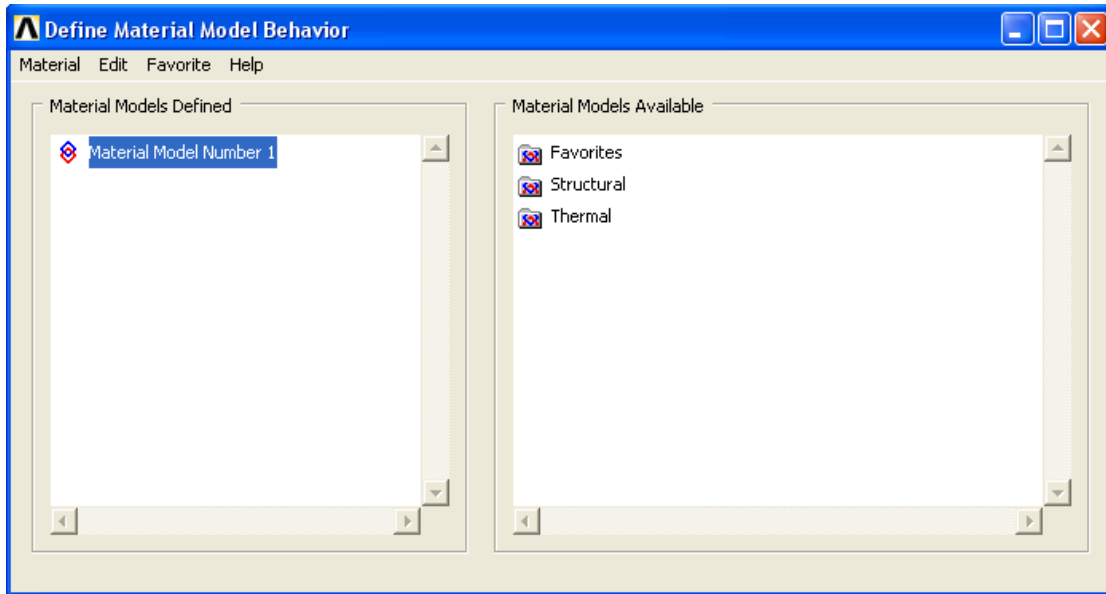


Рисунок 5. Окно *Define Material Model Behavior*

### *Определение термосвойств материалов*

Рассмотрим последовательность действий при определении термосвойств биметаллической композиции (первый материал – сталь, второй материал – медь) (Таблица 2).

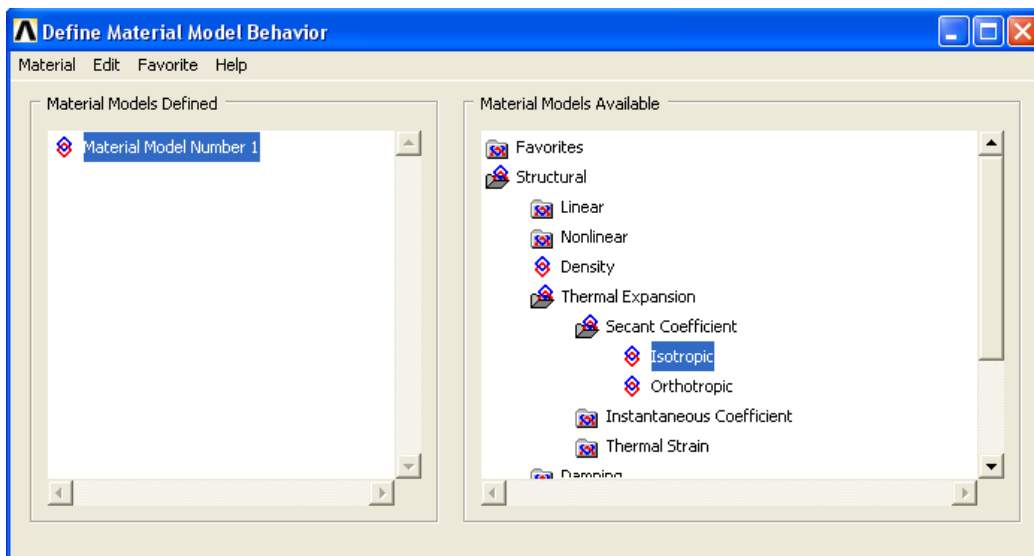
Таблица 2. Термохарактеристики материала модели

<i>Наименование параметра</i>	<i>Значение</i>	
	<i>Сталь</i>	<i>Медь</i>
<i>Коэффициент теплового расширения ALPX (1/°C)</i>	<i>1.2E-5</i>	<i>1.67E-5</i>

### *Определение коэффициента теплового расширения стали (первый материал)*

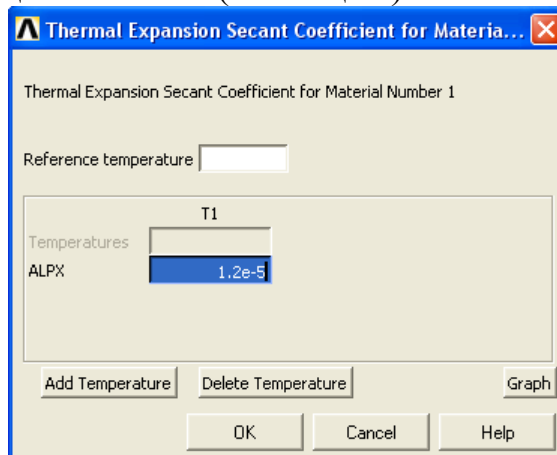
Для определения коэффициента теплового расширения необходимо воспользоваться пунктом меню окна *Define Material Model Behavior* (Рисунок 6):

*Define Material Model Behavior*> *Material Models Available*> *Structural*>  
*Thermal Expansion*> *Secant Coefficient*> *Isotropic*



**Рисунок 6. Пункт окна *Material Models Available* для определения коэффициента теплового расширения первого материала**

При использовании указанного пункта меню появиться окно *Thermal Expansion Secant Coefficient for Materia...* (Рисунок 7), в котором необходимо ввести соответствующее значение (Таблица 2) и нажать кнопку **ОК**.



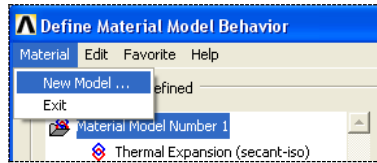
**Рисунок 7. Окно *Thermal Expansion Secant Coefficient for Materia...***

### *Создание второй модели материала*

Для того, чтобы создать вторую модель материала необходимо воспользоваться пунктом верхнего выпадающего меню окна *Define Material Model Behavior* (Рисунок 8):

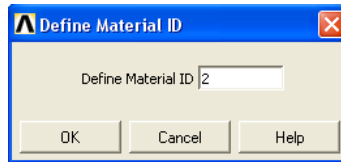
***Define Material Model Behavior > Material > New Model...***





**Рисунок 8. Пункт верхнего выпадающего меню для создания новой модели материала**

При использовании указанного пункта появится окно *Define Material ID* (Рисунок 9), в котором «по умолчанию» будет указан новый по порядку номер материала и пользователю необходимо будет только подтвердить его нажатием кнопки **OK**.

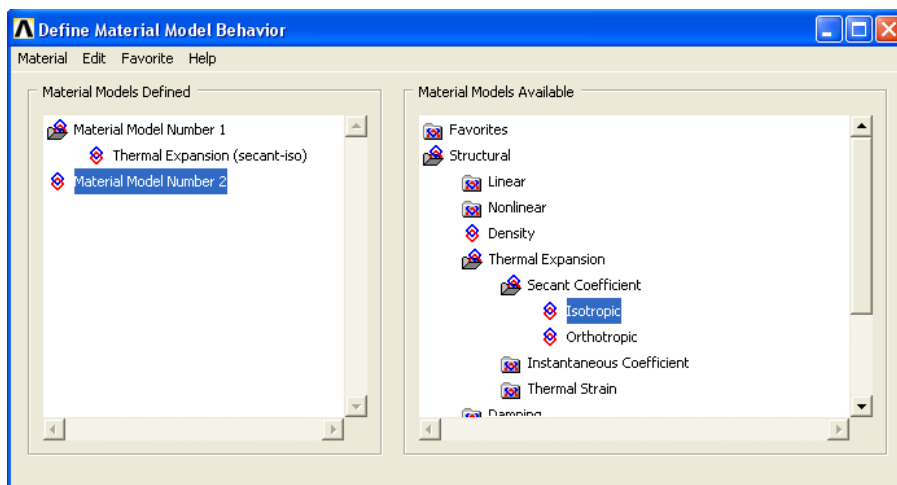


**Рисунок 9. Окно *Define Material ID***

*Определение коэффициента теплового расширения меди (второй материал)*

Для определения коэффициента теплового расширения меди необходимо воспользоваться пунктом меню окна *Define Material Model Behavior* (Рисунок 8):

*Define Material Model Behavior* > *Material Models Available* > *Structural* > *Thermal Expansion* > *Secant Coefficient* > *Isotropic*



**Рисунок 10. Пункт окна *Material Models Available* для определения коэффициента теплового расширения второго материала**

При использовании указанного пункта меню появиться окно *Thermal Expansion Secant Coefficient for Materia...* (Рисунок 11), в котором необходимо ввести соответствующее значение (Таблица 2) и нажать кнопку **ОК**.

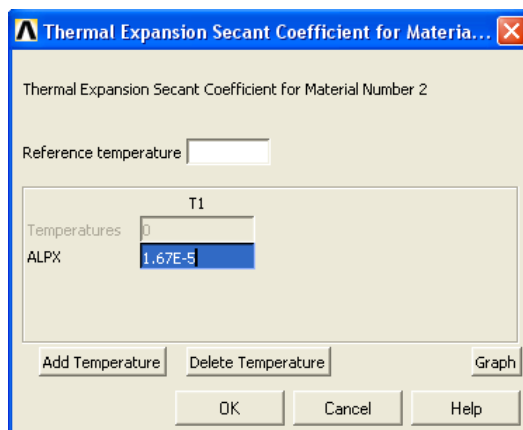


Рисунок 11. Окно *Thermal Expansion Secant Coefficient for Materia...*

*Определение механических характеристик материалов биметаллической композиции*

При решении задачи будет использоваться модель упругого изотропного тела для обеих пластин (Таблица 3).

Таблица 3. Механические характеристики материалов биметаллической пластины

<i>Наименование параметра</i>	<i>Значение</i>	
	<i>Сталь</i>	<i>Медь</i>
<i>Модуль упругости <math>E_X</math> (Па)</i>	<i>2E11</i>	<i>8.2E10</i>
<i>Коэффициент Пуассона <math>PRXY</math></i>	<i>0.3</i>	<i>0.33</i>

*Определение механических характеристик пластины из стали (первый материал)*

Рассмотрим последовательность действий при определении свойств стали. В данном случае необходимо в окне *Material Models Defined* с

ПОМОЩЬЮ «МЫШИ» ВЫБРАТЬ РАЗДЕЛ *Material Model Number 1*, а затем использовать пункт окна *Define Material Model Behavior* (Рисунок 12):

*Define Material Model Behavior*> *Material Models Available*> *Structural*>  
*Linear*> *Elastic*> *Isotropic*

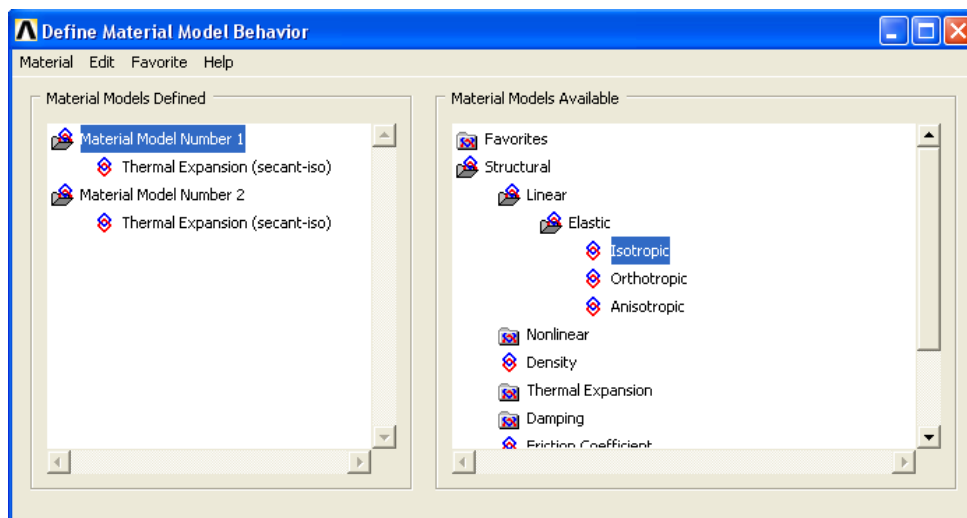


Рисунок 12. Пункт окна *Material Model Available* для определения механических характеристик первого материала

При использовании указанного пункта меню:

- Далее появиться окно *Linear Isotropic Properties for Material Numb...* (Рисунок 13), в котором необходимо определить требуемые значения упругих постоянных - модуля упругости *EX*, и коэффициента Пуассона *PRXY* (Таблица 3) - и нажать кнопку *OK*.

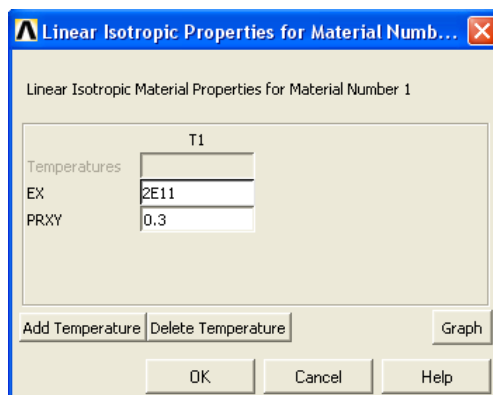
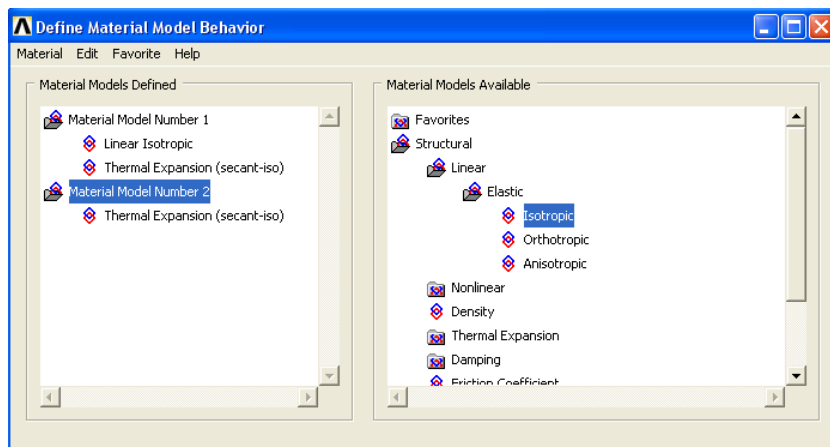


Рисунок 13. Окно *Linear Isotropic Properties for Material Numb...* для первого материала

*Определение механических характеристик пластины из меди (второй материал)*

При определении механических свойств второго материала необходимо в окне *Material Models Defined* с помощью «мыши» выбрать раздел *Material Model Number 2*, а затем еще раз использовать пункт окна *Define Material Model Behavior* (Рисунок 12):

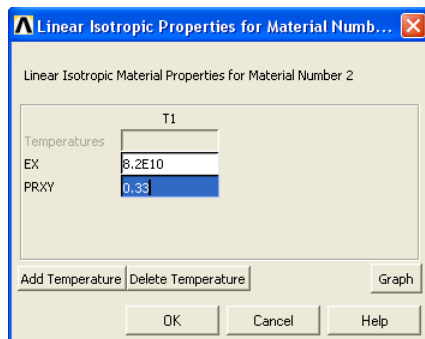
*Define Material Model Behavior*> *Material Models Available*> *Structural*> *Linear*> *Elastic*> *Isotropic*



**Рисунок 14. Пункт окна *Material Model Available* для определения механических характеристик второго материала**


При использовании указанного пункта меню:

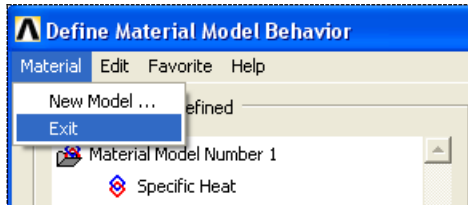
- Далее появится окно *Linear Isotropic Properties for Material Numb...* (Рисунок 15), в котором необходимо определить требуемые значения упругих постоянных - модуля упругости *EX*, и коэффициента Пуассона *PRXY* (Таблица 3) - и нажать кнопку **OK**.



**Рисунок 15. Окно *Linear Isotropic Properties for Material Numb...* для второго материала**

### *Завершение определения свойств материалов*

В завершение необходимо закрыть окно *Define Material Model Behavior* (Рисунок 16) с помощью пункта меню этого окна *Material> Exit* либо воспользоваться значком  в правом верхнем углу окна.



**Рисунок 16. Завершение создания моделей материалов**

## **Конечноэлементное разбиение модели**

### *Шаг 1. Выбор типа элементов для конечно-элементного разбиения*

Указываем тип элементов, с помощью которых будем создавать разбиение. Будем пользоваться при этом пунктом главного меню:

**Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete**

При его использовании появляется окно *Element Types* (Рисунок 17) с надписью *None Defined*, означающей, что к настоящему моменту ни один из типов элементов не выбран для использования при разбиении. В этом случае:

- Нажимаем кнопку *Add...* (Рисунок 17).
- В появившемся окне *Library of Elements Types* (Рисунок 18) следует выбрать из раздела *Coupled Field* элемент *Vector Quad 13*.
- Нажать кнопку *OK* в окне *Library of Elements Types*.
- Нажимаем кнопку *Options* (Рисунок 17).
- В появившемся окне *PLANE13 element type options* (Рисунок 19) в выпадающем списке *Element degrees of freedom K1* следует выбрать опцию *UX, UY, TEMP, AZ*, а в выпадающем списке *Element Behavior K3* следует выбрать опцию *Axisymmetric*, т.к. решается осесимметричная задача.
- Нажать кнопку *OK* в окне *PLANE13 element type options*.
- Нажимаем кнопку *Close* в окне *Element Types* (Рисунок 17).

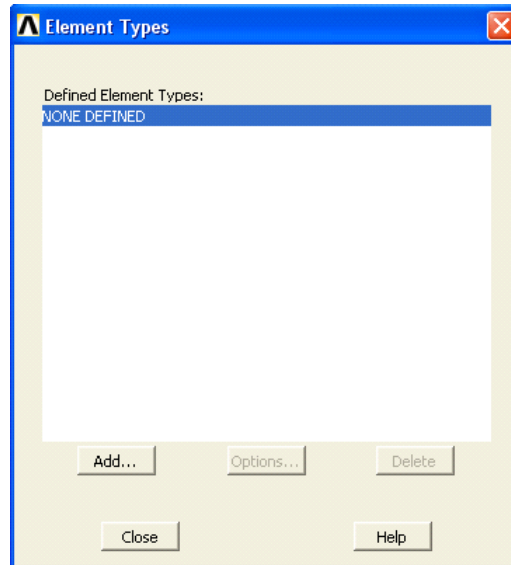


Рисунок 17. Вид окна *Elements Types*

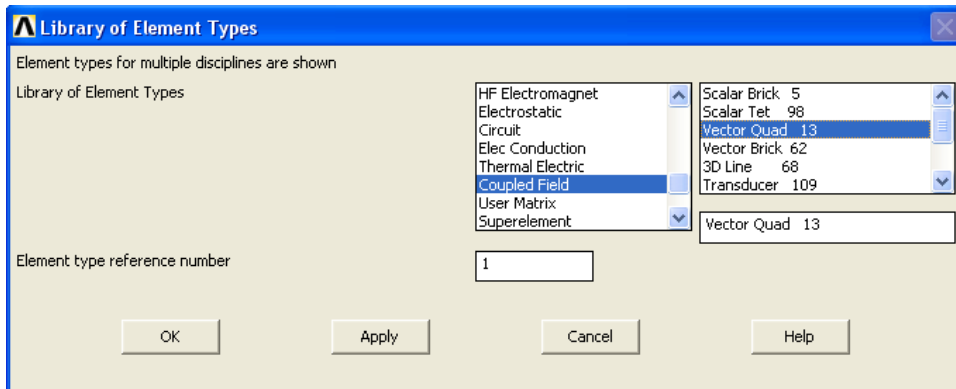


Рисунок 18. Выбор из раздела *Coupled Field* окна *Library of Elements* элемента *Vector Quad 13*

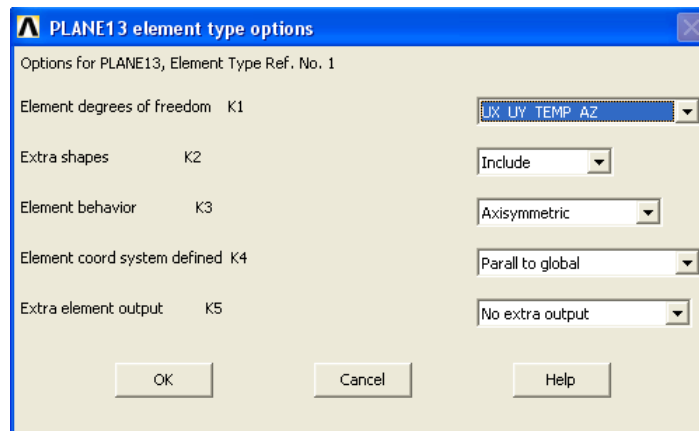


Рисунок 19. Окно *PLANE13 element type options*

## Шаг 2. Включение нумерации поверхностей

Пункт меню утилит

**Utility Menu > PlotCtrl > Numbering...**

При использовании данного пункта меню появляется окно **Plot Numbering Controls** (Рисунок 20). Далее выполняем следующие действия:

- устанавливаем флаг  On в пункте **AREA**.
- Нажимаем кнопку **OK** для подтверждения окончания выбора.

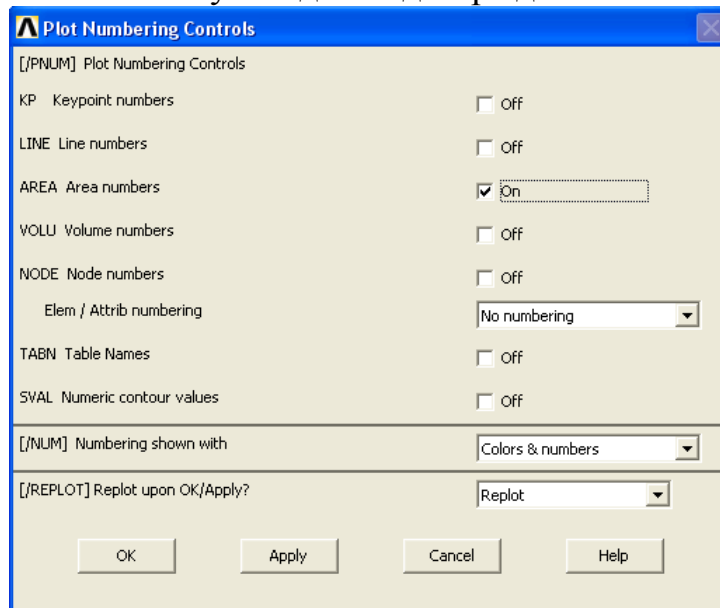


Рисунок 20. Окно **Plot Numbering Controls** с выбранной опцией **AREA**

Список команда

**/PNUM,AREA,1**

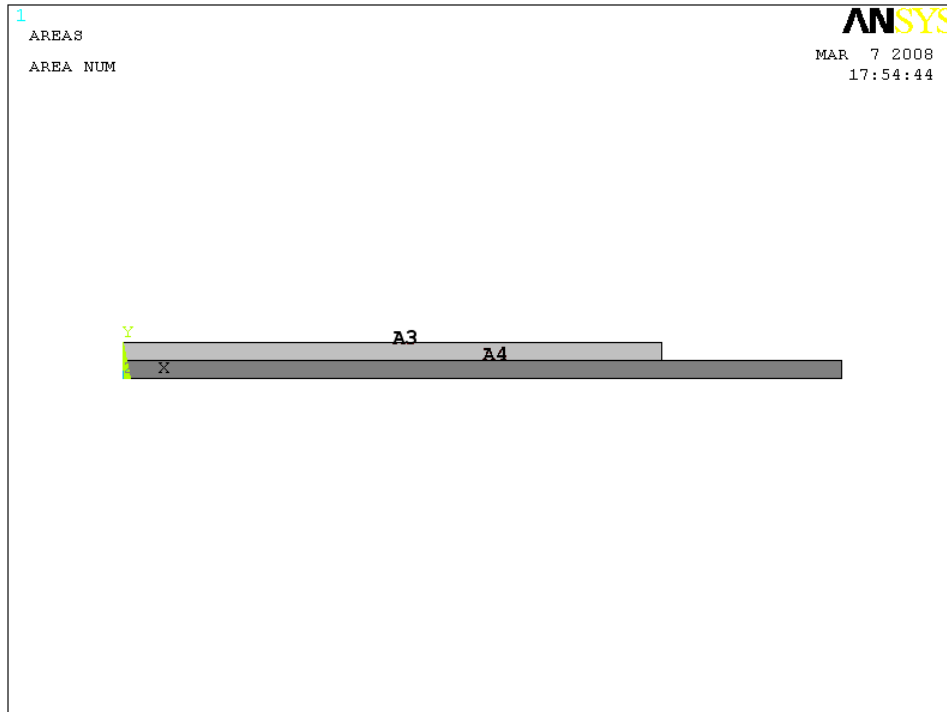
## Шаг 3. Отображение поверхностей

Пункт меню утилит

**Utility Menu > Plot > Areas**

*Список команда*

***APLOT,ALL,,***



**Рисунок 21. Модель с включенной нумерацией поверхностей**

*Шаг 4. Присвоение атрибутов компонентам модели*

Можно воспользоваться любым из трех перечисленных ниже способов (средствами *MeshTool*, пунктом главного меню или командой) для назначения атрибутов модели.

*Средства MeshTool*

***Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool...***

Для присвоения атрибутов компонентам модели можно воспользоваться первой секцией *MeshTool*. Для этого:

- В первом выпадающем списке необходимо установить раздел *Areas*.
- Нажать кнопку ***Set*** (Рисунок 22).
- В появившемся окне выбора геометрических компонент *Area Attributes* (Рисунок 23) следует выбрать с помощью мыши



поверхность *A4* (прямоугольник, моделирующий нижнюю пластину, Рисунок 21) и нажать кнопку *OK*.

- В окне присвоения параметров *Area Attributes* (Рисунок 24) необходимо нажать *Apply*.
- Во вновь появившемся окне выбора геометрических компонент *Area Attributes* (Рисунок 23) следует выбрать с помощью мыши поверхность *A3* (прямоугольник, моделирующий верхнюю пластину, Рисунок 21) и нажать кнопку *OK*.
- В окне присвоения параметров *Area Attributes* необходимо в выпадающем списке *MAT Material Number* выбрать номер 2 (второй материал - медь) и нажать кнопку *OK*.

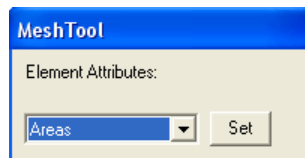


Рисунок 22. Первая секция *MeshTool*

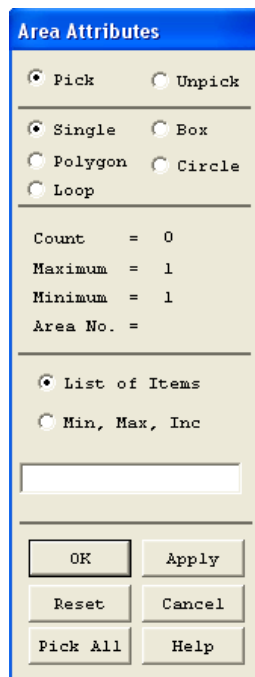


Рисунок 23. Окно выбора геометрических компонент *Area Attributes*

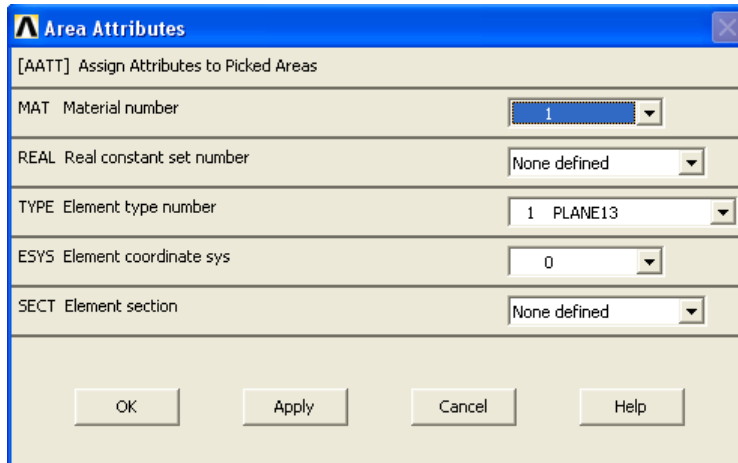


Рисунок 24. Окно присвоения параметров *Area Attributes* поверхности *A4*

#### *Пункт главного меню*

Для определения атрибутов модели необходимо использовать следующий пункт главного меню:

***Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Areas***

- В появившемся окне выбора геометрических компонент *Area Attributes* (Рисунок 23) следует выбрать с помощью мыши поверхность *A4* (прямоугольник, моделирующий нижнюю пластину, Рисунок 21) и нажать кнопку ***OK***.
- В окне присвоения параметров *Area Attributes* (Рисунок 24) необходимо нажать ***Apply***.
- Во вновь появившемся окне выбора геометрических компонент *Area Attributes* (Рисунок 23) следует выбрать с помощью мыши поверхность *A3* (прямоугольник, моделирующий верхнюю пластину, Рисунок 21) и нажать кнопку ***OK***.
- В окне присвоения параметров *Area Attributes* необходимо в выпадающем списке ***MAT Material Number*** выбрать номер ***2*** (второй материал - медь) и нажать кнопку ***OK***.

#### *Список команд*

***ASEL,S,AREA,,4,,***

***AATT,1,0,1,0,0***

***ASEL,S,AREA,,3,,***

*AATT,2,0,1,0,0*

*ASEL,ALL,,,,,*

*Шаг 3. Выключение нумерации поверхностей и включение нумерации линий*

*Пункт меню утилит*

*Utility Menu> PlotCtrl> Numbering...*

При использовании данного пункта меню появляется окно *Plot Numbering Controls* (Рисунок 20). Далее выполняем следующие действия:

- Устанавливаем флаг  Off в пункте *AREA*.
- Устанавливаем флаг  On в пункте *LINE*.
- Нажимаем кнопку **OK** для подтверждения окончания выбора.

*Список команда*

*/PNUM,AREA,0*

*/PNUM,LINE,1*

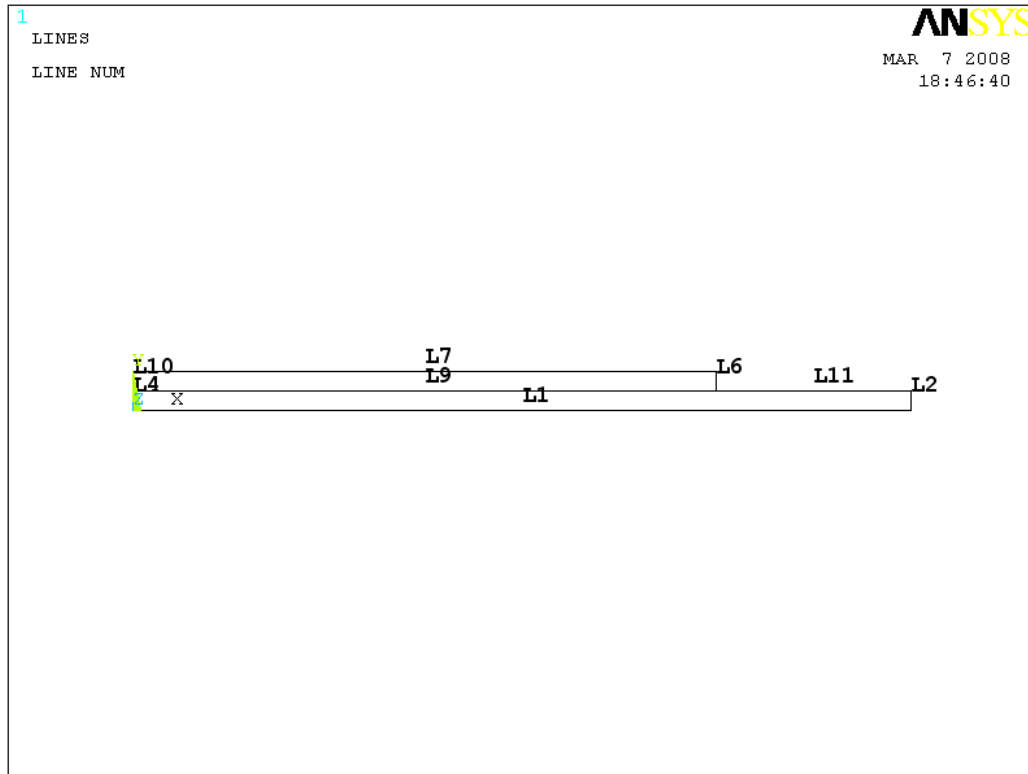
*Шаг 4. Отображение линий модели*

*Пункт меню утилит*

*Utility Menu> Plot> Lines*

*Список команда*

*LPLLOT,ALL,,*



**Рисунок 25. Отображение линий модели**

*Шаг 5. Установление количества элементов на ребрах при упорядоченном разбиении*

Можно воспользоваться любым из трех перечисленных ниже способов (средствами *MeshTool*, пунктом главного меню или командой *LESIZE*) для назначений количества делений на выбранных линиях.

*Средства MeshTool*

**Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool...**

Для установки количества делений (или размеров элементов) на линиях с помощью *MeshTool*:

- Воспользуемся кнопкой *Set* с меткой *Lines* из третьей сверху секции диалогового окна *MeshTool* (Рисунок 26).
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* выбираем линии *L4*, *L10* - осевые линии биметаллической пластины (Рисунок 25).
- Нажимаем в окне *OK* или *Apply*.

- В поле *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем количество разбиений выбранных линий. В данном случае указываем, что линия делится на 5 отрезков узлами конечноэлементной сетки (Рисунок 27).

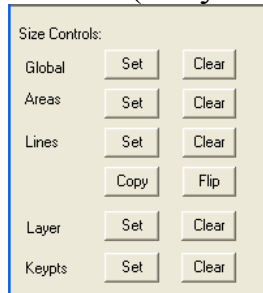


Рисунок 26. Третья сверху секция окна *MeshTool*

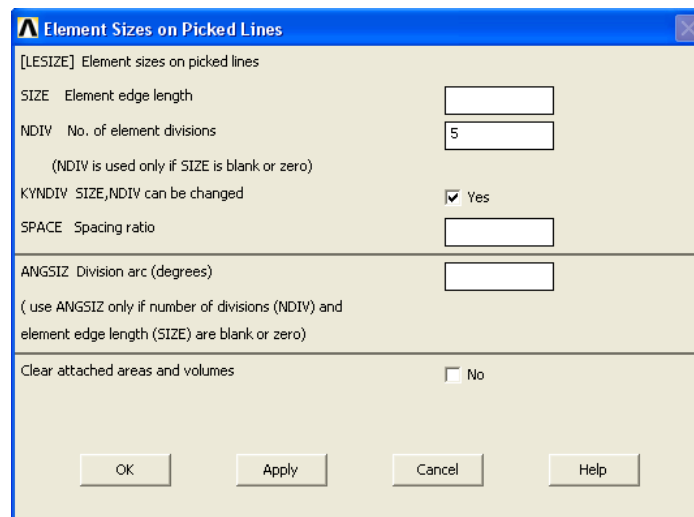


Рисунок 27. Вид окна *Element Sizes on Picked Lines*

- Нажимаем *Apply* в окне *Element Sizes on Picked Lines* (Рисунок 27), т.к. еще будем продолжать назначать количество разбиений на других линиях.
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* выбираем линии *L9* (Рисунок 25).
- Нажимаем в окне *OK* или *Apply*.
- В поле с меткой *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем количество разбиений выбранных линий. В данном случае указываем, что линии делиться на 30 отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем в окне *OK*.

*Пункт главного меню*

**Main Menu > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > Picked Lines**

При его использовании:

- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* выбираем линии *L4*, *L10* - осевые линии биметаллической пластины (Рисунок 25).
- Нажимаем в окне **OK** или *Apply*.
- В поле *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем количество разбиений выбранных линий. В данном случае указываем, что линия делится на **5** отрезков узлами конечноэлементной сетки (Рисунок 27).
- Нажимаем *Apply* в окне *Element Sizes on Picked Lines* (Рисунок 27), т.к. еще будем продолжать назначать количество разбиений на других линиях.
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* выбираем линии *L9* (Рисунок 25).
- Нажимаем в окне **OK** или *Apply*.
- В поле с меткой *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем количество разбиений выбранных линий. В данном случае указываем, что линии делиться на **30** отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем в окне **OK**.

*Список команд*

**LESIZE,4,,5**

**LESIZE,10,,5**

**LESIZE,9,,30**

*Шаг 4. Выполнение явной конкатенации линий*

*Пункт главного меню*

**Main Menu > Preprocessor > Meshing > Concatenate > Lines**

При его использовании:

- С помощью окна выбора **Concatenate Lines** (Рисунок 28) выбираем линии **L9**, **L11** (Рисунок 25), которые при разбиении будут «считаться» одной стороной для поверхности **A4** (Рисунок 21).
- Нажимаем в окне **OK**.

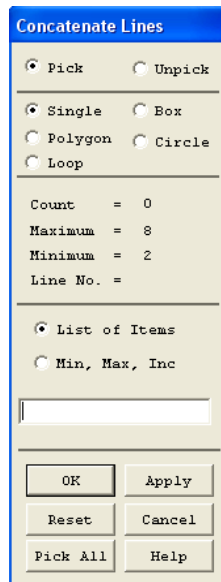


Рисунок 28. Окно **Concatenate Lines**

*Список команд*

**LCCAT,9,11**

*Шаг 5. Построение упорядоченного разбиения области*

*Средства MeshTool*

**Main Menu > Preprocessor > MeshTool**

Для построения упорядоченного разбиения используем четвертую (сверху) секцию окна **MeshTool**:

- В первом выпадающем списке выбираем раздел **Area** – т.к. будут разбиваться поверхности.

- Выбираем форму элементов, а именно пункт **Quad** – для того чтобы разбиение было выполнено четырехсторонними элементами.
- Выбираем вид разбиения, а именно пункт **Mapped** – разбиение должно быть упорядоченным
- Во втором выпадающем списке выбираем пункт **3 or 4 sided** – разбиение четырех или трехсторонней поверхности (Рисунок 29).
- Нажимаем кнопку **Mesh**.
- С помощью появившегося окна выбора **Mesh Areas** указываем, что собираемся разбивать все поверхности с помощью кнопки **Pick All**.

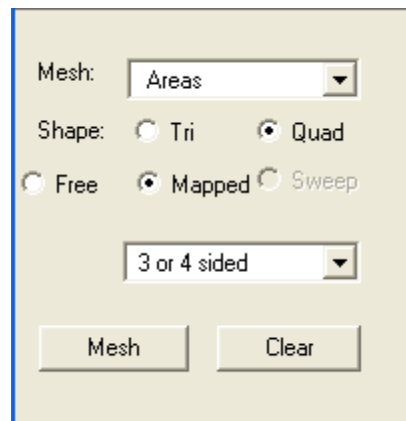


Рисунок 29. Четвертая секция **MeshTool**

#### *Пункты главного меню*

Построение упорядоченного разбиения поверхности выполняется с помощью пункта меню:

**Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 sided**

При использовании данного пункта меню появится окно выбора **Mesh Areas**. После этого с помощью появившегося окна выбора **Mesh Areas** указываем что собираемся разбивать все поверхности с помощью кнопки **Pick All**.

#### *Список команд*

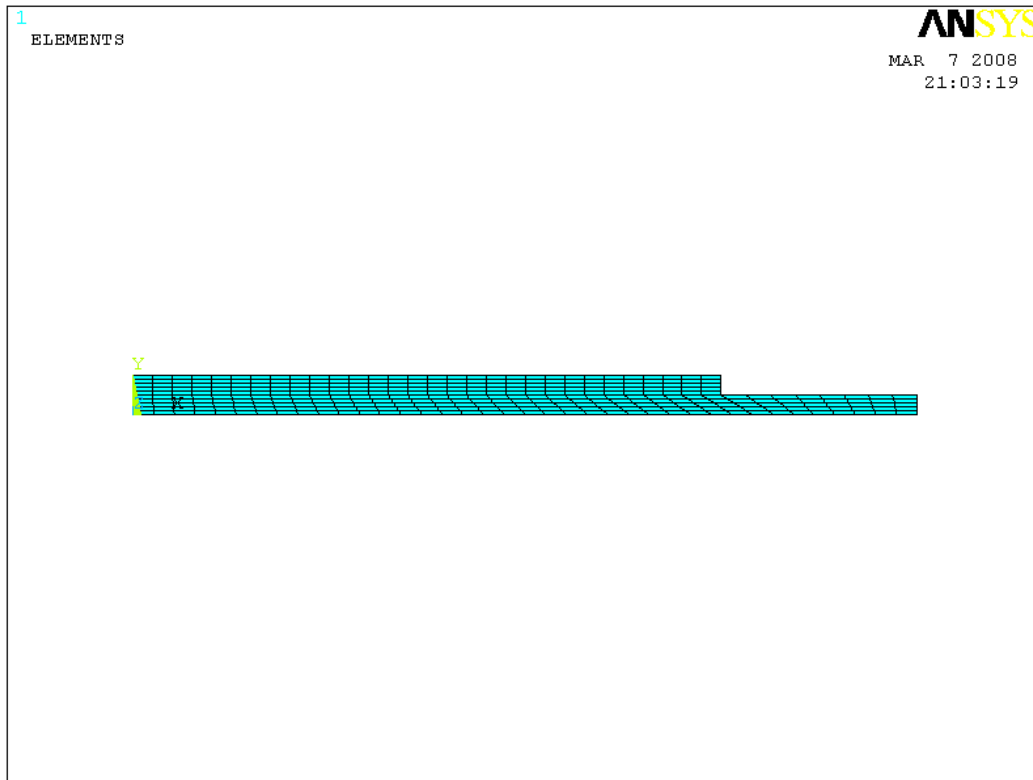
**MSHAPE,0,2-D**



*MSHMID,0*

*MSHKEY,1*

*AMESH,ALL*



**Рисунок 30. Результат построения упорядоченного разбиения**

### **Ограничения и нагрузки для решения задач теплообмена**

*Шаг 1. Определение температуры всех узлов биметаллической конструкции*

*Пункты главного меню*

*Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Thermal> Temperature> On Nodes*

*Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Thermal> Temperature> On Nodes*

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора геометрических компонент *Apply TEMP on Nodes* (Рисунок 31). Нажимаем кнопку *Pick All*. Далее в списке *Lab2* окна определения значений *Apply TEMP on Lines* (Рисунок 32) выбираем с помощью «мыши» *TEMP*, т.е. температуру, в поле *VALUE* вводим *400*. Нажимаем кнопку *OK* (Рисунок 33).

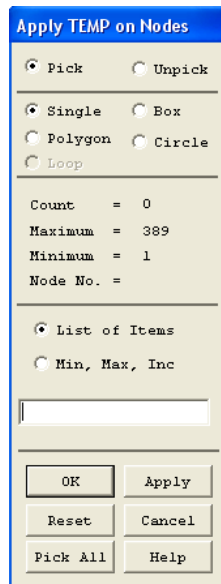


Рисунок 31. Окно выбора геометрических компонент *Apply TEMP on Nodes*

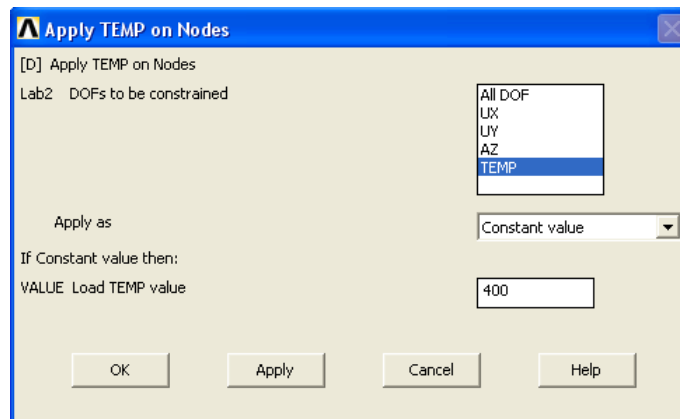
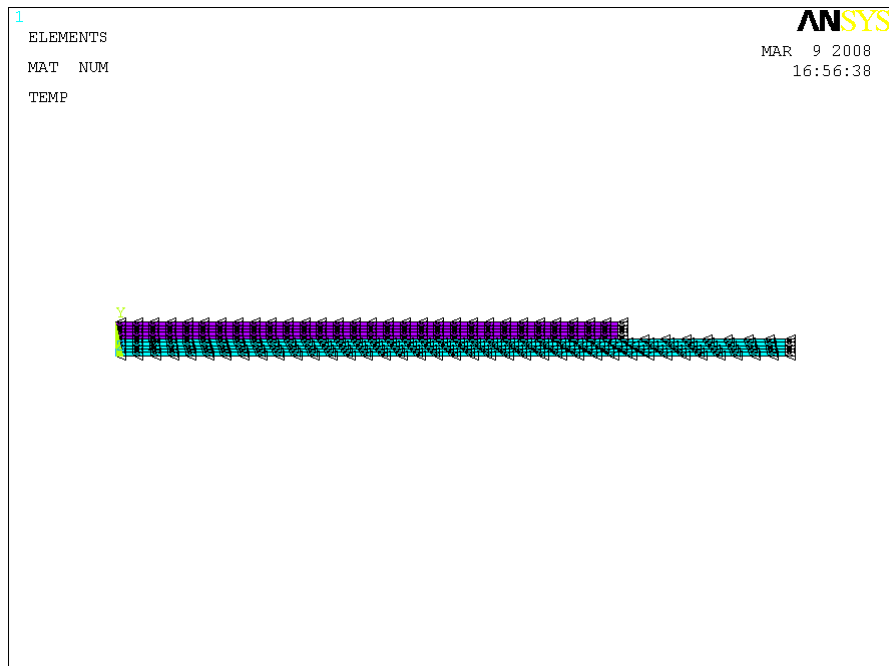


Рисунок 32. Окно определения значений *Apply TEMP on Lines*

*Команда*

*D,ALL,TEMP,400,,,,,,,,*



**Рисунок 33. Результат приложения температуры к узлам сечения модели**  
**З а м е ч а н и е!** Ограничение температуры на линий обозначается стрелками-треугольниками.

### *Шаг 2. Закрепление узловой точки модели*

Закрепление крайней узловой точки модели по направлению  $0Y$  имитирует то, что биметаллическая пластина лежит на столе.

*Пункты главного меню*

**Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Structural> Displacement> On Keypoints**

**Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Displacement> On Keypoints**

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора геометрических компонент **Apply U,ROT on KPs** (Рисунок 34). Далее выполняем следующие действия:

- «Мышью» выбираем правую нижнюю ключевую точку модели (Рисунок 35).
- Нажимаем кнопку **OK**.
- В поле окна определения значений **Apply U,ROT on KPs** с меткой **Lab2 DOFs to be constrained** (Рисунок 36) выбираем раздел **UY**,

поле *VALUE* остается пустым, предполагается, что перемещение по *OY* ограничено).

- Нажимаем кнопку *OK*.

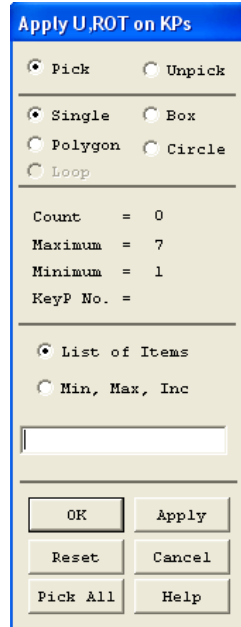


Рисунок 34. Окно выбора геометрических компонент *Apply U,ROT on KPs*

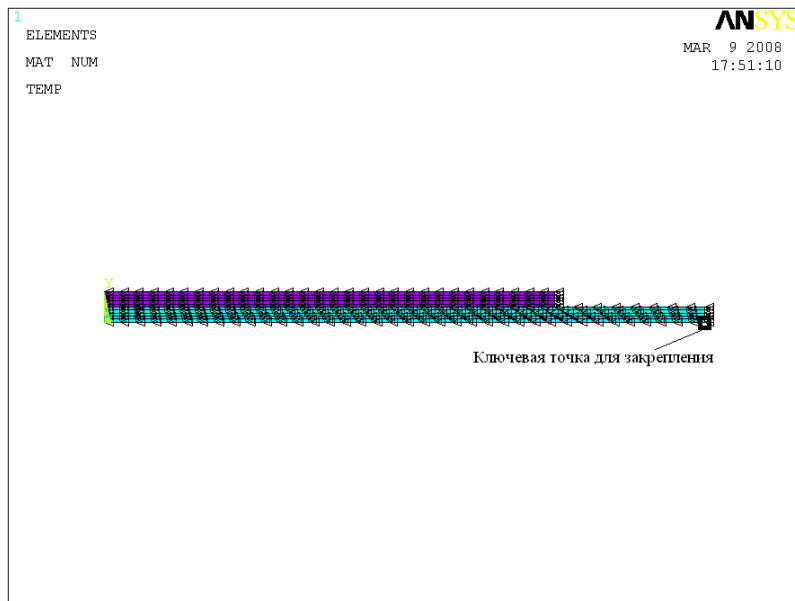
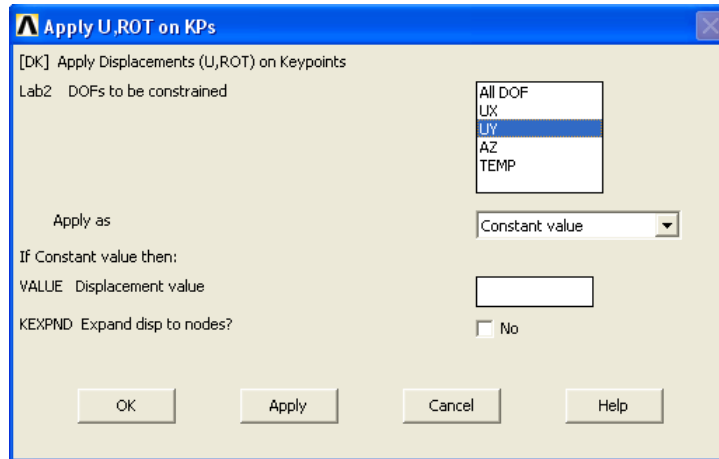


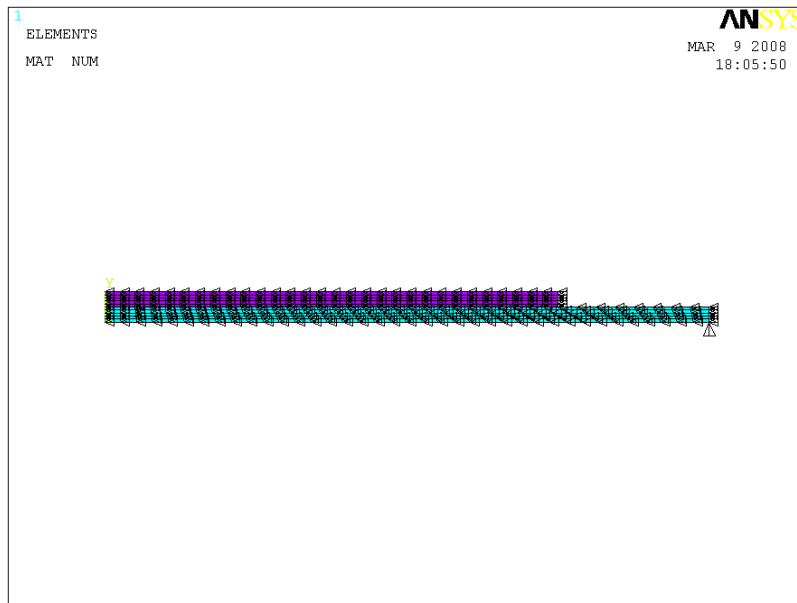
Рисунок 35. Выбор точки для закрепления



**Рисунок 36. Окно определения значений параметров *Apply U,ROT on KPs***

*Команд*

*DK,2,UY,0,,,,,,*



**Рисунок 37. Результат определения перемещения в крайней ключевой точке**

*Шаг 3. Определение начальных условий*

Данный шаг необходим т.к. в данном случае будет выполняться решение задачи с учетом изменяемости процесса во времени.

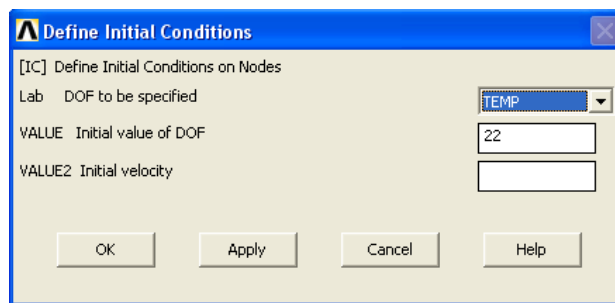
*Пункты главного меню*

**Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Initial Condit'n > Define**

**Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Initial Condit'n > Define**

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора геометрических компонент **Define Initial Conditions**. Далее:

- Нажимаем кнопку **Pick All**.
- В выпадающем списке **Lab DOF to be specified** окна присвоения значений **Define Initial Conditions** необходимо выбрать раздел **TEMP**, т.к. будут указываться температура в поле ввода **VALUE Initial value of DOF** указываем начальную температуру **22 °C** (Рисунок 38).
- Нажимаем кнопку **OK**.



**Рисунок 38. Окно определения параметров *Define Initial Conditions***

*Команда*

**IC,ALL,TEMP,22,,**

**Решение поставленной задачи и просмотр результатов решения**

Временной анализ (**Transient Analysis**) проводится для расчета процессов, изменяющихся во времени. Наиболее простой в использовании метод расчета – это полный метод (**Full Method**), т.к. он позволяет использовать все типы нелинейностей и все типы нагрузок.

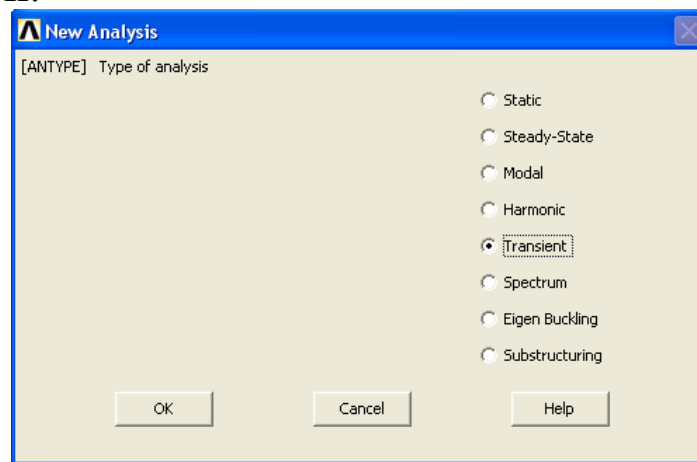
Для проведения временного расчета, кроме основных нагрузок необходимо кроме основных нагрузок задать еще и временные настройки. Они включают в себя время окончания расчета, а также количество подшагов (**substeps**) при расчете.

### *Шаг 1. Выбор **Transient**-анализа*

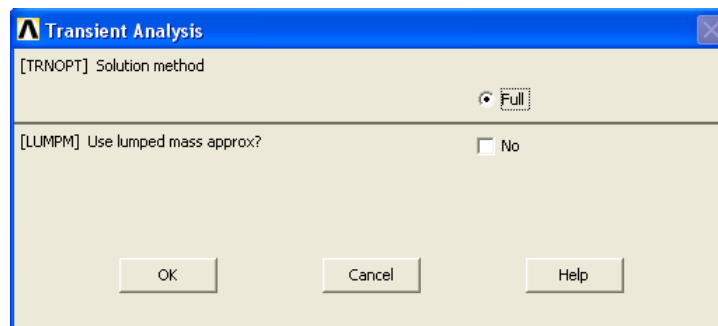
Для выбора **Transient**-анализа (анализа во времени) необходимо использовать пункт главного меню

**Main Menu > Solution > New Analysis**

В этом случае появляется окно **New Analysis** (Рисунок 39), в котором необходимо выбрать опцию **Transient** и нажать кнопку **OK**. После этого появиться окно **Transient Analysis** (Рисунок 40), в котором необходимо нажать кнопку **OK**.



**Рисунок 39. Окно *New Analysis***



**Рисунок 40. Окно *Transient Analysis***

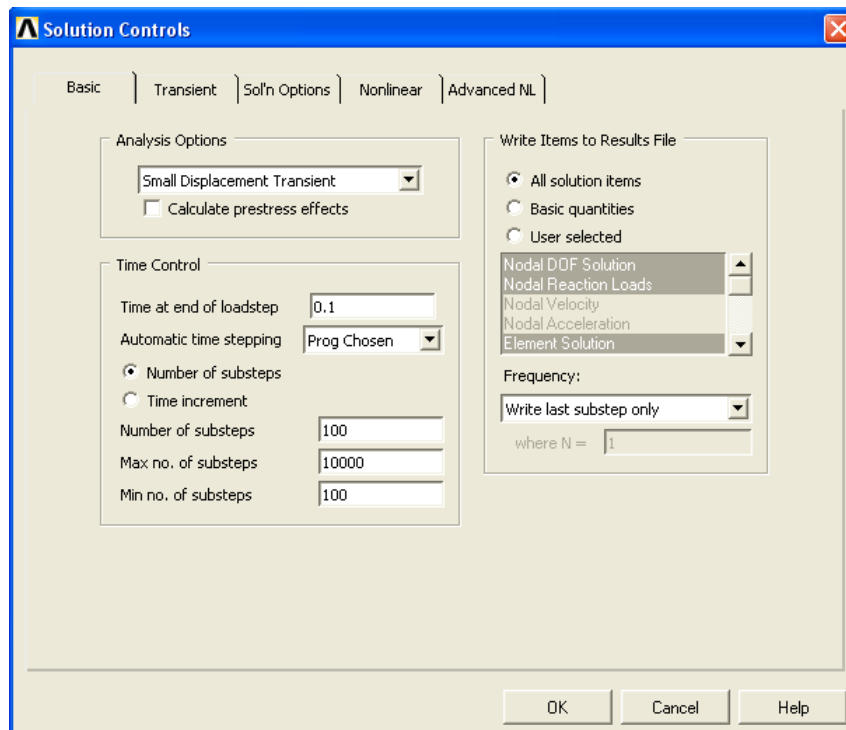
### *Шаг 2. Определение времени расчета и количества подшагов при расчете*

Определение времени расчета и количества подшагов при расчете осуществляется с помощью пункта меню:

**Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls**

В этом случае появляется окно ***Solution Controls***, в котором необходимо заполнить значения:

- Задать время расчета (окно ввода ***Time at end of loadstep***) – ***0.1*** с
- Определить количество подшагов (окно ввода ***Number of substeps***) – ***100***.
- Задать максимальное количество подшагов (окно ввода ***Max no. of substeps***) – ***10000***.
- Определить минимальное количество подшагов (окно ввода ***Min no. of substeps***) – ***100***.
- Нажать кнопку ***OK***.



**Рисунок 41. Окно *Solution Controls***

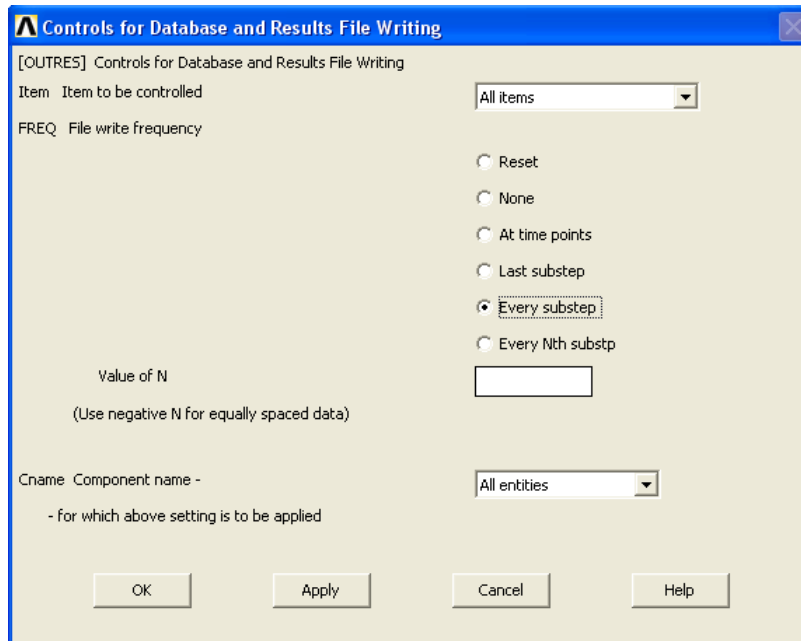
### *Шаг 3. Определение параметров хранения результатов*

Определение параметров хранения результатов осуществляется с помощью пункта главного меню:

***Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrl > DB/Result File***

В этом случае появляется окно ***Controls for Database and Results File Writing***, в котором необходимо в поле ***FREQ File write frequency*** выбрать опцию ***Every substep*** и нажать кнопку ***OK***.






**Рисунок 42. Окно *Controls for Database and Results File Writing***

#### *Шаг 4. Решение задачи*

##### *Пункт главного меню*

#### ***Main Menu > Solution > Solve > Current LS***

При использовании данного пункта меню появляется два окна. Далее выполняем следующие действия:

- Закрываем окно ***/STATUS Command***, содержащее служебную информацию о решаемой задаче, нажатием кнопки .
- Нажимаем кнопку ***OK*** во втором окне (***Solve Current Load Step***).

##### *Список команд*

***/SOLU***

***SOLVE***

***З а м е ч а н и е!*** Решение продолжается до появления информационного сообщения ***Solution is done!*** (Рисунок 43). Данное окно следует закрыть с помощью кнопки ***Close***.

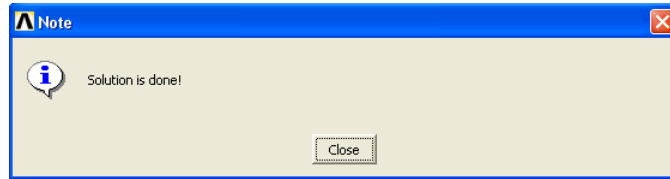


Рисунок 43. Окно *Note* с сообщением об окончании решения

### Шаг 5. Просмотр полей перемещений

#### Пункт главного меню

При просмотре полей перемещений следует воспользоваться пунктом главного меню:

***Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu***

При использовании этого пункта меню появится окно ***Contour Nodal Solution Data*** (Рисунок 44). Далее следует:

- Выбрать раздел ***DOF Solution*** в списке с меткой ***Item to be contoured***.
- Выбрать раздел (***Y-Component of displacement***), соответствующий выбору распределения перемещений вдоль оси  $0Y$ .
- Нажать кнопку ***OK*** (Рисунок 45).

***З а м е ч а н и е!*** Для остальных установок можно оставить значения «по умолчанию».

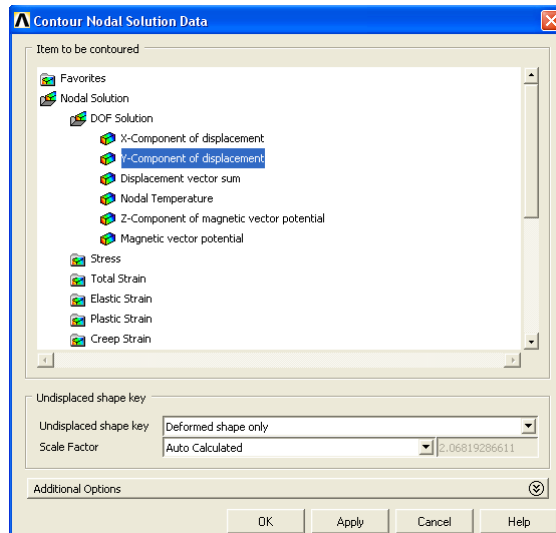
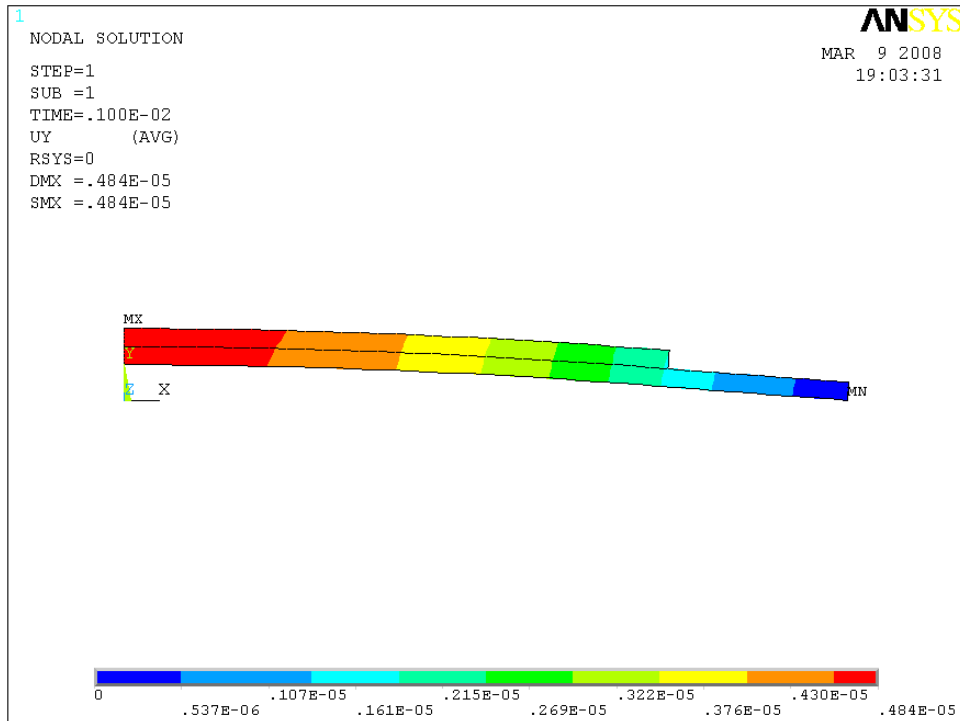


Рисунок 44. Окно ***Contour Nodal Solution Data*** с выбранным разделом ***Y-Component of displacement***





**Рисунок 45. Результаты визуализации распределения перемещений биметаллической пластины**

*Шаг 6. Просмотр пространственного распределения перемещений с помощью **Result Viewer***

**Main Menu > General Postproc > Result Viewer**

При использовании этого пункта меню появится окно **Result Viewer** (Рисунок 46), в котором необходимо:

- В выпадающем списке **Choose a result item** выбрать пункт **Y-component of displacement** (Рисунок 46).
- Нажать кнопку  **Plot Results** (Рисунок 46).
- В верхнем выпадающем меню **Result Viewer** выбрать пункт **Result Viewer > View > Expanded Model > 2D Axisymmetric Expansion** (Рисунок 47). При использовании данного пункта появиться одноименное окно (Рисунок 48), в котором можно выбрать пункт **3/4 expansion** и нажать кнопку **OK**, а затем кнопку **Isometric View**  справа на вспомогательной панели инструментов (Рисунок 49).

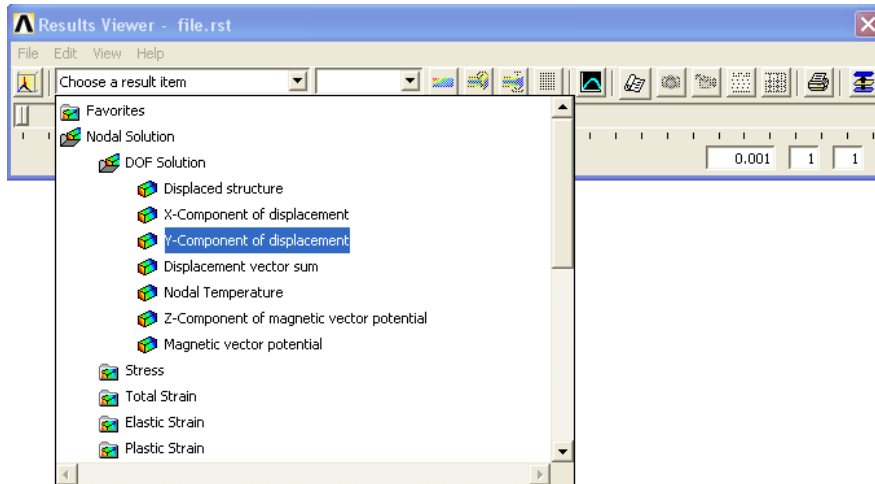


Рисунок 46. Окно выбора геометрических компонент  
*Delete TEMP on Nodes*

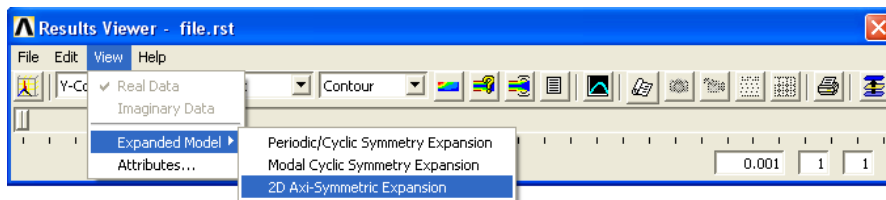


Рисунок 47. Окно *Result Viewer* с выбранной опцией осесимметричного продолжения

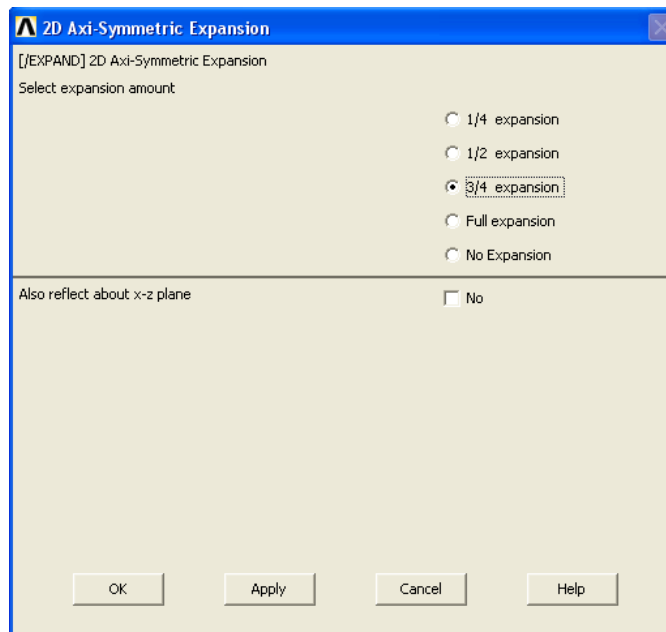
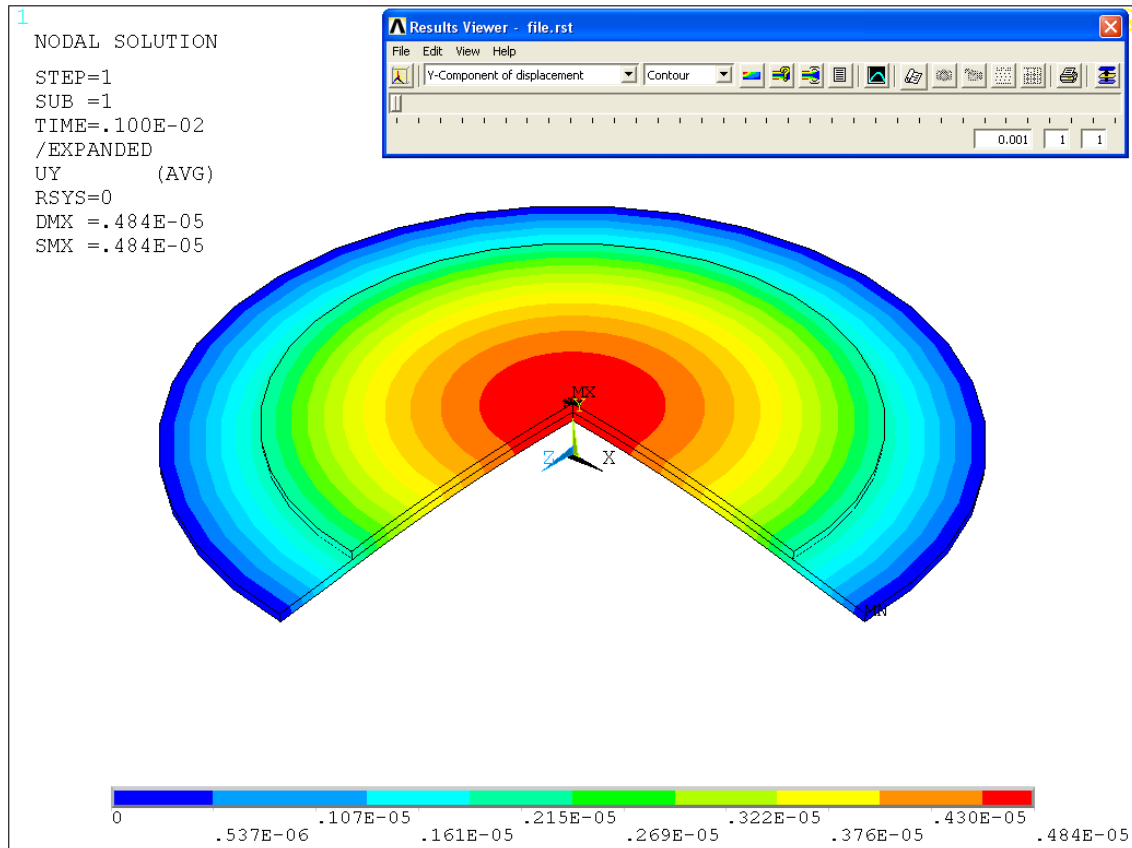


Рисунок 48. Окно *2D Axi-Symmetric Expansion*




**Рисунок 49. Результат осесимметричного продолжения модели**

*Шаг 3. Повторно решаем задачу*

*Пункт главного меню*

**Main Menu > Solution > Solve > Current LS**

При использовании данного пункта меню появляется два окна. Далее выполняем следующие действия:

- Закрываем окно */STATUS Command*, содержащее служебную информацию о решаемой задаче, нажатием кнопки .
- Нажимаем кнопку **OK** во втором окне (*Solve Current Load Step*).

*Список команд*

**/SOLU**



**SOLVE**

### Шаг 7. Построение графика перемещений узловой точки во времени

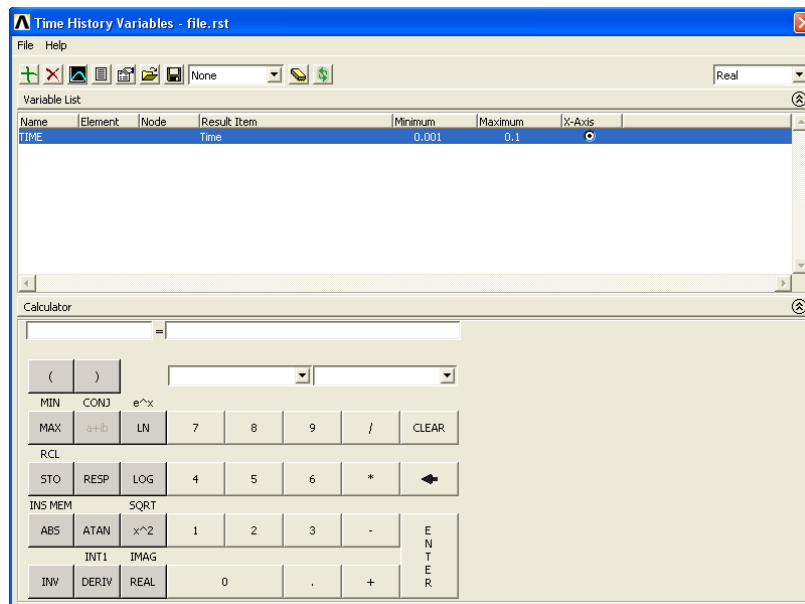
При просмотре полей деформаций следует воспользоваться пунктом главного меню:

#### **Main Menu > TimeHist Postpro**

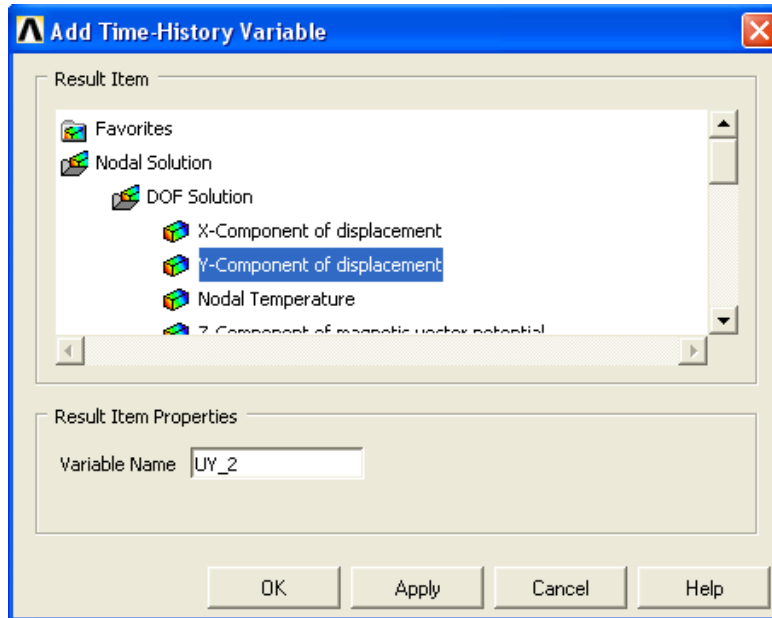
При использовании этого пункта меню появится окно **Time History Variables** (Рисунок 50). Далее следует:

- Нажать кнопку **Add Data**  кнопочного меню окна **Time History Variables**.
- Выбрать раздел **Y-Component of displacement** (Рисунок 51), соответствующий выбору перемещений.
- Нажать кнопку **OK** (Рисунок 51).
- С помощью появившегося меню выбора узловой точки **Node for Data** и «мыши» указать узловую точку, в которой следует определить перемещения (например, узловая точка, находящаяся на оси симметрии). Нажать кнопку **OK**.
- В окне нажать **Time History Variables** кнопку **Graph Data**  (Рисунок 50).

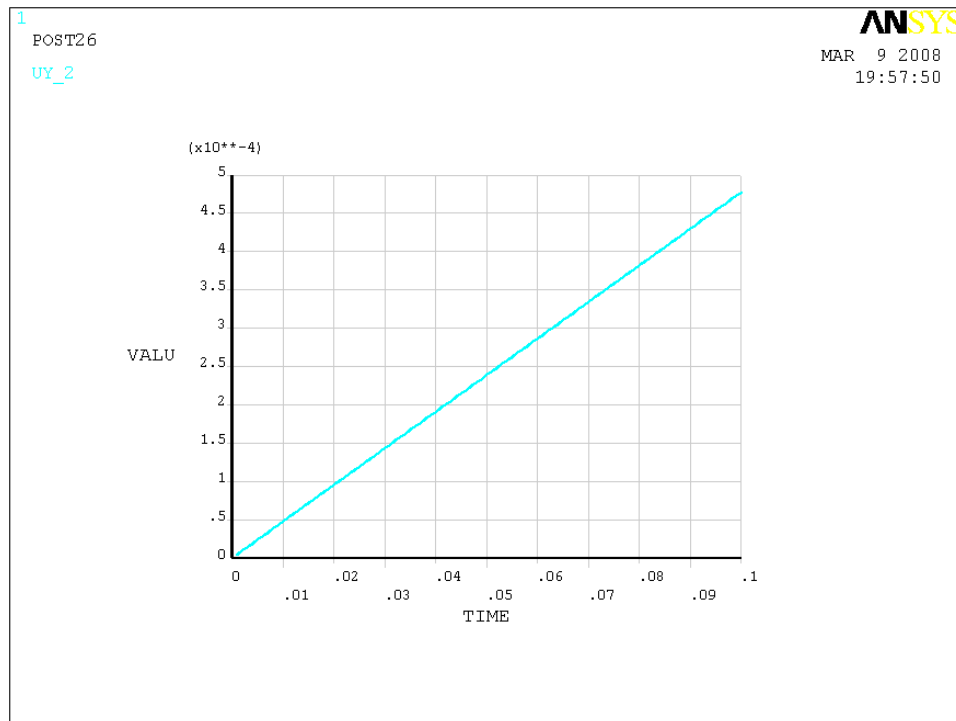
После этого в графическом окне можно будет просмотреть требуемый график (Рисунок 52).



**Рисунок 50. Окно Time History Variables**



**Рисунок 51. Выбор физического параметра для отображения его изменения во времени**



**Рисунок 52. Изменение перемещений указанной узловой точки во времени**

## Пример 2. Расширение и контактное взаимодействие твердых тел при нагревании

### Создание геометрической модели взаимодействующих деталей

В данном разделе излагаются методы построения геометрической модели в ANSYS. В примере 2 рассматривается метод построения модели «сверху вниз». Создаются два прямоугольника, между которыми создан небольшой зазор. При нагревании одного из прямоугольников происходит его удлинение и контактное взаимодействие со вторым.

#### Шаг 1. Создание плоской модели с помощью прямоугольников

Пункт главного меню

**Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By Dimensions**

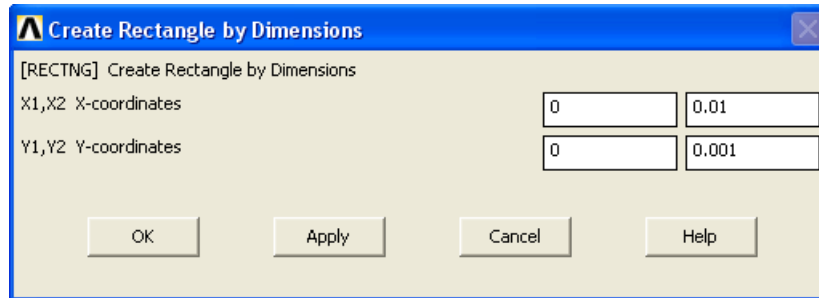
В полях ввода появившегося диалогового окна **Create Rectangle By Dimensions**:

- Вводим координаты двух ключевых точек определяющих первый прямоугольник (Таблица 1, Рисунок 1).
- Нажимаем кнопку **Apply**.
- Вводим координаты двух ключевых точек определяющих второй прямоугольник (Таблица 1).
- Нажимаем кнопку **OK** (Рисунок 54).

**Таблица 4. Таблица координат прямоугольников**

<i>Первый прямоугольник</i>		<i>Второй прямоугольник</i>	
<i>X-координаты</i>	<i>Y-координаты</i>	<i>X-координаты</i>	<i>Y-координаты</i>
<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0.010001</i>	<i>-0.001</i>
<i>0.01</i>	<i>0.001</i>	<i>0.013</i>	<i>0.002</i>





**Рисунок 53. Создание 1-го прямоугольника**

*Список команд*

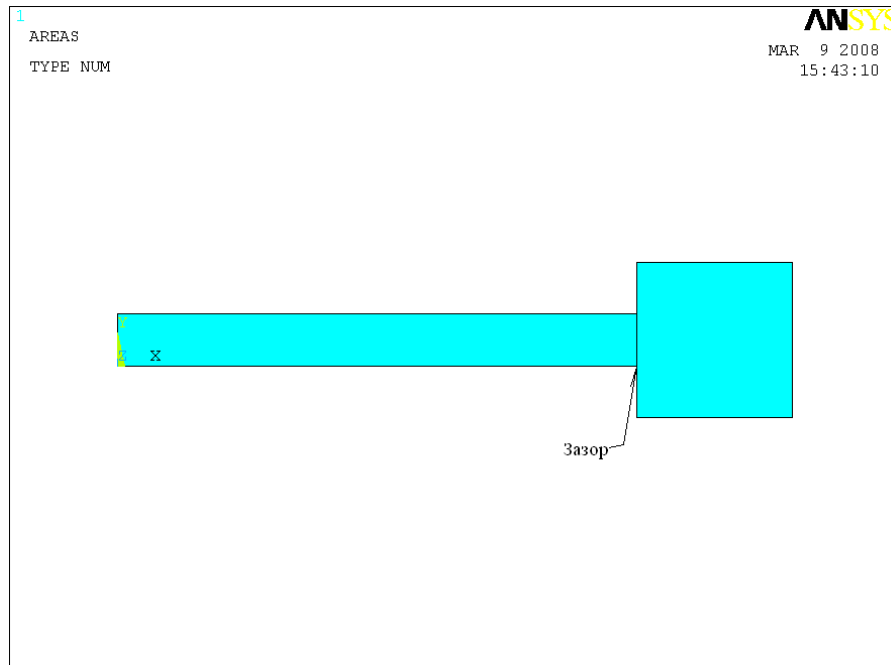
***/PREP7***

***RECTNG,0,0.01,0,0.001***

***RECTNG,0.010001,0.013,-0.001,0.002***

После каждой команды необходимо нажать ***Enter*** на клавиатуре.

*Результаты выполнения шага 1.*



**Рисунок 54. Результат создания геометрической модели контактирующих деталей**

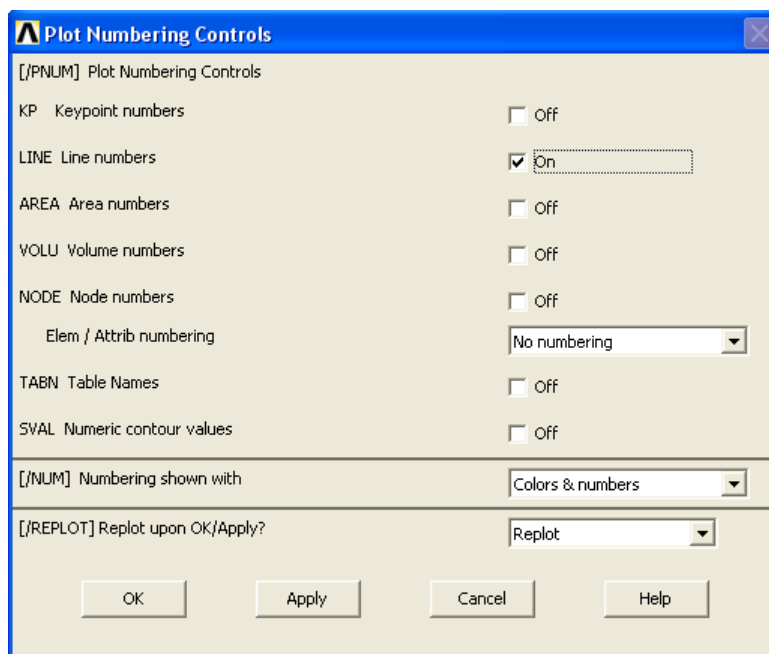
## Шаг 2. Включение нумерации линий

Пункт меню утилит

**Utility Menu > PlotCtrl > Numbering...**

При использовании данного пункта меню появляется окно **Plot Numbering Controls** (Рисунок 55). Далее выполняем следующие действия:

- Устанавливаем флаг  On в пункте **LINE**.
- Нажимаем кнопку **OK** для подтверждения окончания выбора.



**Рисунок 55. Окно Plot Numbering Controls**

Список команда

**/PNUM,LINE,1**

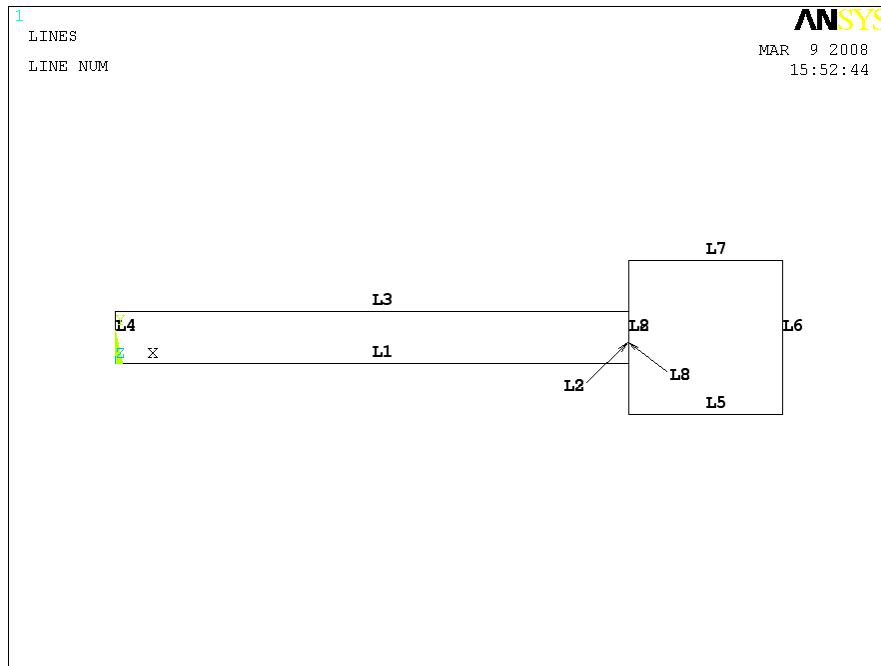
## Шаг 3. Отображение линий модели

Пункт меню утилит

**Utility Menu > Plot > Lines**

Список команда

***L******PLOT,ALL,,***



**Рисунок 56. Отображение нумерации линий модели**

*Шаг 2. Деление линии L8 на три части*

*Пункт главного меню*

***Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate> Booleans> Divide> Lines into N Ln's***

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора геометрических компонент ***Div Line into N Lines*** (Рисунок 57). В этом случае необходимо:

- С помощью «мыши» выбрать линию ***L8***.
- Нажать кнопку ***OK*** (Рисунок 57).
- В окне определения значений ***Div Line into N Lines*** (Рисунок 58) необходимо в разделе ***NDIV*** ввести значение ***3***.
- Нажать кнопку ***OK*** (Рисунок 58).

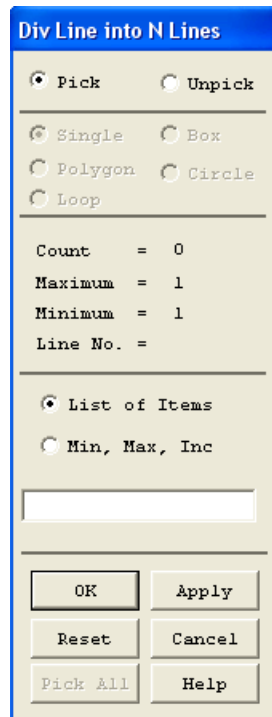


Рисунок 57. Окно выбора геометрических компонент *Div Line into N Lines*

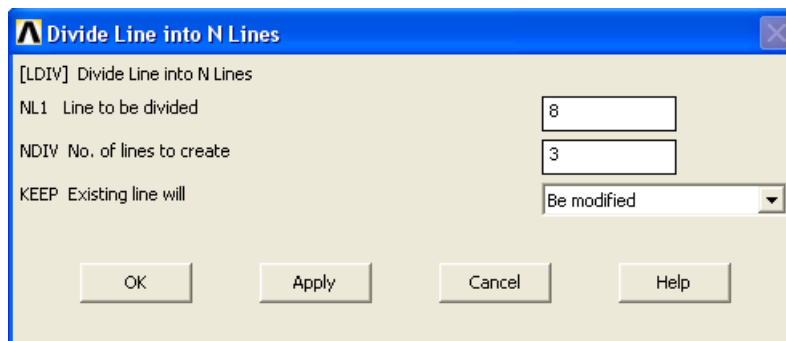


Рисунок 58. Окно присвоения значений *Div Line into N Lines*

*Список команд*

*LDIV,8,,3,0*

После команды необходимо нажать **Enter** на клавиатуре.

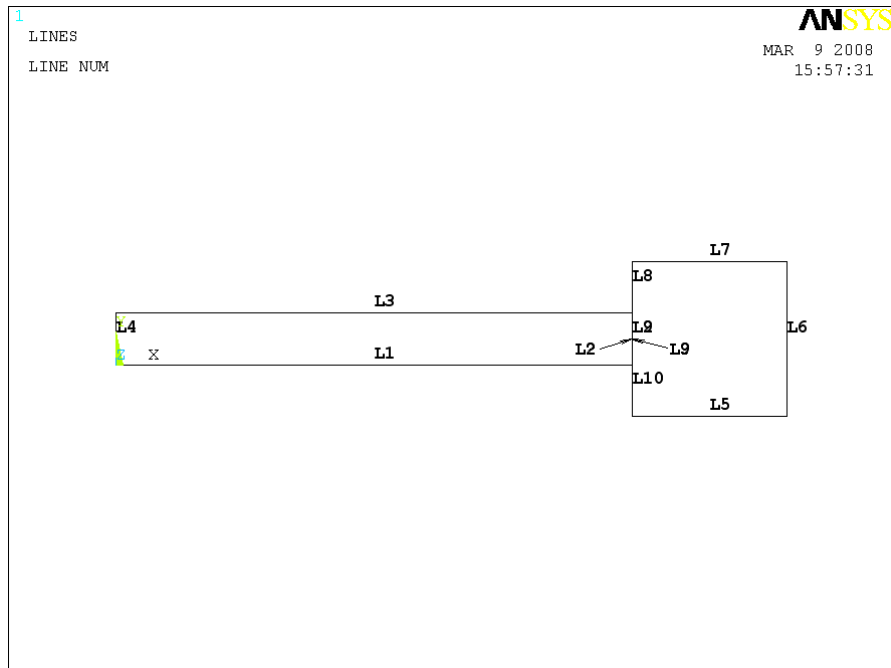


Рисунок 59. Результат деления линии L8

## Определение физических констант материалов участвующих в решении задач в ANSYS

*Шаг 1. Определение типа решаемой задачи*

**Main Menu > Preferences...**

При его использовании появляется окно **Preferences for GUI Filtering**.

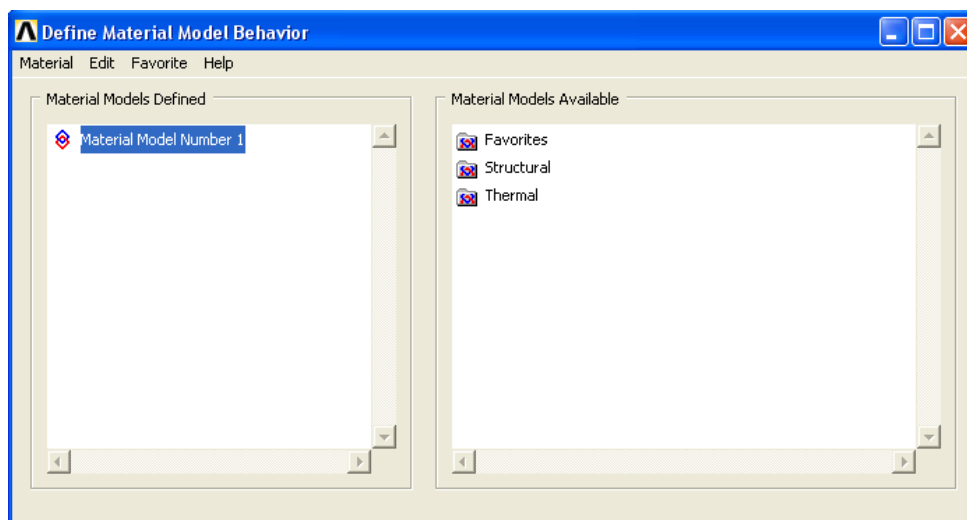
- Устанавливаем флажок  в полях с метками **Structural** и **Thermal**.
- Нажимаем кнопку **OK** для подтверждения выбора (Рисунок 4).

*Шаг 2. Последовательность действий при определении свойств материала рельса*

Для определения свойств материала необходимо воспользоваться пунктом главного меню.

**Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models**

При его использовании появиться окно **Define Material Model Behavior** (Рисунок 5), в котором следует выбрать необходимые пункты.



**Рисунок 60. Окно *Define Material Model Behavior***

*Определение тепловых характеристик материала*

Рассмотрим последовательность действий при определении термосвойств модели (Таблица 5).

**Таблица 5. Тепловые характеристики материала модели**

<i>Наименование параметра</i>	<i>Значение</i>
<i>Коэффициент теплового расширения ALPX (1/°C)</i>	<i>1.2E-5</i>
<i>Коэффициента теплопроводности KXX ((Вт/м)*°C)</i>	<i>60.5</i>
<i>Коэффициент удельной теплоёмкости C (Дж/(кг*°C))</i>	<i>434</i>

Для определения коэффициента теплового расширения необходимо воспользоваться пунктом меню окна *Define Material Model Behavior* (Рисунок 6):

*Define Material Model Behavior*> *Material Models Available*> *Structural*>  
*Thermal Expansion*> *Secant Coefficient*> *Isotropic*

При использовании указанного пункта меню появится окно *Thermal Expanption Secant Coefficient for Materia...* (Рисунок 7), в котором необходимо ввести соответствующее значение (Таблица 5) и нажать кнопку **OK**.

### Определение коэффициента теплопроводности

Для определения коэффициента теплопроводности необходимо воспользоваться пунктом меню окна *Define Material Model Behavior* (Рисунок 61):

*Define Material Model Behavior*> *Material Models Available*> *Thermal*>  
*Conductivity*> *Isotropic*

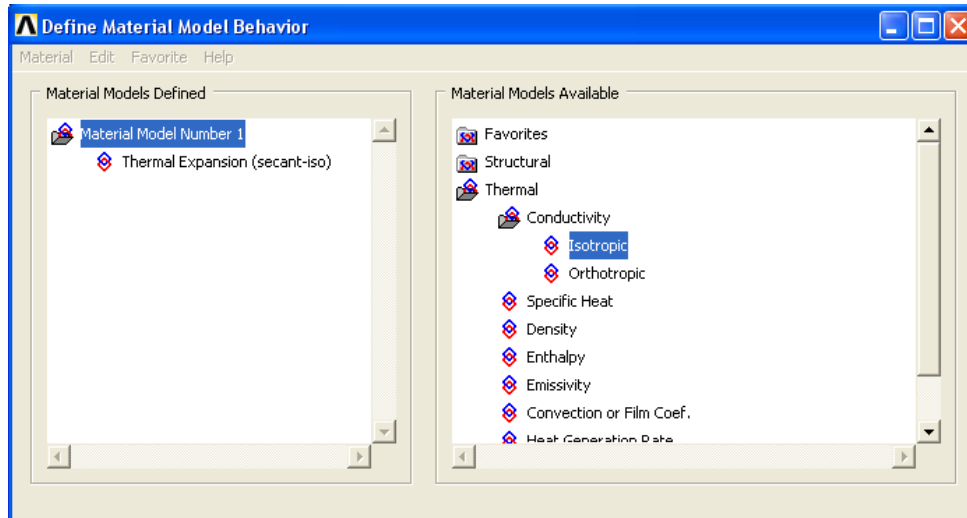


Рисунок 61. Пункт окна *Material Models Available* для определения коэффициента теплопроводности первого материала

При использовании указанного пункта меню появится окно *Conductivity for Material Number 1* (Рисунок 62), в котором необходимо ввести соответствующее значение (Таблица 5) и нажать кнопку **OK**.

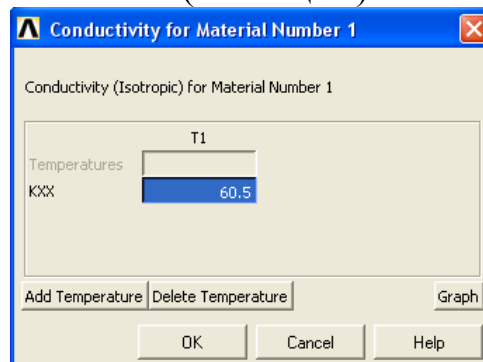


Рисунок 62. Окно *Conductivity for Material Number 1*

### Определение коэффициента удельной теплоемкости

Для определения коэффициента удельной теплоемкости необходимо воспользоваться пунктом меню окна **Define Material Model Behavior** (Рисунок 63):

**Define Material Model Behavior**> **Material Models Available**> **Thermal**>  
**Specific Heat**

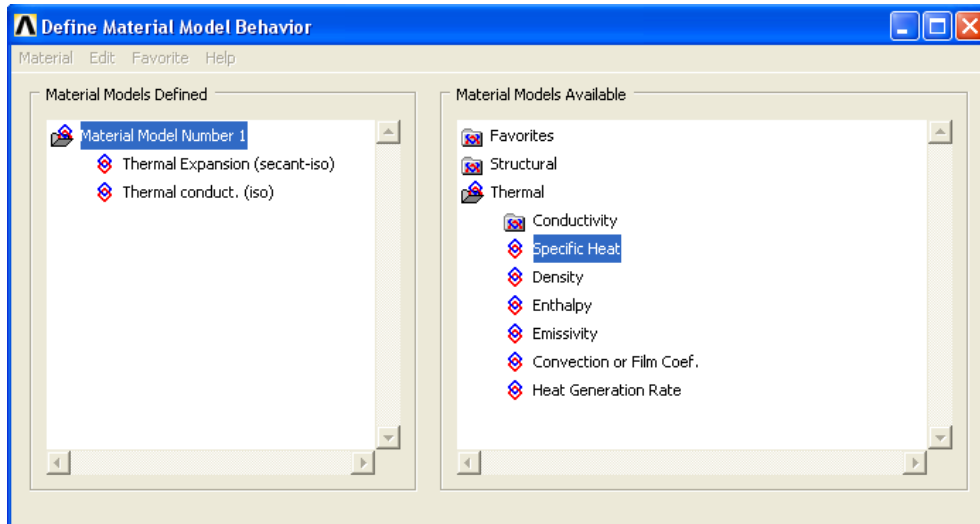


Рисунок 63. Пункт окна **Material Model Available** для определения коэффициента удельной теплоемкости

При использовании указанного пункта меню появится окно **Specific Heat for Material Number 1** (Рисунок 64), в котором необходимо ввести соответствующее значение (Таблица 5) и нажать кнопку **OK**.

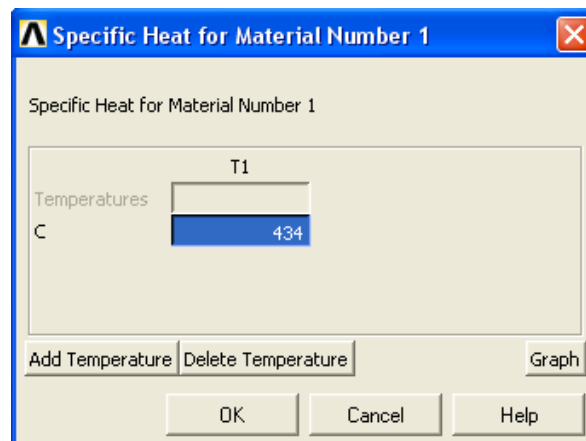


Рисунок 64. Окно **Specific Heat for Material Number 1**



*Определение механических характеристик материала*

При решении задачи будет использоваться модель упругого изотропного тела для обеих прямоугольных пластин (Таблица 6).

**Таблица 6. Механические характеристики материала прямоугольных пластин**

<i>Наименование параметра</i>	<i>Сталь</i>
<i>Модуль упругости <math>E_X</math> (Па)</i>	<i>2E11</i>
<i>Коэффициент Пуассона <math>PRXY</math></i>	<i>0.3</i>


В данном случае необходимо в окне *Material Models Defined* с помощью «мыши» выбрать раздел *Material Model Number 1*, а затем использовать пункт окна *Define Material Model Behavior* (Рисунок 12):

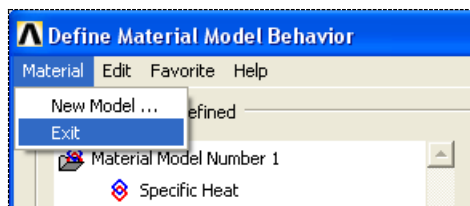
*Define Material Model Behavior*> *Material Models Available*> *Structural*> *Linear*> *Elastic*> *Isotropic*

При использовании указанного пункта меню:

- Далее появиться окно *Linear Isotropic Properties for Material Numb...* (Рисунок 13), в котором необходимо определить требуемые значения упругих постоянных - модуля упругости *EX*, и коэффициента Пуассона *PRXY* (Таблица 6) - и нажать кнопку *OK*.

*Завершение определения свойств материалов*

В завершение необходимо закрыть окно *Define Material Model Behavior* (Рисунок 16) с помощью пункта меню этого окна *Material*> *Exit* либо воспользоваться значком  в правом верхнем углу окна.



**Рисунок 65. Завершение создания моделей материалов**

## Конечноэлементное разбиение модели

### Шаг 1. Выбор типа элементов для конечно-элементного разбиения

Указываем тип элементов, с помощью которых будем создавать разбиение. Будем пользоваться при этом пунктом главного меню:

**Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete**

При его использовании появляется окно *Element Types* (Рисунок 17) с надписью *None Defined*, означающей, что к настоящему моменту ни один из типов элементов не выбран для использования при разбиении. В этом случае:

- Нажимаем кнопку *Add...* (Рисунок 17).
- В появившемся окне *Library of Elements Types* (Рисунок 18) следует выбрать из раздела *Coupled Field* элемент *Vector Quad 13*.
- Нажать кнопку *OK* в окне *Library of Elements Types*.
- Нажимаем кнопку *Options* (Рисунок 17).
- В появившемся окне *PLANE13 element type options* (Рисунок 19) в выпадающем списке *Element degrees of freedom K1* следует выбрать опцию *UX, UY, TEMP, AZ*, а в выпадающем списке *Element Behavior K3* следует выбрать опцию *Plane stress*, т.к. решается плоская задача (плоское напряженное состояние).
- Нажать кнопку *OK* в окне *PLANE13 element type options*.
- Нажимаем кнопку *Close* в окне *Element Types* (Рисунок 17).

### Шаг 4. Присвоение атрибутов компонентам модели

**З а м е ч а н и е!** Данный шаг можно пропустить, поскольку ANSYS автоматически присваивает значения параметров первого материала всем компонентам модели.

Можно воспользоваться любым из трех перечисленных ниже способов (средствами *Meshtool*, пунктом главного меню или командой) для назначения атрибутов модели.

#### Средства MeshTool

**Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool...**

Для присвоения атрибутов компонентам модели можно воспользоваться первой секцией *Meshtool*. Для этого:

- В первом выпадающем списке необходимо установить раздел *Areas*.
- Нажать кнопку *Set* (Рисунок 22).
- В появившемся окне выбора геометрических компонент *Area Attributes* (Рисунок 23) следует нажать кнопку *Pick All*.
- В окне присвоения параметров *Area Attributes* (Рисунок 24) необходимо нажать *OK*.

#### *Пункт главного меню*

Для определения атрибутов модели необходимо использовать следующий пункт главного меню:

***Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Areas***

- В появившемся окне выбора геометрических компонент *Area Attributes* (Рисунок 23) следует нажать кнопку *Pick All*.
- В окне присвоения параметров *Area Attributes* (Рисунок 24) необходимо нажать *OK*.

#### *Список команд*

***ASEL,ALL,,,,,***

***AATT,1,0,1,0,0***

#### *Шаг 5. Установление количества элементов на ребрах при упорядоченном разбиении*

Можно воспользоваться любым из трех перечисленных ниже способов (средствами *Meshtool*, пунктом главного меню или командой *LESIZE*) для назначений количества делений на выбранных линиях.

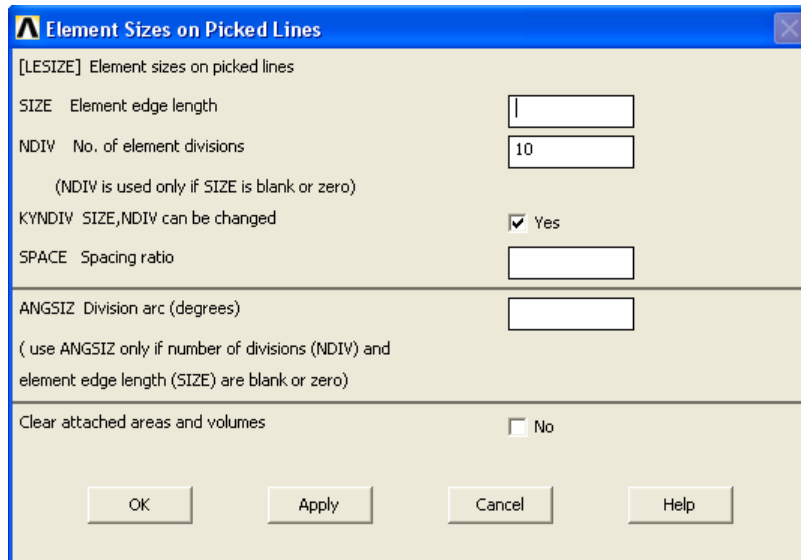
#### *Средства MeshTool*

***Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool...***

Для установки количества делений (или размеров элементов) на линиях с помощью *MeshTool*:

- Воспользуемся кнопкой *Set* с меткой *Lines* из третьей сверху секции диалогового окна *MeshTool* (Рисунок 26).
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* выбираем линии *L2, L8, L9, L10* (Рисунок 59).

- Нажимаем в окне **OK** или **Apply**.
- В поле **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем количество разбиений выбранных линий. В данном случае указываем, что линия делится на **10** отрезков узлами конечноэлементной сетки (Рисунок 66).



**Рисунок 66. Вид окна *Element Sizes on Picked Lines***

- Нажимаем **Apply** в окне **Element Sizes on Picked Lines** (Рисунок 66), т.к. еще будем продолжать назначать количество разбиений на других линиях.
- С помощью окна выбора **Element Size on Picked...** выбираем линии **L1** (Рисунок 59).
- Нажимаем в окне **OK** или **Apply**.
- В поле с меткой **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем количество разбиений выбранных линий. В данном случае указываем, что линии делиться на **20** отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем **Apply** в окне **Element Sizes on Picked Lines** (Рисунок 66).
- С помощью окна выбора **Element Size on Picked...** выбираем линии **L5** (Рисунок 59).
- Нажимаем в окне **OK**
- В поле с меткой **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем количество разбиений

выбранных линий. В данном случае указываем, что линии делиться на 5 отрезков узлами конечноэлементной сетки.

- Нажимаем в окне **OK**.

*Пункт главного меню*

**Main Menu> Preprocessor> Meshing> Size Cntrls>  
ManualSize> Lines> Picked Lines**

При его использовании:

- С помощью окна выбора **Element Size on Picked...** выбираем линии **L2, L8, L9, L10** (Рисунок 59).
- Нажимаем в окне **OK** или **Apply**.
- В поле **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем количество разбиений выбранных линий. В данном случае указываем, что линия делится на **10** отрезков узлами конечноэлементной сетки (Рисунок 66).
- Нажимаем **Apply** в окне **Element Sizes on Picked Lines**, т.к. еще будем продолжать назначать количество разбиений на других линиях.
- С помощью окна выбора **Element Size on Picked...** выбираем линии **L1** (Рисунок 59).
- Нажимаем в окне **OK** или **Apply**.
- В поле с меткой **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем количество разбиений выбранных линий. В данном случае указываем, что линии делиться на **20** отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем **Apply** в окне **Element Sizes on Picked Lines**.
- С помощью окна выбора **Element Size on Picked...** выбираем линии **L5** (Рисунок 59).
- Нажимаем в окне **OK** или **Apply**.
- В поле с меткой **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем количество разбиений выбранных линий. В данном случае указываем, что линии делиться на **5** отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем в окне **OK**.

*Список команд*

**LESIZE,2,,10**

*LESIZE,8,,10*

*LESIZE,9,,10*

*LESIZE,10,,10*

*LESIZE,1,,20*

*LESIZE,5,,5*

#### *Шаг 4. Выполнение явной конкатенации линий*

*Пункт главного меню*

**Main Menu > Preprocessor > Meshing > Concatenate > Lines**

При его использовании:

- С помощью окна выбора **Concatenate Lines** (Рисунок 28) выбираем линии **L8**, **L9**, **L10** (Рисунок 59), которые при разбиении будут «считаться» одной стороной для поверхности **A4**.
- Нажимаем в окне **OK**.

*Список команд*

*LSEL,S,LINE,,8,10,1,0*

*LCCAT,ALL,,*

*LSEL,ALL,,,,,*

#### *Шаг 5. Построение упорядоченного разбиения области*

*Средства MeshTool*

**Main Menu > Preprocessor > MeshTool**

Для построения упорядоченного разбиения используем четвертую (сверху) секцию окна **MeshTool**:

- В первом выпадающем списке выбираем раздел **Area** – т.к. будут разбиваться поверхности.

- Выбираем форму элементов, а именно пункт *Quad* – для того чтобы разбиение было выполнено четырехсторонними элементами.
- Выбираем вид разбиения, а именно пункт *Mapped* – разбиение должно быть упорядоченным
- Во втором выпадающем списке выбираем пункт *3 or 4 sided* – разбиение четырех или трехсторонней поверхности (Рисунок 29).
- Нажимаем кнопку *Mesh*.
- С помощью появившегося окна выбора *Mesh Areas* указываем, что собираемся разбивать все поверхности с помощью кнопки *Pick All*.

#### *Пункты главного меню*

Построение упорядоченного разбиения поверхности выполняется с помощью пункта меню:

***Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 sided***

При использовании данного пункта меню появится окно выбора *Mesh Areas*. После этого с помощью появившегося окна выбора *Mesh Areas* указываем что собираемся разбивать все поверхности с помощью кнопки *Pick All*.

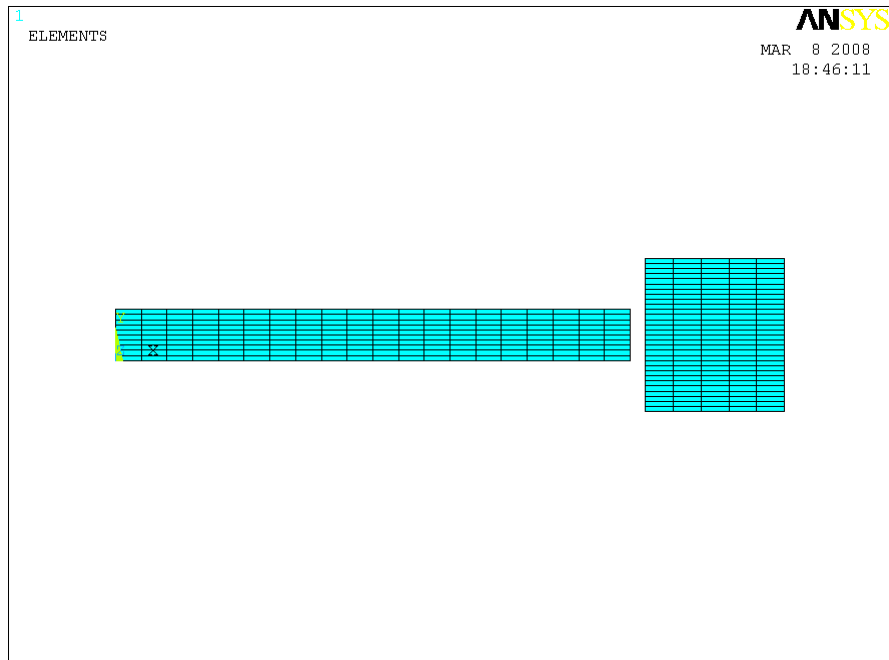
#### *Список команд*

***MSHAPE,0,2-D***

***MSHMID,0***

***MSHKEY,1***

***AMESH,ALL***



**Рисунок 67. Результат построения упорядоченного разбиения**

*Шаг 6. Удаление конкатенации линий*

***Main Menu > Preprocessor > Meshing > Concatenate > Del Concats > Lines***

При его использовании автоматически удалены фиктивные линии, построенные с помощью конкатенации.

### **Ограничения и нагрузки модели**

*Шаг 1. Определение температуры на границе модели*

*Пункты главного меню*

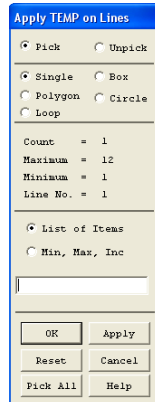
***Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Thermal > Temperature > On Lines***

***Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Temperature > On Lines***

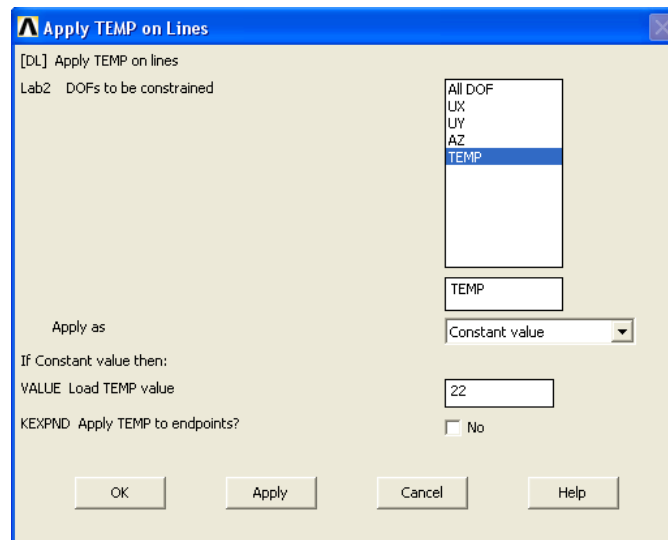
При использовании данного пункта меню появляется окно выбора геометрических компонент ***Apply TEMP on Lines*** (Рисунок 68). Далее выполняем следующие действия:



- Выбираем линию **L6** (Рисунок 59) для того, чтобы задать на ней температуру.
- Нажимаем кнопку **OK**.
- В списке **Lab2** окна определения значений **Apply TEMP on Lines** (Рисунок 69) выбираем с помощью «мыши» **TEMP**.
- В поле **VALUE Load TEMP value** вводим **22**.
- Нажимаем кнопку **OK**.



**Рисунок 68. Окно выбора геометрических компонент *Apply TEMP on Lines***



**Рисунок 69. Окно определения значений *Apply TEMP on Lines***

*Команда*

*DL,6,,TEMP,22*

## Шаг 2. Определение теплового потока

### Пункты главного меню

**Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Thermal> Heat Flux> On Lines**

**Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Thermal> Heat Flux> On Lines**

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора геометрических компонент **Apply HFLUX on Lines**. Далее выполняем следующие действия:

- Выбираем линию **L4** (Рисунок 59) для того, чтобы определить на ней тепловой поток.
- Нажимаем кнопку **OK**.
- В поле ввода **VALI Heat flux** окна определения значений **Apply HFLUX on Lines** указываем величину равномерного теплового потока величиной **6000 (Вт/м<sup>2</sup>)** (Рисунок 70).

**З а м е ч а н и е!** Второе поле **ValJ** не заполняется в случае однородного теплового потока.

- Нажимаем кнопку **OK**.

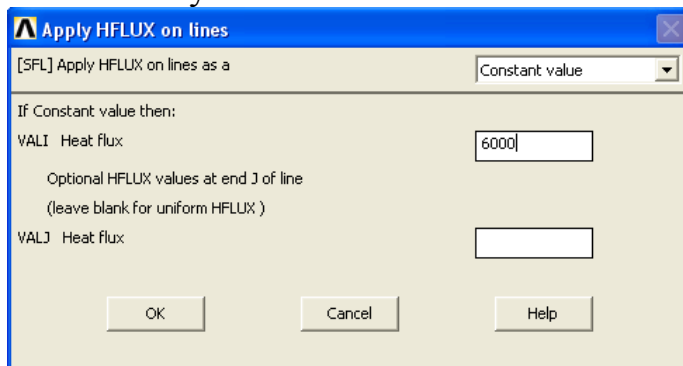


Рисунок 70. Окно определения параметров **Apply HFLUX on Lines**

### Команда

**SFL,4,HFLUX,6000,,,22,**

**З а м е ч а н и е!** Температура окружающей среды равна 22 градуса.

## Шаг 3. Определение конвекции

*Пункты главного меню*

**Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Thermal> Convection> On Lines**

**Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Thermal> Convection> On Lines**

При использовании данного пункта меню появляется окно **Apply CONV on Lines**. Далее выполняем следующие действия:

- Выбираем линии **L1, L3, L5, L10, L8, L7** (Рисунок 59) для того, чтобы определить на ней условия конвекции.
- Нажимаем кнопку **OK**.
- В поле ввода **VALI Film coefficient** окна определения значений **Apply CONV on lines** указываем величину равномерной конвекции при контакте с воздухом величиной **5 (Вт/м<sup>2</sup>)**, в окне **VAL2I Bulk Temp on lines** вводим температуру окружающей среды **22 °C** (Рисунок 71).

**З а м е ч а н и е!** Поля **ValJ Film coefficient** и **VAL2J Bulk Temp on lines** не заполняются в случае однородной конвекции.

- Нажимаем кнопку **OK**.

*Команды*

**SFL,1,CONV,5,,22**

**SFL,3,CONV,5,,22**

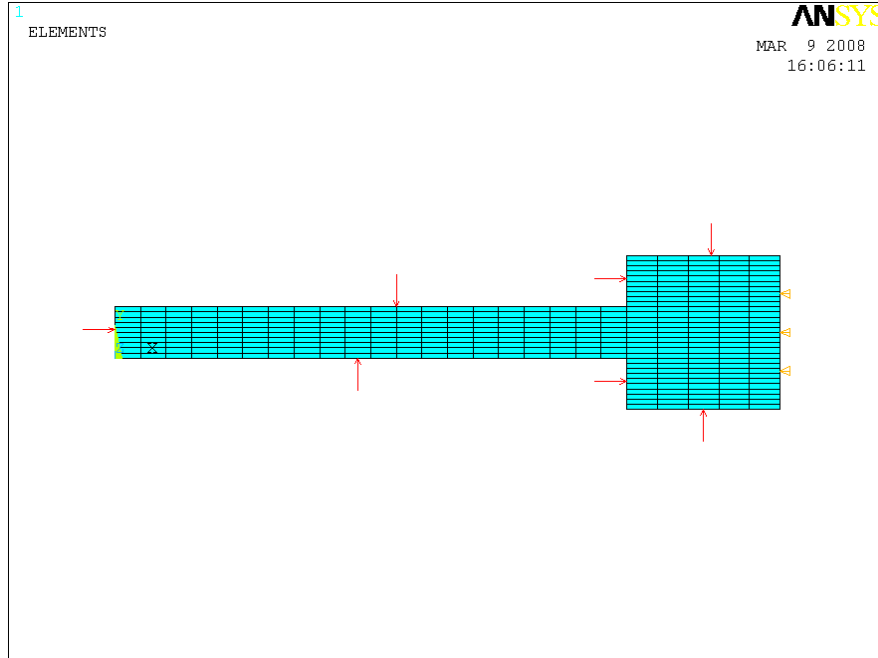
**SFL,5,CONV,5,,22**

**SFL,10,CONV,5,,22**

**SFL,8,CONV,5,,22**

**SFL,7,CONV,5,,22**

*Результат определения конвекции*



**Рисунок 71. Результат определения температуры, конвекции и теплового потока**

*Шаг 4. Определение перемещений по линиям модели*

*Пункт главного меню*

*Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Structural> Displacement> On Lines*

*Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Displacement> On Lines*

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора *Apply U,ROT on Lines* (Рисунок 72). Далее выполняем следующие действия:

- Выбираем линии *L4, L6* (Рисунок 59) для того, чтобы определить на них нулевые перемещения по направлению *OX*.
- Нажимаем кнопку *OK*.
- В появившемся окне ввода данных *Apply U,ROT on Lines* (Рисунок 73) в поле *Lab2 DOFs to be constrained* выбираем пункт *UX*, а поле *VALUE Displacement value* оставляем пустым («по умолчанию» равно *0*).

- Нажимаем кнопку *Apply*.
- Выбираем линии *L4*, *L6* для того, чтобы определить на них нулевые перемещения по направлению *0Y*.
- Нажимаем кнопку *OK*.
- В появившемся окне ввода данных *Apply U,ROT on Lines* в поле *Lab2 DOFs to be constrained* выбираем пункт *UY*, а поле *VALUE Displacement value* оставляем пустым («по умолчанию» равно *0*).
- Нажимаем кнопку *OK*.

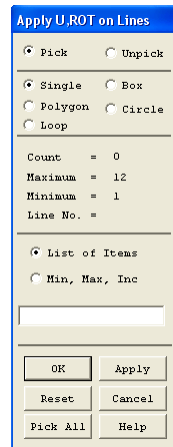


Рисунок 72. Окно *Apply U,ROT on Lines*

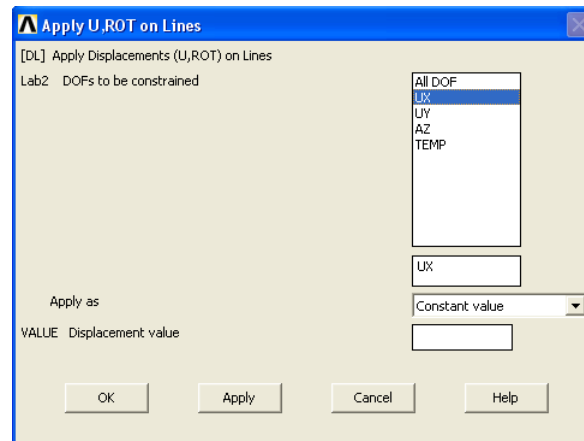


Рисунок 73. Окно ввода данных *Apply U,ROT on Lines*

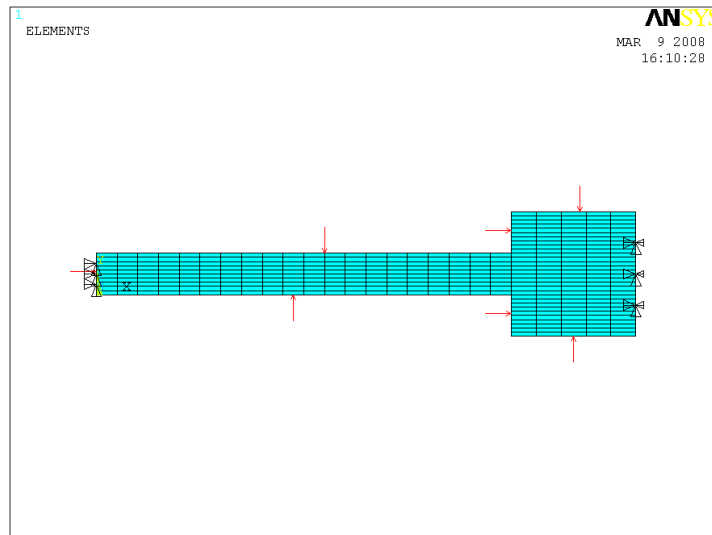
*Команда*

*DL,4,1,UX,0,0*

*DL,4,1,UY,0,0*

*DL,6,2,UX,0,0*

*DL,6,2,UY,0,0*




**Рисунок 74. Результат задания перемещений**

#### *Шаг 5. Создание контактных пар*

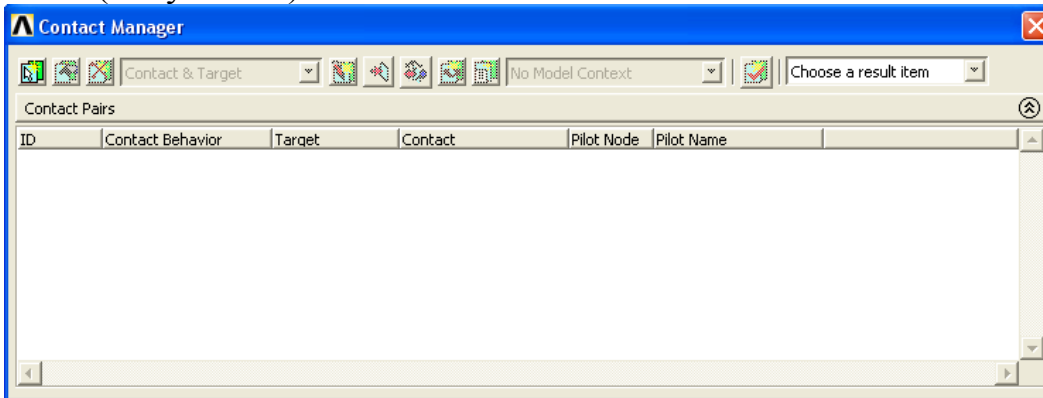
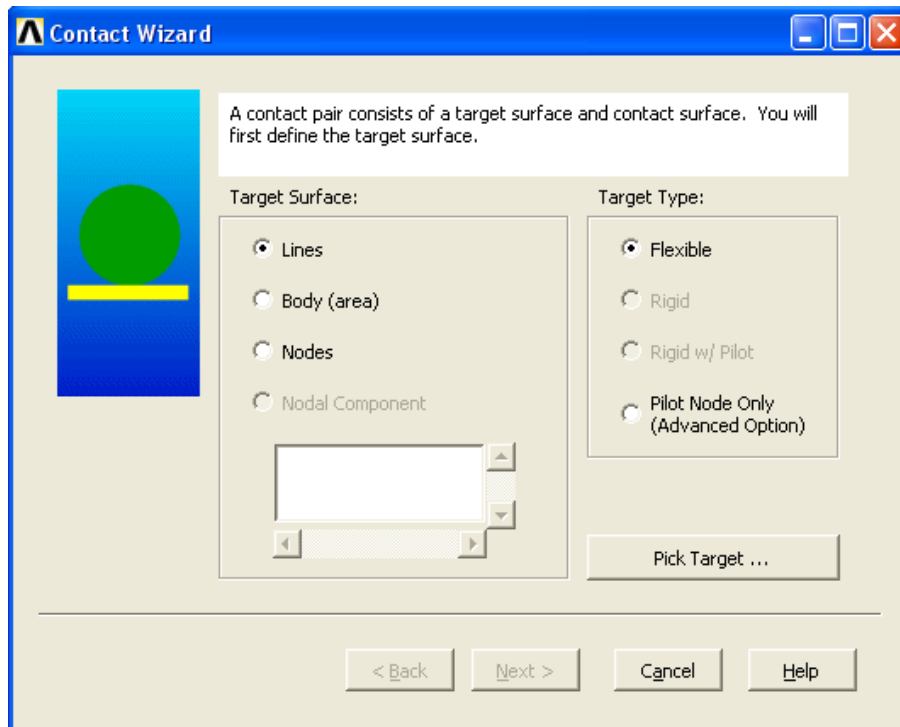
Для создания контактных пар необходимо воспользоваться пунктом главного меню:

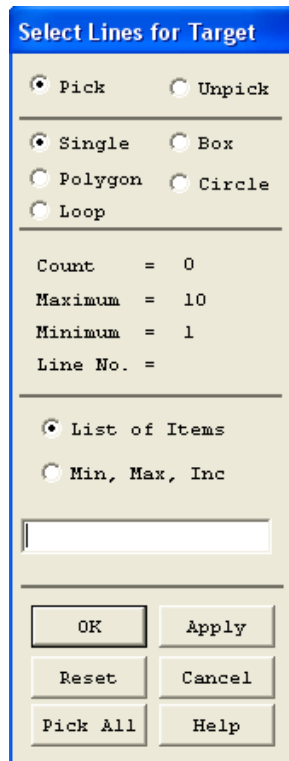
***Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Contact Pair***

При использовании данного пункта меню появится окно ***Contact Manager*** (Рисунок 75). Далее:

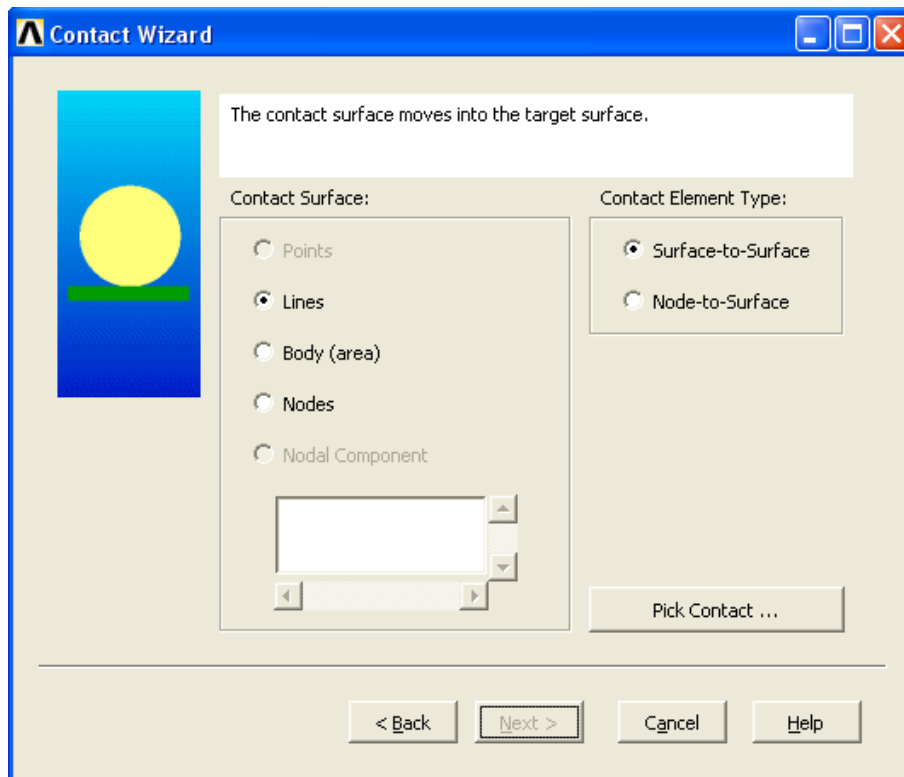
- Нажимаем кнопку  ***Contact Wizard*** (Рисунок 75).
- В первом окне ***Contact Wizard*** (Рисунок 76) нажимаем кнопку ***Pick Target...*** . С помощью появившегося окна выбора геометрических компонент ***Select Lines for Target*** (Рисунок 77) выбираем линию ***L9*** (Рисунок 59). Нажимаем кнопку ***OK***, а в первом окне ***Contact Wizard*** нажимаем кнопку ***Next>***.
- Во втором окне ***Contact Wizard*** нажимаем кнопку ***Pick Contact...*** . С помощью появившегося окна выбора геометрических компонент ***Select Lines for Contact*** выбираем линию ***L2*** (Рисунок 59). Нажимаем кнопку ***OK***, а во втором окне ***Contact Wizard*** нажимаем кнопку ***Next>***.

- В третьем окне *Contact Wizard* в поле *Thermal Contact Conductance* устанавливаем коэффициент теплопроводности контакта равным  $100 \text{ (Вт/м}^2\text{)}$ , далее нажимаем кнопку *Optional settings...* (Рисунок 79). В выпадающем списке *Behavior of contact surface* (закладка *Basic*) выбираем опцию *No Separation*. Нажимаем кнопку *OK*, а в третьем окне *Contact Wizard* нажимаем кнопку *Create*>.
- В четвертом окне *Contact Wizard* нажимаем кнопку *Finish* (Рисунок 80).

Рисунок 75. Окно *Contact Manager*Рисунок 76. Первое окно *Contact Wizard*

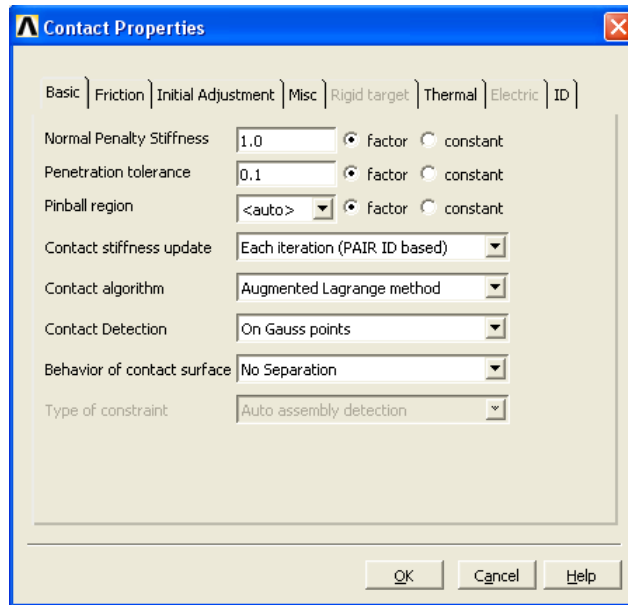


**Рисунок 77. Окно *Select Lines for Target***

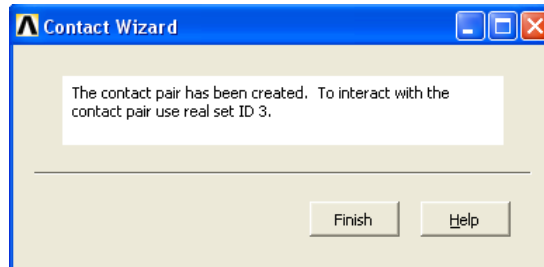


**Рисунок 78. Второе окно *Contact Wizard***

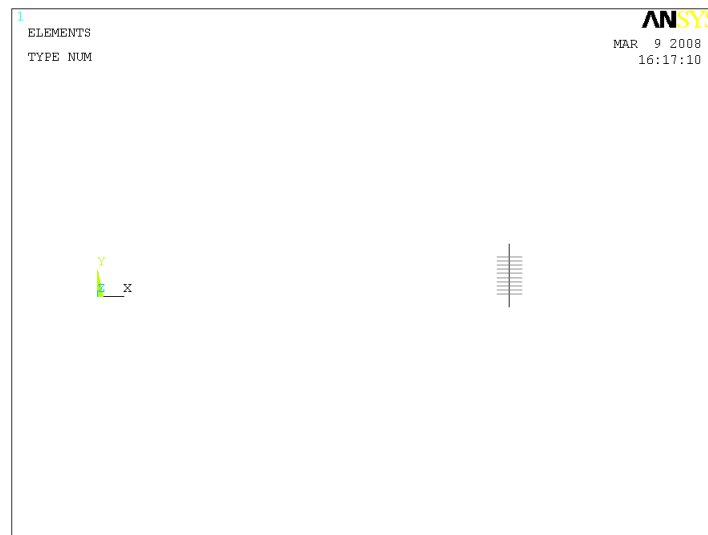




**Рисунок 79. Окно *Contact Properties***



**Рисунок 80. Четвертое окно *Contact Wizard***



**Рисунок 81. Результат создания контактных пар**


## Решение поставленной задачи и просмотр результатов решения

### Шаг 1. Решение задачи

#### Пункт главного меню

#### Main Menu > Solution > Solve > Current LS

При использовании данного пункта меню появляется два окна. Далее выполняем следующие действия:

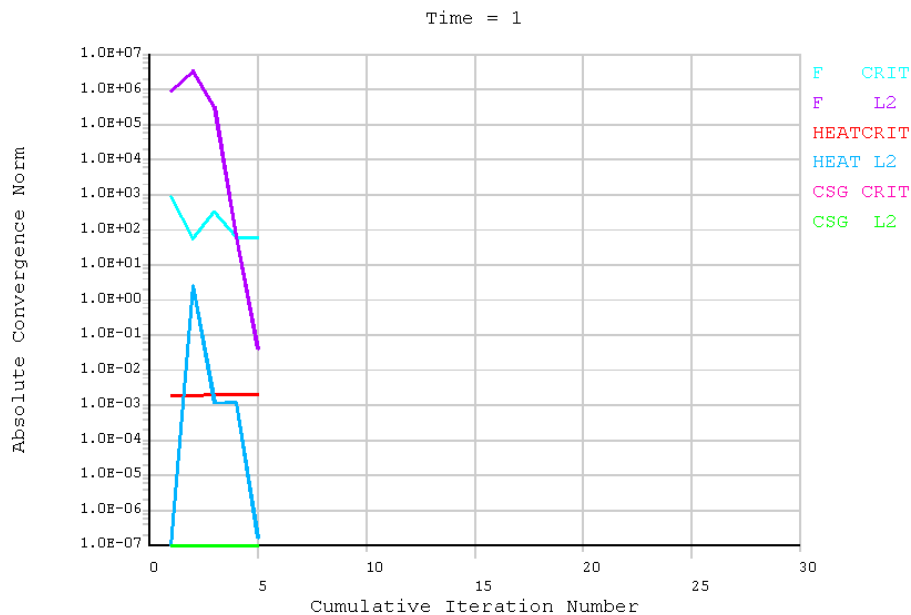
- Закрываем окно */STATUS Command*, содержащее служебную информацию о решаемой задаче, нажатием кнопки .
- Нажимаем кнопку **OK** во втором окне (*Solve Current Load Step*).

#### Список команд

**/SOLU**

**SOLVE**

**З а м е ч а н и е!** Решение (Рисунок 82) продолжается до появления информационного сообщения *Solution is done!* (Рисунок 43). Данное окно следует закрыть с помощью кнопки *Close*.



**Рисунок 82. Отображение сходимости решения**

## Шаг 2. Просмотр полей распределения первых главных напряжений

При просмотре полей напряжений следует воспользоваться пунктом главного меню:

**Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu**

При использовании этого пункта меню появится окно **Contour Nodal Solution Data**. Далее следует:

- Выбрать раздел **Stress** в списке с меткой **Item to be contoured**.
- Выбрать раздел **1st Principal stress** (Рисунок 83), соответствующий выбору первого главного напряжения.
- В выпадающем списке **Scale Factor** необходимо выбрать опцию **True Scale**.
- Нажать кнопку **OK** (Рисунок 84).

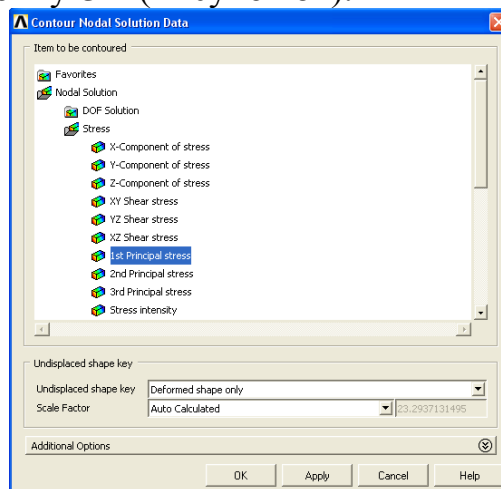


Рисунок 83. Окно **Contour Nodal Solution Data** с выбранным разделом **1st Principal stress**

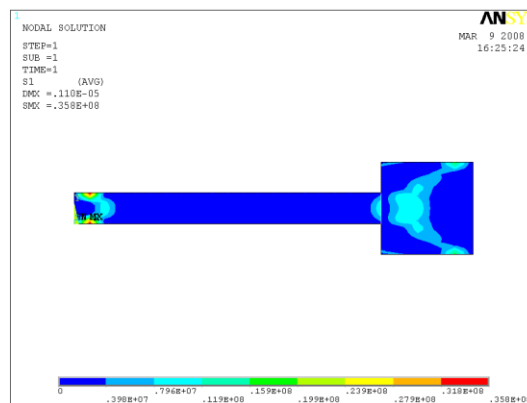


Рисунок 84. Распределение первых главных напряжений

### Шаг 3. Просмотр распределения контактных давлений

При просмотре полей напряжений следует воспользоваться пунктом главного меню:

**Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu**

При использовании этого пункта меню появится окно **Contour Nodal Solution Data**. Далее следует:

- Выбрать раздел **Contact** в списке с меткой **Item to be contoured**.
- Выбрать раздел **Contact pressure** (Рисунок 85), соответствующий выбору первого главного напряжения.
- В выпадающем списке **Scale Factor** необходимо выбрать опцию **True Scale**.
- Нажать кнопку **OK**.

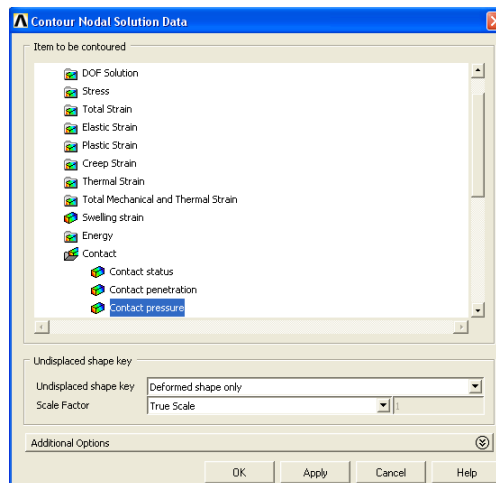


Рисунок 85. Окно **Contour Nodal Solution Data** с выбранным разделом **Contact Pressure**

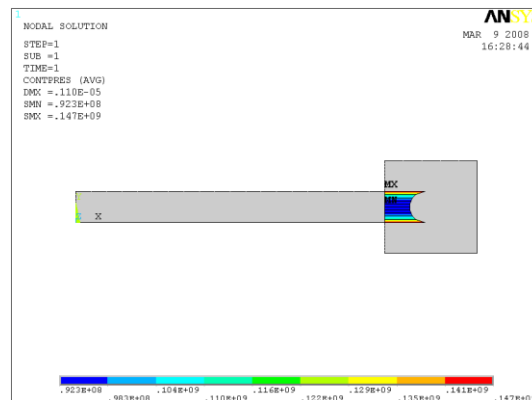


Рисунок 86. Распределение контактных давлений

### Пример 3. Распределение остаточных напряжений в поперечном сечении рельса при термообработке рабочей поверхности

Для определения остаточных деформаций необходимо провести расчет в два этапа (*step*): на первом этапе определяется деформированное состояние под воздействием температуры, на втором этапе производится рестарт (*restart*) первого этапа, но уже без учета температуры или другой тепловой нагрузки, которая удаляется перед запуском на рестарт.

Пример демонстрирует возможности ANSYS при решении термомеханических задач с упруго-пластическими характеристиками. Средства, использованные в примерах 1 и 2, использовать нельзя, поскольку элементы раздела *Coupled Field* примеров 1 и 2 могут использоваться только при упругом деформировании материала.

### Средства создания геометрической модели детали в ANSYS

В данном разделе излагаются методы построения геометрической модели в ANSYS. Поскольку задача является осесимметричной, то для уменьшения количества элементов при конечно-элементном разбиении будет рассматриваться половина поперечного сечения рельса.

#### *Шаг 1. Создание ключевых точек, определяющих половину профиля сечения*

Создаем шестнадцать ключевых точек на рабочей плоскости, определяющих поперечное сечение рельса. Для этого вводим их номера и координаты.

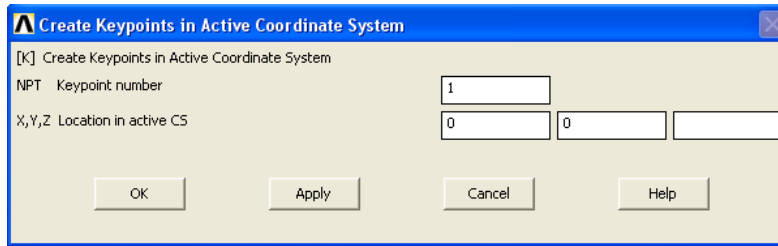
*Пункт главного меню*

***Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS***

В полях ввода появившегося диалогового окна вводим номер создаваемой ключевой точки (поле *NPT*) и значения, соответствующих данной точке координат (поля *X* и *Y*).

***З а м е ч а н и е! В активном поле ввода находится вертикальный курсор. Переход к следующему полю осуществляется с помощью «мыши» либо кнопки «Tab» на клавиатуре.***

- 1-я ключевая точка имеет координаты  $(0; 0)$  (Рисунок 87).



**Рисунок 87. Создание 1-ой ключевой точки**

- Нажимаем кнопку *Apply*, т.к. точки будут продолжать создаваться
- 2-я ключевая точка имеет координаты  $(0.05; 0)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*, т.к. точки будут продолжать создаваться
- 3-я ключевая точка имеет координаты  $(0.05; 0.015)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 4-я ключевая точка имеет координаты  $(0.04; 0.015)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 5-я ключевая точка имеет координаты  $(0.04; 0.025)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 6-я ключевая точка имеет координаты  $(0.02; 0.025)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 7-я ключевая точка имеет координаты  $(0.02; 0.035)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 8-я ключевая точка имеет координаты  $(0.01; 0.035)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 9-я ключевая точка имеет координаты  $(0.01; 0.08)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 10-я ключевая точка имеет координаты  $(0.02; 0.08)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 11-я ключевая точка имеет координаты  $(0.02; 0.09)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 12-я ключевая точка имеет координаты  $(0.03; 0.09)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 13-я ключевая точка имеет координаты  $(0.03; 0.105)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 14-я ключевая точка имеет координаты  $(0.02; 0.105)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 15-я ключевая точка имеет координаты  $(0.02; 0.115)$ .
- Нажимаем кнопку *Apply*.

- 16-я ключевая точка имеет координаты  $(0.; 0.115)$ .
- Нажимаем кнопку **ОК**, т.к. создание ключевых точек на данном этапе закончено (Рисунок 88).

*Список команд*

***/PREP7***

***K,1,0,0,***

***K,2,0.05,0,***

***K,3,0.05,0.015,***

***K,4,0.04,0.015,***

***K,5,0.04,0.025,***

***K,6,0.02,0.025,***

***K,7,0.02,0.035,***

***K,8,0.01,0.035,***

***K,9,0.01,0.08,***

***K,10,0.02,0.08,***

***K,11,0.02,0.09,***

***K,12,0.03,0.09,***

***K,13,0.03,0.105,***

***K,14,0.02,0.105,***

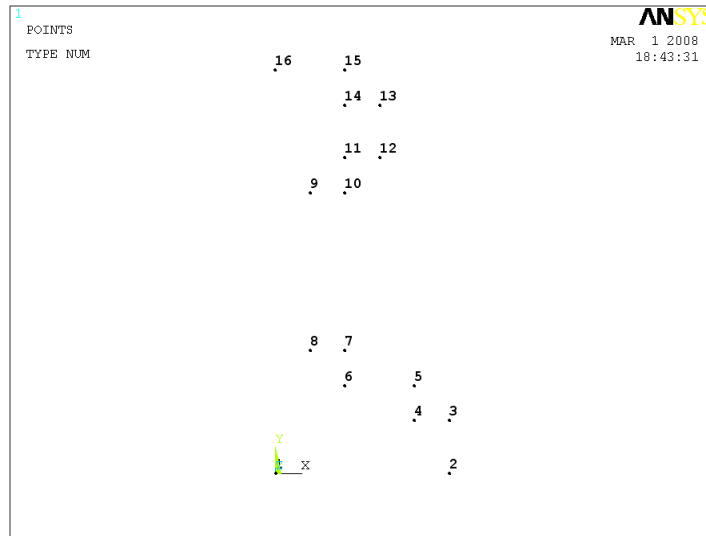
***K,15,0.02,0.115,***

***K,16,0.,0.115,***

После каждой команды необходимо нажать ***Enter*** на клавиатуре.

***З а м е ч а н и е!*** Поле для ввода координаты по оси ***Z*** в обоих случаях пусто, т.к. «по умолчанию» она равна нулю.

*Результаты выполнения шага 1.*



**Рисунок 88. Результат создания ключевых точек**

### *Шаг 2. Соединение ключевых точек прямыми линиями*

Согласно способу создания модели снизу-вверх, после создания ключевых точек, по ним следует создавать компоненты более высокого уровня – линии, которые будут соединять эти точки. Создаем прямые линии. Для этого указываем ключевые точки, которые должны быть соединены прямыми линиями.

*Пункт главного меню*

***Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Line***

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора ***Create Straight Line***. В этом случае необходимо последовательно указать («мышью» либо с помощью командной строки) пары точек (Рисунок 88), которые необходимо соединить прямой линией:

- Последовательно указываем ключевые точки **1** и **2**. Эти точки автоматически соединятся прямой линией.
- Указываем ключевые точки **2** и **3**. Эти точки автоматически соединятся прямой линией.
- Указываем ключевые точки **5** и **6**, **8** и **9**, **11** и **12**, **12** и **13**, **15** и **16**, **16** и **1**. Эти пары точек будут соединены прямыми линиями.
- Нажимаем кнопку **ОК** (Рисунок 89).

*Список команд*



*LSTR,1,2*

*LSTR,2,3*

*LSTR,5,6*

*LSTR,8,9*

*LSTR,11,12*

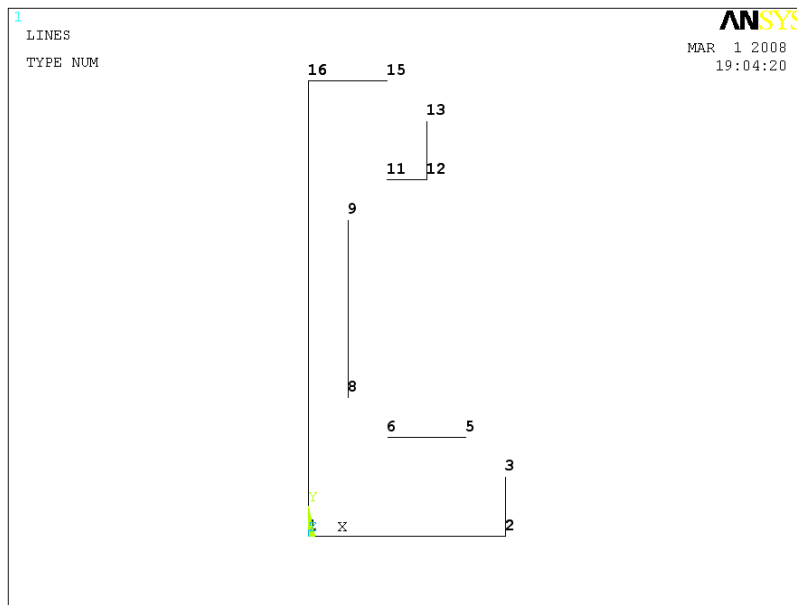
*LSTR,12,13*

*LSTR,15,16*

*LSTR,16,1*

После каждой команды необходимо нажать **Enter** на клавиатуре.

*Результаты выполнения шага 2.*



**Рисунок 89. Результат построения всех прямых линий границы модели**

*Шаг 3. Создание дуг по ключевым точкам концов и радиусу*

Рисуем дуги окружностей между ключевыми точками **3** и **5** с центром в ключевой точке **4**, а так же между ключевыми точками **6** и **8** с центром в

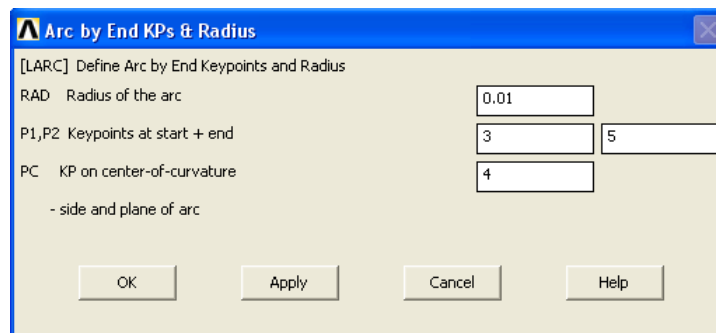
ключевой точке **7**, **9** и **11** с центром в ключевой точке **10**, **13** и **15** с центром в ключевой точке **14**. Радиус дуг равен **0.01**.

*Пункт главного меню*

**Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Lines> Arcs> By End KPs & Rad**

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора *Arc by End KPs & Rad*. В этом случае:

- Последовательно указываем ключевую точку **3** (начала дуги) и **5** (конца дуги).
- Нажимаем кнопку **OK**.
- Указываем ключевую точку **4** (центр окружности).
- Нажимаем кнопку **OK**.
- Появляется диалоговое окно *Arc by End KPs & Radius*, в котором необходимо ввести радиус дуги (поле **RAD**), который равен **0.01** (Рисунок 90).



**Рисунок 90. Вид окна *Arc by KPs & Radius***

- Нажимаем кнопку *Apply*, т.к. необходимо построить еще одну дугу.
- Последовательно повторяем указанную последовательность действий для построения дуги, соединяющей ключевые точки **6** и **8** (центр дуги ключевая точка **7**), **9** и **11** (центр дуги ключевая точка **10**), **13** и **15** (центр дуги ключевая точка **14**). Все дуги имеют одинаковый радиус **0.01**, (Рисунок 91).

*Список команд*

**LARC,3,5,4,0.01**

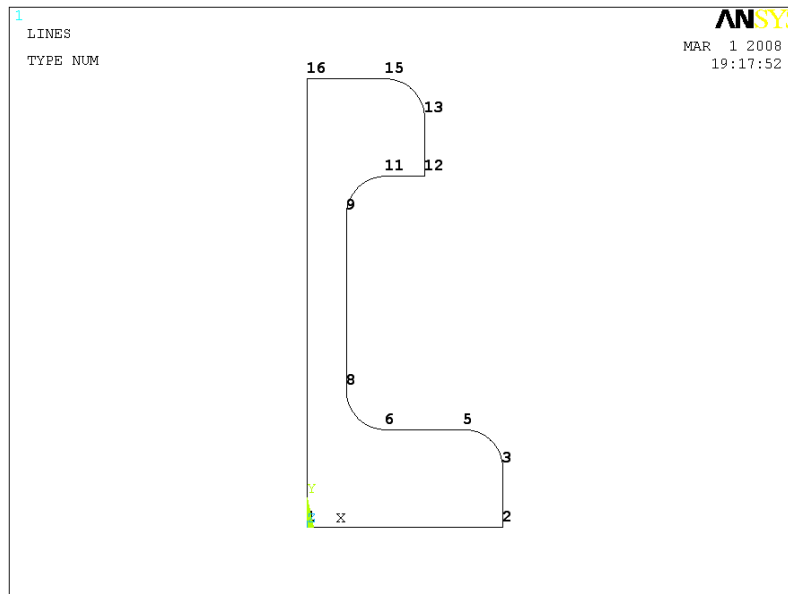
*LARC,6,8,7,0.01*

*LARC,9,11,10,0.01*

*LARC,13,15,14,0.01*

После ввода команды необходимо нажать **Enter** на клавиатуре.

*Результаты выполнения шага 3*



**Рисунок 91. Промежуточные результаты построения границы модели**

*Шаг 4. Удаление вспомогательных ключевых точек*

После того как контур модели создан, некоторые ключевые точки становятся не нужными (в частности точки задававшие центры дуг). На данном шаге будет выполнено удаление вспомогательных ключевых точек **4**, **7**, **10** и **14** (Рисунок 88).

*Пункт главного меню*

**Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Keypoints**

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора **Delete Keypoints**. В этом случае:

- Указываем ключевые точки, которые необходимо удалить.
- Нажимаем кнопку **OK**.

*Список команд*

***KDELE,4***

***KDELE,7***

***KDELE,10***

***KDELE,14***

*Шаг 5. Включение нумерации линий*

***Utility Menu> PlotCtrl> Numbering...***

При использовании данного пункта меню появляется окно ***Plot Numbering Controls***. Далее выполняем следующие действия:

- устанавливаем флаг  On в пункте ***LINE***.
- Нажимаем кнопку ***OK*** для подтверждения окончания выбора.

*Список команда*

***/PNUM,LINE,1***

*Шаг 6. Отображение линий модели*

***Utility Menu> Plot> Lines***

*Список команда*

***LPLOT,ALL,,***

### Результаты выполнения шага 6

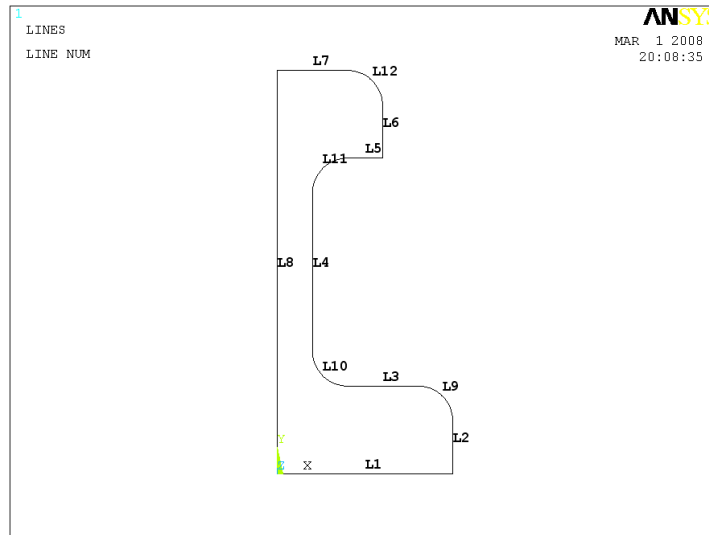


Рисунок 92. Результат включения нумерации линий

### Шаг 7. Создание поверхности по линиям

При создании плоской модели методом снизу-вверх, как правило, последним шагом является создание поверхности по линиям, ее ограничивающим, либо по ключевым точкам. На данном шаге по сделанному ранее контуру (линиям границы) будет создана поверхность детали.

*Пункт главного меню*

**Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > By Lines**

- При использовании указанного пункта меню появится окно выбора **Create Area By Lines**, с помощью которого следует указать линии (**L1 - L12**), являющиеся границами поверхности (Рисунок 92).
- Нажать кнопку **OK** для подтверждения окончания выбора (Рисунок 93).

*Команда*

**AL,ALL**

**З а м е ч а н и е!** При использовании команды **AL** можно использовать не более 10 линий, поэтому использован параметр **ALL**.

*Результаты выполнения шага 7*

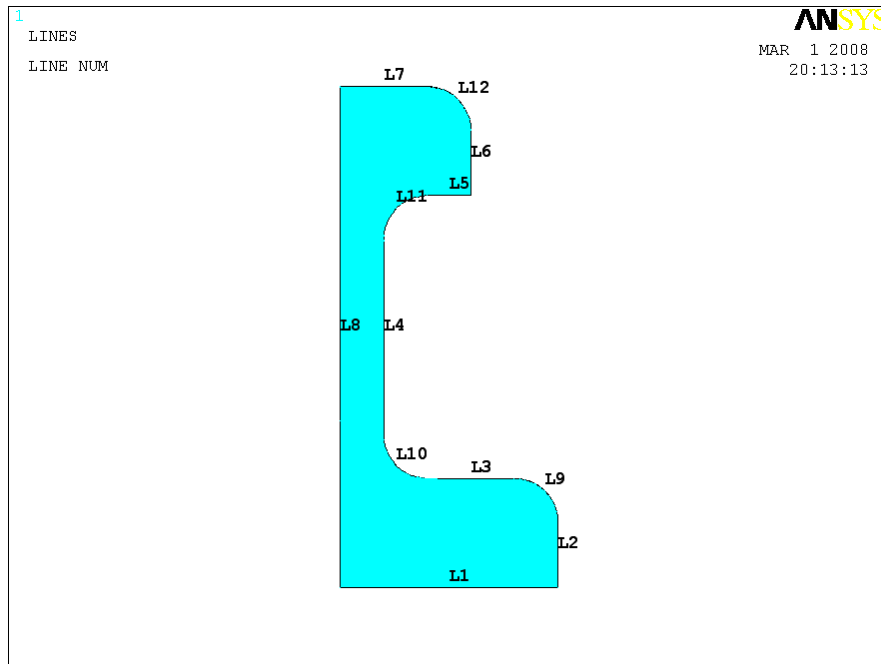


Рисунок 93. Результат построения поверхности

## Определение физических констант материалов

*Шаг 1. Определение типа решаемой задачи*

**Main Menu > Preferences...**

При его использовании появляется окно **Preferences for GUI Filtering**.

- Устанавливаем флажок  в полях с метками **Structural** и **Thermal**.
- Нажимаем кнопку **OK** для подтверждения выбора (Рисунок 4).

*Шаг 2. Последовательность действий при определении свойств материала рельса*

Для определения свойств материала необходимо воспользоваться пунктом главного меню.

**Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models**

При его использовании появиться окно **Define Material Model Behavior** (Рисунок 5), в котором следует выбрать необходимые пункты.

### *Определение термосвойств материала*

Рассмотрим последовательность действий при определении термосвойств материала рельса (Таблица 7).

**Таблица 7. Термохарактеристики материала модели**

<i>Наименование параметра</i>	<i>Значение</i>
<i>Коэффициент теплового расширения ALPX (1/°C)</i>	<i>1.2e-5</i>
<i>Коэффициента теплопроводности KXX ((Вт/м)*°C)</i>	<i>60.5</i>
<i>Коэффициент удельной теплоёмкости C (Дж/(кг*°C))</i>	<i>434</i>

### *Определение коэффициента теплового расширения*

Для определения коэффициента теплового расширения необходимо воспользоваться пунктом меню окна ***Define Material Model Behavior*** (Рисунок 6):

***Define Material Model Behavior > Material Models Available > Structural > Thermal Expansion > Secant Coefficient > Isotropic***

При использовании указанного пункта меню появиться окно ***Thermal Expansion Secant Coefficient for Material...*** (Рисунок 7), в котором необходимо ввести соответствующее значение (Таблица 7) и нажать кнопку ***OK***.

### *Определение коэффициента теплопроводности*

Для определения коэффициента теплопроводности необходимо воспользоваться пунктом меню окна ***Define Material Model Behavior*** (Рисунок 61):

***Define Material Model Behavior > Material Models Available > Thermal > Conductivity > Isotropic***

При использовании указанного пункта меню появиться окно ***Conductivity for Material Number 1*** (Рисунок 62), в котором необходимо ввести соответствующее значение (Таблица 7) и нажать кнопку ***OK***.

### Определение коэффициента удельной теплоемкости

Для определения коэффициента удельной теплоемкости необходимо воспользоваться пунктом меню окна **Define Material Model Behavior** (Рисунок 63):

**Define Material Model Behavior > Material Models Available > Thermal > Specific Heat**

При использовании указанного пункта меню появится окно **Specific Heat for Material Number 1** (Рисунок 64), в котором необходимо ввести соответствующее значение (Таблица 7) и нажать кнопку **OK**.

### Определение механических характеристик рельса

Решение задач с учетом пластичности гораздо сложнее линейных задач теории упругости. Поэтому в ряде случаев для изотропных тел используются некоторые упрощения связи  $\varepsilon$  и  $\sigma$  для реального материала. Так, в технических расчетах диаграмму растяжения аппроксимируют в виде кусочно-ломаных прямых или так называемых диаграмм Прандтля (Рисунок 94).

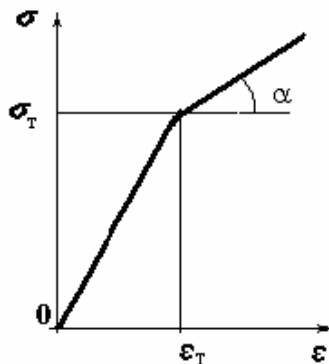


Рисунок 94. Билинейная диаграмма Прандтля

Простейшей моделью деформирования металлов за пределами упругости реализующей в ANSYS простейшую диаграмму Прандтля является билинейное кинематическое упрочнение, характеризуемое пятью коэффициентами (Таблица 3).

Таблица 8. Механические характеристики материала рельса

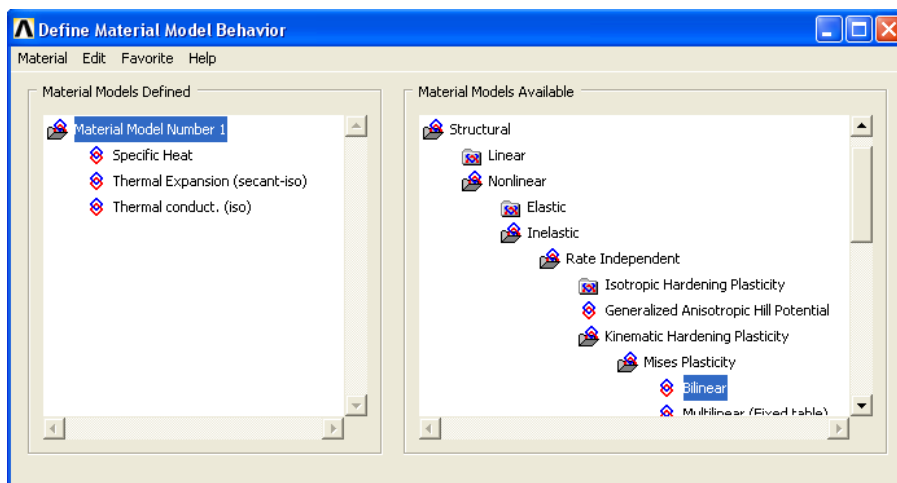
Наименование параметра	Значение
------------------------	----------



<i>Модуль упругости <math>E</math> (Па)</i>	<i>2E11</i>
<i>Коэффициент Пуассона <math>\nu</math></i>	<i>0.3</i>
<i>Напряжение текучести <math>Yield\ Stress</math> (Па)</i>	<i>2E8</i>
<i>Касательный модуль <math>Tang\ Modulus</math> (Па)</i>	<i>3.5E9</i>

Рассмотрим последовательность действий при определении свойств стали. В данном случае необходимо использовать пункт окна *Define Material Model Behavior* (Рисунок 95):

*Define Material Model Behavior* > *Material Models Available* > *Structural* > *Nonlinear* > *Rate Independent* > *Kinematic Hardening Plasticity* > *Mises Plasticity* > *Bilinear*



**Рисунок 95. Пункт окна *Material Model Available* для определения механических характеристик билинейного кинематического упрочнения**

При использовании указанного пункта меню:

- Появится окно с замечанием о том, что необходимо определить упругие характеристики материалов (Рисунок 96). Пользователь должен нажать кнопку **ОК**.

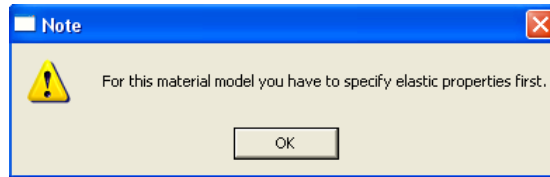


Рисунок 96. Окно с предупреждением о том, что необходимо определить упругие характеристики материала

- Далее появится окно *Linear Isotropic Properties for Material Numb...* (Рисунок 13), в котором необходимо определить требуемые значения упругих постоянных - модуля упругости *EX*, и коэффициента Пуассона *PRXY* (Таблица 3) - и нажать кнопку *OK*.
- Затем появится окно *Bilinear Kinematic Hardening for Material Number 1...* (Рисунок 98), в котором необходимо определить требуемые значения пластических постоянных - напряжения текучести *Yield Stress*, и касательного модуля *Tang Modulus* (Таблица 3) – и нажать кнопку *OK*.

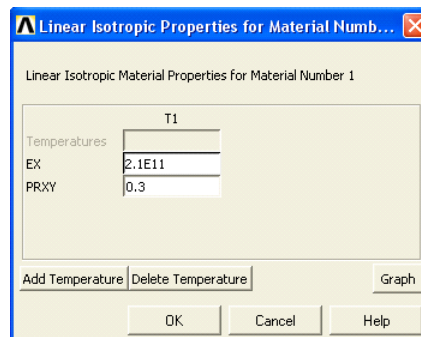


Рисунок 97. Окно *Linear Isotropic Properties for Material Numb...*

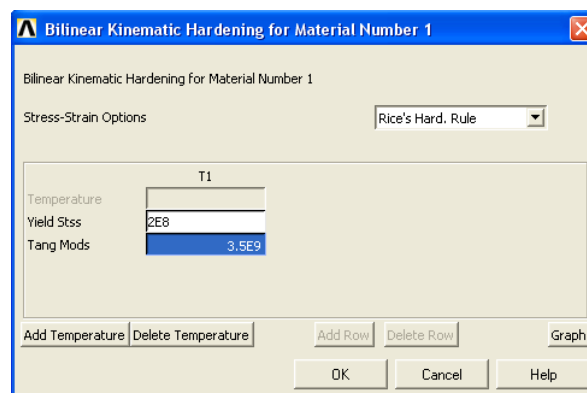



Рисунок 98. Окно *Bilinear Kinematic Hardening for Material Number 1*

- В завершение необходимо закрыть окно **Define Material Model Behavior** (Рисунок 16) с помощью пункта меню этого окна **Material> Exit** либо воспользоваться значком  в правом верхнем углу окна.

## Конечноэлементное разбиение модели

### Шаг 1. Выбор типа элементов для конечно-элементного разбиения

Указываем тип элементов, с помощью которых будем создавать разбиение. Будем пользоваться при этом пунктом главного меню:

**Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete**

При его использовании появляется окно **Element Types** (Рисунок 17) с надписью **None Defined**, означающей, что к настоящему моменту ни один из типов элементов не выбран для использования при разбиении. В этом случае:

- Нажимаем кнопку **Add...** (Рисунок 17).
- В появившемся окне **Library of Elements Types** (Рисунок 99) следует выбрать из раздела **Thermal Solid** (т.к. вначале будет решаться задача теплообмена) элемент **Quad 4node 55**.
- Нажать кнопку **OK** в окне **Library of Elements Types**.
- Нажимаем кнопку **Close** в окне **Element Types**.

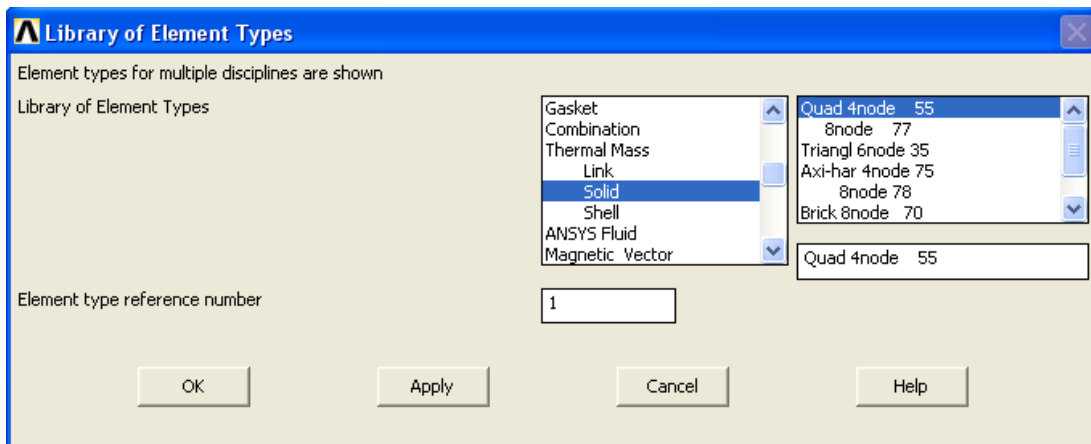


Рисунок 99. Выбор из раздела **Thermal Solid** окна **Library of Elements** элемента **Quad 4node 55**

## Шаг 2. Присвоение атрибутов компонентам модели

**З а м е ч а н и е!** В лабораторной работе данный шаг можно пропустить, т.к. в ANSYS используется только одна модель материала и один тип конечных элементов и они («по умолчанию») будут присвоены всем компонентам модели.

Можно воспользоваться любым из трех перечисленных ниже способов (средствами *Meshtool*, пунктом главного меню или командой) для назначения атрибутов модели.

### Средства MeshTool

#### **Main Menu> Preprocessor> Meshing> MeshTool...**

Для присвоения атрибутов компонентам модели можно воспользоваться первой секцией *Meshtool*. Для этого:

- В первом выпадающем списке необходимо установить раздел *Areas*.
- Нажать кнопку *Set* (Рисунок 22).
- В появившемся окне выбора геометрических компонент *Area Attributes* (Рисунок 23) следует нажать кнопку *Pick All*.
- В окне присвоения параметров (Рисунок 24) необходимо нажать **OK**.

### Пункт главного меню

Для определения атрибутов модели необходимо использовать следующий пункт главного меню:

#### **Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh Attributes> Picked Areas**

При использовании данного пункта меню появится окно выбора геометрических компонент (Рисунок 23), в котором необходимо нажать кнопку *Pick All*. Затем в окне присвоения параметров необходимо нажать кнопку **OK**.

### Список команд

**ASEL,ALL,,,,,**

**AATT,1,0,1,0**

### Шаг 3. Установка качества свободного разбиения *SmartSize*

#### Средства *MeshTool*

#### *Main Menu* > *Preprocessor* > *Meshing* > *MeshTool...*

Для присвоения атрибутов компонентам модели можно воспользоваться второй секцией *MeshTool* (Рисунок 100). Для этого:

- Включаем флаг  в разделе *SmartSize*.
- Устанавливаем 4 уровень *SmartSize* с помощью полосы прокрутки. Этот уровень соответствует разбиению достаточно хорошего качества.

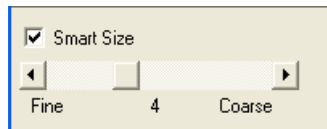


Рисунок 100. Вторая секция *MeshTool* с включенным *SmartSize*

#### Пункт главного меню

#### *Main Menu* > *Preprocessor* > *Meshing* > *Size Cntrl*s > *Basic*

При использовании данного пункта меню появится окно *Basic SmartSize Settings* (Рисунок 101), в котором с помощью выпадающего списка *LVL Size Level* устанавливаем значение 4.

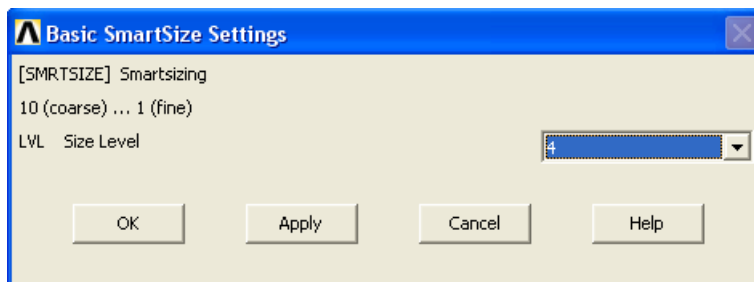


Рисунок 101. Окно *Basic SmartSize Settings*

#### Команда

*SMRTSIZE,4,,,,,,,,,*

### Шаг 4. Построение свободного разбиения области

## Средства *MeshTool*

### *Main Menu*> *Preprocessor*> *MeshTool...*

Для построения разбиения используются средства, находящиеся в четвертом (сверху) разделе *MeshTool* (Рисунок 29). Для построения свободного разбиения области средствами *MeshTool*:

- В первом выпадающем списке выбираем раздел *Area* – т.к. будут разбиваться поверхности.
- Нажимаем в окне кнопку *Mesh*.
- Нажимаем кнопку *Pick All* в появившемся окне выбора *Mesh Areas*.

### Пункты главного меню

Построение свободного разбиения осуществляется с помощью пункта меню:

### *Main Menu*> *Preprocessor*> *Meshing*> *Mesh*> *Areas*> *Free*

При его использовании появляется окно выбора геометрических компонент *Mesh Areas*, в котором необходимо нажать кнопку *Pick All*.

### Команда

### *AMESH,1,,,*

### Результаты выполнения шага 6

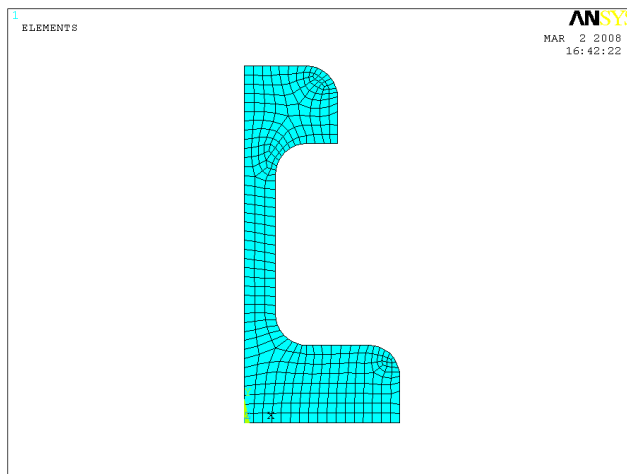


Рисунок 102. Результат построения свободного разбиения

### Шаг 5. Проверка качества разбиения

**З а м е ч а н и е!** Данный шаг может быть пропущен, т.к. разбиение не содержит элементов с опасными отклонениями формы.

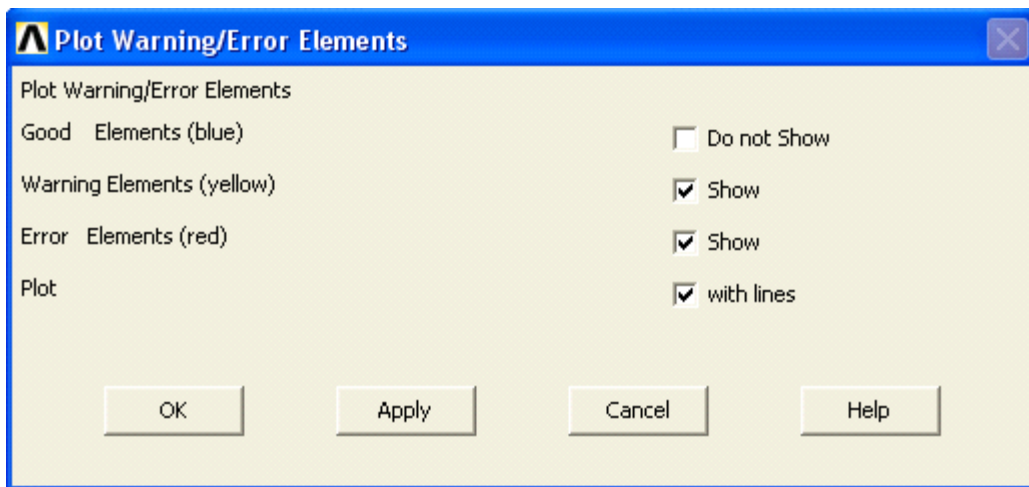
При получении предупреждающего сообщения следует посмотреть, где расположены элементы с отклонениями формы и какова степень отклонения их формы от нормальной.

**З а м е ч а н и е!** Выполнение проверки качества разбиения не доступно с помощью средств *MeshTool*.

Пункт главного меню

**Main Menu> Preprocessor> Meshing> Check Mesh> Individual Elm> Plot Warning/Error Elements**

При его использовании появляется первое окно **Plot Warning/Error Elements** (Рисунок 103). «По умолчанию» в нем стоят необходимые установки. Необходимо подтвердить установки, нажав **OK** (Рисунок 104).



**Рисунок 103. Вид окна *Plot Warning/Error Elements***

Список команд

**CHECK,,**

**/REPLOT**

Результаты выполнения шага 5

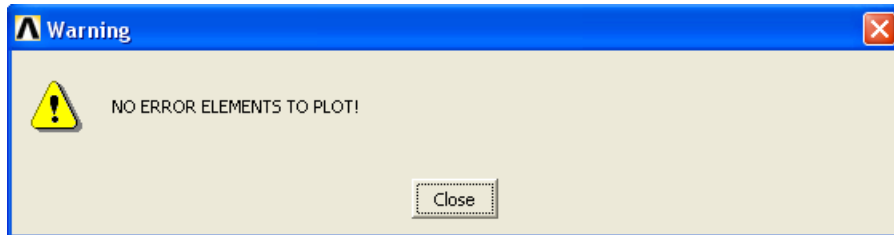


Рисунок 104. Сообщение об отсутствии "опасных" элементов в модели

## Ограничения и нагрузки для решения задач теплообмена

*Шаг 1. Определение температуры на нижней границе модели*

*Пункты главного меню*

*Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Thermal> Temperature> On Lines*

*Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Thermal> Temperature> On Lines*

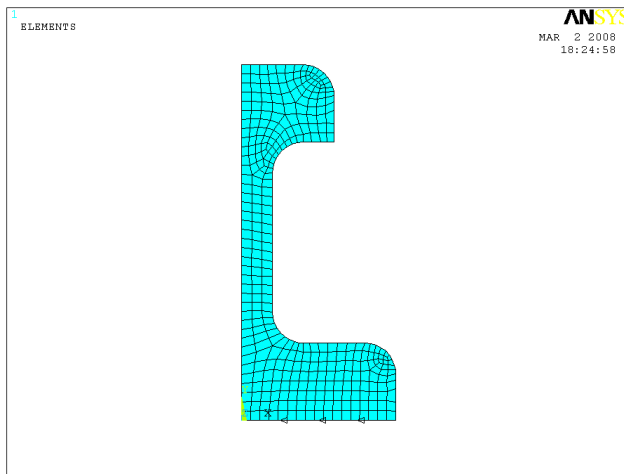
При использовании данного пункта меню появляется окно выбора геометрических компонент *Apply TEMP on Lines* (Рисунок 31). Далее выполняем следующие действия:

- Выбираем линию *L1* (нижнюю линию модели, Рисунок 93) для того, чтобы задать на ней температуру.
- Нажимаем кнопку *OK*.
- В списке *Lab2* окна определения значений *Apply TEMP on Lines* (Рисунок 32) выбираем с помощью «мыши» *TEMP*.
- В поле *VALUE* вводим *22*.
- Нажимаем кнопку *OK* (Рисунок 105).

*Команда*

*DL,1,,TEMP,22*





**Рисунок 105. Результат приложения постоянной температуры к нижней границе области**

**З а м е ч а н и е!** Ограничение температуры на линий обозначается стрелками-треугольниками.

*Шаг 2. Определение теплового потока*

*Пункты главного меню*

**Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Thermal> Heat Flux> On Lines**

**Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Thermal> Heat Flux> On Lines**

При использовании данного пункта меню появляется окно **Apply HFLUX on Lines**. Далее выполняем следующие действия:

- Выбираем линии **L7** и **L12** (Рисунок 93) для того, чтобы определить на ней тепловой поток.
- Нажимаем кнопку **OK**.
- В поле ввода **VALI Heat flux** окна определения значений **Apply HFLUX on Lines** указываем величину равномерного теплового потока величиной **60000 (Вт/м<sup>2</sup>)** (Рисунок 37).

**З а м е ч а н и е!** Второе поле **ValJ** не заполняется в случае однородного теплового потока.

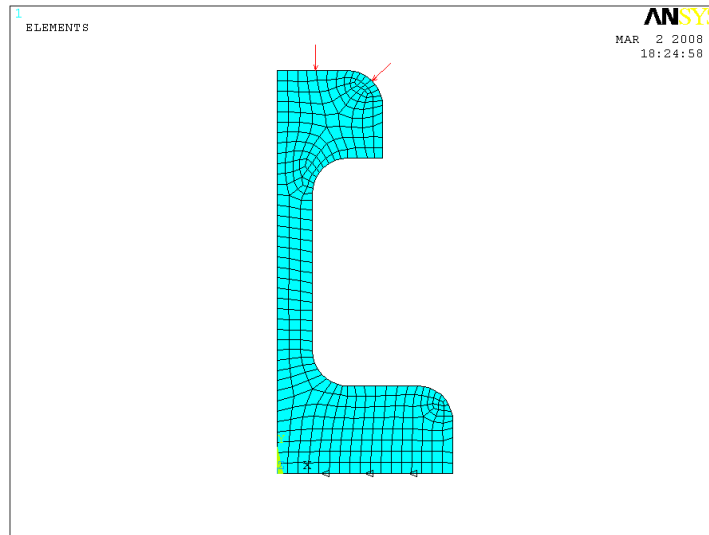
- Нажимаем кнопку **OK**.

*Команды*

**SFL,7,HFLUX,60000,,,22,**

*SFL,12,HFLUX,60000,,,22,*

*Результат определения теплового потока*



**Рисунок 106. Результат приложения нагрузки к модели образца**

*Шаг 3. Определение конвекции*

*Пункты главного меню*

*Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> Thermal> Convection> On Lines*

*Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Thermal> Convection> On Lines*

При использовании данного пункта меню появляется окно *Apply CONV on Lines*. Далее выполняем следующие действия:

- Выбираем линии *L2, L9, L3, L10, L4, L11, L5* и *L6* (Рисунок 93) для того, чтобы определить на ней условия конвекции.
- Нажимаем кнопку **OK**.
- В поле ввода *VAL1 Film coefficient* окна определения значений *Apply CONV on lines* указываем величину равномерной конвекции при контакте с воздухом величиной **5 (Вт/м<sup>2</sup>)**, в окне *VAL2I Bulk Temp on lines* вводим температуру окружающей среды **22 °C** (Рисунок 71).

***З а м е ч а н и е!*** Поля *ValJ Film coefficient* и *VAL2J Bulk Temp on lines* не заполняются в случае однородной конвекции.

- Нажимаем кнопку **ОК**.

*Команды*

*SFL,2,CONV,5,,22*

*SFL,9,CONV,5,,22*

*SFL,3,CONV,5,,22*

*SFL,10,CONV,5,,22*

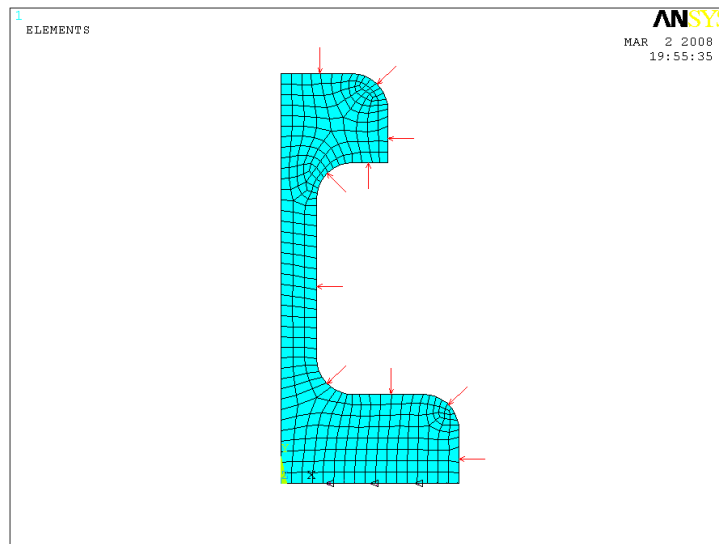
*SFL,4,CONV,5,,22*

*SFL,11,CONV,5,,22*

*SFL,5,CONV,5,,22*

*SFL,6,CONV,5,,22*

*Результат определения конвекции*



**Рисунок 107. Результат определения конвекции и теплового потока**


**Решение поставленных задач и просмотр результатов решения**

*Шаг 1. Решение задачи*

*Пункт главного меню*

**Main Menu > Solution > Solve > Current LS**

При использовании данного пункта меню появляется два окна. Далее выполняем следующие действия:

- Закрываем окно */STATUS Command*, содержащее служебную информацию о решаемой задаче, нажатием кнопки .
- Нажимаем кнопку **OK** во втором окне (*Solve Current Load Step*).

*Список команд*

**/SOLU**

**SOLVE**

**З а м е ч а н и е!** Решение продолжается до появления информационного сообщения *Solution is done!* (Рисунок 43). Данное окно следует закрыть с помощью кнопки *Close*.

*Шаг 2. Просмотр полей напряжений*

*Пункт главного меню*

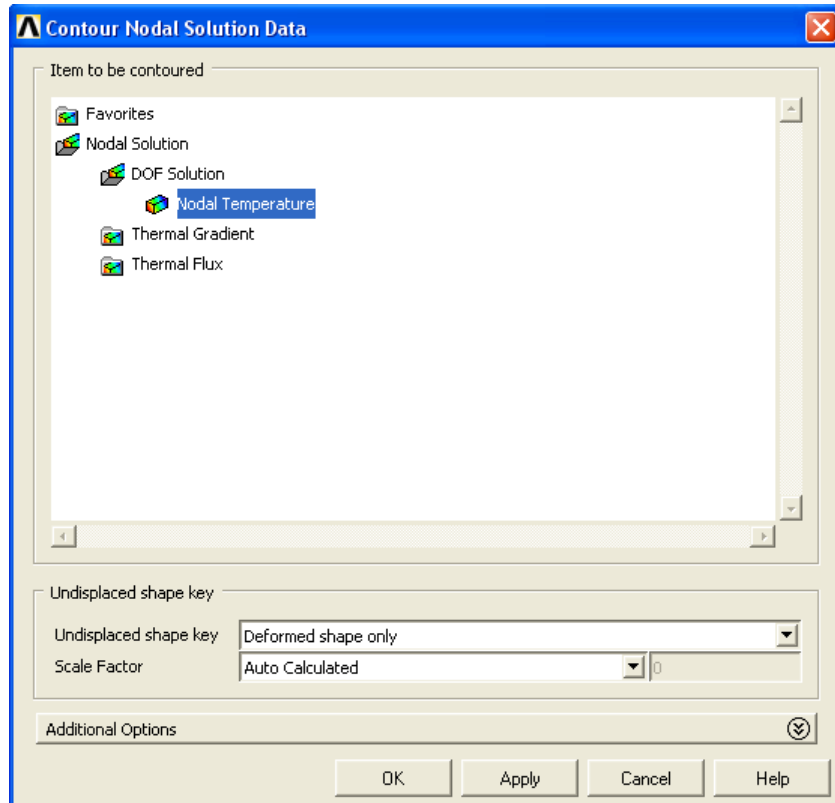
При просмотре полей напряжений следует воспользоваться пунктом главного меню:

**Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu**

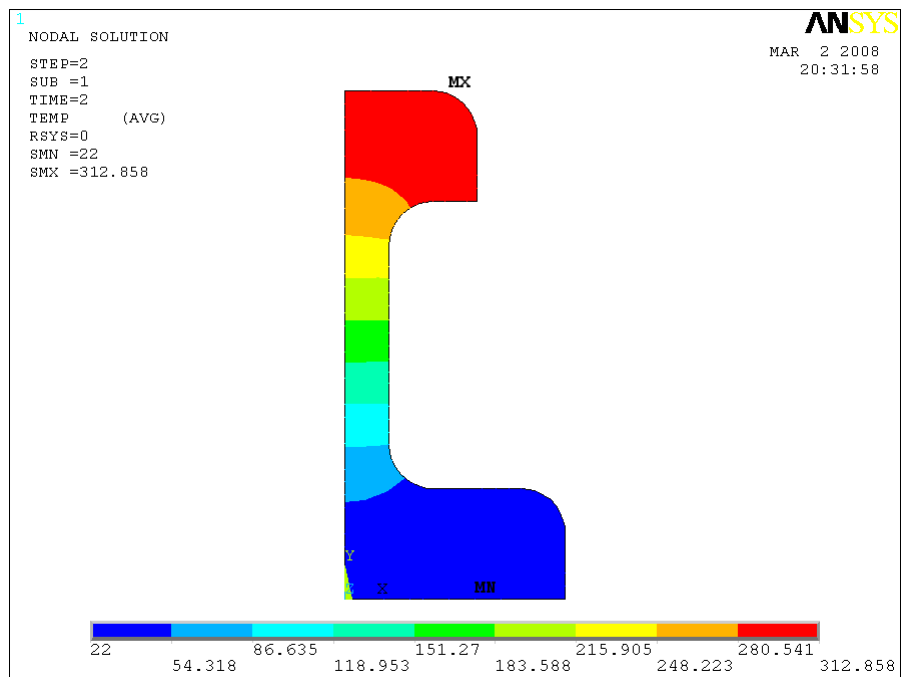
При использовании этого пункта меню появится окно *Contour Nodal Solution Data* (Рисунок 108). Далее следует:

- Выбрать раздел **DOF Solution** в списке с меткой *Item to be contured*.
- Выбрать раздел (*Nodal Temperature*), соответствующий выбору распределения температур.
- Нажать кнопку **OK**.

**З а м е ч а н и е!** Для остальных установок можно оставить значения «по умолчанию».



**Рисунок 108. Окно *Contour Nodal Solution Data* с выбранным разделом *Nodal Temperature***



**Рисунок 109. Результаты визуализации распределения температур**

## Решение задачи структурного анализа с учетом результатов решения задачи теплообмена

*Шаг 1. Переключение типа конечных элементов*

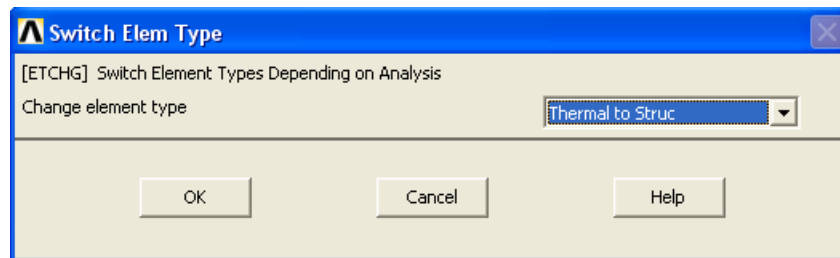
*Пункт главного меню*

**Main Menu > Preprocessor > Element Type > Switch Elem Type**

При использовании данного пункта меню появляется окно **Switch Elem Type** (Рисунок 110). Далее выполняем следующие действия:

- В выпадающем списке **Change element type** выбираем опцию **Thermal to Struct**.
- Нажимаем кнопку **OK**.

**З а м е ч а н и е!** Появится окно **Warning**, которое необходимо закрыть с помощью кнопки **Close**.



**Рисунок 110. Окно *Switch Elem Type***

*Команда*

**ETCHG, TTS**

*Шаг 2. Определение перемещений по линии основания и линии симметрии*

*Пункт главного меню*

**Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines**

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора **Apply U, ROT on Lines** (Рисунок 72). Далее выполняем следующие действия:

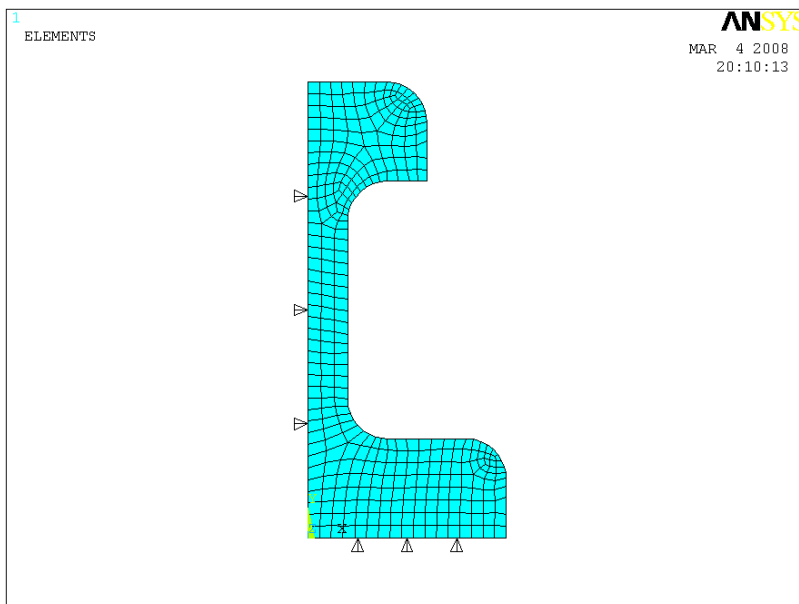
- Выбираем линию *L1* (линию основания модели, Рисунок 93) для того, чтобы определить на ней нулевые перемещения по направлению *Y* ( $UY = 0$ ).
- Нажимаем кнопку *OK*.
- В появившемся окне ввода данных *Apply U,ROT on Lines* (Рисунок 73) в поле *Lab2 DOFs to be constrained* выбираем раздел *UY*, а поле *VALUE Displacement value* оставляем пустым («по умолчанию» равно 0).
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- Выбираем линию *L8* (линию симметрии модели, Рисунок 93).
- Нажимаем кнопку *OK*.
- В появившемся окне ввода данных *Apply U,ROT on Lines* в поле *Lab2 DOFs to be constrained* выбираем раздел *UX*, а поле *VALUE Displacement value* так же оставляем пустым.
- Нажимаем кнопку *OK*.

*Команда*

*DL,1,1,UY,0,0*

*DL,8,1,UX,0,0*

*Результат закрепления линий модели*



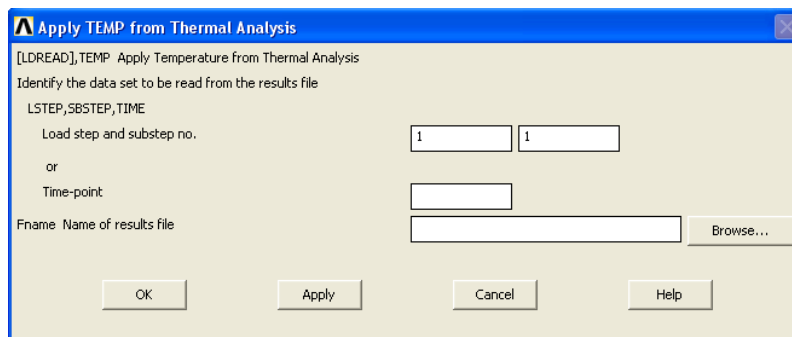
**Рисунок 111. Результат задания перемещений**

*Шаг 3. Решение структурной задачи с использованием результатов термоанализа*

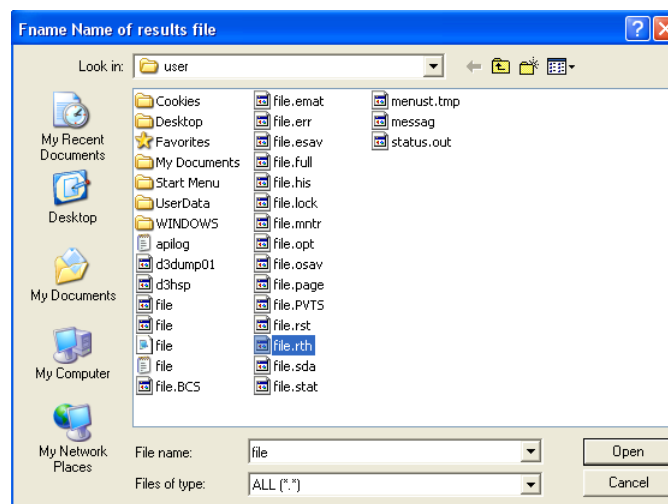
***Solution > Define Loads > Apply > Structural > Temperature > From Therm Analy***

При использовании данного пункта меню появляется окно ***Apply TEMP from Thermal Analysis***. Далее выполняем следующие действия:

- В окнах ввода ***Load step and substep no*** вводим номера шагов и подшагов. В данном случае вводим ***1*** и ***1***, т.к. при температурном анализе был выполнен ***1*** шаг и ***1*** подшаг (Рисунок 112).
- В разделе ***Fname Name of results file*** необходимо воспользоваться кнопкой ***Browse*** и с помощью окна ***Fname Name of results file*** (Рисунок 113) выбрать файл с расширением ***-rth***, который автоматически формируется ANSYS. Нажать кнопку ***Open***.
- Нажимаем кнопку ***OK***.



**Рисунок 112. Окно *Apply TEMP from Thermal Analysis***



**Рисунок 113. Окно *Fname Name of results file***

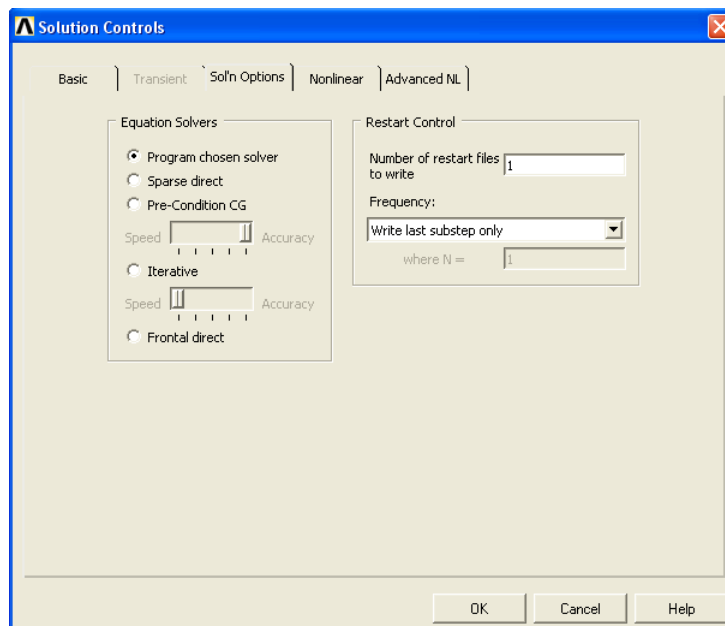


*Шаг 4. Устанавливаем возможность выполнения рестарта решения*

**Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls**

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора **Solution Controls** (Рисунок 114). Далее выполняем следующие действия:

- Выбираем третью закладку **Sol'n Options**.
- В разделе **Restart Control** устанавливаем значение **1** в окне ввода **Number of restart files to write**.
- В выпадающем списке **Frequency** выбираем раздел **Write last substep only**.
- Нажимаем кнопку **OK**.




**Рисунок 114. Окно *Solution Controls***

*Шаг 5. Повторно решаем задачу*

*Пункт главного меню*

**Main Menu > Solution > Solve > Current LS**

При использовании данного пункта меню появляется два окна. Далее выполняем следующие действия:

- Закрываем окно */STATUS Command*, содержащее служебную информацию о решаемой задаче, нажатием кнопки .
- Нажимаем кнопку **OK** во втором окне (*Solve Current Load Step*).

*Список команд*

*/SOLU*

*SOLVE*

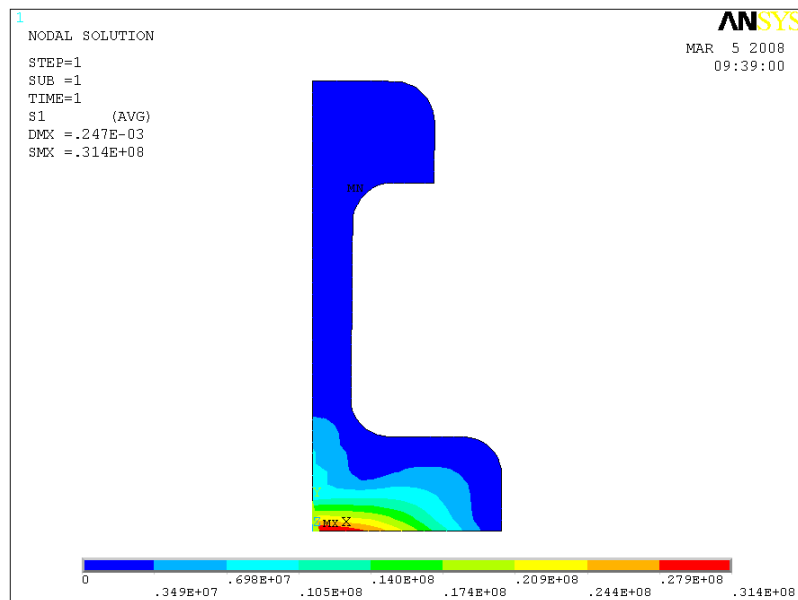
### *Шаг 6. Просмотр полей распределения первых главных напряжений*

При просмотре полей напряжений следует воспользоваться пунктом главного меню:

**Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu**

При использовании этого пункта меню появится окно *Contour Nodal Solution Data*. Далее следует:

- Выбрать раздел **Stress** в списке с меткой *Item to be contoured*.
- Выбрать раздел **1st Principal stress** (Рисунок 83), соответствующий выбору первого главного напряжения.
- Нажать кнопку **OK**.



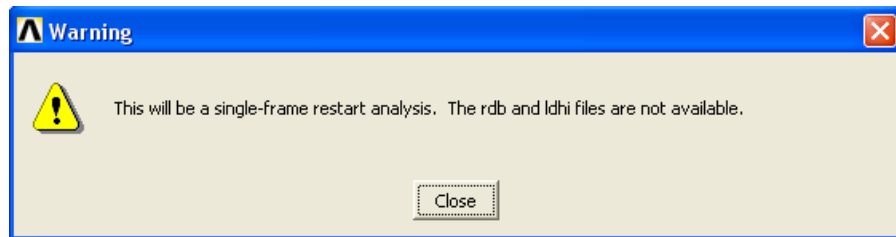
**Рисунок 115. Распределение первых главных напряжений**

## Просмотр остаточных деформаций

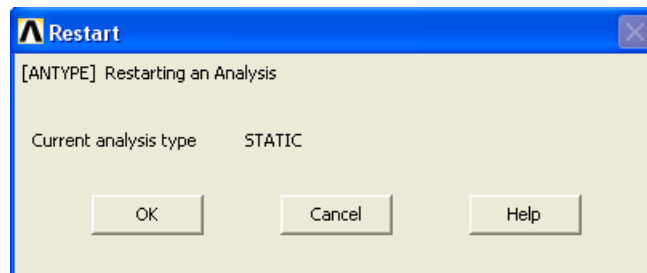
*Шаг 1. Выполнение рестарта решения*

**Main Menu > Solution > Analysis Type > Restart**

При использовании этого пункта меню появится окно **Warning** (Рисунок 116) с предупреждением, которое необходимо закрыть кнопкой **Close**, и окно **Restart** (Рисунок 117) в нем необходимо нажать **OK**.



**Рисунок 116. Окно Warning**



**Рисунок 117. Окно Restart**

*Шаг 2. Удаление температурных перемещений*

**Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Structural > Temperature > On Nodes**

**Main Menu > Solution > Define Loads > Delete > Structural > Temperature > On Nodes**


При использовании этого пункта меню появится окно выбора геометрических компонент **Delete TEMP on Nodes** (Рисунок 46), в котором необходимо нажать кнопку **Pick All**.

### Шаг 3. Повторно решаем задачу

Пункт главного меню

**Main Menu > Solution > Solve > Current LS**

При использовании данного пункта меню появляется два окна. Далее выполняем следующие действия:

- Закрываем окно **/STATUS Command**, содержащее служебную информацию о решаемой задаче, нажатием кнопки .
- Нажимаем кнопку **OK** во втором окне (**Solve Current Load Step**).

Список команд

**/SOLU**

**SOLVE**

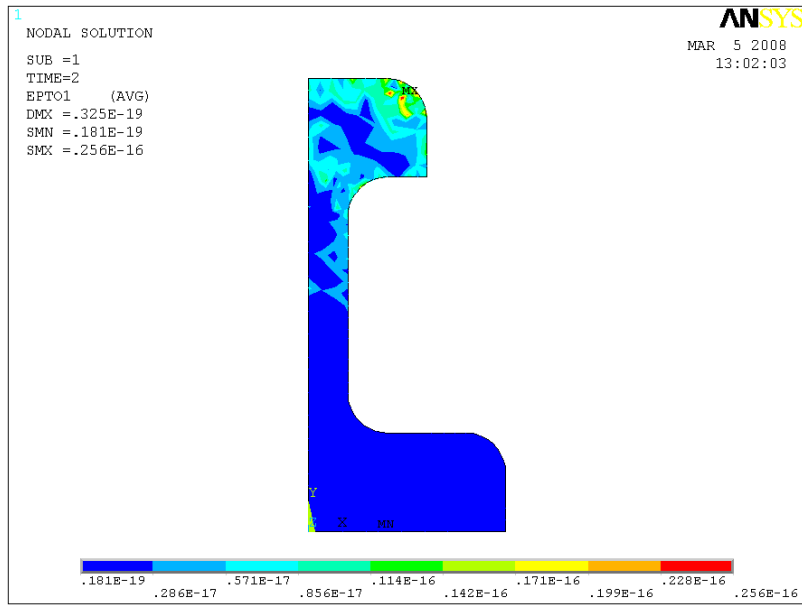
### Шаг 4. Просмотр остаточных деформаций

При просмотре полей деформаций следует воспользоваться пунктом главного меню:

**Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu**

При использовании этого пункта меню появится окно **Contour Nodal Solution Data**. Далее следует:

- Выбрать раздел **Total Strain** в списке с меткой **Item to be contured**.
- Выбрать раздел **1st Principal strain** (Рисунок 83), соответствующий выбору первой главной деформации.
- В выпадающем меню **Scale Factor** необходимо выбрать опцию **True Scale**.
- Нажать кнопку **OK**.



**Рисунок 118. Распределение остаточных первых главных деформаций**

## Литература

1. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров: Справочное пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк – М: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Пример 1. Деформирование биметаллических конструкций при остывании .....</b>	<b>3</b>
Создания геометрической модели в ANSYS.....	3
Шаг 1. Создание сечения конструкции с помощью прямоугольников .....	3
Шаг 2. «Склеивание» прямоугольников .....	5
Определение физических констант материалов, участвующих в решении задачи.....	5
Шаг 1. Определение типа решаемой задачи.....	5
Шаг 2. Последовательность действий при определении свойств материала биметаллической пластины .....	6
Конечноэлементное разбиение модели.....	13
Шаг 1. Выбор типа элементов для конечно-элементного разбиения .....	13
Шаг 2. Включение нумерации поверхностей.....	15
Шаг 3. Отображение поверхностей.....	15
Шаг 4. Присвоение атрибутов компонентам модели .....	16
Шаг 3. Выключение нумерации поверхностей и включение нумерации линий .....	19
Шаг 4. Отображение линий модели .....	19
Шаг 5. Установление количества элементов на ребрах при упорядоченном разбиении .....	20
Шаг 4. Выполнение явной конкатенации линий.....	22
Шаг 5. Построение упорядоченного разбиения области .....	23
Ограничения и нагрузки для решения задач теплообмена .....	25
Шаг 1. Определение температуры всех узлов биметаллической конструкции .....	25
Шаг 2. Закрепление узловой точки модели.....	27
Шаг 3. Определение начальных условий.....	29
Решение поставленной задачи и просмотр результатов решения .....	30
Шаг 1. Выбор <b>Transient</b> -анализа.....	31
Шаг 2. Определение времени расчета и количества подшагов при расчете .....	31
Шаг 3. Определение параметров хранения результатов .....	32
Шаг 4. Решение задачи .....	33
Шаг 5. Просмотр полей перемещений .....	34
Шаг 6. Просмотр пространственного распределения перемещений с помощью <b>Result Viewer</b> .....	35
Шаг 3. Повторно решаем задачу.....	37

Шаг 7. Построение графика перемещений узловой точки во времени ....	38
<b>Пример 2. Расширение и контактное взаимодействие твердых тел при нагревании.....</b>	<b>40</b>
Создание геометрической модели взаимодействующих деталей .....	40
Шаг 1. Создание плоской модели с помощью прямоугольников .....	40
Шаг 2. Включение нумерации линий.....	42
Шаг 3. Отображение линий модели .....	42
Шаг 2. Деление линии <b>L8</b> на три части .....	43
Определение физических констант материалов участвующих в решении задач в ANSYS.....	45
Шаг 1. Определение типа решаемой задачи.....	45
Шаг 2. Последовательность действий при определении свойств материала рельса .....	45
Конечноэлементное разбиение модели.....	50
Шаг 1. Выбор типа элементов для конечно-элементного разбиения .....	50
Шаг 4. Присвоение атрибутов компонентам модели .....	50
Шаг 5. Установление количества элементов на ребрах при упорядоченном разбиении .....	51
Шаг 4. Выполнение явной конкатенации линий.....	54
Шаг 5. Построение упорядоченного разбиения области .....	54
Шаг 6. Удаление конкатенации линий.....	56
Ограничения и нагрузки модели .....	56
Шаг 1. Определение температуры на границе модели .....	56
Шаг 2. Определение теплового потока.....	58
Шаг 3. Определение конвекции.....	58
Шаг 4. Определение перемещений по линиям модели.....	60
Шаг 5. Создание контактных пар .....	62
Решение поставленной задачи и просмотр результатов решения .....	66
Шаг 1. Решение задачи .....	66
Шаг 2. Просмотр полей распределения первых главных напряжений ....	67
Шаг 3. Просмотр распределения контактных давлений .....	68
<b>Пример 3. Распределение остаточных напряжений в поперечном сечении рельса при термообработке рабочей поверхности .....</b>	<b>69</b>
Средства создания геометрической модели детали в ANSYS .....	69
Шаг 1. Создание ключевых точек, определяющих половину профиля сечения.....	69
Шаг 2. Соединение ключевых точек прямыми линиями .....	72
Шаг 3. Создание дуг по ключевым точкам концов и радиусу .....	73
Шаг 4. Удаление вспомогательных ключевых точек .....	75



Шаг 5. Включение нумерации линий.....	76
Шаг 6. Отображение линий модели .....	76
Шаг 7. Создание поверхности по линиям.....	77
Определение физических констант материалов .....	78
Шаг 1. Определение типа решаемой задачи.....	78
Шаг 2. Последовательность действий при определении свойств материала рельса .....	78
Конечноэлементное разбиение модели.....	83
Шаг 1. Выбор типа элементов для конечно-элементного разбиения .....	83
Шаг 2. Присвоение атрибутов компонентам модели .....	84
Шаг 3. Установление качества свободного разбиения <b>SmartSize</b> .....	85
Шаг 4. Построение свободного разбиения области .....	85
Шаг 5. Проверка качества разбиения .....	86
Ограничения и нагрузки для решения задач теплообмена .....	88
Шаг 1. Определение температуры на нижней границе модели .....	88
Шаг 2. Определение теплового потока .....	89
Шаг 3. Определение конвекции.....	90
Решение поставленных задач и просмотр результатов решения.....	91
Шаг 1. Решение задачи .....	91
Шаг 2. Просмотр полей напряжений .....	92
Решение задачи структурного анализа с учетом результатов решения задачи теплообмена.....	94
Шаг 1. Переключение типа конечных элементов.....	94
Шаг 2. Определение перемещений по линии основания и линии симметрии .....	94
Шаг 3. Решение структурной задачи с использованием результатов термоанализа.....	96
Шаг 4. Устанавливаем возможность выполнения рестарта решения.....	97
Шаг 5. Повторно решаем задачу.....	97
Шаг 6. Просмотр полей распределения первых главных напряжений ....	98
Просмотр остаточных деформаций.....	99
Шаг 1. Выполнение рестарта решения .....	99
Шаг 2. Удаление температурных перемещений .....	99
Шаг 3. Повторно решаем задачу.....	100
Шаг 4. Просмотр остаточных деформаций .....	100
<b>Литература.....</b>	<b>102</b>