

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П.КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Ю. В. Скворцов, С. В. Глушков

**Использование МКЭ-пакета ANSYS
для решения задач механики
деформируемого твёрдого тела**

Интерактивное мультимедийное пособие

САМАРА

2011

УДК 621
ББК О.5.2-01.6
С 427

Авторы: Скворцов Юрий Васильевич,
Глушков Сергей Валериевич

Редакторская обработка Ю. В. Скворцов
Компьютерная верстка Ю. В. Скворцов
Доверстка С. В. Глушков

Скворцов, Ю. В. Использование МКЭ-пакета ANSYS для решения задач механики деформируемого твёрдого тела [Электронный ресурс] : интерактивное. мультимедийное. пособие / Ю. В. Скворцов, С. В. Глушков; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (Нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (9,1 Мб). – Самара, 2011. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Учебное пособие предназначено для подготовки к занятиям и самостоятельного освоения МКЭ-пакета ANSYS. Оно может быть использовано как для начального изучения МКЭ-пакета ANSYS, так и для углубления навыков решения с помощью данной программы разнообразных задач математической физики. В курсе представлены необходимая теория и пошаговые решения большого количества статических и динамических задач, в том числе с учётом разнообразных нелинейных эффектов, таких как большие перемещения и деформации, пластичность и ползучесть, контактное взаимодействие тел.

Настоящее пособие предназначено для использования магистрантами направления 010800.68 «Механика и математическое моделирование» при изучении дисциплины «Компьютерный практикум по механике» в 9 и А(10) семестрах, для бакалавров направления 151600.62 «Прикладная механика», в рамках освоения дисциплины «Конечно-элементное моделирование конструкций» в 6 и 7 семестрах, а также для профессорско-преподавательского состава, проходящего повышение квалификации на ФКПК ИДПО СГАУ по одноименному курсу.

При подготовке учебного пособия учтён многолетний опыт использования современных МКЭ-пакетов на кафедре прочности летательных аппаратов СГАУ.

Пособие размещено по адресу: <http://distance.ssau.ru/course/view.php?id=35>

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2011

ПРИЛОЖЕНИЕ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

1 Введение в механику разрушения

Современные требования к конструкциям в отношении минимизации их металлоемкости и повышения эффективности не позволяют гарантировать отсутствие местных повреждений в течение полного срока эксплуатации. С развитием дефектоскопии установлено, что во многих элементах конструкций имеются трещиноподобные дефекты. Очагами зарождения трещин являются концентраторы напряжений заводского, строительного-монтажного или эксплуатационного происхождения (сварные соединения, расслоение металла, неметаллические включения, механические поверхностные повреждения, усталостные повреждения, коррозионные язвы и др.).

Опыт эксплуатации машин и механизмов показывает, что даже разработанная тщательным образом программа контроля качества изделий не может исключить источники образования трещин и их появление в процессе эксплуатации. Наличие трещин вовсе не означает, что конструкция не может работать в данных конкретных условиях. Если металл вязкий, то трещины даже сравнительно большой длины не вызывают его разрушения. И, наоборот, в хрупких металлах малые трещины могут привести к катастрофическому их распространению при средних уровнях напряжений, остающихся существенно ниже предела текучести.

Наличие трещины в материале, вызывая концентрацию напряжений в нем, снижает статическую прочность элементов конструкций тем больше, чем выше предел прочности или текучести материала. Недооценка этого типичного для металлов свойства приводила в прошлом ко многим неожиданным, а иногда и катастрофическим разрушениям корпусов ракет, самолетных конструкций, сварных сосудов давления, нефтегазопроводов, строительных конструкций и т.п.

Плодотворным для прогнозирования явлений образования и развития трещин явилось такое (бурно развивающееся с начала 50-х годов прошлого столетия) направление науки о прочности как *механика разрушения* твердых тел, исследующая модели трещин, параметры напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещины и соответствующие критерии разрушения.

Механика разрушения рассматривает размер дефекта как один из важнейших параметров, причем в качестве характеристики материала вместо предела прочности использует вязкость разрушения (трещиностойкость).

К настоящему времени разработан ряд критериев начала распространения трещины (часто называемых критериями разрушения). Из них наибольшее применение получили энергетический и силовой подходы. В первом случае склонность трещины к росту характеризуется интенсивностью освобождения энергии (т.е. энергией, необходимой для увеличения поверхности трещины на единицу площади). Силовой критерий основывается на понятии коэффициента интенсивности напряжений. В этом случае склонность трещины к росту характеризуется интенсивностью полей напряжений и деформаций. В определенном смысле оба критерия эквивалентны.

Механика разрушения имеет две стороны. Одна из них заключается в анализе напряжений, возникающих в элементе конструкции с трещиной, и вычислении соответствующих параметров. Другой стороной являются экспериментальные исследования на вязкость разрушения (трещиностойкость).

Расчет параметров механики разрушения для реальных элементов конструкций с трещинами удобно выполнять численно, например, при помощи метода конечных элементов.

1.1 Виды разрушения

В зависимости от кинематики (относительного движения двух поверхностей трещины) различают три основных типа деформации при растрескивании (рисунок 1): I – отрыв; II – поперечный сдвиг; III – продольный сдвиг.

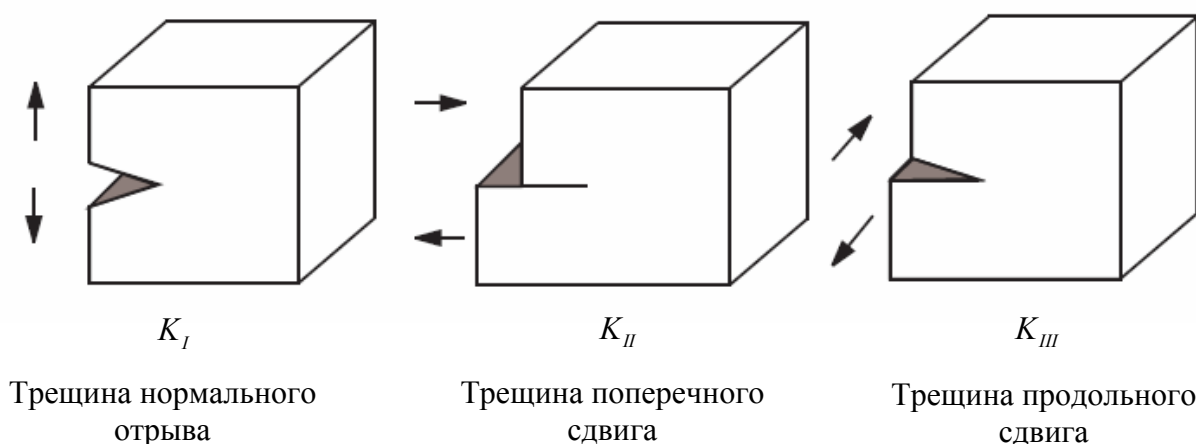


Рисунок 1 – Схематизация видов разрушения

В общем случае разрушение характеризуется комбинацией этих основных типов растрескивания.

1.2 Параметры механики разрушения

Типовые параметры механики разрушения описывают либо скорость высвобождения энергии, либо интенсивности полей напряжений и деформаций в окрестности вершины трещины. Из них наибольшее распространение получили следующие величины:

- коэффициент интенсивности напряжений;
- интенсивность освобождения энергии;
- J -интеграл.

Применение коэффициента интенсивности напряжений и скорости высвобождения энергии ограничено рамками линейной механики разрушения в упругой постановке. J -интеграл применим как к линейно-упругим материалам, так и к нелинейным упругопластическим материалам.

1.2.1 Коэффициент интенсивности напряжений

Для линейно-упругого материала поля напряжений и деформаций в области вершины трещины описываются выражениями

$$\sigma_{ij} = -\frac{K}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta); \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ij} = -\frac{K}{\sqrt{r}} g_{ij}(\theta), \quad (2)$$

где K – коэффициент интенсивности напряжений; r и θ – координаты в полярной системе координат (рисунок 2). Эти выражения применимы к любому из трех рассмотренных выше видов разрушения.

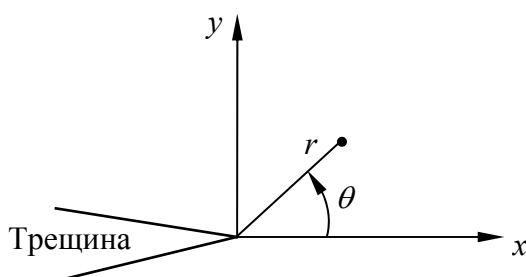


Рисунок 2 – Системы координат трещины

Так, для трещины типа I поле напряжений можно представить в виде

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right); \quad (3)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right); \quad (4)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right). \quad (5)$$

Коэффициент интенсивности напряжений и интенсивность освобождения энергии связаны соотношением

$$G = \frac{K^2}{E'}, \quad (6)$$

где G обозначает интенсивность освобождения энергии; для плоской деформации $E' = \frac{E}{1-\mu^2}$, а для плоского напряженного состояния $E' = E$. Здесь E – модуль упругости материала; μ – коэффициент Пуассона.

1.2.2 J -интеграл

J -интеграл один из наиболее широко применяемых параметров для описания упругопластических задач механики разрушения. Он определяется как

$$J = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma} \left[(W + T) \delta_{1i} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_1} \right] n_i d\Gamma, \quad (7)$$

где W – плотность энергии деформации; T – плотность кинетической энергии; σ_{ij} и u_j – компоненты тензора напряжений и вектора перемещений соответственно; Γ – окружающий вершину трещины контур, по которому выполняется интегрирование; n_i – компоненты единичного вектора внешней нормали к контуру δ_{1j} – символ Кронекера.

Для линейного и нелинейно-упругого материала, а также для случаев незначительной пластической деформации интеграл в (7) является не зависящим от пути. Его значение при этом не зависит от операции предела, при которой контур Γ сжимается в вершину трещины.

Для трещины в линейно-упругом материале J -интеграл представляет собой интенсивность освобождения энергии. Кроме того, интенсивность полей напряжений и деформаций в области вершины трещины характеризуется J -интегралом и в нелинейно-упругом материале.

2 Решение задач механики разрушения в программе ANSYS

Исследование разрушения включает в себя анализ напряженного состояния и вычисление параметров механики разрушения. Анализ напряженного состояния – это стандартный для ANSYS линейно-упругий или нелинейный упругопластический анализ.

Поскольку в области кромки трещины существуют высокие градиенты напряжений, конечно-элементное моделирование этой зоны требует особого внимания. В пакете ANSYS под кромкой трещины в двухмерном анализе понимается ее вершина, а в трехмерном – фронт (рисунок 3).

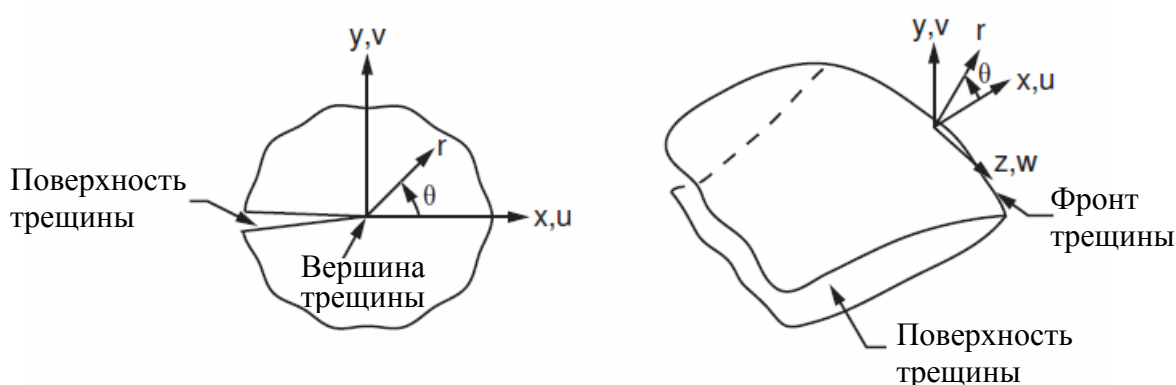


Рисунок 3 – Вершина и фронт трещины

2.1 Моделирование области вершины трещины

Поля напряжений и деформаций в окрестности вершины трещины обычно обладают высокими градиентами. Характер этих полей зависит от материала, геометрии и иных факторов. Для точного определения быстроизменяющихся полей напряжений и деформаций, необходимо использовать достаточно мелкую сетку в области вершины трещины. Для линейно-упругих задач перемещения около вершины трещины (или фронта трещины) изменяются пропорционально \sqrt{r} , где r – расстояние от вершины трещины. Напряжения и деформации имеют особенность (сингулярность) в вершине трещины и изменяются пропорционально $1/\sqrt{r}$. Чтобы создать такую сингулярность в деформациях и напряжениях, сетка в области вершины трещины должна иметь определенные характеристики:

- поверхности трещины должны совпадать;

- элементы вокруг вершины (или фронта) трещины должны быть квадратичными со средними узлами, смещенными на четверть длины стороны к вершине (такие элементы называются сингулярными).

На рисунке 4 представлены примеры сингулярных элементов для двухмерных и трехмерных моделей разрушения.

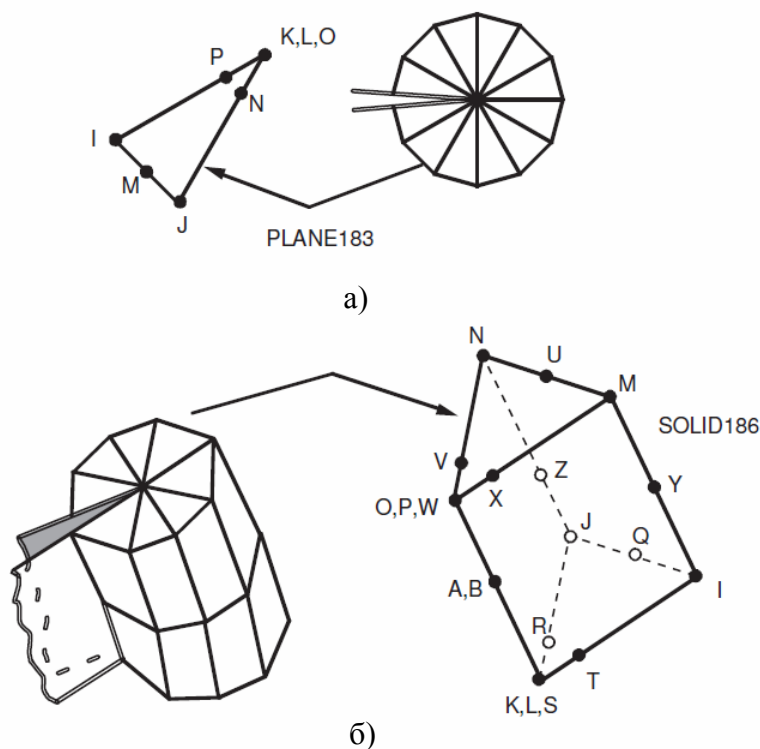


Рисунок 4 – Примеры сингулярных элементов для двухмерных (а) и трехмерных (б) моделей

2.1.1 Двухмерные модели

Рекомендованный тип элементов для двухмерной модели разрушения – PLANE183. Это 8-узловой плоский элемент второго порядка. Первый ряд элементов вокруг вершины трещины должен быть сингулярным, как показано на рисунке 4,а.

При моделировании трещины удобно воспользоваться специальной командой препроцессора **KSCON** (*Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrl>Concentrat KPs>Create*), которая назначает размеры элементов вблизи точки концентрации напряжений. При этом автоматически генерируются сингулярные элементы вокруг указанной точки. Параметры данной команды позволяют управлять радиусом элементов первого ряда, количеством эле-

ментов в окружном направлении и др. На рисунке 5 представлена модель образца с трещиной, построенная с использованием команды **KSCON**.

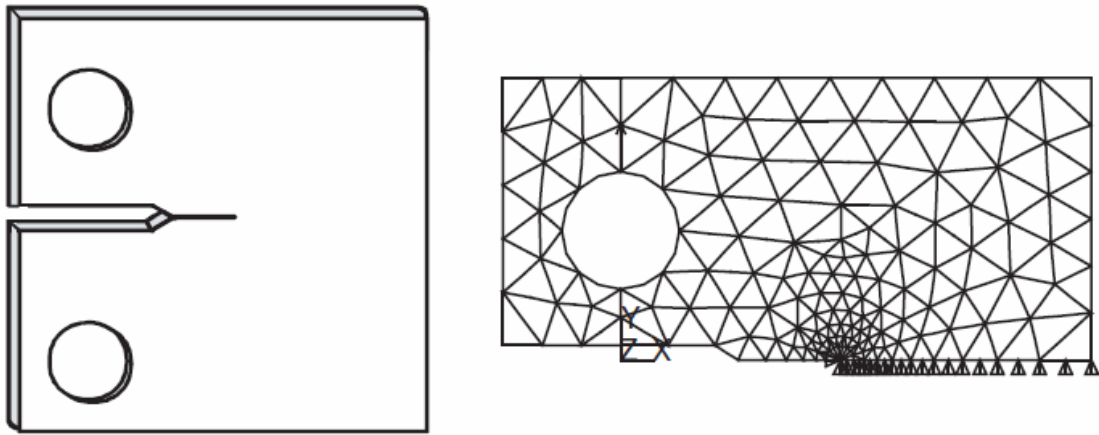


Рисунок 5 – Образец с трещиной и его двухмерная конечно-элементная модель

При моделировании трещин важно учитывать симметрию, если таковая имеется. Во многих случаях можно ограничиться моделированием лишь половины области трещины с симметричными или антисимметричными граничными условиями (рисунок 6).

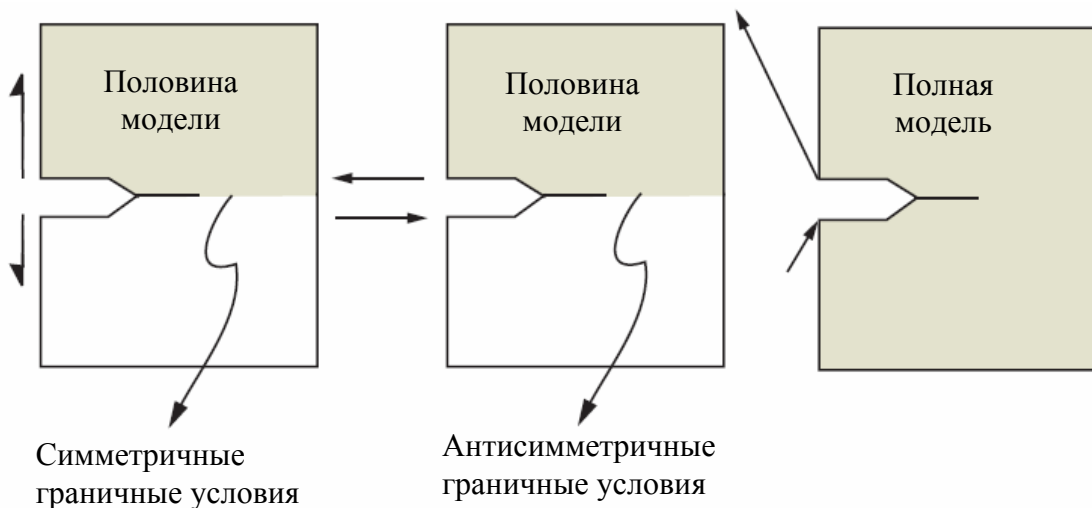


Рисунок 6 – Использование симметрии

Для получения достоверных результатов первый ряд элементов вокруг вершины трещины должен иметь радиус $a/8$ или меньше, где a – длина трещины. В окружном направлении рекомендуется примерно один элемент на каждые 30...40 градусов.

Элементы в вершине трещины не должны быть искривленными и должны иметь форму равнобедренного треугольника.

2.1.2 Трехмерные модели

Рекомендованный тип элементов для трехмерных моделей – SOLID186 (20-узловой шестигранный объемный элемент). Первый ряд элементов вокруг фронта трещины должен быть образован сингулярными элементами (см. рисунок 4,б). Отметим, что эти элементы имеют клиновидную форму с гранью KLPO, вырожденной в линию КО.

Построение трехмерной модели трещины является значительно более сложной задачей, чем создание двумерной модели. Команда **KSCON** здесь недоступна. При этом всегда следует контролировать ориентацию объемных элементов – фронт трещины должен описываться кромками КО элементов.

Рекомендации по размерам элементов здесь такие же, как и для двумерных моделей. Кроме того, отношение размеров не должно превышать 4 к 1 по всем направлениям.

Для трещин с криволинейным фронтом рекомендуемый размер элементов вдоль этой линии будет зависеть от локального значения кривизны. Общая рекомендация – иметь, по крайней мере, один элемент на каждые $15...30^\circ$ вдоль криволинейного фронта трещины.

Все кромки элементов должны быть прямыми, включая кромки на фронте трещины.

2.2 Вычисление *J*-интеграла

Вычисление *J*-интеграла происходит на уровне решателя, причем рассчитанные значения данного параметра механики разрушения сохраняются в файле результатов (.rst) для последующего их просмотра средствами пост-процессора. Для реализации данного процесса необходимо использовать команду **CINT** (которая недоступна из меню).

Вычисление *J*-интеграла в ANSYS основано на методе интегрирования по области, который предполагает интегрирование по площади для двумерных задач и по объему для трехмерных. Интегралы по площади и объему имеют более высокую точность, нежели контурный и поверхностный интегралы соответственно, и намного легче реализуются численно. Сам метод также очень удобен в использовании.

2.2.1 Метод интегрирования по области

Для двумерных задач в отсутствие температурных деформаций, зависящих от пути пластических деформаций, объемных сил в пределах области интегрирования и давления на поверхностях трещины интеграл по области (площади) представляется выражением

$$J = \int_A \left[\sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - W \delta_{li} \right] \frac{\partial q}{\partial x_i} dA, \quad (11)$$

где q – вектор направления роста трещины. Направление q совпадает с осью x локальной системы координат в вершине трещины (см. рисунок 3). Вектор q обращается в нуль в узлах контура Γ , ограничивающего область A , и равен единичному вектору для всех узлов внутри Γ (кроме средних промежуточных узлов, непосредственно примыкающих к контуру Γ). Узлы с единичным вектором q называются узлами виртуального роста трещины.

Для элементов второго порядка (таких как PLANE183 и SOLID186) вектор q в примыкающих к контуру промежуточных узлах принимает значение, получаемое путем осреднения значений в соответствующих угловых узлах. Форма конечно-элементной дискретизации J -интеграла представляется как

$$J = \sum_{ie=1}^{ne} \left[\sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - W \delta_{li} \right] \frac{\partial q}{\partial x_i} w_{iw} A_{ie}, \quad (12)$$

где ne – число элементов, по которым выполняется интегрирование, w_{iw} – весовые функции; A_{ie} – площадь элемента ie .

Для трехмерных задач метод интегрирования по области представляет интегрирование по объему, которое опять выполняется по группе элементов. Реализация здесь становится более сложной, но в принципе аналогичной двумерной задаче.

2.2.2 Узлы виртуального роста трещины

Узлы виртуального роста трещины – это одна из самых важных составляющих исходных данных, требуемых для оценки J -интеграла. Они в программе ANSYS объединяются в компонент (component) узлов вершины трещины.

Для двумерных задач компонент узлов вершины трещины содержит, как правило, один узел, представляющий вершину трещины. Первый охваты-

вающий площадь интегрирования контур, определяется элементами, связанными с узлами, помещенными в компонент узлов вершины трещины. Второй контур описывается элементами, соседствующими с элементами первого контура, и т.д. Следует отметить, что для получения достоверных результатов элементы, входящие в контур, не должны достигать внешней границы модели (за исключением поверхностей трещины).

Для трехмерных задач компонент узлов вершины трещины состоит из узлов вдоль фронта трещины. Данный компонент узлов не обязательно должен быть отсортирован. Контур J -интеграла определяется аналогично контурам двумерного.

2.2.3 Выбор элементов и моделей поведения материала

Вычисление J -интеграла (доступное через команду **CINT**) поддерживается следующими типами элементов:

- PLANE182;
- PLANE183;
- SOLID185;
- SOLID186;
- SOLID187.

Данный расчет возможен при выборе следующих моделей поведения материала:

- линейная упругость;
- пластичность.

2.2.4 Процесс вычисления J -интеграла

ANSYS вычисляет J -интеграл на этапе МКЭ-анализа после того, как на конкретном подшаге решение сходится; его значение сохраняется в файле результатов.

Команда **CINT** инициализирует расчет J -интеграла, а также используется для определения различных параметров, которые необходимы для выполнения этого процесса.

Для вычисления J -интеграла необходимы следующие шаги:

- Шаг 1: Инициализация новой процедуры вычисления J -интеграла.
- Шаг 2: Определение параметров трещины.
- Шаг 3: Задание числа контуров.
- Шаг 4: Определение условия симметрии трещины.
- Шаг 5: Задание параметров вывода.

- *Шаг 1: Инициализация новой процедуры вычисления J -интеграла*

Для того чтобы начать вычисление J -интеграла, необходимо воспользоваться командой **CINT** с опцией *NEW* и указать номер для идентификации набора входных данных по J -интегралу. Синтаксис команды:

`CINT, NEW, n`

где n – порядковый номер трещины.

Например,

`CINT, NEW, 1`

- *Шаг 2: Определение параметров трещины*

Для вычисления J -интеграла необходимо определить компонент узлов вершины трещины и направление роста трещины. Для их задания существуют два различных метода:

1. Определение компонента узлов вершины трещины и нормали к плоскости трещины. Этот подход предназначен для двумерных и плоских трехмерных трещин. Он предлагает простой способ вычисления трехмерного J -интеграла, поскольку объем исходной информации здесь минимален. Рекомендуется использовать данный метод, если поверхность трещины плоская.

2. Задание компонента узлов роста трещины и направления роста трещины. Этот подход предназначен для трехмерных задач с криволинейной поверхностью трещины, когда не существует единой нормали к ней. Здесь необходимо определить компонент узлов роста трещины и направление роста трещины в каждом узле линии фронта. Данный метод следует использовать, если поверхность трещины неплоская или вершина трещины формируется не одним узлом, а несколькими совпадающими узлами (сжатая в вершине трещины сетка).

Определение компонента узлов вершины трещины и нормали к плоскости трещины. Для геометрии двумерной трещины компонент узлов вершины трещины обычно содержит один узел, расположенный в вершине трещины. Однако здесь можно определить группу узлов вокруг вершины трещины, включая узел в вершине. ANSYS использует эту группу в качестве стартовых узлов для формирования информации по первому контуру интегрирования.

Для геометрии плоской трехмерной трещины необходимо определить компонент узлов, включающий все узлы вдоль фронта трещины. В каждой

точке линии фронта, однако, может находиться лишь один узел. Все узлы данного компонента должны при помощи элементов соединяться между собой и должны формировать линию – фронт трещины. ANSYS использует их для автоматического определения элементов, задающих контур интегрирования. Процедура аналогична двумерной задаче и повторяется для всех узлов вдоль фронта трещины.

Синтаксис команды:

```
CINT, CTNC, CMNAME
```

После задания компонента узлов вершины трещины, следует воспользоваться командой **CINT** с опцией *NORMAL* для определения нормали к плоскости трещины. ANSYS автоматически преобразует ее в вектор роста трещины q , основываясь на информации об элементах. Вектор роста трещины берется в направлении, перпендикулярном плоскости, образованной нормалью к поверхности трещины и касательной к фронту трещины в рассматриваемом узле, и затем приводится к единичному вектору.

Синтаксис команды:

```
CINT, NORMAL, par1, par2
```

где $par1$ – номер системы координат, а $par2$ – ось системы координат $par1$.

Пример 1:

```
! Локальная система координат
LOCAL, 11, 0, , , ,
! Выбор узлов, лежащих на фронте трещины, и формирование
! компонента узлов вершины трещины
NSEL, S, LOC, X, Xctip
NSEL, R, LOC, Y, Yctip
CM, CRACK_TIP_NODE_CM
! Инициализация новой процедуры вычисления J-интеграла
CINT, NEW, 1
CINT, CTNC, CRACK_TIP_NODE_CM
CINT, NORMAL, 11, 2
```

Пример 2:

```
! Выбор узлов, лежащих на фронте трещины, и формирование
! компонента узлов вершины трещины
LSEL, , , ,
NSLL
CM, CRACK_FRONT_NODE_CM, NODE
CINT, NEW, 1
CINT, CTNC, CRACK_FRONT_NODE_CM
```

Задание компонента узлов роста трещины и направления роста трещины. Как отмечалось ранее, этот метод используется, если поверхность трещины неплоская или вершина трещины формируется несколькими совпадающими узлами:

1. Определение компонента, состоящего из одного или более узлов, образующих вершину трещины.

Пример: `CINT, CENCOMP, CMNAME`

2. Отдельное определение узла вершины трещины, если компонент содержит более одного узла. Если узел вершины трещины не определен, то в качестве него принимается первый из узлов, входящих в компонент.

Пример: `CINT, CENCOMP, CMNAME, node1`

3. Задание направления роста трещины. Для этого следует определить локальную систему координат, связанную с рассматриваемой трещиной, и указать ось данной системы координат, вдоль которой предположительно трещина будет расти.

Пример: `CINT, CENCOMP, CMNAME, node1, 11, 2`

Направление роста трещины можно определить и по-другому, непосредственно задавая составляющие вектора роста трещины по осям глобальной системы координат X , Y и Z .

Пример: `CINT, CENCOMP, CMNAME, node1, , , compx, compy, compz`

Эту процедуру следует повторить для всех узлов, расположенных вдоль фронта трещины.

Пример 1:

```
! Локальные системы координат
```

```
local, 11, 0, , , ,
```

```
local, 12, 0, , , ,
```

```
...
```

```
local, n, 0, , , ,
```

```
NSEL, S, LOC, X, Xctip1
```

```
NSEL, R, LOC, Y, Yctip1
```

```
NSEL, R, LOC, Z, Zctip1
```

```
CM, CRACK_FRONT_NODE_CM1
```

```
NSEL, S, LOC, X, Xctip2
```

```
NSEL, R, LOC, Y, Yctip2
```

```
NSEL, R, LOC, Z, Zctip2
```

```
CM, CRACK_FRONT_NODE_CM2
```

```

...
NSEL,S,LOC,X,Xctipn
NSEL,R,LOC,Y,Yctipn
NSEL,R,LOC,Z,Zctipn
CM,CRACK_FRONT_NODE_CMn

CINT,NEW,1
CINT,CENC,CRACK_FRONT_NODE_CM1,,11,2
CINT,CENC,CRACK_FRONT_NODE_CM2,,11,2
...
CINT,CENC,CRACK_FRONT_NODE_CM2,,n,2

```

Пример 2:

```

! Определение компонента узлов роста трещины и
! направления роста трещины с использованием векторов
NSEL,S,LOC,X,Xctip1
NSEL,R,LOC,Y,Yctip1
NSEL,R,LOC,Z,Zctip1
CM,CRACK_FRONT_NODE_CM1
NSEL,S,LOC,X,Xctip2
NSEL,R,LOC,Y,Yctip2
NSEL,R,LOC,Z,Zctip2
CM,CRACK_FRONT_NODE_CM2
...
NSEL,S,LOC,X,Xctipn
NSEL,R,LOC,Y,Yctipn
NSEL,R,LOC,Z,Zctipn
CM,CRACK_FRONT_NODE_CMn

CINT,NEW,1
CINT,CENC,CRACK_FRONT_NODE_CM1, , , ,Vx1,Vy1,Vz1
CINT,CENC,CRACK_FRONT_NODE_CM2, , , ,Vx2,Vy2,Vz2
...
CINT,CENC,CRACK_FRONT_NODE_CM2, , , ,Vxn,Vyn,Vzn

```

- *Шаг 3: Задание числа контуров для интегрирования*

Число контуров для вычисления J -интеграла задается следующим образом:

```
CINT,NCONTOUR,n
```

где n – число контуров.

Для трехмерной трещины каждый узел фронта трещины имеет одинаковое число контуров.

Пример:

```

CINT,NEW,1
CINT,CTNC,CRACK_FRONT_NODE_SET,NODE
CINT,NCONTOUR,6

```


- *Шаг 4: Определение условий симметрии*

Если трещина расположена в плоскости симметрии и построена только половина модели, то необходимо задать граничные условия симметрии так, чтобы ANSYS мог их учесть:

```
CINT, SYMM, ON
```

Пример:

```
CINT, NEW, 1  
CINT, SYMM, ON    ! Трещина 1 - это симметричная трещина
```

- *Шаг 5: Задание опций вывода результатов*

ANSYS вычисляет значения J -интеграл на уровне решателя и сохраняет их в файле результатов для последующего использования в постпроцессоре. Управление выводом J -интеграла производится командой **OUTRES**. Команда **OUTRES,ALL** автоматически включает вывод результатов вычисления J -интеграла. Однако можно воспользоваться командой **OUTRES,CINT** для отдельного управления выводом результатов J -интеграла.

Пример:

```
CINT, NEW, 1  
CINT, CTNC, CRACK_TIP_NODE_CM  
CINT, SYMM, ON  
CINT, NCONT, 5  
OUTRES, CINT, 10    ! Вывод J-интеграла на каждом 10 шаге
```

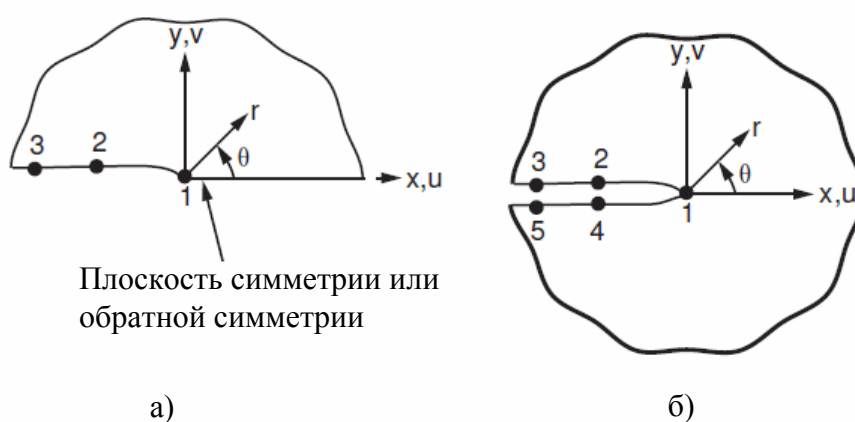
2.3 Вычисление коэффициентов интенсивности напряжений

Коэффициенты интенсивности напряжений K_I , K_{II} и K_{III} для смешанного типа деформирования рассчитываются в общем постпроцессоре с помощью команды **KCALC** (*Main Menu>General Postproc>Nodal Calcs>Stress Int Factr*). Однако применение этой команды ограничено рамками линейно-упругих задач с однородным изотропным материалом в области трещины. Для использования команды **KCALC** необходимо в общем постпроцессоре выполнить следующие шаги:

1. Определение локальной системы координат в вершине (или на фронте) трещины. Ось x должна быть параллельна поверхности трещины (перпендикулярна фронту трещины в трехмерных задачах), а ось y – перпендикулярна поверхности трещины (как показано на рисунке 3). Во время выполнения команды **KCALC** эта система координат должна быть активной

системой координат модели (команда **CSYS**) и системой координат для отображения результатов (**RSYS**).

2. Задание траектории вдоль поверхности трещины. Первый узел создаваемой траектории должен быть узлом вершины трещины. Для модели половины трещины требуются два дополнительных узла, оба вдоль одной поверхности трещины. Для полной модели, включающей две поверхности трещины, необходимо дополнительно указать четыре узла, по два на каждой поверхности трещины. Рисунок 7 иллюстрирует оба рассмотренных выше случая на примере двухмерной модели.



**Рисунок 7 – Определение траектории вдоль поверхностей трещины:
(а) – модель половины трещины; (б) – полная модель трещины**

3. Вычисление K_I , K_{II} , K_{III} . Параметр *KPLAN* в команде **KCALC** определяет, рассматриваются ли условия плоской деформации (plane strain) или плоского напряженного состояния (plane stress). За исключением анализа тонких пластин обычно полагают, что асимптотическое поведение напряжений вблизи вершины трещины ближе к плоской деформации. Поле *KCSYM* определяет, моделируется ли половина трещины с граничными условиями симметрии или обратной симметрии либо же полная трещина.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТОВ

1 Волокнистые композиционные материалы

Композитом называется неоднородный (гетерогенный) материал, состоящий из двух или нескольких взаимно нерастворимых компонентов (фаз). Согласно этому определению к композитам можно отнести очень многие материалы.

Ради удобства одну из фаз обычно называют матрицей (или связующим), а другие включениями (или армирующими элементами). Композиционные материалы, как правило, классифицируются по форме включений. Самыми распространенными среди них являются макрочастицы (гранулы), короткие (или разорванные) волокна, непрерывные длинные волокна, а также слои.

В современных силовых конструкциях наибольшее распространение получили волокнистые композиционные материалы, состоящие из сравнительно податливой полимерной матрицы, армированной высокопрочными непрерывными стеклянными, органическими, углеродными или борными волокнами. Уровень прочностных и жесткостных свойств таких материалов определяется в основном свойствами волокна. От выбора матрицы зависят прочность на сдвиг, термостойкость, сопротивление ударным нагрузкам и усталости. В каждом слое волокна могут быть расположены строго параллельно друг другу (однонаправленный материал) либо сплетены в ткань. Однако текстильная переработка заметно снижает прочность и жесткость материала.

Такие композиты обладают двумя уровнями неоднородности: микро-неоднородностью, связанной с наличием в материале двух фаз (волокон и матрицы), и макронеоднородностью, связанной с наличием однонаправленных слоев (или монослоев). При расчете и проектировании конструкций обычно учитывается лишь второй уровень неоднородности материала, т.е. считается, что он состоит из совокупности квазиоднородных элементарных слоев, свойства которых известны.

Минимальный набор технических характеристик монослоя, используемых в качестве исходных данных для расчета и проектирования конструкций, включает в себя: E_1 , E_2 – модули упругости вдоль и поперек волокон соответственно (рисунок 1); G_{12} – модуль сдвига; μ_{12} – коэффициент Пуассона (причем первый индекс здесь указывает направление действующего на-

пряжения, а второй – направление возникающей при этом поперечной деформации); $\sigma_{1в}^+$, $\sigma_{1в}^-$ – пределы прочности при одноосном растяжении и сжатии вдоль волокон; $\sigma_{2в}^+$, $\sigma_{2в}^-$ – пределы прочности при одноосном растяжении и сжатии поперек волокон; $\sigma_{12в}$ – предел прочности при сдвиге. При этом коэффициент Пуассона μ_{21} выражается как

$$\mu_{21} = \mu_{12} \frac{E_2}{E_1}. \quad (1)$$

Для большинства однонаправленных материалов $E_1 \gg E_2$, поэтому, как правило, $\mu_{21} \ll \mu_{12}$.

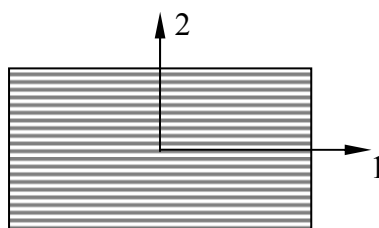


Рисунок 1 – Однонаправленный монослой

Следует отметить, что теоретические методы расчета этих характеристик, базирующиеся на рассмотрении идеализированных микромоделей и не учитывающие микроструктурные несовершенства, плохо согласуются с экспериментом. Поэтому в практических расчетах здесь рекомендуется использовать лишь экспериментальные данные.

Основным недостатком однонаправленных материалов являются их низкие механические свойства в поперечном направлении. Поэтому композитные элементы конструкций обычно изготавливают из нескольких монослоев, ориентируя их в разных направлениях. После полимеризации в автоклаве многослойный пакет образует монолитный неоднородный материал с некоторыми прочностными и жесткостными характеристиками. Требуемые значения этих характеристик достигаются соответствующим подбором структурных параметров, таких как число слоев, их толщина, углы ориентации и последовательность укладки слоев (рисунок 2).

Исследования показывают, что для получения требуемых характеристик нет необходимости применения сложных схем армирования. Во многих случаях можно ограничиться лишь четырьмя направлениями: 0° , 90° , $\pm 45^\circ$.

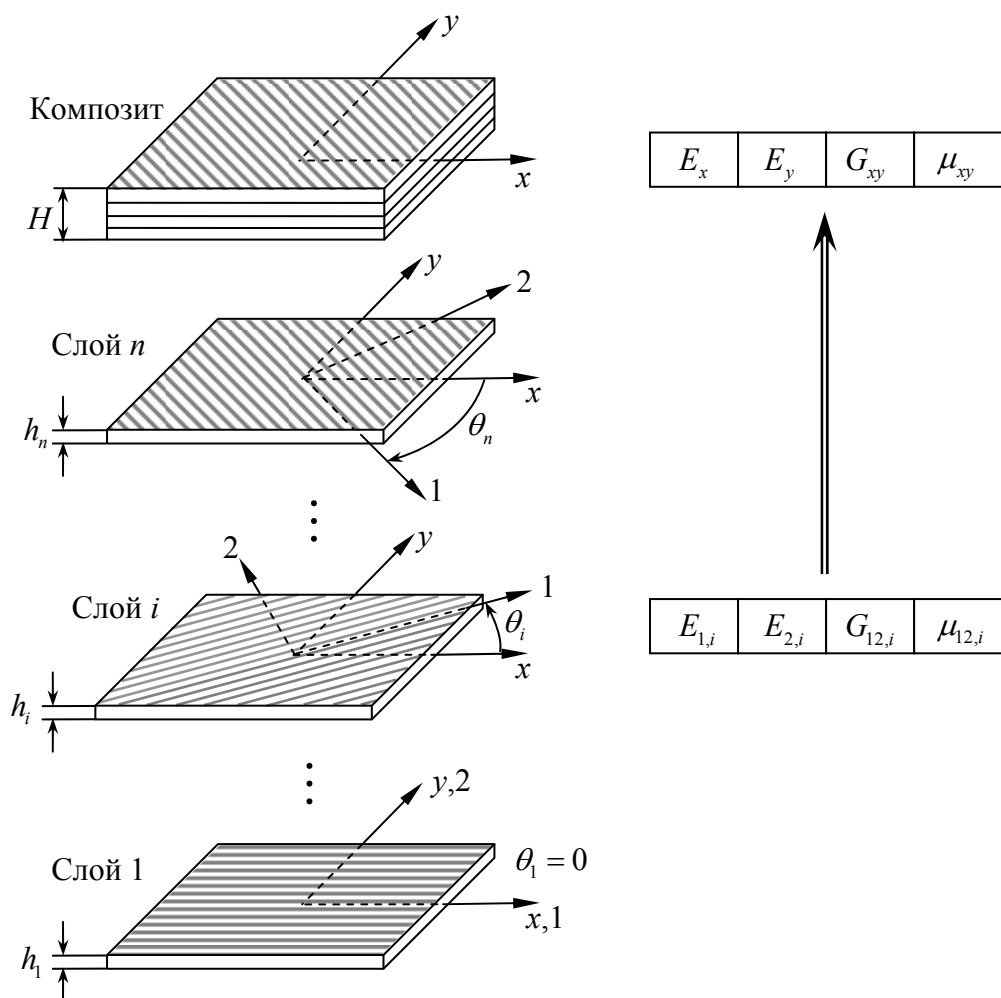


Рисунок 2 – Многослойный пакет

Отметим, что высокая прочность слоистого композита в плоскости слоев, как правило, сочетается с низкой прочностью связи между слоями. Поэтому преимущества волокнистых композитов наиболее полно реализуются в тонкостенных элементах, где напряжения в слоях значительно превышают межслоевые напряжения.

Достоинствами композитов являются их высокие удельные прочностные и жесткостные характеристики по сравнению с металлами, а также возможность управления физико-механическими параметрами при создании материала конструкции.

В принципе для любой конструкции может быть разработан материал, наиболее полно соответствующий ее назначению, полн действующих нагрузок и условиям эксплуатации. В этом отношении композиты эквивалентны природным материалам, рациональное сочетание свойств которых сформировалось в процессе длительной эволюции.

Расчет композитных элементов конструкций осуществляется, как правило, на основе обычных теорий и методов строительной механики, однако, с помощью соотношений, учитывающих специфические особенности армированных материалов. Ввиду того, что уравнения равновесия и геометрические соотношения от свойств материала не зависят, эти особенности должны учитываться физическими соотношениями, связывающими напряжения и деформации.

2 Упругие характеристики многослойного пакета

При плоском напряженном состоянии уравнение связи средних по толщине напряжений $[\sigma] = \{\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{xy}\}$ со средними деформациями $[\varepsilon] = \{\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{xy}\}$ многослойного материала (см. рисунок 2) можно представить в стандартном виде

$$[\sigma] = [\kappa][\varepsilon], \quad (2)$$

где

$$[\kappa] = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^n [\kappa]_i h_i. \quad (3)$$

Здесь n – общее число слоев; $[\kappa]_i$ – матрица упругих постоянных i -го слоя, преобразованная к общей системе координат (x, y) :

$$[\kappa]_i = [T]_i [\bar{\kappa}]_i [T]_i^T. \quad (4)$$

Матрица преобразования $[T]_i$ находится как

$$[T]_i = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2cs \\ s^2 & c^2 & 2cs \\ cs & -cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где обозначено $c = \cos \theta_i$ и $s = \sin \theta_i$.

Поскольку однонаправленный слой представляет собой ортотропный материал, его матрица упругих постоянных в местной системе координат $(1, 2)_i$ имеет вид

$$[\bar{\kappa}]_i = \begin{bmatrix} \frac{E_{1,i}}{1 - \mu_{12,i} \mu_{21,i}} & \frac{\mu_{12,i} E_{2,i}}{1 - \mu_{12,i} \mu_{21,i}} & 0 \\ \frac{\mu_{21,i} E_{1,i}}{1 - \mu_{12,i} \mu_{21,i}} & \frac{E_{2,i}}{1 - \mu_{12,i} \mu_{21,i}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12,i} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Следует отметить, что структура пакета слоев, как правило, симметрична относительно общей системы координат. В таком случае многослойный материал будет ортотропным в осях x, y . При этом из матрицы $[K]$ можно легко найти осредненные по толщине упругие постоянные E_x, E_y, G_{xy} и μ_{xy} .

При изгибе характеристиками напряженного состояния композита могут служить погонные силы $[N] = \{N_x, N_y, T\}$ и моменты $[M] = \{M_x, M_y, M_{xy}\}$. При этом соотношения упругости записываются как

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \chi \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $[e] = \{e_{xx}, e_{yy}, e_{xy}\}$ – матрица-столбец деформаций срединной поверхности; $[\chi] = \{\chi_{xx}, \chi_{yy}, \chi_{xy}\}$ – матрица-столбец изменений кривизн; $[A]$ – матрица мембранных жесткостей; $[D]$ – матрица изгибных жесткостей; $[B]$ – матрица мембранно-изгибных жесткостей, отвечающая за взаимосвязь сил и изменений кривизн, моментов и деформаций.

Матрицы, характеризующие жесткостные характеристики многослойного пакета при изгибе, определяются выражениями

$$\begin{aligned} [A] &= \sum_{i=1}^n [K]_i (z_i - z_{i-1}); \\ [B] &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [K]_i (z_i^2 - z_{i-1}^2); \\ [D] &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n [K]_i (z_i^3 - z_{i-1}^3), \end{aligned} \quad (8)$$

где z_i – расстояние от срединной поверхности до верхней поверхности i -го слоя, причем $z_0 = -H/2$.

Следует отметить, что матрица мембранно-изгибных жесткостей $[B]$ будет ненулевой лишь в случае, когда структура пакета слоев несимметрична относительно срединной поверхности. При этом нагружение композита в плоскости слоев будет сопровождаться изгибом, а поперечное давление будет вызывать появление мембранных усилий. Такое свойство композитной конструкции существенно усложняет ее поведение под нагрузкой и увеличивает трудоемкость расчета. Более того, можно показать, что при прочих рав-

ных условиях композит с симметричным расположением слоев обладает бóльшей изгибной жесткостью (мембранная жесткость от порядка расположения слоев не зависит).

3 Оценка прочности композитов

При оценке прочностных характеристик многослойного композита предполагают, что его несущая способность исчерпывается при разрушении хотя бы одного монослоя. Данная процедура сводится к нахождению компонент напряжений в каждом слое с учетом ориентации волокон в нем, т.е. в местной системе координат $(1, 2)$, и применению к каждому слою какого-либо феноменологического критерия разрушения при сложном напряженном состоянии. В подавляющем большинстве случаев можно считать, что каждый монослой работает в условиях плоского напряженного состояния. Поэтому здесь обычно приходится учитывать лишь три компоненты σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} .

При феноменологическом подходе неоднородный композит (в данном случае монослой) рассматривается как сплошная среда (однородный анизотропный материал), математическая модель которой максимально учитывает опытные данные о прочности. Феноменологические критерии разрушения не выводятся аналитически, они постулируются или предлагаются на основе обобщения результатов экспериментов.

Проведение таких экспериментов (особенно при различных комбинациях σ_{11} , σ_{22} и σ_{12}) является весьма сложной и дорогостоящей технической задачей. Поэтому обычно здесь ограничиваются нахождением пределов прочности при одноосном нагружении.

Геометрически критерий разрушения можно интерпретировать как некоторую предельную поверхность в пространстве напряжений, т.е. условия разрушения выполняются в тот момент, когда заданный вектор напряжений пересекает эту поверхность, называемую поверхностью прочности.

Предложено много разновидностей критериев разрушения анизотропных тел. Простейшим из них является критерий максимальных напряжений, в основе которого лежит гипотеза о том, что различные виды разрушения взаимно независимы, и разрушение наступает тогда, когда предельных значений достигают в отдельности напряжения σ_{11} , σ_{22} и σ_{12} . При этом условие прочности имеет вид

$$\begin{cases} \sigma_{1B}^- < \sigma_{11} < \sigma_{1B}^+ \\ \sigma_{2B}^- < \sigma_{22} < \sigma_{2B}^+ \\ |\sigma_{12}| < \sigma_{12B} \end{cases} \quad (9)$$

Поверхностью прочности здесь является прямоугольный параллелепипед (рисунок 3).

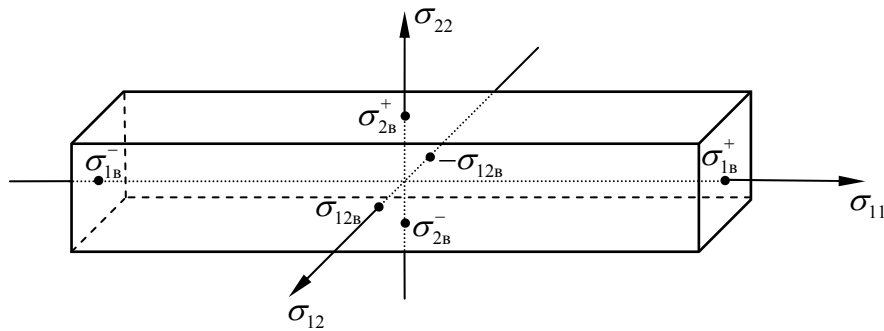


Рисунок 3 – Поверхность прочности критерия максимальных напряжений

Следует отметить, что среди феноменологических критериев разрушения наиболее общей является тензорно-полиномиальная формулировка. В матричных обозначениях для случая плоского напряженного состояния при удержании лишь линейных и квадратичных членов она имеет вид

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (10)$$

где σ_i – матричные обозначения компонент тензора напряжений (т.е. $\sigma_1 = \sigma_{11}$, $\sigma_2 = \sigma_{22}$ и $\sigma_3 = \sigma_{12}$); F_i , F_{ij} – матричные обозначения компонент тензоров поверхности прочности второго и четвертого рангов соответственно. Здесь опущены знаки суммирования по повторяющимся индексам.

Учитывая, что для монослоя оси координат 1 и 2 являются главными осями ортотропии, формулировку критерия (10) можно дополнительно упростить за счет специальных условий симметрии. В итоге приходим к критерию разрушения Цзя-Ву, который является в настоящее время одним из наиболее используемых в мире. В развернутой форме он имеет вид

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{33} \sigma_3^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1, \quad (11)$$

где

$$F_1 = \frac{1}{\sigma_{1B}^+} + \frac{1}{\sigma_{1B}^-}; \quad F_2 = \frac{1}{\sigma_{2B}^+} + \frac{1}{\sigma_{2B}^-};$$

$$F_{11} = -\frac{1}{\sigma_{1B}^+ \sigma_{1B}^-}; \quad F_{22} = -\frac{1}{\sigma_{2B}^+ \sigma_{2B}^-}; \quad F_{33} = \frac{1}{\sigma_{12B}^2};$$

коэффициент F_{12} , характеризующий взаимное влияние напряжений σ_{11} и σ_{22} на прочность материала, находится из экспериментов при двухосном напряженном состоянии. Необходимость экспериментального определения смешанного коэффициента F_{12} является наиболее неприятной особенностью данного критерия.

Следует отметить, что уравнение (11) описывает поверхность прочности в виде эллипсоида (рисунок 4).

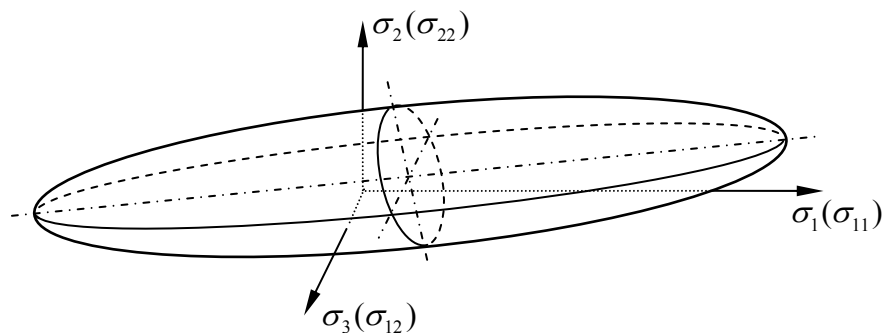


Рисунок 4 – Поверхность прочности критерия Цзя-Ву

Оценка прочности с использованием критерия Цзя-Ву выполняется следующим образом. Вычисляется выражение, стоящее в левой части уравнения (11). Если полученное значение меньше единицы, то условие прочности удовлетворяется. В противном случае происходит разрушение материала.

4 Типы элементов, используемые в программе ANSYS для моделирования композитов

Программа ANSYS использует для моделирования композиционных материалов специализированные элементы, называемые слоистыми (layered): SHELL99, SHELL91, SHELL181, SHELL281, SOLSH190, SOLID46, SOLID191, а также SOLID185 и SOLID186 с опцией «слоистое тело».

SHELL99 – линейный элемент слоистой оболочки. Он имеет восемь узлов (т.е. является элементом второго порядка) и шесть степеней свободы в каждом узле (рисунок 5). Данный элемент предназначен для моделирования тонких и умеренно толстых пластин и оболочек с отношением длины стороны к толщине равным 10 или более. SHELL99 позволяет с помощью реальных постоянных задавать до 250 слоев постоянной толщины или до 125 сло-

ев переменной толщины. В последнем случае толщина может изменяться по линейному закону в каждом из двух направлений. Кроме того, имеется возможность ручного ввода (также с помощью реальных постоянных) матриц жесткостных характеристик пакета, которые могут представлять неограниченное число слоев. У данного элемента есть опция выбора узловой поверхности. Узлы здесь могут располагаться на срединной (по умолчанию), нижней или верхней поверхности элемента.

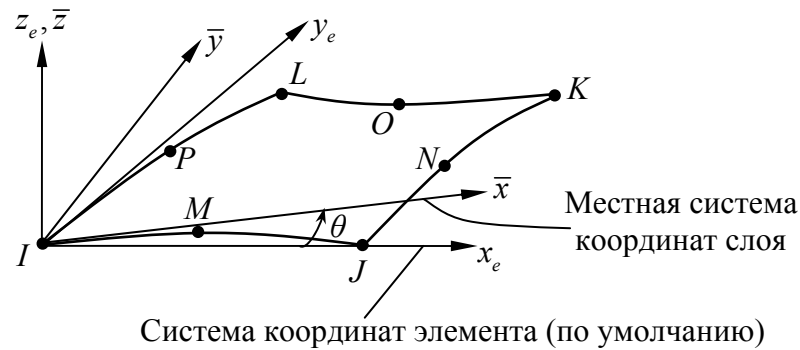
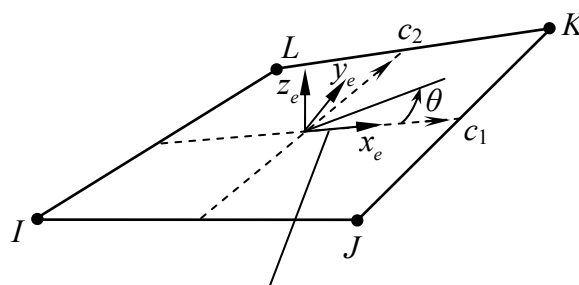


Рисунок 5 – Элемент SHELL99

SHELL91 – нелинейный элемент слоистой оболочки. Этот элемент аналогичен предыдущему за исключением того, что он позволяет задавать максимум 100 слоев и не имеет возможности ручного ввода матриц жесткостных характеристик пакета. Однако SHELL91 поддерживает учет пластичности, больших деформаций и имеет специальную опцию трехслойной конструкции с легким наполнителем (sandwich). Кроме того, данный элемент лучше описывает поведение конструкции при больших перемещениях.

SHELL181 – элемент оболочки с конечными деформациями. Он имеет четыре узла, в каждом из которых определены также шесть степеней свободы (рисунок 6). Данный элемент позволяет учитывать полный набор нелинейных эффектов, включая большие (конечные) деформации. Для определения слоистой конфигурации здесь используются не реальные постоянные (как для предыдущих элементов), а специальные средства создания поперечных сечений. При этом можно задавать до 255 слоев.

SHELL281 отличается от SHELL181 лишь тем, что он является элементом второго порядка и, следовательно, имеет восемь узлов.



Система координат элемента (по умолчанию)

Рисунок 6 – Элемент SHELL181

SOLSH190 – элемент слоистой объемной оболочки. Он имеет форму обычного объемного элемента первого порядка и содержит восемь узлов с тремя поступательными степенями свободы в каждом из них. Однако его система координат определяется так же, как у оболочечного элемента. Благодаря применению специальной технологии исключения ложных сдвигов SOLSH190 может использоваться для моделирования оболочечных конструкций с широким диапазоном толщин. Слоистая конфигурация здесь определяется не с помощью реальных постоянных, а также с использованием средств создания поперечных сечений.

SOLID46 – элемент слоистого трехмерного тела. Это шестигранный элемент первого порядка с восемью узлами, имеющими по три степени свободы (рисунок 7). Данный элемент предназначен для моделирования толстых пластин и оболочек, а также трехмерных тел из композиционных материалов. Он позволяет задавать с использованием реальных постоянных до 250 слоев постоянной толщины или до 125 слоев переменной толщины. В последнем случае толщина может изменяться по линейному закону в каждом из двух направлений. Для представления более 250 слоев здесь можно взять несколько элементов по толщине конструкции. Кроме того, такой подход позволяет отказаться от единой для всего пакета слоев кинематической гипотезы и перейти к гипотезе ломаной линии. Здесь также имеется возможность ручного ввода матриц жесткостных характеристик пакета.

SOLID191 в основном аналогичен типу SOLID46, но является элементом второго порядка (с 20 узлами) и позволяет задавать до 100 слоев постоянной толщины.

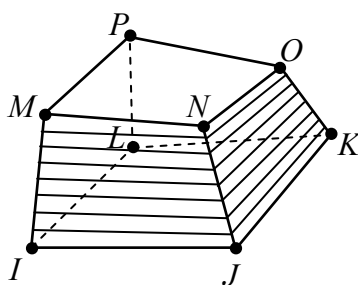


Рисунок 7 – Элемент SOLID46

SOLID185 – элемент трехмерного тела. Это объемный элемент первого порядка с восемью узлами, позволяющий учитывать практически все виды нелинейностей. Он имеет две формулировки: элемент однородного тела (KEYOPT(3) = 0, по умолчанию) и элемент слоистого тела (KEYOPT(3) = 1). При выборе второй формулировки слоистая конфигурация здесь определяется не с помощью реальных постоянных, а с использованием средств создания поперечных сечений.

SOLID186 отличается от SOLID185 лишь тем, что он является элементом второго порядка и, следовательно, имеет 20 узлов.

В заключение следует отметить, что в последнее время разработчики программы ANSYS идут по пути сокращения библиотеки конечных элементов. Так, например, начиная с версии Release 13, из всех слоистых элементов поддерживаются только SHELL181, SHELL281, SOLSH190, SOLID185 и SOLID186.

5 Определение слоистой конфигурации

Важнейшей характеристикой композиционного материала является его слоистая конфигурация (или структура пакета слоев). Слои могут быть изготовлены из различных ортотропных материалов и могут иметь разную толщину и ориентацию главных осей ортотропии. Очевидно, что для волокнистых композитов ориентация слоя определяется направлением волокон.

В программе ANSYS слоистую конфигурацию можно задавать двумя способами:

- путем описания свойств отдельных слоев;
- путем определения матриц жесткостных характеристик пакета.

Последний способ в дальнейшем не рассматривается, поскольку он является достаточно трудоемким (требующим ручного ввода большого количе-

ства исходных данных) и доступен лишь для элементов SHELL99 и SOLID46.

При использовании первого способа слоистая конфигурация определяется послойно снизу вверх в положительном направлении нормальной оси z_e системы координат элемента. Нижний слой получает номер 1, следующий – 2 и т.д., как показано на рисунке 8. При наличии симметрии слоев относительно срединной поверхности ANSYS позволяет определять лишь половину слоев.

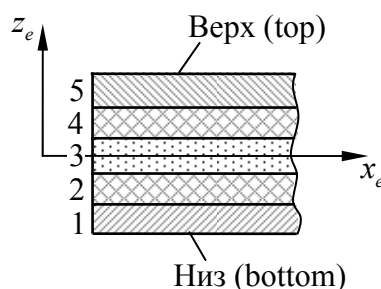


Рисунок 8 – Порядок нумерации слоев

Следует отметить, что элементы SHELL99, SHELL91, SOLID46 и SOLID191 получают свою слоистую конфигурацию через атрибут REAL (номер набора реальных постоянных), а элементы SHELL181, SHELL281, SOLSH190, SOLID185 и SOLID186 – через атрибут SECNUM (номер сечения).

При использовании таблицы реальных постоянных (*Main Menu* > *Preprocessor* > *Real Constants*) для каждого слоя определяются следующие свойства:

- свойства материала (посредством ссылки на номер материала MAT);
- угол ориентации слоя (THETA);
- толщина слоя (TK).

При использовании средств создания поперечных сечений для оболочек (*Main Menu* > *Preprocessor* > *Sections* > *Shell* > *Lay-up* > *Add/Edit*) появляется диалоговая панель, представленная на рисунке 9. Требуемая информация по каждому слою здесь в основном аналогична предыдущей: в столбце «Thickness» задается толщина слоя; в столбце «Material ID» выбирается номер определенного ранее материала; в столбце «Orientation» определяется угол ориентации слоя в градусах. Кроме этих свойств следует также в столбце «Inte-

gration Pts» указать еще число точек интегрирования по толщине слоя. Чем больше слоев, тем меньше требуется таких точек. По умолчанию их три. И, наконец, последний столбец «Pictorial View» предназначен для наглядного представления слоя, причем штриховка указывает направление армирования, а цвет – материал. Для добавления нового слоя здесь используется кнопка *Add Layer*, а для удаления существующего – *Delete Layer*.

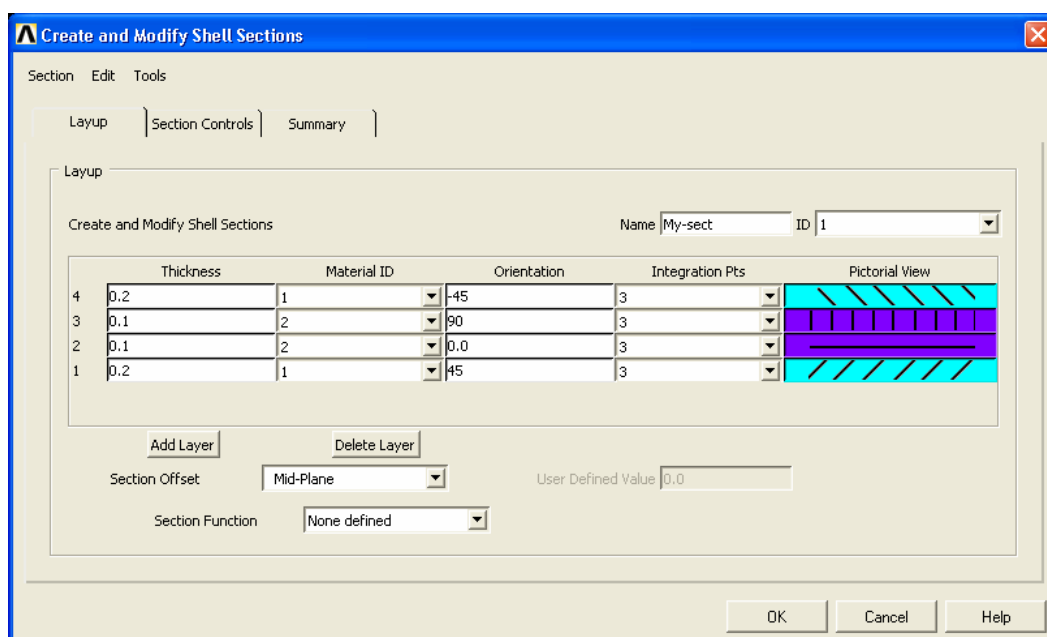


Рисунок 9 – Средства создания поперечных сечений

Помимо перечисленных выше действий в поле «Name» можно указать имя сечения, что удобно для ссылки на него. В списке «Section Offset» задается положение узловой поверхности. По умолчанию она совпадает со средней поверхностью оболочки. При переменной толщине оболочки следует в списке «Section Function» выбрать имя построенной ранее таблицы, содержащей значения толщины в зависимости от глобальных декартовых координат.

В программе ANSYS предполагается, что главные направления материала совпадают с осями системы координат слоя, которая определяется системой координат элемента и углом ориентации слоя θ . Он представляет собой угол (в градусах) между осями x двух систем координат. По умолчанию система координат элемента зависит от порядка перечисления узлов (см. рисунок 5) либо связывается с параметрическим направлением s_1 узловой поверхности (см. рисунок 6). При этом если используется свободная сетка, то элементы будут иметь разную ориентацию своих систем координат. В таких

случаях для изменения систем координат элементов следует воспользоваться командой ESYS (*Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Default Attribs*). Отметим, что в качестве системы координат элементов нельзя указывать глобальную систему координат. Поэтому здесь предварительно требуется определить соответствующую локальную систему координат.

6 Задание критериев разрушения

Отметим, что все слоистые элементы позволяют оценивать прочность с помощью различных критериев разрушения (*failure criteria*). В программе ANSYS имеются три предопределенных критерия разрушения. К ним относятся следующие:

- 1) критерий *максимальных деформаций*, учитывающий девять разрушающих деформаций;
- 2) критерий *максимальных напряжений*, учитывающий девять разрушающих напряжений (пределов прочности);
- 3) критерий *Цая-Ву*, учитывающий девять разрушающих напряжений и три дополнительных смешанных коэффициента, характеризующих взаимное влияние напряжений на прочность материала.

Кроме того, пользователь с помощью специальных подпрограмм может задать до шести своих собственных критериев разрушения.

В программе ANSYS при оценке прочности композитов учитываются все компоненты тензора напряжений (или деформаций). При этом используются следующие обозначения:

σ_{xt}^f – разрушающее напряжение при растяжении в направлении оси x материала (должно быть положительным);

σ_{xc}^f – разрушающее напряжение при сжатии в направлении оси x материала (может быть отрицательным; по умолчанию равно $-\sigma_{xt}^f$);

σ_{yt}^f – разрушающее напряжение при растяжении в направлении оси y материала (должно быть положительным);

σ_{yc}^f – разрушающее напряжение при сжатии в направлении оси y материала (может быть отрицательным; по умолчанию равно $-\sigma_{yt}^f$);

σ_{zt}^f – разрушающее напряжение при растяжении в направлении оси z материала (должно быть положительным);

σ_{zc}^f – разрушающее напряжение при сжатии в направлении оси z материала (может быть отрицательным; по умолчанию равно $-\sigma_{zt}^f$);

σ_{xy}^f – разрушающее напряжение при сдвиге в плоскости xu материала (должно быть положительным);

σ_{yz}^f – разрушающее напряжение при сдвиге в плоскости uz материала (должно быть положительным);

σ_{xz}^f – разрушающее напряжение при сдвиге в плоскости xz материала (должно быть положительным);

C_{xy} – коэффициент взаимного влияния в плоскости xu для теории Цая-Ву (по умолчанию равен -1);

C_{yz} – коэффициент взаимного влияния в плоскости uz для теории Цая-Ву (по умолчанию равен -1);

C_{xz} – коэффициент взаимного влияния в плоскости xz для теории Цая-Ву (по умолчанию равен -1).

Коэффициенты взаимного влияния Цая-Ву могут принимать значения от -2 до 2 , однако рекомендуемые значения лежат в диапазоне от -1 до 0 . При анализе плоского напряженного состояния следует установить σ_{zt}^f , σ_{zc}^f , σ_{yz}^f и σ_{xz}^f на несколько порядков больше, чем σ_{xt}^f , σ_{xc}^f или σ_{xy}^f , а коэффициенты C_{yz} и C_{xz} положить равными нулю.

Вводить информацию по критериям разрушения можно как в препроцессоре (*Main Menu > Preprocessor > Material Props > Failure Criteria > Add/Edit*), так и после выполнения анализа в общем постпроцессоре (*Main Menu > General Postproc > Failure Criteria > Add/Edit*).

При использовании критерия максимальных напряжений определяется максимальное отношение различных компонент тензора напряжений в системе координат материала к соответствующим разрушающим напряжениям. Если данное значение меньше единицы, то условие прочности удовлетворяется.

В программе ANSYS предусмотрены два метода вычисления критерия Цая-Ву. Первый, называемый «strength index» (показатель прочности), использует стандартную запись данного критерия (см., например, уравнение (11) для случая плоского напряженного состояния). Значение выражения, стоящего в левой части уравнения, и принимается в качестве значения критерия.

рия разрушения. Так как критерий Цая-Ву является квадратичным, по данной величине сложно судить о том, насколько действующая нагрузка близка к разрушающей. Второй метод, называемый «inverse strength ration» (инверсия коэффициента запаса прочности), лишен этого недостатка.

Рассчитанные значения по различным критериям разрушения можно просматривать в общем постпроцессоре, используя обычные приемы.

КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ

1 Классификация контактных взаимодействий

Контактные задачи являются существенно нелинейными и требуют значительных ресурсов компьютера. При их решении возникает ряд проблем. Основная из них заключается в том, что истинное пятно контакта до решения задачи, как правило, неизвестно. В зависимости от нагрузок, свойств материала и граничных условий тела могут входить в контакт и выходить из него внезапно и непредсказуемо. Другая проблема заключается в необходимости учета трения. Существует несколько видов трения и соответствующих им моделей, и все они являются нелинейными. Следует отметить, что если трение учитывать не требуется и зона взаимодействия тел является фиксированной, вместо решения контактной задачи можно просто связать соответствующие степени свободы (couple DOFs).

Контактные задачи делятся на два основных класса: 1) взаимодействие жесткого (rigid) и деформируемого (flexible) тел и 2) взаимодействие двух деформируемых тел. Задача может быть отнесена к первому классу, если относительно нежесткий материал контактирует с более твердым (как, например, при штамповке металлов и т.п.). Во втором случае оба контактирующих тела считаются деформируемыми, т.е. имеющими сопоставимые жесткости (примером здесь может служить фланцевое или резьбовое соединение и т.п.).

В программе ANSYS имеются три основные модели контакта (узел – узел, узел – поверхность, поверхность – поверхность) и две дополнительные (линия – линия, линия – поверхность).

Эти модели используют разные наборы контактных элементов и применяются для разных задач.

При решении контактных задач, прежде всего, требуется определить объекты (части конструктивных элементов), которые могут участвовать в контактном взаимодействии. Если один из взаимодействующих объектов точка, то соответствующим ей компонентом конечно-элементной модели является узел. Если же в контакт вступает поверхность, ей соответствуют конечные элементы твердого тела, оболочки или балки. Конечно-элементная модель распознает контактные пары (contact pair) при наличии специальных контактных элементов, которые накладываются на те части модели, где ищется контактное взаимодействие.

2 Контактные элементы

Модель «узел – узел» применяется для идеализации точечного контакта и представляется одним контактными элементом. Очевидно, что при использовании таких элементов необходимо заранее знать расположение контактирующих объектов, причем относительное скольжение между ними должно быть незначительным. Примером применения контакта узла с узлом является традиционная модель биения трубы, где контактирующие точки неизменно расположены между трубой и ограничителем.

К контактными элементам типа «узел – узел» в программе ANSYS относятся двухмерный CONTACT12, трехмерный CONTACT52 и универсальный CONTACT178 элементы. CONTACT178 обладает большими возможностями по сравнению с остальными. Его можно использовать при решении как двухмерных, так и трехмерных задач. Каждый из перечисленных выше элементов определяется двумя узлами и поступательными перемещениями в них (рисунок 1).

Данные элементы могут также использоваться для расчета контакта поверхности с поверхностью, если узлы двух поверхностей выровнены и их относительные перемещения скольжения пренебрежимо малы.

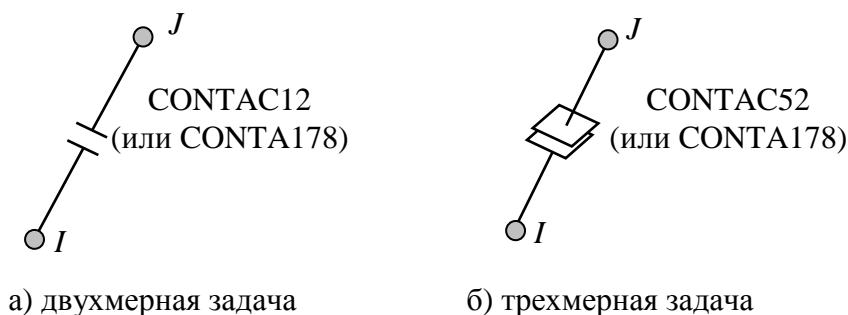


Рисунок 1 – Модель контакта «узел – узел»

Модель контакта «узел – поверхность» обычно используется для представления контакта точки с поверхностью. Такая ситуация возникает, например, при анализе контактного взаимодействия двух балок, элементов крепежа с деталью в соединениях с зазором и т.п.

В программе ANSYS контакт «узел – поверхность» моделируется двумя типами элементов. При этом узел связывается с контактными элементом CONTACT175, а поверхность покрывается сеткой так называемых элементов

ответной поверхности TARGE169 для двухмерной задачи или TARGE170 для трехмерной (рисунок 2).

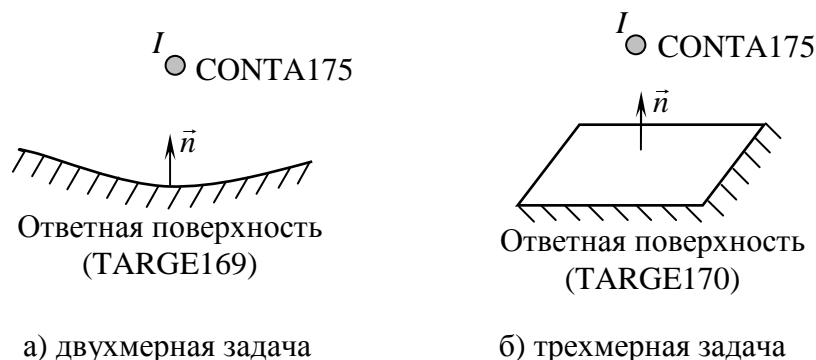


Рисунок 2 – Модель контакта «узел – поверхность»

В асимметричной модели контакта «поверхность – поверхность» одна из поверхностей выбирается в качестве контактной (contact), а другая – целевой, или ответной (target).

Для представления контактной поверхности используются следующие элементы: двухмерный линейный 2-узловой CONTA171; двухмерный линейный 3-узловой CONTA172; трехмерный поверхностный 4-узловой CONTA173; трехмерный поверхностный 8-узловой CONTA174. Ответная поверхность так же, как и в предыдущем случае моделируется элементами TARGE169 или TARGE170 (рисунок 3).

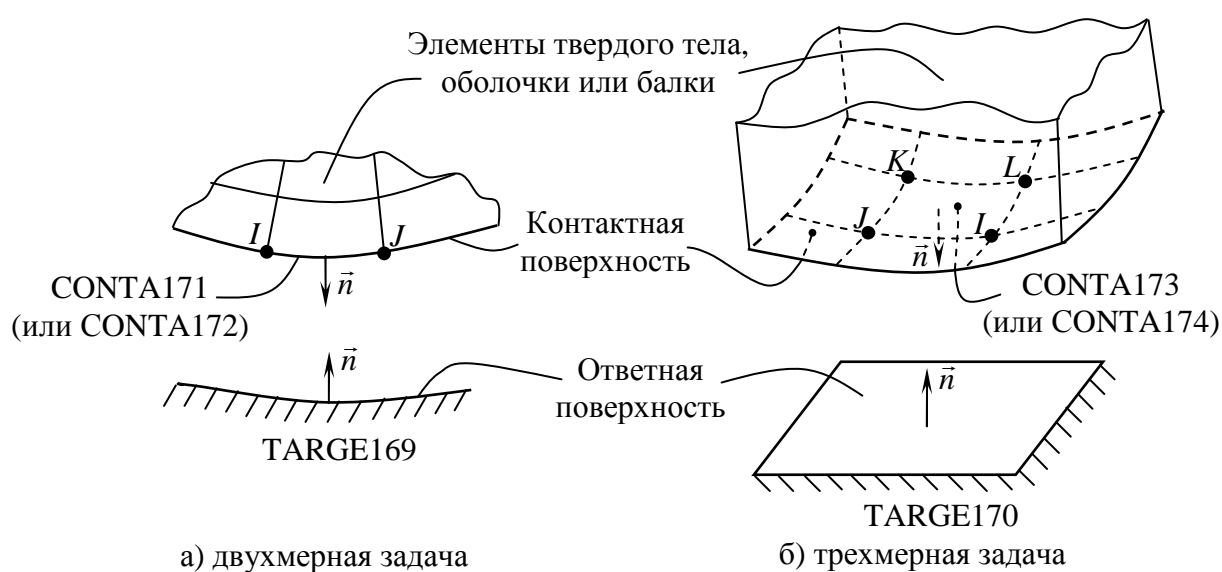


Рисунок 3 – Модель контакта «поверхность – поверхность»

Модель контакта «поверхность–поверхность» хорошо подходит для таких задач, как расчет начальных натягов при сборке деталей, внедрение тел, обработка металлов давлением, глубокая вытяжка и т.п. Данная модель по сравнению с предыдущей имеет ряд преимуществ. Так, она позволяет эффективно учитывать большие перемещения с явно выраженным скольжением.

Следует отметить, что контактная и ответная поверхности являются неравнозначными. Контактные элементы имеют ограничения от проникновения в ответную поверхность, однако ответные элементы могут свободно проникать через контактную поверхность.

При моделировании взаимодействия жесткого и деформируемого тел в качестве абсолютно жесткой всегда выступает ответная поверхность. Недеформируемую ответную поверхность в двухмерных задачах можно представлять совокупностью отрезков прямых линий, дуг окружностей и парабол, а в трехмерных задачах – в виде набора треугольников, четырехугольников, цилиндров, конусов и сфер.

При описании контакта двух деформируемых тел выбор поверхностей, указываемых в качестве контактной и ответной, влечет разное проникновение и, таким образом, влияет на точность решения. При выборе данных поверхностей можно руководствоваться следующими правилами:

- если ожидается, что выпуклая поверхность входит в контакт с плоской или вогнутой поверхностью, то последняя должна использоваться в качестве ответной;
- если обе контактирующие поверхности выпуклые, то за ответную следует принять менее выпуклую поверхность;
- если обе поверхности являются плоскими, то выбор контактной и ответной поверхностей произволен;
- если одна поверхность содержит острое ребро, а другая не имеет его, то в качестве контактной нужно выбирать первую поверхность;
- если одна поверхность имеет относительно грубую сетку, а другая – подробную, то поверхность с грубой сеткой должна быть ответной, а с подробной сеткой – контактной.
- если одна поверхность значительно жестче другой, то более податливая поверхность должна служить контактной, а более жесткая – ответной;
- если одна поверхность существенно больше другой, то более протяженная поверхность должна быть ответной.

В сложных случаях, например, когда обе поверхности содержат острые ребра или являются рифлеными (волнистыми), полезно создавать так называемый симметричный контакт. Здесь каждую поверхность следует назначить и контактной, и ответной, что требует задания двух контактных пар. При этом сначала определяется одна контактная пара, а затем другая, где ответная и контактная поверхности меняются местами. Очевидно, что такой подход значительно увеличивает время счета.

Отметим, что для балочных и оболочечных элементов контактные поверхности могут располагаться с обеих сторон для моделирования двухстороннего контакта.

На шаге идентификации контактных пар требуется выделить зоны, где при деформировании модели возможен контакт. Для повышения эффективности расчета (т.е. уменьшения времени счета) контактная зона не должна быть слишком большой.

После определения контактирующих поверхностей для каждой контактной пары создаются ответные и контактные элементы, которые будут отслеживать кинематику процесса деформирования. При этом контактные элементы, представляющие контактную поверхность, должны иметь те же самые геометрические размеры, что и лежащие под ними конечные элементы деформируемого тела (т.е. они должны иметь с ними общие узлы на гранях). Аналогично генерируются ответные элементы, представляющие деформируемую ответную поверхность.

Для правильного задания контакта нормали \vec{n} ответных и контактных элементов должны быть направлены наружу (т.е. на встречу друг друга), как показано на рисунке 3. При использовании элементов твердого тела данное условие выполняется, как правило, автоматически. Однако для балочных и оболочечных моделей пользователь сам должен позаботиться о правильной ориентации нормалей.

Ответные и контактные элементы, составляющие каждую контактную пару, связываются друг с другом посредством общего набора реальных постоянных. Различные контактные пары должны определяться разными номерами наборов реальных постоянных, даже если значения их геометрических характеристик не отличаются.

В случае, когда несколько ответных поверхностей взаимодействуют с одной и той же контактной поверхностью (или наоборот), следует определять

несколько контактных пар с различными номерами реальных постоянных путем использования совпадающих ответных (или контактных) элементов.

Программа ANSYS контролирует состояние каждого контактного элемента (т.е. его расположение относительно связанной с ним ответной поверхности) при помощи параметра STAT, который может принимать следующие значения:

- STAT = 0 – открытый контакт (вдали от контактной зоны);
- STAT = 1 – состояние, близкое к контакту;
- STAT = 2 – контакт со скольжением;
- STAT = 3 – контакт с прилипанием.

По умолчанию точки определения контакта расположены не в узлах контактных элементов, а в их точках интегрирования по Гауссу. Считается, что контактный элемент имеет состояние, близкое к контакту, если его точки интегрирования входят в область контакта (pinball), которая центрируется по узлам соответствующего ответного элемента. Программа ANSYS по умолчанию определяет контактную область как круг (в двумерных задачах) или сферу (в трехмерных задачах) радиусом в две глубины прилегающих основных конечных элементов (рисунок 4). При моделировании контакта жесткого и деформируемого тел радиус увеличивается до четырех глубин основных элементов.

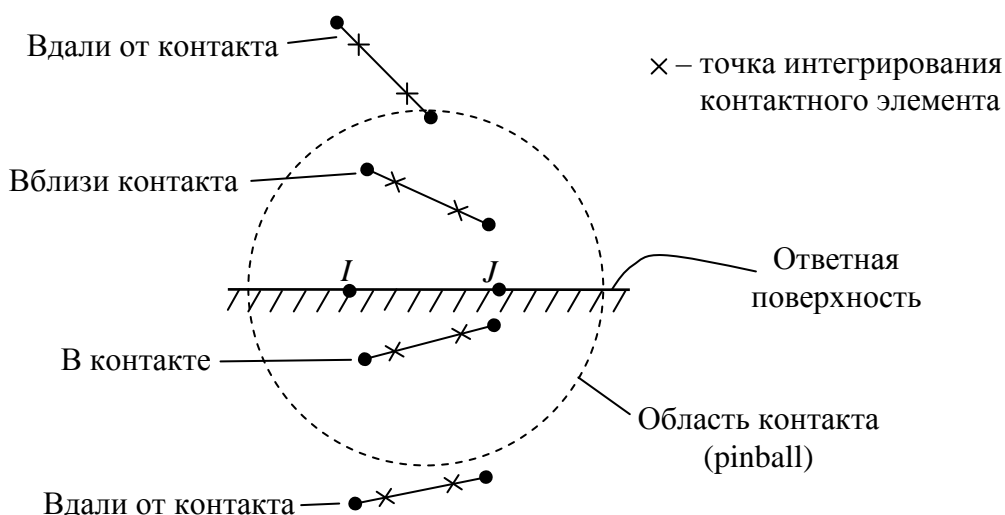



Рисунок 4 – К определению состояния контакта

Время решения задачи зависит от размера области контакта. Вычисления для удаленных от контакта элементов просты и не требуют больших ре-

сурсов компьютера. Вычисления для элементов, близких к контакту, сложнее и проводятся медленнее. И, наконец, наиболее трудоемкие расчеты выполняются для элементов, участвующих в контакте.

В программе ANSYS решение контактной задачи (как и любой другой нелинейной) проводится шагово-итерационным методом последовательных нагружений. При этом следует обратить внимание на то, что если размер шага по времени (т.е. подшага) является достаточно большим, таким что перемещения контактного элемента превышают размер области контакта, то данный элемент может свободно пройти через ответную поверхность.

3 Использование Мастера контактов

Реализованные в виде набора диалоговых панелей средства Мастера контактов «Contact Wizard» обеспечивают простой способ создания контактных пар для большинства контактных задач, встречающихся в инженерной практике. Мастер контактов запускается нажатием одноименной кнопки диалоговой панели Менеджера контактов «Contact Manager» (рисунок 5), вызываемого последовательностью *Main Menu>Preprocessor>Create>Contact Pair* либо кнопкой  пиктографического меню программы ANSYS (предварительно нужно войти в модуль препроцессора).

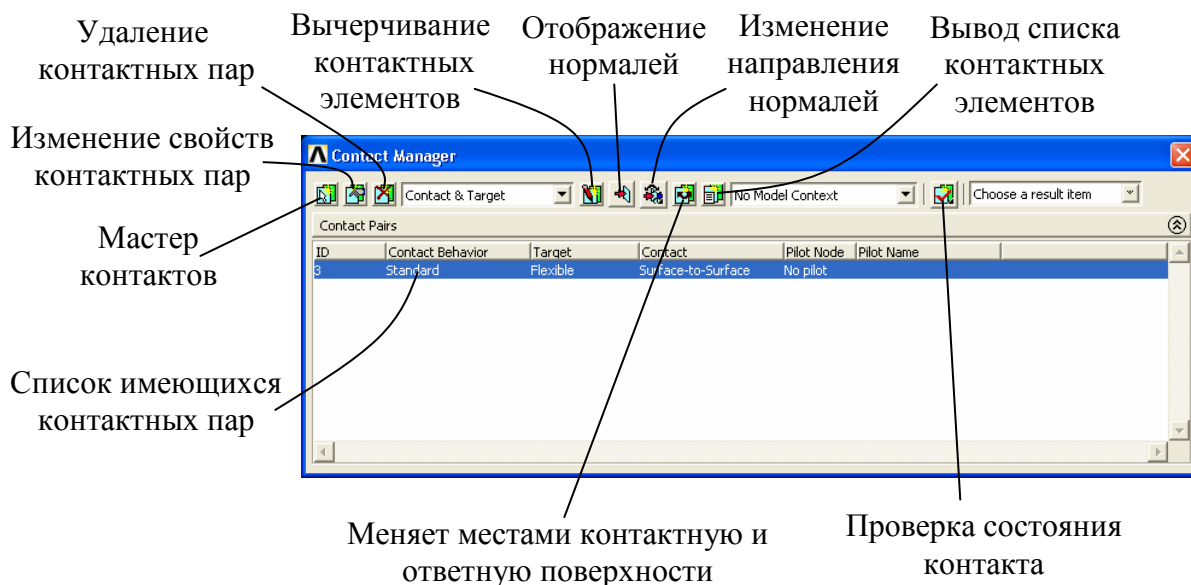


Рисунок 5 – Менеджер контактов

Следует отметить, что перед запуском Мастера контактов необходимо разбить на конечные элементы те части модели, которые относятся к дефор-

мируемому телу. Сетка на ответных абсолютно жестких поверхностях не строится.

Мастер контактов «Contact Wizard» для создания каждой контактной пары последовательно отображают на экране ряд диалоговых панелей, вид которых зависит от мерности решаемой задачи. Следует подчеркнуть, что фактически пара создаются только после удовлетворения всем требованиям и нажатия кнопки *Create*. До этого момента в любой панели можно для прекращения данного процесса нажать кнопку *Cancel*. Кроме того, с помощью кнопки *Back* можно вернуться к предыдущим диалоговым панелям и изменить указанные в них параметры.

Первым шагом при создании контактной пары является указание ответной поверхности. Соответствующая диалоговая панель приведена на рисунке 6 (где объемная картинка слева говорит о том, что задача является трехмерной).

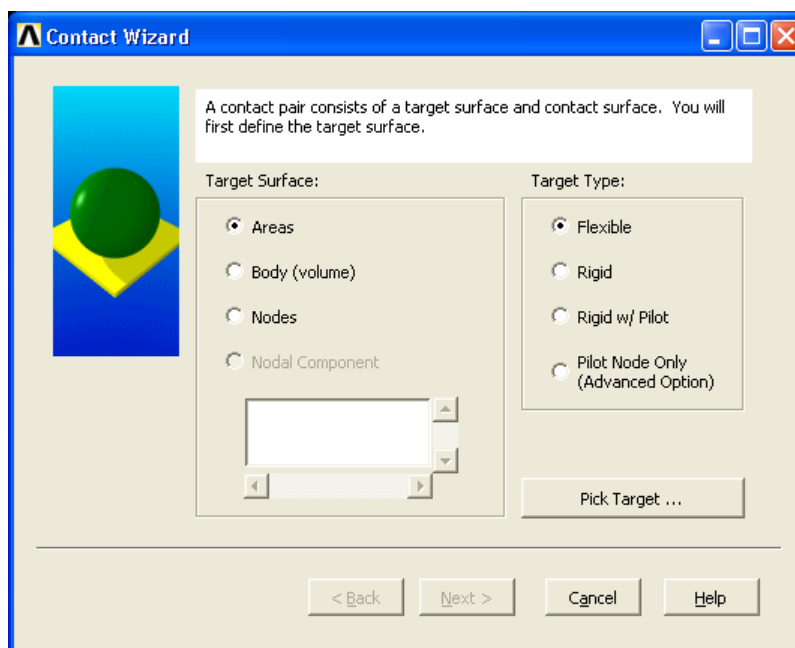


Рисунок 6 – Определение ответной поверхности

Для реализации первого шага требуется выполнить следующие действия:

1. В разделе «Target Surface» выбрать тип объектов, которые будут использоваться для определения ответной поверхности. Она может представляться линиями (Lines) в двухмерных моделях или поверхностями (Areas) в трехмерных моделях, а также телом (Body), узлами (Nodes) и содержащим

узлы компонентом (Nodal Component). Если объекты какого-либо типа отсутствуют в модели, то соответствующие им опции будут недоступными.

2. В разделе «Target Type» указать тип ответной поверхности. Для деформируемой ответной поверхности здесь следует выбрать опцию Flexible, а для абсолютно жесткой – Rigid.

3. Нажать кнопку *Pick Target*. При этом появляется стандартная панель указания, позволяющая выбирать объекты непосредственно в рабочем окне. Для завершения процесса указания объектов здесь следует нажать *Apply*, а не *OK*, поскольку в противном случае кнопка *Next* будет неактивной.

4. Нажать кнопку *Next* для перехода к следующему шагу.

После определения ответной поверхности появляется другая диалоговая панель, предназначенная для указания контактной поверхности (рисунок 7).

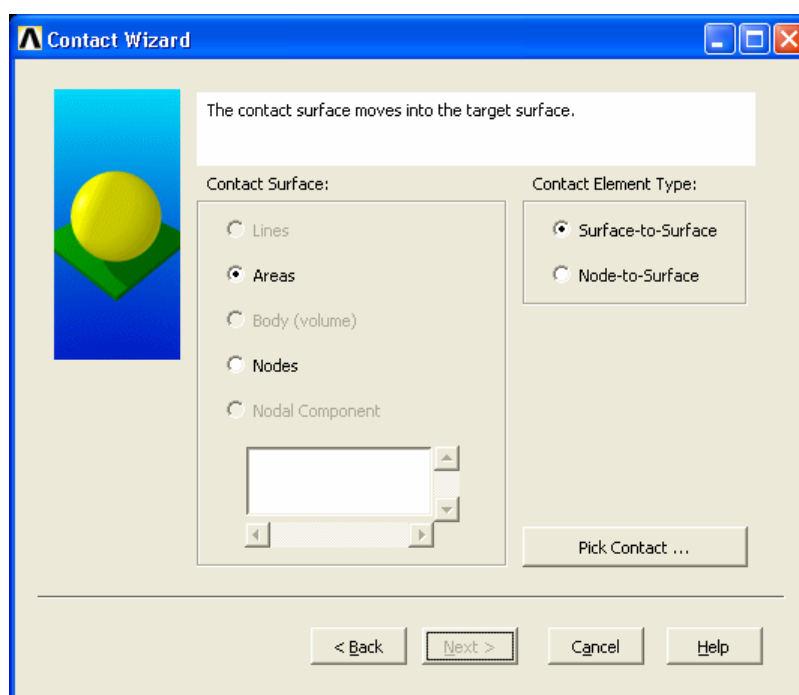


Рисунок 7 – Определение контактной поверхности

Порядок действий здесь аналогичен предыдущему:

1. В разделе «Contact Surface» выбрать тип объектов, которые будут использоваться для определения контактной поверхности. Она может представляться линиями (Lines), поверхностями (Areas), телом (Body), узлами (Nodes) и содержащим узлы компонентом (Nodal Component).

2. В разделе «Contact Element Type» указать тип модели контакта. Для модели «поверхность – поверхность» здесь следует выбрать опцию Surface-to-Surface, а для модели «узел – поверхность» – Node-to-Surface.

3. Нажать кнопку *Pick Target* и указать соответствующие объекты мышью в рабочем окне. В конце нажать *Apply*.

4. Нажать кнопку *Next* для перехода к следующему шагу.

Следующим шагом является задание параметров контакта, т.е. свойств контактной пары, формирующих набор реальных постоянных и опции контактных элементов. Соответствующая диалоговая панель показана на рисунке 8.

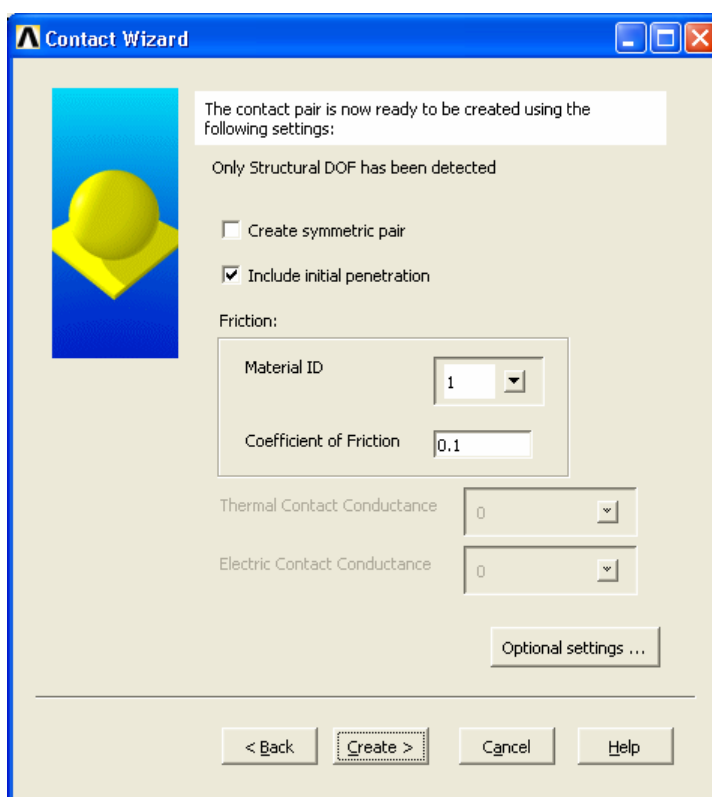


Рисунок 8 – Задание параметров контакта

В сложных случаях (когда неочевидно, какую поверхность следует выбрать в качестве ответной, а какую – в качестве контактной) здесь можно установить флаг «Create symmetric pair» для создания симметричного контакта. При этом вместо одной будут построены две контактные пары.

Для учета начального внедрения (например, натяга) необходимо включить опцию «Include Initial Penetration».

Для задания трения нужно в разделе «Friction» в списке «Material ID» указать номер материала, коэффициент трения которого будет использоваться

ся в расчетах (если он определен). При явном вводе значения коэффициента трения в поле «Coefficient of Friction», именно, оно будет применяться в дальнейшем.

При нажатии кнопки *Optional settings* (дополнительные параметры) появляется новая диалоговая панель с большим количеством вкладок, содержащих расширенный набор параметров контакта (рисунок 9). Для большинства контактных задач значения этих параметров оптимально устанавливаются по умолчанию самим Мастером контактов. Менять данные значения требуется лишь в редких случаях. Например, для устранения зазора между ответной и контактной поверхностью путем сдвига последней следует выбрать вкладку «Initial Adjustment» (начальное регулирование) и для параметра «Automatic contact adjustment» (автоматическое регулирование контакта) выбрать значение Close gap (закрывать зазор).

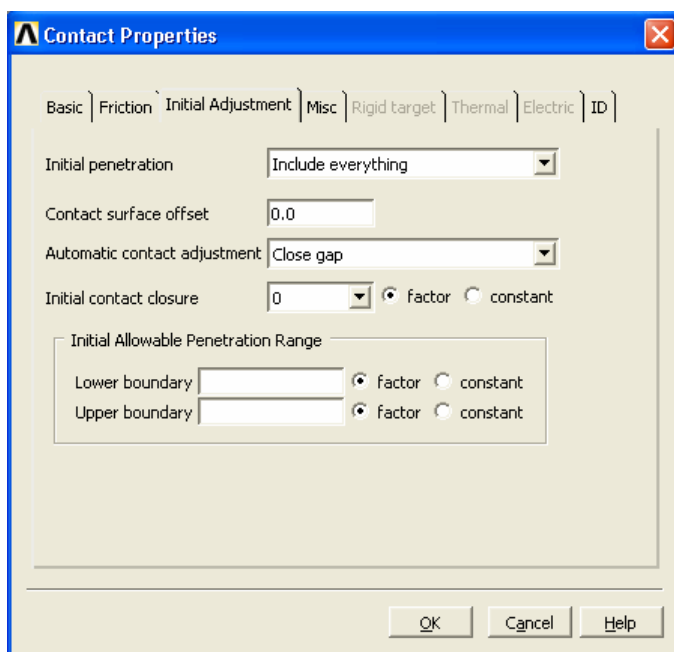


Рисунок 9 – Дополнительные параметры контакта

После задания параметров для создания собственно контактной пары необходимо воспользоваться кнопкой *Create* (см. рисунок 8).

В конце появляется информационное окно (рисунок 10), где констатируется факт создания контактной пары, указывается номер связанного с ней набора реальных постоянных и отмечается необходимость визуальной проверки на экране ориентации внешних нормалей к контактной и ответной поверхностям. Нормали к этим поверхностям должны указывать друг на друга (кроме случая начального внедрения). Если данное требование не выполня-

ется, то для изменения направления нормалей ответных элементов следует воспользоваться кнопкой *Flip Target Normals*, а контактных элементов – *Flip Contact Normals*. Завершается процесс создания контактной пары нажатием кнопки *Finish*.

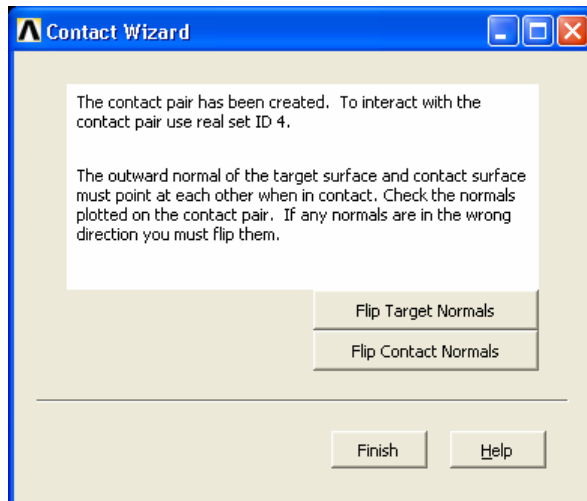


Рисунок 10 – Завершение процесса создания контактной пары

УЧЕТ ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

1 Основные понятия теории пластичности

Пластичностью называется свойство твердого тела изменять под внешними воздействиями, не разрушаясь, свою форму и размеры и сохранять остаточные (пластические) деформации после устранения этих воздействий. Пластичность материалов является одним из самых распространенных видов физической нелинейности.

1.1 Диаграммы деформирования

Для расчетов за пределами упругости необходимо располагать диаграммами деформирования материалов. Экспериментальные исследования механических свойств материалов при одноосном растяжении обычно обрабатывают в виде графиков зависимости напряжения σ от деформации ε . При этом силу P , растягивающую образец, относят к первоначальной площади сечения F_0 , а удлинение образца Δl – к первоначальной расчетной длине образца l_0 :

$$\sigma = \frac{P}{F_0}; \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (1)$$

т.е. не учитывают изменение площади поперечного сечения образца и предполагают равномерное его деформирование по длине. Поэтому график зависимости $\sigma - \varepsilon$ (рисунок 1), построенный с использованием формул (1), называют условной диаграммой растяжения (деформирования).

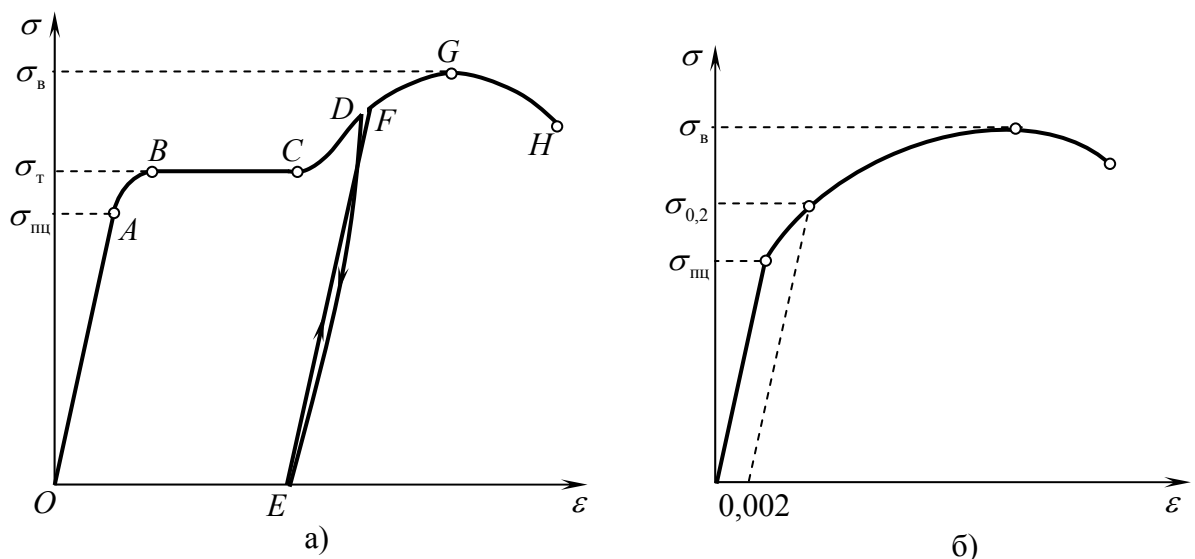


Рисунок 1 – Условные диаграммы растяжения

На участке OA (см. рисунок 1,а) материал деформируется линейно, т.е. справедлив закон Гука. Точка A соответствует так называемому пределу пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ и лежит несколько ниже предела упругости (точка B), после которого уже появляются остаточные деформации, и удлинения быстро увеличиваются. При этом часто обнаруживается характерная площадка текучести BC , когда образец удлиняется, а сила не увеличивается. Напряжение, соответствующее площадке BC , называется физическим пределом текучести σ_T .

Для некоторых материалов кривая растяжения лишена площадки текучести (см. рисунок 1,б) и иногда практически не имеет начального прямолинейного участка. В таких случаях вводят понятие условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ как напряжения, соответствующего остаточной деформации 0,2%.

Следует отметить, что в теории пластичности (как и в программе ANSYS) понятия пределов пропорциональности, упругости и текучести не различаются.

За площадкой текучести напряжение вновь начинает возрастать. Участок CG отвечает состоянию упрочнения материала. Если при этом нагрузку уменьшать, то кривая разгрузки DE в общем близка к прямой линии, причем последняя имеет такой же наклон, как и линия упругого участка OA . Такое поведение связано с тем, что при разгрузке деформация тела происходит благодаря накопленной им упругой потенциальной энергии. Величина остаточной деформации измеряется отрезком OE . Если повторно нагрузить образец, то кривая нагружения EF будет мало отличаться от линии DE . Таким образом, материал вследствие первоначальной вытяжки как бы приобретает упругие свойства и повышает предел текучести. Это явление называется упрочнением (наклепом).

Моменту образования шейки соответствует точка G . Далее удлиняется практически лишь область шейки, и диаметр уменьшается только здесь. По этой причине за точкой D сила P убывает, т.е. моменту образования шейки соответствует максимальная сила растяжения. Условное напряжение в этот момент называется временным сопротивлением разрыву σ_B . И, наконец, в точке H происходит разрыв образца.

Следует отметить, что при анализе больших (и особенно конечных) деформаций необходимо располагать действительной (истинной) диаграм-

мой деформирования. При этом растягивающую силу нужно относить к действительной площади поперечного сечения образца F :

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{F}. \quad (2)$$

Действительная площадь F может быть легко связана с первоначальной площадью F_0 , если приближенно принять, что объем элемента образца $F_0 dz$ при его деформации остается постоянным. Поскольку длина dz этого элемента после деформации равна $dz(1 + \varepsilon)$, а площадь поперечного сечения равна F , то согласно принятому допущению

$$F_0 dz = F dz(1 + \varepsilon),$$

откуда

$$F = \frac{F_0}{1 + \varepsilon}.$$

Подставляя эту величину в формулу (2), получаем зависимость действительного напряжения от условного

$$\bar{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon). \quad (3)$$

Кроме того, при нагружении образца приращения деформации необходимо вычислять по отношению к текущему (мгновенному) состоянию:

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l},$$

где l – текущая длина образца; dl – бесконечно малое ее изменение. Суммирование приводит к так называемой логарифмической деформации:

$$\bar{\varepsilon} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon). \quad (4)$$

Таким образом, действительная диаграмма деформирования материала выражает зависимость действительного напряжения $\bar{\sigma}$ от логарифмической деформации $\bar{\varepsilon}$. Следует отметить, что при $\varepsilon < 10\%$ различие между логарифмической и обычной деформациями незначительно (не превышает 5%).

1.2 Условия текучести

В теории пластического течения, получившей наибольшее распространение, в основе уравнений состояния пластически деформируемой сплошной среды лежат:

- условия текучести (или пластичности);

- условия упрочнения;
- закон течения.

В случае одноосного растяжения или сжатия пластические деформации возникают, когда напряжение достигает предела текучести материала (точка B на рисунке 1,а). Однако важно знать поведение материала при сложном напряженном состоянии. В частности, необходимо иметь суждение о том, какие условия характеризуют переход материала из упругого состояния в состояние текучести.

В общем случае плоского или объемного напряженных состояний экспериментально невозможно определить условия текучести для бесконечного множества соотношений между составляющими напряжений. Поэтому условие текучести для сложного напряженного состояния устанавливается гипотетическим путем с последующей экспериментальной проверкой.

Поскольку в начальной стадии нагружения справедлив закон Гука, возникновение пластических деформаций однозначно определяется напряжениями. Следовательно, условие начала пластичности может быть представлено в виде

$$f(\sigma_{ij}, F) = 0, \quad (5)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; F – некоторые характеристики материала, определяющие возникновение пластических деформаций при простейших напряженных состояниях. В случае изотропии F представляет собой одну единственную скалярную константу (обычно предел текучести), а для анизотропного материала F может быть совокупностью многих параметров, вид которой определяется конкретной записью условия текучести.

Геометрически критерий (5) можно интерпретировать как некоторую предельную поверхность в шестимерном пространстве напряжений (рисунок 2), т.е. условие текучести выполняется в тот момент, когда заданный вектор напряжений достигает этой поверхности, называемой поверхностью текучести. Любое напряженное состояние внутри этой поверхности является упругим.

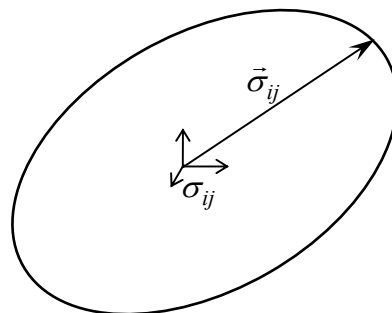


Рисунок 2 – Поверхность текучести

Для изотропных материалов, свойства которых одинаковы во всех направлениях, наибольшее распространение получило условие текучести Мизеса:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_T, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентное напряжение по Мизесу, которое через главные напряжения σ_1 , σ_2 и σ_3 выражается как

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]}. \quad (7)$$

В трехмерном пространстве главных напряжений уравнение (6) описывает круговую цилиндрическую поверхность, ось которой является прямая $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ (рисунок 3,а). Таким образом, согласно условию Мизеса при всесторонних равных растяжениях или сжатиях пластические деформации не возникают. В случае двухосного напряженного состояния цилиндрическая поверхность вырождается в эллипс (рисунок 3,б).

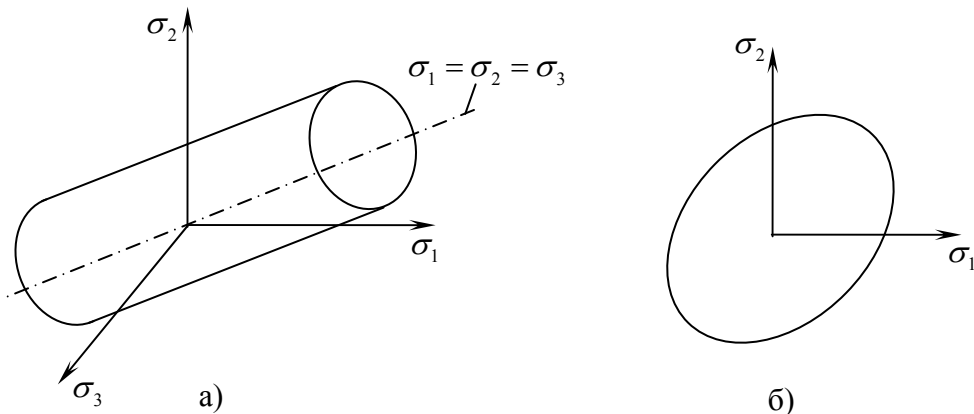


Рисунок 3 – Поверхность и кривая текучести Мизеса

1.3 Условия упрочнения

Как отмечалось выше, пластические деформации вне горизонтальной площадки текучести приводят к упрочнению материала, т.е. повышают предел текучести (в направлении деформирования). Таким образом, для упрочняющегося материала поверхность текучести не является фиксированной (как в случае идеальной пластичности), а как-то расширяется и смещается по мере развития упрочнения. Форма и положение этой поверхности зависят, вообще говоря, не только от текущего напряженного состояния, но и от всей предшествующей истории деформирования.

Изменение поверхности текучести в процессе нагружения описывают условия упрочнения. Имеются два основных вида упрочнения: изотропное и кинематическое. В первом случае поверхность текучести сохраняет в пространстве напряжений свое относительное положение (т.е. не смещается), но увеличивается в размерах (равномерно расширяется) по мере развития пластических деформаций. При использовании критерия Мизеса (6) здесь будет увеличиваться только радиус цилиндра. Иллюстрация изотропного упрочнения для двухосного напряженного состояния представлена на рисунке 4,а.

При кинематическом упрочнении поверхность текучести сохраняет свои размеры, но смещается в направлении пластического деформирования (рисунок 4,б). При этом предел текучести в направлении деформации возрастает, а в противоположном направлении падает (т.е. происходит разупрочнение). Такая схема, по крайней мере, качественно описывает эффект Баушингера, который заключается в том, что предварительная пластическая деформация одного знака ухудшает сопротивляемость материала в отношении последующей пластической деформации другого знака (так, пластическое растяжение стержня приводит к заметному снижению предела текучести при последующем сжатии того же стержня).

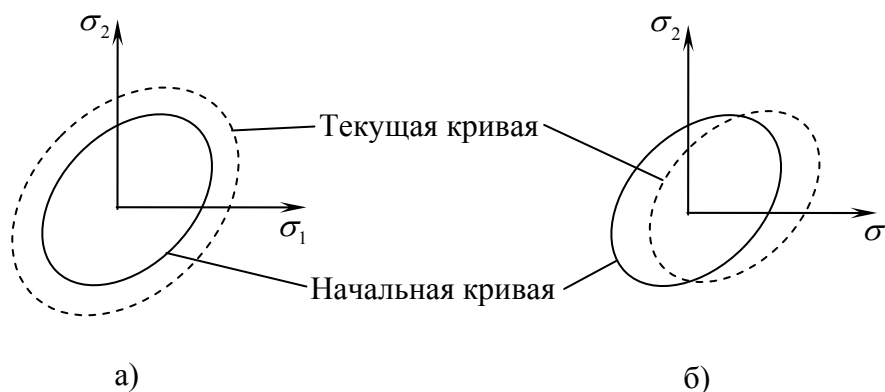


Рисунок 4 – Изотропное (а) и кинематическое (б) упрочнения

Возможно также комбинированное упрочнение, когда поверхность текучести испытывает перенос и одновременно расширяется равномерно во всех направлениях.

1.4 Закон течения

Закон течения определяет направление развития пластических деформаций. Он обычно записывается как

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (8)$$

где $d\varepsilon_{ij}^p$ – приращения пластических деформаций; $d\lambda \geq 0$ – некоторый бесконечно малый скалярный множитель; f – функция текучести.

Закон текучести в таком виде называется ассоциированным, поскольку связывается (ассоциируется) с условием пластичности. Он устанавливает, что вектор приращений $d\varepsilon_{ij}^p$ направлен по нормали к поверхности текучести.

В заключение отметим, что классическая теория пластичности не учитывает влияние каких-либо временных эффектов. Зависимость пластических деформаций от скорости деформации изучается в теории вязкопластичности. Изменение деформаций и напряжений во времени рассматривается в теории ползучести. Данные эффекты могут быть определяющими при высоких температурах.

2 Описание пластических свойств материалов в программе ANSYS

Для задания пластических свойств материалов в программе ANSYS удобно использовать универсальную диалоговую панель (рисунок 5), вызываемую следующей последовательностью:

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models.

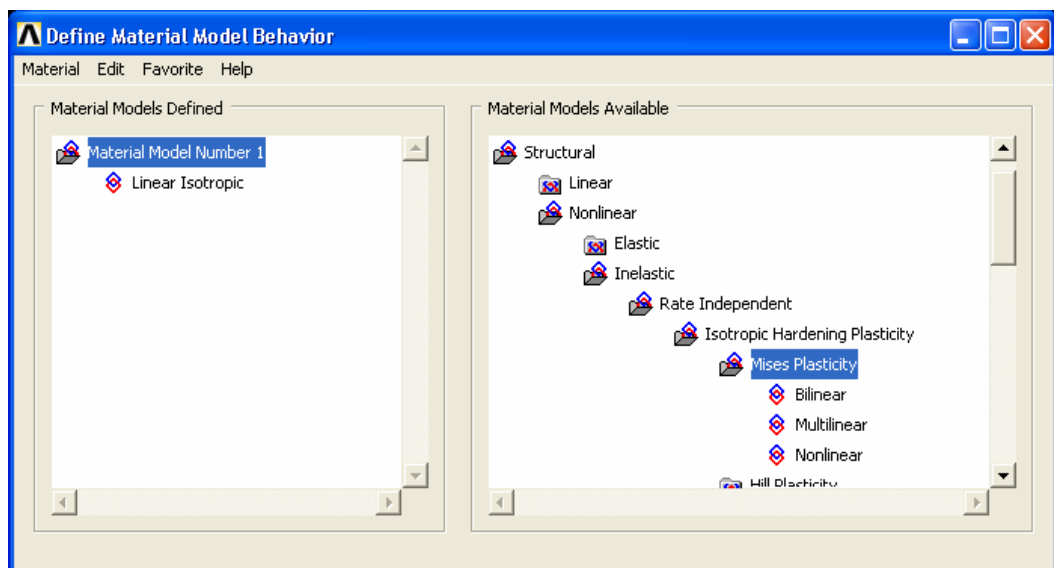


Рисунок 5 – Задание пластических свойств

Отметим, что до ввода свойств, характеризующих нелинейную часть диаграммы деформирования, всегда следует задавать упругие постоянные материала (модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ), которые описывают начальный прямолинейный участок данной диаграммы.

Для определения свойств пластичности необходимо в правом окне «Materials Models Available» (см. рисунок 5) двойным щелчком мыши войти в категорию «Structural» (механика деформируемого твердого тела), а затем последовательно открыть подкатегории «Nonlinear» (нелинейный), «Inelastic» (неупругий) и «Rate Independent» (не зависящий от скорости деформации).

После этого следует выбрать условие упрочнения (Hardening Plasticity). Здесь возможны следующие варианты: изотропное (Isotropic); кинематическое (Kinematic) и комбинированное (Combined Kinematic and Isotropic). Как отмечалось ранее, кинематическое упрочнение позволяет учитывать эффект Баушингера. Данный вид упрочнения рекомендуется использовать при анализе малых пластических деформаций, когда имеет место непропорциональное нагружение (особенно, при циклическом изменении нагрузки). Изотропное упрочнение является более предпочтительным для задач с большими деформациями.

Далее указывается условие пластичности: Mises Plasticity – рекомендуемое в большинстве случаев условие текучести Мизеса, задаваемое уравнением (6); Hill Plasticity – условие текучести Хилла, которое является расширением критерия Мизеса для учета анизотропии пластических свойств.

В заключение выбирается вид аппроксимации диаграммы деформирования. Простейшими моделями здесь являются билинейная (Bilinear) и полилинейная (Multilinear). В первом случае диаграмма деформирования представляется двумя прямолинейными участками, характеризующими начальное упругое деформирование и состояние упрочнения (рисунок 6,а). При этом помимо упругих постоянных требуется ввести предел текучести σ_T (Yield Stress) и касательный модуль E_δ (Tangent Modulus).

Во втором случае диаграмма деформирования заменяется кусочно-линейной кривой (рисунок 6,б). Здесь нелинейный участок задается по точкам: $\varepsilon_1, \sigma_1, \varepsilon_2, \sigma_2, \dots, \varepsilon_n, \sigma_n$ (максимум 100 точек). Для ввода данных значений используется диалоговая панель, показанная на рисунке 7. При этом напряжения можно определять в зависимости от полных или пластических деформаций (поле «Stress-Strain Options»). Для ввода очередной точки следу-

ет нажать кнопку *Add Point*. Кнопка *Graph* позволяет отобразить диаграмму деформирования материала непосредственно в рабочем окне.

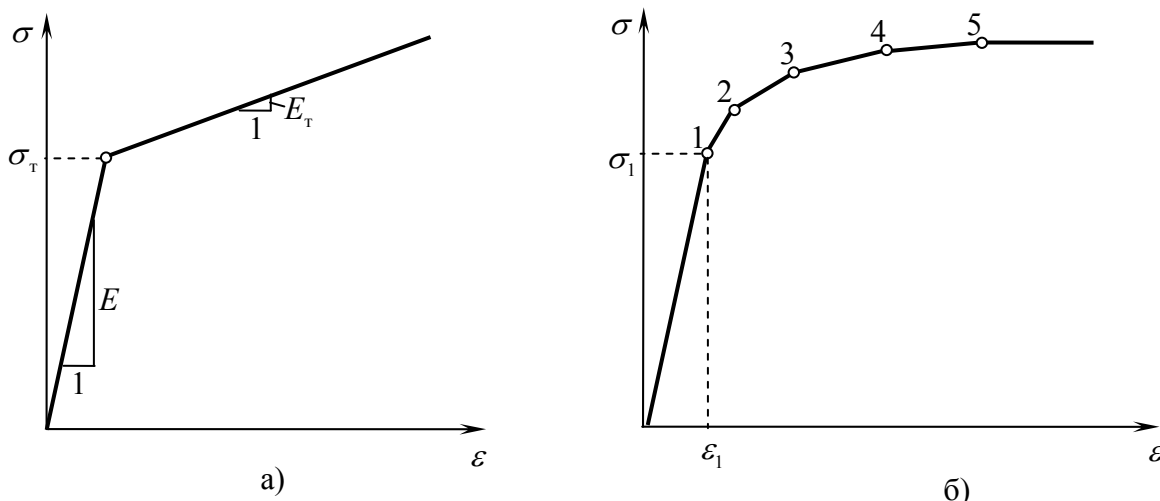


Рисунок 6 – Билинейная (а) и полилинейная (б) модели

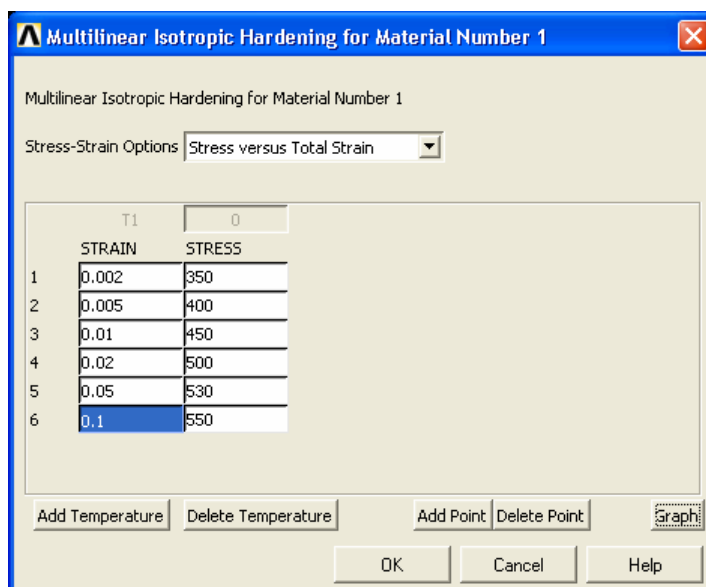
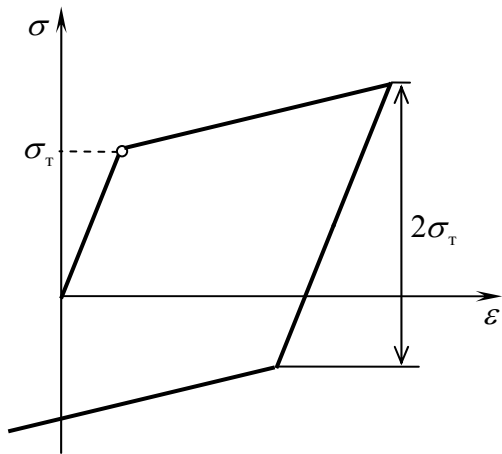


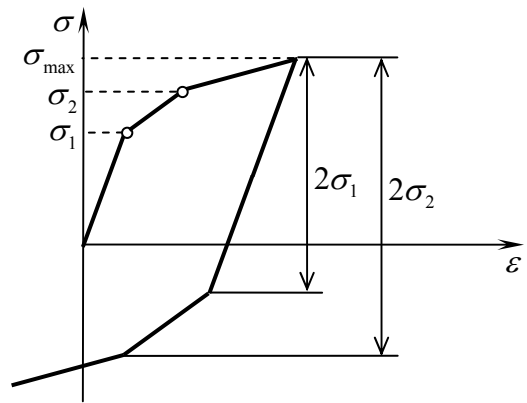
Рисунок 7 – Ввод точек диаграммы деформирования

Следует отметить, что программа выдаст ошибку, если отношение координат первой точки σ_1/ϵ_1 не будет равно модулю упругости E .

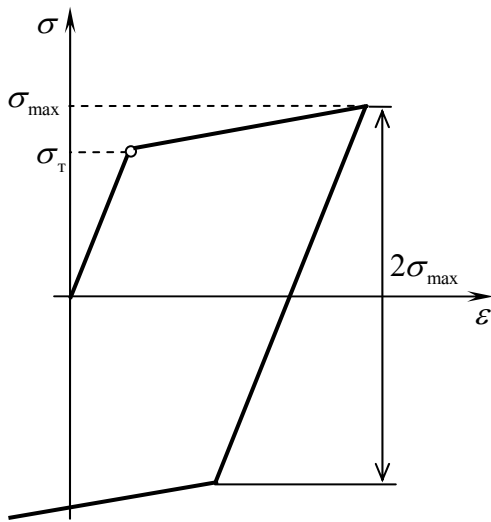
На рисунке 8 показано как выполняется разгрузка в зависимости от выбранной опции пластичности.



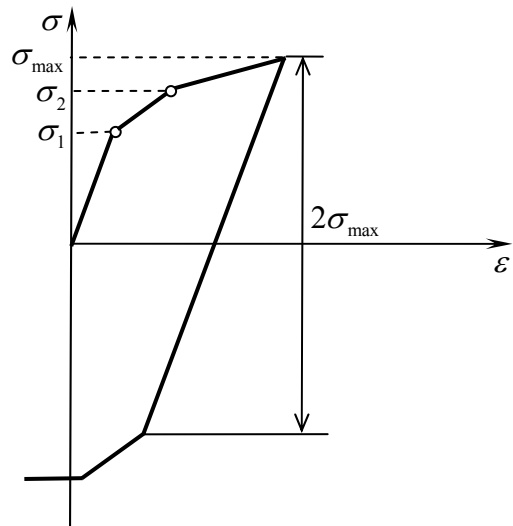
а) билинейная модель с кинематическим упрочнением



б) полилинейная модель с кинематическим упрочнением



в) билинейная модель с изотропным упрочнением



г) полилинейная модель с изотропным упрочнением

Рисунок 8 – Поведение диаграммы при разгрузке

В заключение следует отметить, что задание пластических свойств материала вносит нелинейность в модель. При этом программа ANSYS будет выполнять нелинейный анализ, автоматически подбирая размер шага по времени (если он не установлен пользователем).

Кроме того, пластичность представляет собой неконсервативный процесс, при котором последовательность приложения нагрузок может повлиять на конечный результат. Поэтому в сложных случаях (например, при непропорциональном нагружении) нагрузку следует прикладывать в правильной последовательности, соблюдая реальную историю нагружения.

РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ

1 Особенности учета нелинейных эффектов в МКЭ-расчетах

Линейность поведения конструкции опирается на следующие допущения:

- перемещения малы по сравнению с размерами тела;
- материал является линейно-упругим;
- природа граничных условий сохраняется неизменной во время приложения нагрузки.

Тот факт, что перемещения малы, учитывается при вычислении матрицы жесткости конструкции $[K]$ и вектора нагрузки $[P]$, поскольку интегрирование выполняется по исходному (недеформированному) объему конечных элементов, а матрица $[\beta]$, связывающая деформации с узловыми перемещениями, считается не зависящей от перемещений. Допущение о линейно-упругом материале позволяет использовать постоянную матрицу $[k]$, связывающую напряжения с деформациями. И, наконец, допущение о том, что природа граничных условий сохраняется неизменной, отражается при использовании постоянных граничных связей.

При этих допущениях в случае статического анализа конечно-элементные уравнения равновесия имеют вид

$$[K][v] = [P]. \quad (1)$$

Здесь узловые перемещения $[v]$ являются линейной функцией приложенного вектора нагрузки $[P]$. Таким образом, если вместо нагрузки $[P]$ приложить $\alpha [P]$ (где α – некоторая постоянная), то перемещения будут равны $\alpha [v]$. Это не выполняется в нелинейном анализе.

Если перемещения тела являются большими (например, для пластин и оболочек прогиб больше четверти толщины), то необходимо учитывать изменение конфигурации тела, т.е. так называемую *геометрическую нелинейность*. Для тонкостенных конструкций обычно возникает ситуация, когда перемещения и углы поворота большие, а деформации можно считать малыми (по сравнению с единицей). Случай больших деформаций (более 4%) требует использования специальной формулировки. И, наконец, особо следует выделить случай очень больших (конечных) деформаций, превышающих 30%. Корректно решать такие задачи можно только с использованием совре-

менных пакетов, предназначенных для анализа высоконелинейных процессов. В программе ANSYS имеется ряд элементов, позволяющих учитывать такие деформации.

Если связь между напряжениями и деформациями нелинейная (например, как при пластическом течении), то следует учитывать *физическую нелинейность*.

Если в процессе нагружения граничные условия изменяются (например, при определенном уровне нагрузки накладываются дополнительные ограничения на некоторые перемещения), то поведение будет линейным только до изменения граничных условий. Такая ситуация возникает при решении *контактных задач*.

Основной целью нелинейного анализа является нахождение положения равновесия тела, соответствующего приложенным нагрузкам. Принимая, что внешние силы являются функцией времени, условия равновесия системы конечных элементов, соответствующей телу, могут быть выражены как

$${}^t[P] - {}^t[F] = 0, \quad (2)$$

где ${}^t[P]$ – вектор внешне приложенных узловых сил в конфигурации в момент времени t ; ${}^t[F]$ – вектор узловых сил, соответствующих напряжениям в элементах в той же конфигурации.

Данное уравнение должно удовлетворяться в любой момент всей истории приложения нагрузки, т.е. переменная времени t должна браться от 0 до максимального значения, которое нас интересует. В статическом анализе без временных эффектов t является лишь удобной переменной для обозначения различных уровней приложения нагрузки и соответственно различных конфигураций. Данную переменную в этом случае можно назвать параметром нагрузки.

Во многих задачах требуется найти только напряжения или перемещения, достигнутые при определенном уровне нагрузки. В некоторых случаях (для консервативных систем) равновесные конфигурации, соответствующие заданной нагрузке, могут вычисляться сразу без решения для других равновесных конфигураций. Однако, когда анализ включает зависящие от уровня нагрузки нелинейные геометрические или физические условия или зависящие от времени явления (т.е. неконсервативное поведение), уравнение (2) необходимо решать для полного временного диапазона. Для этого используется пошаговый метод последовательных нагружений.

В пошаговой схеме предполагается, что решения для временных шагов от 0 до t включительно получены, а требуется найти решение для момента времени $t + \Delta t$, где Δt – некоторое малое приращение времени. Согласно (2) в момент времени $t + \Delta t$ имеем

$${}^{t+\Delta t}[P] - {}^{t+\Delta t}[F] = 0. \quad (3)$$

Так как решение в момент времени t известно, можно записать

$${}^{t+\Delta t}[F] = {}^t[F] + [\Delta F], \quad (4)$$

где $[\Delta F]$ – приращение узловых сил, соответствующее приращению напряжений за период времени от t до $t + \Delta t$. Этот вектор может аппроксимироваться с помощью так называемой матрицы тангенциальной жесткости ${}^t[K]$, которая соответствует геометрическим и физическим условиям в момент времени t :

$$[\Delta F] = {}^t[K][\Delta v], \quad (5)$$

где $[\Delta v]$ – вектор приращения узловых перемещений. Подставляя (5) и (4) в (3), получим

$${}^t[K][\Delta v] = {}^{t+\Delta t}[P] - {}^t[F]. \quad (6)$$

Решая эту систему уравнений, можно определить $[\Delta v]$, а затем найти приближение для перемещений в момент времени $t + \Delta t$:

$${}^{t+\Delta t}[v] = {}^t[v] + [\Delta v]. \quad (7)$$

Однако из-за допущения (5) такое решение может приводить к существенным ошибкам и в зависимости от размера шага по времени (или нагрузке) может быть неустойчивым. Поэтому на практике, как правило, требуется итерационное уточнение решения на каждом шаге.

Широко используемой итерационной процедурой здесь является метод Ньютона-Рафсона, предназначенный для решения систем нелинейных уравнений. При этом уравнения (6) и (7) примут вид

$${}^{t+\Delta t}[K]^{(i-1)}[\Delta v]^{(i)} = {}^{t+\Delta t}[P] - {}^{t+\Delta t}[F]^{(i-1)}; \quad (8)$$

$${}^{t+\Delta t}[v]^{(i)} = {}^{t+\Delta t}[v]^{(i-1)} + [\Delta v]^{(i)}, \quad (9)$$

с начальными условиями

$${}^{t+\Delta t}[K]^{(0)} = {}^t[K]; \quad {}^{t+\Delta t}[v]^{(0)} = {}^t[v]; \quad {}^{t+\Delta t}[F]^{(0)} = {}^t[F]. \quad (10)$$

Здесь $i = 1, 2, \dots$ – номер итерации.

Следует отметить, что каждая итерация полного метода Ньютона-Рафсона требует пересчета (т.е. обновления) матрицы тангенциальной жесткости, который является весьма трудоемкой операцией. Поэтому на практике часто используется упрощенный (модифицированный) метод Ньютона-Рафсона. Эффективность данной схемы в МКЭ-расчетах заключается в том, что в пределах шага по времени матрица тангенциальной жесткости не меняется. В этом случае уравнение (8) преобразуется к следующему виду:

$${}^t[K][\Delta v]^{(i)} = {}^{t+\Delta t}[P] - {}^{t+\Delta t}[F]^{(i-1)}. \quad (11)$$

Правая часть уравнений (8) и (11), которая определяет «невязку» сил, обращается в нуль, если конфигурация тела соответствует его равновесному состоянию. В противном случае по величине «невязки» находится приращение перемещений на очередной итерации, а также корректируется конфигурация тела. На практике итерационный процесс выполняется до тех пор, пока приращение перемещений не будет находиться внутри определенной меры сходимости.

На рисунках 1 и 2 представлена графическая иллюстрация полного и модифицированного методов Ньютона-Рафсона при использовании их в пошаговой процедуре последовательных нагружений. В этом случае приращение нагрузки, как правило, берется постоянным.

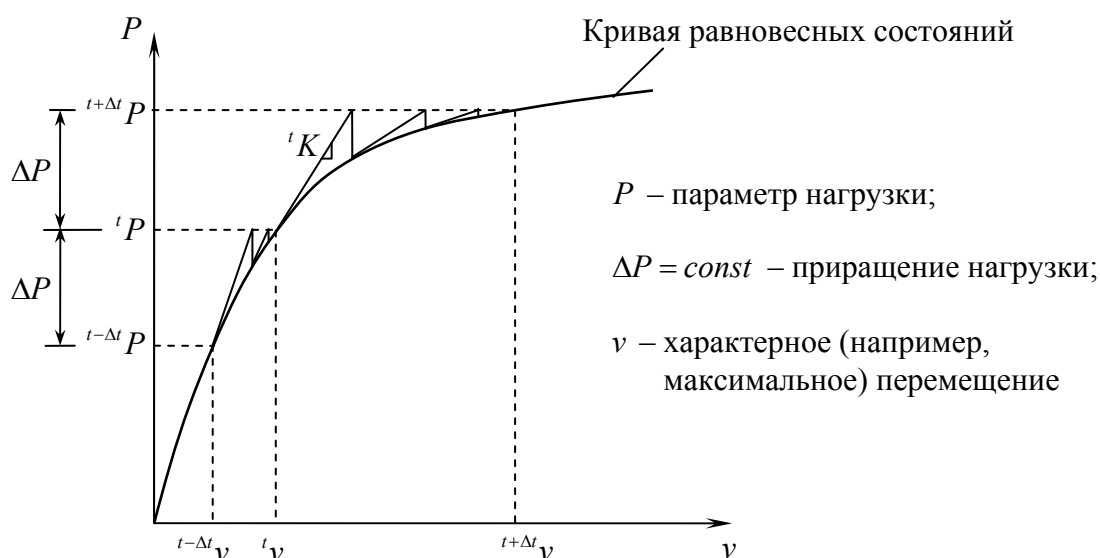


Рисунок 1 – Полный метод Ньютона-Рафсона

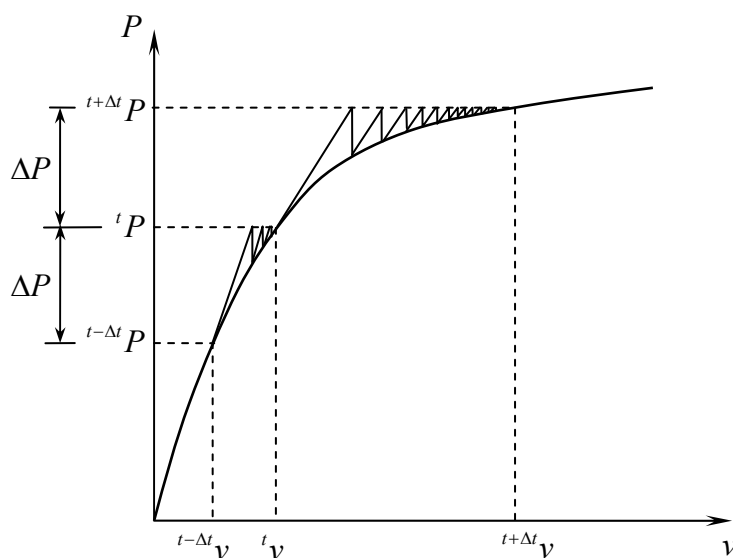


Рисунок 2 – Модифицированный метод Ньютона-Рафсона

Видно, что модифицированный метод требует для сходимости значительно большего числа итераций, нежели полный, однако время выполнения одной итерации здесь существенно меньше.

Следует отметить, что нелинейные соотношения могут быть записаны в лагранжевом или эйлеровом представлении. В лагранжевой (материальной) формулировке внимание фокусируется на движении фиксированных частиц, а в эйлеровой (пространственной) – наблюдается протекание во времени процесса в данном месте. Для твердых тел материальное описание обычно является более естественным и эффективным подходом, чем пространственное, которое применяется, как правило, в решении задач механики жидкости и газа.

Основная трудность нелинейного анализа заключается в том, что параметры состояния среды определяются в деформированной конфигурации в момент времени $t + \Delta t$, которая сама обычно является неизвестной, тогда как, например, начальная конфигурация входит в состав исходных данных. Поэтому вводятся вспомогательные величины, определенные относительно известной отсчетной конфигурации. Так, для характеристики напряженного состояния здесь может использоваться второй тензор напряжений Пиолы-Кирхгофа, а для характеристики деформированного состояния – тензор деформации Коши-Грина. Они являются объективными характеристиками, поскольку их значения не зависят от движения тела как жесткого целого.

В принципе в качестве отсчетной конфигурации может использоваться любая из уже определенных конфигураций. Однако на практике выбор лежит преимущественно между двумя формулировками, которые называются общей (total) и модифицированной (updated) формулировками Лагранжа. В первой схеме решения все статические и кинематические переменные относятся к начальной конфигурации, а во второй – к конфигурации в момент времени t . Если начальная конфигурация не имеет преимуществ по сравнению с остальными, то эффективнее использовать модифицированную формулировку, поскольку в этом случае выражения получаются проще. Так, матрица тангенциальной жесткости здесь записывается в виде суммы двух матриц:

$${}^t[K] = {}^t[K_0] + {}^t[K_\sigma], \quad (12)$$

где ${}^t[K_0]$ – инкрементальная матрица жесткости; ${}^t[K_\sigma]$ – матрица начальных напряжений (или геометрическая матрица жесткости). При использовании же общей формулировки Лагранжа появляется еще одна квадратная матрица – матрица начальных (или больших) перемещений.

2 Задача начальной устойчивости (линеаризованный подход)

Как известно, форма статического равновесия может быть устойчивой (после отклонения система возвращается в исходное состояние), неустойчивой (после отклонения система не возвращается в исходное состояние, а будет уходить от этого состояния) и нейтральной, или безразличной (после отклонения система не возвращается в исходное состояние, но и не удаляется от него).

Очевидно, что при малых внешних нагрузках соотношение между внешними силами и перемещениями мало отличается от линейного и состояние равновесия будет устойчивым. При увеличении внешних нагрузок (особенно это относится к тонкостенным конструкциям) состояние устойчивого равновесия может смениться на состояние неустойчивого равновесия. Нагрузка, при которой начальная форма перестает быть устойчивой, называется критической, а соответствующее состояние – критическим.

Отметим, что на основе линейной теории можно установить лишь устойчивое состояние равновесия, но невозможно определить критические нагрузки. Поэтому здесь нужны нелинейные соотношения.

Выпишем уравнения равновесия системы, идеализированной по МКЭ, в приращениях (формулы (6) и (12)):

$${}^t[K][\Delta v] = {}^{t+\Delta t}[P] - {}^t[F], \quad (13)$$

где

$${}^t[K] = {}^t[K_0] + {}^t[K_\sigma].$$

Можно показать, что критерием устойчивости здесь является положительная определенность матрицы тангенциальной жесткости ${}^t[K]$.

Задача начальной устойчивости решается с помощью статического критерия устойчивости Эйлера и путем линеаризации исходных нелинейных соотношений. Согласно этому критерию критическим называется наименьшее значение нагрузки, при котором кроме начального положения равновесия система может иметь, по крайней мере, еще одно близкое к начальному положение равновесия. Таким образом, задача заключается в отыскании состояния нейтрального равновесия.

Уравнение нейтрального равновесия следует непосредственно из равенства (13), если его правую часть приравнять нулю:

$${}^t[K][\Delta v] = 0. \quad (14)$$

Эта однородная система уравнений имеет ненулевое решение лишь в том случае, когда определитель ее матрицы коэффициентов равен нулю. Таким образом, в состоянии нейтрального равновесия $\det({}^t[K]) = 0$, т.е. матрица тангенциальной жесткости является сингулярной (вырожденной).

Для линеаризации задачи предположим, что в исходном (докритическом) состоянии перемещения малы, и, следовательно, можно не учитывать изменение конфигурации тела. Таким образом, решение можно найти за один шаг. Здесь необходимо отметить, что матрица начальных напряжений $[K_\sigma]$ не содержит перемещения в явном виде и пропорциональна напряжениям. На первом шаге напряжения определяются из линейного решения и, в свою очередь, пропорциональны внешней нагрузке. Если нагрузку увеличить в λ раз, то можно найти, что существует состояние нейтрального равновесия, т.е. такое, при котором

$$([K_0] + \lambda[K_\sigma])[\Delta v] \equiv 0, \quad (15)$$

где $[K_0]$ – обычная матрица жесткости конструкции.

Таким образом, приходим к обобщенной проблеме собственных значений. Решая приведенную выше задачу, можно найти наименьшее собственное значение λ_1 , которое и определяет критическую нагрузку. При этом соответствующий собственный вектор (с точностью до произвольного множителя) будет характеризовать форму потери устойчивости.

Следует отметить, что в МКЭ-пакетах метод начальной устойчивости реализуется с помощью режима Buckling. При этом определение критической нагрузки здесь осуществляется в два этапа по следующей схеме. Сначала по заданной внешней нагрузке $[P]$ (обычно единичной) с использованием линейного статического анализа вычисляются напряжения, по которым строится матрица начальных напряжений $[K_\sigma]$. Затем решается проблема собственных значений для определения наименьшего собственного значения λ_1 , которое показывает во сколько раз критическая нагрузка больше заданной, т.е. $[P_{кр}] = \lambda_1[P]$.

В заключение отметим, что описанный выше подход часто используется там, где он не применим. Задача начальной устойчивости дает физически правильное решение только в тех случаях, когда возможна бифуркация (разветвление) форм равновесия и малы докритические перемещения. Это может быть только в очень ограниченном числе представляющих практический интерес случаев (например, идеально прямой стержень под действием сжимающей силы; пластина при сжатии силами, лежащими в ее срединной плоскости; замкнутая сфера, нагруженная равномерно распределенным внешним давлением, и т.д.). На рисунке 3 представлена классическая задача Эйлера – устойчивость консольного стержня при сжатии мертвой (т.е. не меняющей своего направления) силой. Здесь докритические перемещения равны нулю и на кривой равновесных состояний имеется точка бифуркации.

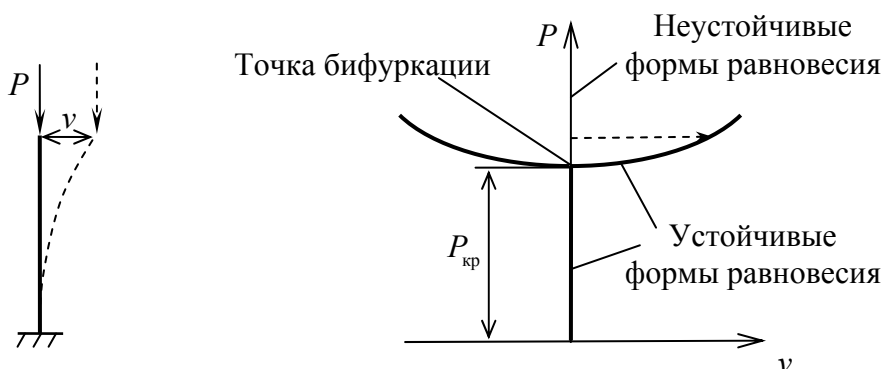


Рисунок 3 – Кривая равновесных состояний с точкой бифуркации

В практических приложениях задачи устойчивости (особенно для оболочечных конструкций, потеря устойчивости которых часто сопровождается скачкообразным увеличением прогибов) следует решать с учетом геометрической, а иногда и физической нелинейностей, т.е. пошаговым методом последовательных нагружений. В этом случае критическая нагрузка находится по расходимости итераций или по смене знака определителя матрицы тангенциальной жесткости.

3 Исследование закритического деформирования. Метод длины дуги

На рисунке 4 показано поведение тонкой оболочки (арки) при различных значениях отношения H/L . В последнем случае (когда H/L – велико) критическая нагрузка $P_{кр}^0$, найденная на базе линеаризованного подхода, обычно оказывается в несколько раз больше верхней критической нагрузки $P_{кр}^в$, определяемой из нелинейного анализа. Для нахождения нижней критической нагрузки $P_{кр}^н$ необходимо исследовать закритическое поведение. Здесь возникает ряд вычислительных проблем, связанных с сингулярностью матрицы тангенциальной жесткости в предельных точках.

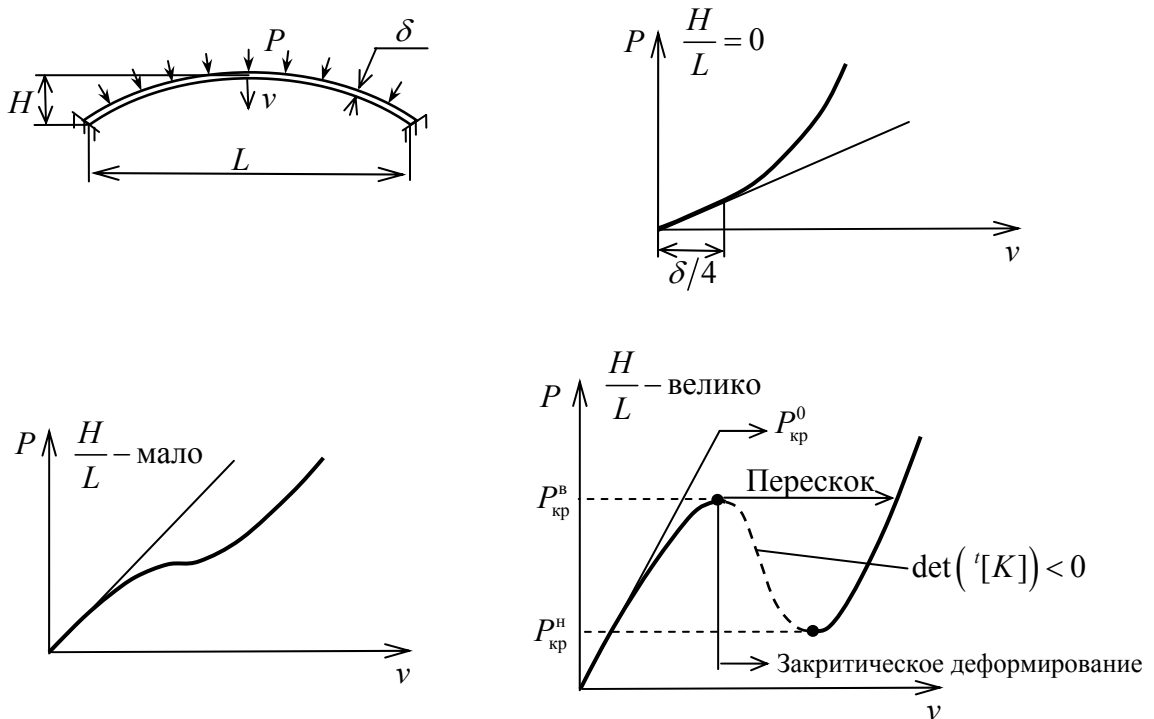


Рисунок 4 – Различные виды деформирования тонкой оболочки (арки)

Для перехода через предельные точки необходимо воспользоваться специальными приемами. Рассмотрим типичную для оболочек кривую равновесных состояний (рисунок 5). Как правило, она является не однозначной по нагрузке и однозначной по перемещению, т.е. одной и той же нагрузке может соответствовать несколько равновесных конфигураций, а одному и тому же перемещению – только одно состояние равновесия. Это обстоятельство указывает на необходимость в таких ситуациях смены управляющего параметра, когда вместо приращений нагрузки задаются приращения перемещений и вычисляются соответствующие реакции, характеризующие внешнюю нагрузку. Однако такой подход применим лишь в случае действия сосредоточенной нагрузки. Кроме того, он не позволяет определять участки кривой равновесных состояний, не однозначные по перемещению, где одновременно происходит уменьшение нагрузки и перемещения (рисунок 6).

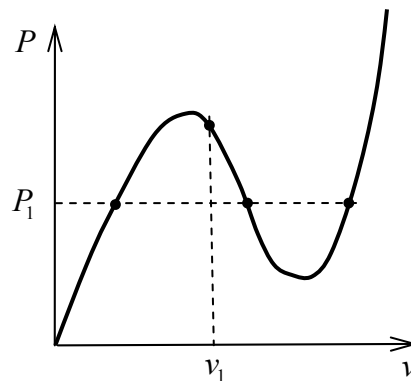


Рисунок 5 – Типичная для оболочек кривая равновесных состояний



Рисунок 6 – Кривая равновесных состояний, не однозначная по перемещению

Отметим, что одним из универсальных приемов перехода через предельные точки является метод длины дуги (arc-length method), который в настоящее время чаще других используется в МКЭ-пакетах для исследования закритического деформирования тонкостенных конструкций. Он является, по сути дела, методом автоматического выбора шага по нагрузке на основе перемещений. Здесь в процессе выполнения итераций нагрузка и перемещения изменяются одновременно. В данном методе вводятся дополнительные уравнения связей, чтобы ограничить длину дуги кривой равновесных состояний (в пространстве нагрузка – перемещение) некоторым предписанным значением, как показано на рисунке 7. На первом шаге длина дуги определяется исходя из полной нагрузки и заданного числа шагов (или подшагов в программе ANSYS). На каждом последующем шаге новая длина дуги вычисляется на основе длины дуги предыдущего шага и поведения решения (т.е. в зависимости от степени нелинейности).

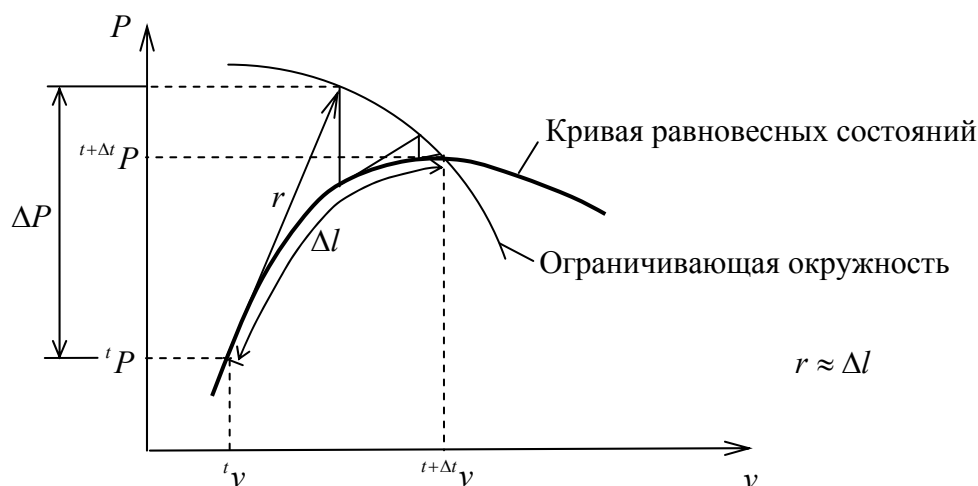


Рисунок 7 – Геометрическая интерпретация метода длины дуги

РЕШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

1 Выбор типа анализа (статика или динамика)

В статическом анализе внешние нагрузки считаются постоянными и полагаются значимыми только силы упругости (жесткости). При этом игнорируются эффекты инерции и демпфирования, вызываемые нагрузками, изменяющимися во времени. Однако при решении статических задач могут учитываться постоянные инерционные силы (такие как сила тяжести, центробежная сила инерции и т.п.), а также изменяющиеся во времени силы, которые могут быть аппроксимированы статически эквивалентными нагрузками (например, эквивалентные ветровые и сейсмические нагрузки, обычно регламентируемые строительными нормами и правилами).

Наряду с динамическими и статическими имеются и так называемые квазистатические процессы. Это процессы, применительно к которым можно считать силы инерции такими, что внутренние усилия успевают «следить» за внешними силами, и в любой момент времени имеет место равновесие. В таком случае время выступает как параметр состояния. Вообще говоря, если частота возбуждения меньше 1/3 низшей частоты собственных колебаний конструкции, то можно считать данный процесс квазистатическим и ограничиться проведением статического расчета.

В случае, когда нагрузки достаточно быстро изменяются во времени, возникающие при деформации тела инерционные силы могут играть существенную роль, и их необходимо учитывать. Разрешающее уравнение МКЭ, которое используется в динамическом анализе, имеет следующий вид:

$$[M][\ddot{v}] + [C][\dot{v}] + [K][v] = [P(t)], \quad (1)$$

где $[K]$ – матрица жесткости тела; $[M]$ – его матрица масс; $[C]$ – матрица демпфирования; $[v]$ – вектор узловых перемещений; $[\dot{v}]$ – вектор узловых скоростей; $[\ddot{v}]$ – вектор узловых ускорений; $[P(t)]$ – вектор внешних узловых сил, которые являются функциями времени t .

МКЭ-пакет ANSYS позволяет выполнять все виды динамического анализа конструкций:

- расчет частот и форм собственных колебаний (*Modal*);
- расчет вынужденных установившихся колебаний (*Harmonic*);
- исследование переходных неустановившихся процессов (*Transient*).

Расчет динамического поведения конструкции заключается в определении перемещений и напряжений как функции времени. Динамический анализ может в качестве предварительного этапа содержать расчет собственных колебаний, в результате чего определяются частоты и формы собственных колебаний. В некоторых случаях эта информация представляет самостоятельный интерес.

2 Расчет частот и форм собственных колебаний

Собственные (или свободные) колебания совершаются при отсутствии внешних сил. Это наиболее естественные движения конструкции. Они являются важнейшей характеристикой линейных систем. Любые колебания системы являются некоторой комбинацией собственных колебаний. Обычно интерес представляет лишь небольшое число (как правило, не более 10) наименьших частот и соответствующих им форм собственных колебаний. Например, в строительстве проектирование сооружений в сейсмоопасных регионах выполняют таким образом, чтобы среди первых трех форм собственных колебаний не было крутильной, поскольку при землетрясении в первую очередь возбуждаются именно такие колебания.

В программе ANSYS расчет частот и форм собственных колебаний (или модальный анализ) проводится только для линейных моделей. При этом нелинейные эффекты (если таковые определены) игнорируются.

С точки зрения математики модальный анализ сводится к решению обобщенной проблемы собственных значений:

$$([K] - \omega_i^2 [M])[\Phi_i] = 0, \quad (2)$$

где ω_i^2 – собственное значение с номером i (в данном случае ω_i является круговой частотой собственных колебаний); $[\Phi_i]$ – соответствующий ему собственный вектор (характеризующий форму собственных колебаний).

Следует отметить, что собственные векторы вычисляются лишь с точностью до произвольного множителя. Поэтому для определенности их обычно нормируют. В программе ANSYS по умолчанию нормирование проводится по матрице масс, так чтобы выполнялось равенство

$$[\Phi_i]^T [M] [\Phi_i] = 1. \quad (3)$$

Для решения проблемы собственных значений основными здесь являются следующие методы:

- Block Lanczos – блочный Ланцоша (выбираемый по умолчанию и имеющий более высокую скорость сходимости, нежели метод итераций в подпространстве);
- Subspace – итераций в подпространстве;
- PCG Lanczos – Ланцоша на базе итерационного решателя PCG (рекомендуемый для очень больших задач, содержащих более 500000 степеней свободы);
- Reduced – редуцированный (обладающий высокой скоростью, но сравнительно низкой точностью).

Имеются еще три метода, предназначенные для решения специальных задач. Так, метод Unsymmetric следует использовать в задачах, приводящих к несимметричным матрицам (как, например, при взаимодействии твердого тела с жидкостью). Два других метода Damped и QR Damped применяются в задачах, где нельзя пренебречь демпфированием (например, при учете подшипников).

Отметим, что в программе ANSYS имеется возможность расчета частот и форм собственных колебаний предварительно нагруженной конструкции (например, лопатки вращающейся турбины). Здесь до проведения модального анализа требуется выполнить статический расчет с созданием начальных напряжений для дальнейшего использования. Данная опция устанавливается путем включения флага «Calculate prestress effects» (команда *Main Menu*>*Solution*>*Analysis Type*>*Sol'n Controls*, вкладка «Basic»). При последующем расчете частот и форм собственных колебаний в этом случае также необходимо активизировать флаг «Incl prestress effects» (команда *Main Menu*>*Solution*>*Analysis Type*>*Analysis Options*).

3 Расчет вынужденных установившихся колебаний

Любая циклически изменяющаяся внешняя нагрузка порождает циклически изменяющийся отклик системы (гармонический отклик). Расчет вынужденных колебаний дает возможность предсказания поведения периодически возбуждаемой динамической системы, позволяя, таким образом, проверять модель конструкции на наличие резонанса, усталость и т.п.

Гармонический анализ применим только для вынужденных установившихся колебаний. Переходные динамические процессы, которые происходят в начале процесса возбуждения, собственно вынужденными колебаниями не описываются (рисунок 1).

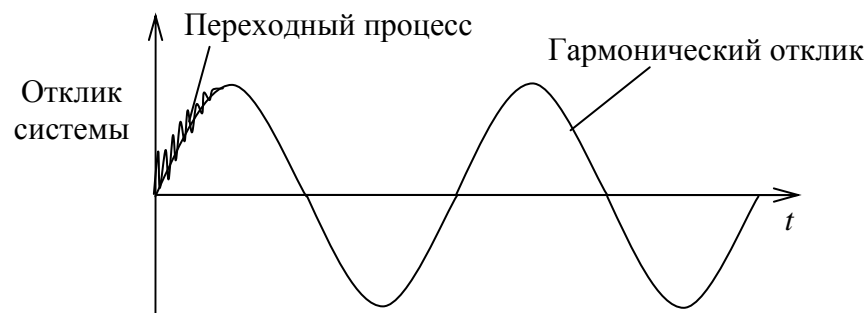


Рисунок 1 – Вынужденные колебания в модели

При расчете вынужденных установившихся колебаний вводятся следующие ограничения:

- все нагрузки считаются зависящими от времени по синусоидальному (гармоническому) закону;
- все нагрузки изменяются с равной частотой;
- нелинейности не допускаются;
- переходные эффекты не учитываются.

Цель данного расчета заключается в вычислении отклика на нескольких частотах гармонического возбуждения (в циклах на единицу времени) и получении функции некоторой выходной величины (обычно амплитуды перемещения) от частоты. Эти зависимости часто называют амплитудно-частотными характеристиками.

Для исследования вынужденных колебаний в программе ANSYS применяются три метода: полный (Full); редуцированный (Reduced) и суперпозиций, или разложения по формам собственных колебаний, (Mode Superpos'n).

Полный метод является наиболее простым из всех трех методов, но самым затратным по времени, поскольку здесь используются исходные (полные) матрицы.

Редуцированный метод позволяет уменьшить размер задачи путем применения управляющих степеней свободы и сокращения размера (редуцирования) матриц. После вычисления перемещений для управляющих степеней свободы решение должно быть расширено до полного набора исходных степеней свободы.

Для решения задачи третьим методом необходимо предварительно провести расчет частот и форм собственных колебаний.

Для полного определения гармонической нагрузки требуется задать амплитуду, фазовый угол и частоту (или диапазон изменения частот). Фазовый угол является мерой времени отставания или опережения. В комплексной плоскости он представляет собой угол, отсчитываемым от действительной оси. Фазовый угол требуется только в случае, когда прикладываемые нагрузки не совпадают по фазе возбуждения. Его нельзя задать непосредственно; вместо этого указываются действительные и мнимые компоненты нагрузок (рисунок 2) путем использования аргументов *VALUE* и *VALUE2* в командах для определения соответствующих перемещений и сосредоточенных сил. Следует отметить, что поверхностные (например, давление) и объемные нагрузки задаются только для нулевой фазы (мнимой компоненты у них нет).

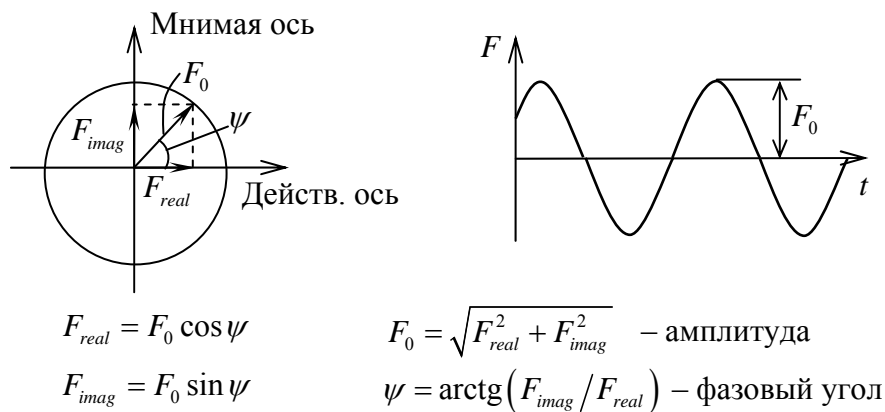


Рисунок 2 – Действительная и мнимая компоненты нагрузки

В МКЭ-пакете ANSYS демпфирование можно задавать различными способами. Один из них состоит в использовании в качестве матрицы $[C]$ линейной комбинации:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K], \quad (4)$$

где α и β – определяемые экспериментально коэффициенты, имеющие размерности s^{-1} и s соответственно. Во многих практических задачах демпфирование, связанное с матрицей масс можно игнорировать ($\alpha = 0$).

Если в модели задано демпфирование, то ее отклик по фазе отклоняется от возбуждения. В этом случае результаты будут представлены в комплексном виде, т.е. будут содержать для каждой выходной величины действительную и мнимую части. В таком же виде приводятся результаты и в случае, когда к модели прикладывается несколько отличающихся по фазе возбуждения нагрузок.

При расчете вынужденных колебаний нельзя определять функцию отклика на одновременное действие нескольких возбуждающих сил, изменяющихся с разной частотой. Однако средства общего постпроцессора позволяют наложить несколько откликов на различные нагрузки для получения суммарной реакции системы.

Расчет вынужденных колебаний может выполняться и для предварительно нагруженной конструкции (при условии, что гармонически изменяющиеся во времени напряжения существенно меньше начальных напряжений). Процедура проведения данного расчета в основном аналогична той, которая используется в модальном анализе.

4 Исследование переходных неустановившихся процессов

Переходные неустановившиеся процессы (иногда называемые процессами с историей нагружения) – это, как правило, кратковременные процессы, происходящие в начале возбуждения колебаний, например в случае ударного воздействия. При этом нагрузка может произвольно изменяться во времени и возможен учет различных нелинейных эффектов.

Задать кривую «нагрузка–время» можно с помощью определения нескольких шагов нагружения. При этом необходимо для каждого шага указать время в конце шага, значение нагрузки и число подшагов (или размер шага интегрирования по времени Δt). От шага к шагу нагрузка может изменяться по линейному закону (плавно) или скачком (мгновенно). Для этих целей используется параметр *KBC*. Он задается командой *Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls* (вкладка «Transient»). Параметр *KBC* может принимать следующие значения: 0 (Ramped) – в ходе расчета нагрузка изменяется плавно (задается по умолчанию); 1 (Stepped) – нагрузка прикладывается скачкообразно. На рисунке 3 представлен пример ввода зависимости «нагрузка–время», где задано четыре шага нагружения.

На первом шаге (в момент времени $t = 0$) должны назначаться начальные условия. Расчет переходных динамических процессов требует определения двух групп начальных условий (поскольку система уравнений имеет второй порядок): начальные перемещения и начальные скорости. Если они равны нулю, то ничего особо указывать не требуется. При этом нагрузки, соответствующие первому излому на кривой «нагрузка–время» можно прикладывать на первом шаге нагружения.

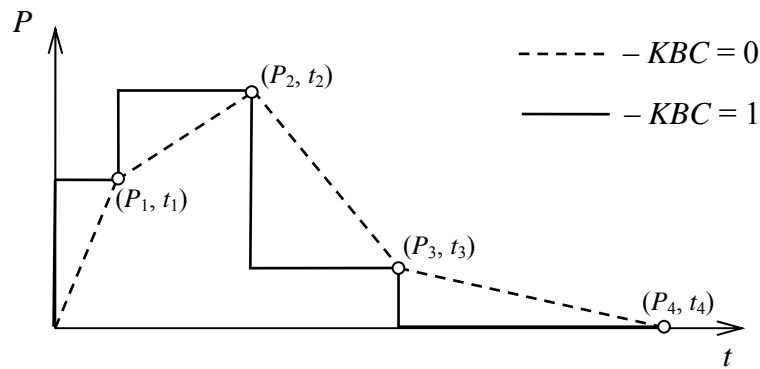


Рисунок 3 – Зависимость «нагрузка–время»

Ненулевые начальные перемещения и скорости следует задавать при помощи команды *Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Initial Condit'n>Define*.

Точность расчета переходного динамического процесса зависит от выбранного шага интегрирования по времени Δt (который определяется числом подшагов). Отметим, что динамический отклик системы можно представить в виде комбинации форм ее собственных колебаний. При этом размер шага Δt должен быть таким, чтобы с достаточной точностью воспроизводились те колебания, которые играют наиболее существенную роль в динамическом поведении конструкции, т.е. колебания с относительно низкими частотами. Известно, что для хорошего отображения какой-либо собственной формы требуется не менее 20 точек на период колебаний. Таким образом, для оценки шага Δt можно воспользоваться следующей формулой:

$$\Delta t \leq \frac{T_{\min}}{20}; \quad T_{\min} = \frac{1}{f_{\max}}, \quad (5)$$

где T_{\min} и f_{\max} – период и частота той наивысшей формы собственных колебаний, которую необходимо описать достаточно точно, поскольку она еще вносит значительный вклад в суммарный отклик системы.

Для исследования переходных динамических процессов в программе ANSYS используются те же три метода, что и в гармоническом анализе. При этом применяется схема прямого интегрирования по времени, которая базируется на методе Ньюмарка и является неявной и безусловно устойчивой (т.е. решение сходится независимо от шага Δt).

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССИВНЫХ ТЕЛ

1 Использование объемных моделей

Для одной и той же конструкции можно использовать различные расчетные схемы. Рассмотрим в качестве примера трубопроводную систему. Для нее простейшей расчетной схемой является балочная модель. Она относится к классу линейных, поскольку здесь геометрия трубопровода представляется его осевой линией.

Следующей по сложности расчетной схемой трубопровода является оболочечная модель. В этом случае геометрия трубы описывается ее срединной (цилиндрической) поверхностью.

И, наконец, самой сложной (детальной) расчетной схемой является объемная модель, когда труба рассматривается как трехмерное тело.

Следует отметить, что при переходе от балочной модели к оболочечной, а также от последней к объемной число степеней свободы (т.е. количество неизвестных перемещений) возрастает практически на порядок.

Таким образом, объемная модель с одной стороны является самой точной, самой подробной расчетной схемой, а с другой – она зачастую предъявляет чрезмерно высокие требования к ресурсам компьютера. Кроме того, при использовании объемной модели практически единственным способом изображения результатов расчета является многоцветное представление поля выходной величины, что затрудняет их анализ.

Обычно объемные модели используются для конструкций, которые в виду особенностей геометрии, материалов, нагружения или требуемых результатов не могут анализироваться при помощи более простых расчетных схем. Они также часто применяются, когда геометрия импортируется из CAD-систем и преобразование модели в плоскую, балочную или оболочечную требует слишком много времени.

2 Импорт геометрических моделей посредством файлов стандарта IGES

Как отмечалось ранее, альтернативой построению геометрии непосредственно средствами ANSYS является импорт твердотельной CAD-модели, сохраненной в формате IGES. При помощи этого нейтрального файла ANSYS может связываться с большинством CAD-систем промышленного назначения.

Для импорта IGES-файла используется следующая команда:

Utility Menu>File>Import>IGES...

При этом появляется диалоговая панель, представленная на рисунке 1.

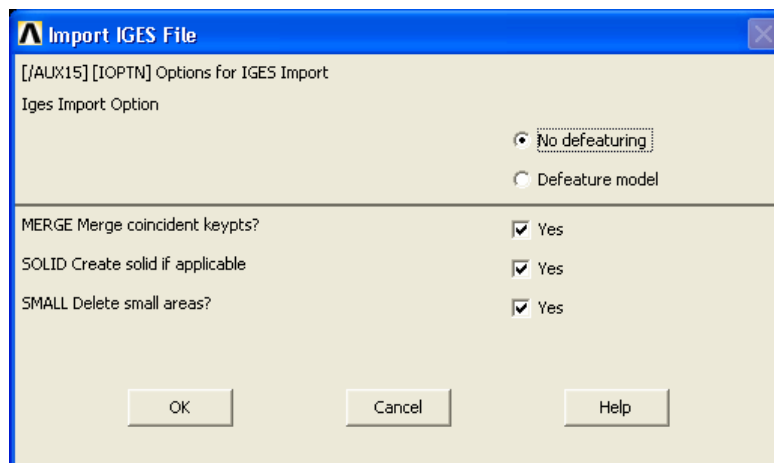


Рисунок 1 – Импорт IGES-файла

Здесь доступны два метода: «No defeaturing» (без упрощения) и «Defeature model» (упрощать модель). Кроме того, имеются три опции: MERGE (слияние совпадающих точек), SOLID (создание объема, если возможно) и SMALL (удаление мелких поверхностей).

Первый метод (No defeaturing) – это импорт и хранение геометрии в стандартной базе данных программы ANSYS. Он установлен по умолчанию и рекомендуется в большинстве случаев. Данный метод быстрее и надежнее другого, а также позволяет выполнять любые стандартные операции над геометрической моделью (в том числе и булевы). Однако при его использовании не доступны специальные команды исправления модели. Кроме того, данный вариант импорта геометрических объектов имеет ограниченные возможности автоматического создания объемных тел.

Второй метод (Defeature model) – это импорт и хранение геометрии в специальной базе данных, позволяющей «лечить» и редактировать (упрощать) модель. Он дает возможность упрощать модель путем удаления мелких деталей, таких как выступы, полости, небольшие отверстия и т.п. Однако здесь доступно лишь ограниченное число стандартных операций над геометрией, поскольку используется специальная база данных. Данный метод требует значительно большего объема памяти и является более медленным, нежели первый. Его не рекомендуется использовать для импорта больших сложных моделей.

Опция MERGE предназначена для слияния совпадающих объектов так, чтобы смежные поверхности имели общую линию, а смежные линии – общую точку. По умолчанию она включена. Ее следует отключить лишь в том случае, когда попытка импорта модели при использовании метода «Defeature model» оказалась неудачной.

Опция SOLID применяется для автоматического создания объемов после импорта и слияния совпадающих объектов. По умолчанию она также включена. Ее отключают только тогда, когда для создания оболочечной или плоской модели необходимо импортировать лишь поверхности.

Опция SMALL предназначена для автоматического удаления мелких (в том числе длинных узких поверхностей), которые могут осложнить разбивку. По умолчанию она активна, но доступна лишь при выборе метода «Defeature model». Ее следует отключить, если при импортировании модели появляются зазоры или дыры.

Во всех случаях необходимо сначала предпринять попытку импорта модели при помощи метода «No defeaturing», называемого также SMOOTH (гладкая модель). При этом достаточно большие модели рекомендуется предварительно разделить на отдельные фрагменты и передавать с использованием нескольких файлов. В дальнейшем для обеспечения непрерывности модели можно воспользоваться командой слияния совпадающих объектов:

Main Menu>Preprocessor>NumberingCtrls>Merge Items.

Если же устранение недостатков модели с использованием стандартных возможностей геометрического ядра ANSYS не возможно, то следует импортировать модель и изменять ее топологию посредством метода «Defeature model», называемого также FACETED (граненая модель). При этом искривленные поверхности будут представляться в виде совокупностей плоских треугольных поверхностей. При выборе этого метода открывается доступ к средствам упрощения геометрии, которые предназначены для устранения мелких объектов, а также поверхностей, имеющих непропорционально малые размеры в одном направлении (т.е. ленточных или клинообразных). Такие объекты могут вызвать трудности при генерации сеток конечных элементов. При данном методе импортирования в подменю *Main Menu>Preprocessor>Modeling* появляются два новых раздела «Simplify» (упрощать) и «Geom Repair» (исправлять геометрию).

Для обнаружения мелких объектов (т.е. отображения их на экране) можно воспользоваться следующими командами:

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Simplify>Detect/Display>
Small Lines (короткие линии),
Small Loops (короткие замкнутые кривые),
Small Areas (мелкие поверхности).*

На практике обычно короткие линии объединяют для получения относительно длинных кривых:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Simplify>Toolkit>Merge Lines.

Для сохранения регулярности модели здесь рекомендуется за один шаг объединять только две линии, имеющие общую точку.

Рекомендуется также удалять из модели слишком мелкие поверхности, например, путем объединения их с соседними:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Simplify>Toolkit>Merge Areas.

Достаточно удобная команда удаления линий заключается в стягивании линии к одной из ее концевых точек:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Simplify>Toolkit>Collapse Lines.

Эффективным способом упрощения геометрии является операция свертки поверхностей:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Simplify>Toolkit>Collapse Areas.

При этом сначала указывается поверхность, подлежащая свертке, а затем линия, в которую поверхность сворачивается. Например, можно свернуть поверхности, представляющие фаски или галтели твердотельной модели. Следует отметить, что данная операция отличается от объединения поверхностей, поскольку линии смежных поверхностей здесь меняют свое положение в пространстве для заполнения мест, оставшихся после свернутых объектов.

В многосвязанных плоских поверхностях можно удалить внутренние границы (отверстия):

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Simplify>Toolkit>Fill Loops.

Малые полости (углубления и сквозные отверстия), а также выступы в твердотельной модели могут вызвать проблемы при разбивке ее на элементы. Для их удаления доступны следующие команды:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Simplify>Toolkit>

Fill Cavity (заполнение полости),
Remove Boss (удаление выступа).

В разделе «Geom Repair» имеется большой набор средств для редактирования и улучшения геометрии импортированных моделей, которые предназначены в основном для обнаружения и устранения зазоров.

Для объединения возможностей рассмотренных выше методов импортирования моделей можно предложить следующий подход:

- 1) импорт IGES-файла при помощи метода «No defeaturing»;
- 2) исправление и изменение геометрической модели путем создания новых объектов и использования булевых операций;
- 3) экспорт модели в IGES-файл пакета ANSYS;
- 4) очистка базы данных (команда *Utility Menu>File>Clear & Start New*);
- 5) импорт IGES-файла при помощи метода «Defeature model»;
- 6) упрощение модели для устранения проблем связанности.

3 Типы элементов, используемые в программе ANSYS для моделирования массивных тел

Основными объемными элементами пакета ANSYS являются: SOLID45, SOLID92, SOLID95, SOLID185, SOLID186 и SOLID187.

SOLID45 – шестигранный объемный элемент первого порядка. Он определяется восемью узлами (I, J, K, L, M, N, O и P) и свойствами ортотропного материала (рисунок 2). При этом главные оси ортотропии материала совпадают с осями системы координат элемента, которая по умолчанию параллельна глобальной декартовой системе координат. В каждом узле здесь определяются только поступательные перемещения UX, UY и UZ. Рассматриваемый элемент обладает свойствами пластичности, ползучести, изменения жесткости при приложении нагрузок, а также позволяет учитывать большие перемещения и большие деформации.

SOLID92 – четырехгранный объемный элемент второго порядка. Он имеет форму тетраэдра и десять узлов. Его рекомендуется использовать при создании нерегулярных (свободных) сеток. В остальном данный элемент аналогичен предыдущему.

SOLID95 – шестигранный объемный элемент второго порядка. Это квадратичная версия элемента SOLID45, использующего линейную аппрок-

симацию перемещений. Его можно применять при построении свободных сеток без потери точности.

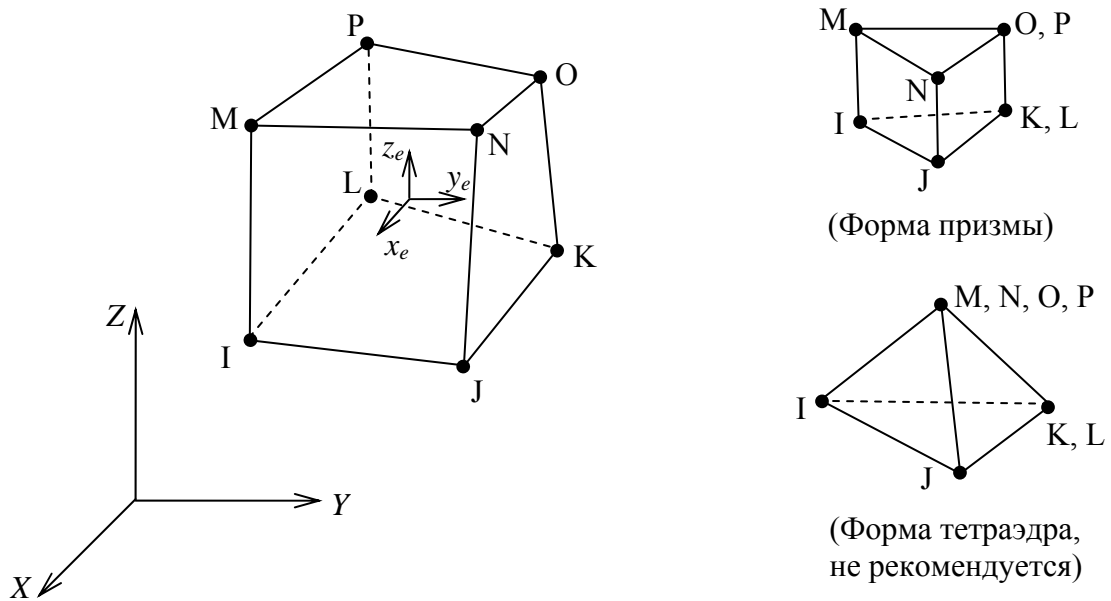


Рисунок 2 – Геометрия элемента SOLID45

SOLID185 и SOLID186 – шестигранные объемные элементы первого и второго порядков соответственно. Отличительная особенность данных элементов заключается в учете дополнительных нелинейных эффектов, таких как гиперупругость, вязкоупругость и вязкопластичность.

SOLID187 – аналогичен типу SOLID92, но в отличие от него позволяет учитывать дополнительные нелинейные эффекты (гиперупругость, вязкоупругость и вязкопластичность).

ТОНКОСТЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

1 Расчетные схемы тонкостенных конструкций

Тонкостенные конструкции получили широкое применение, особенно при создании летательных аппаратов. Точный расчет подобных конструкций на базе объемных моделей представляет весьма сложную задачу с большим числом неизвестных. Однако, учитывая, что толщина здесь намного меньше двух других размеров, решение задачи можно упростить.

В данном случае три измерения являются неравноправными. Поэтому следует попытаться отделить нормальную координату и свести трехмерные уравнения к двумерным, т.е. к уравнениям, включающим только две независимые переменные. Это можно сделать как формально математически, так и путем привлечения некоторых физических гипотез. В результате получают различные расчетные схемы: оболочка, пластина (изгибная панель), мембрана (безмоментная оболочка), сдвиговая панель.

Оболочкой называется тело, ограниченное двумя криволинейными поверхностями, расстояние между которыми мало по сравнению с прочими размерами. Геометрическое место точек, равноудаленных от обеих поверхностей, называется срединной поверхностью.

Оболочка в общем случае может работать на растяжение-сжатие и сдвиг в плоскостях, касательных к срединной поверхности, а также на изгиб и кручение.

Пластиной называется призматическое или цилиндрическое тело, высота которого мала по сравнению с размерами в плане. При расчете пластин обычно принимают допущение о недеформируемости срединной плоскости, т.е. учитывают только работу на изгиб и кручение. Очевидно, что пластина является частным случаем более общей расчетной схемы – оболочки.

В теории пластин и оболочек простейшей и наиболее широко используемой является гипотеза прямых нормалей Кирхгофа-Лява, согласно которой любой прямолинейный элемент, нормальный до деформации к срединной поверхности, остается прямолинейным, нормальным к деформированной срединной поверхности и сохраняет свою длину. Характерной особенностью данной гипотезы является то, что она не учитывает деформации поперечного сдвига и поэтому применима для расчета достаточно тонких пластин и оболочек. Понятие «тонкая» зависит от типа задачи. Но, вообще говоря, харак-

терный размер пластины (или оболочки) должен, по крайней мере, в десять раз превышать ее толщину.

Другой кинематической моделью является гипотеза о независимом повороте нормали, согласно которой любой прямолинейный элемент, нормальный до деформации к срединной поверхности, при деформировании не искривляется, но в общем случае не остается нормальным к деформированной срединной поверхности. Ее называют гипотезой типа Тимошенко (или Миндлина-Рейсснера). Она позволяет в первом приближении учитывать деформации поперечного сдвига и поэтому применима к расчету умеренно толстых пластин и оболочек, а также композитных конструкций, обладающих достаточно высокой сдвиговой (межслоевой) податливостью.

Обе представленные выше гипотезы приводят к линейному распределению по толщине тангенциальных перемещений, а, следовательно, и напряжений в слоях, параллельных срединной поверхности (рисунок 1, а и б).

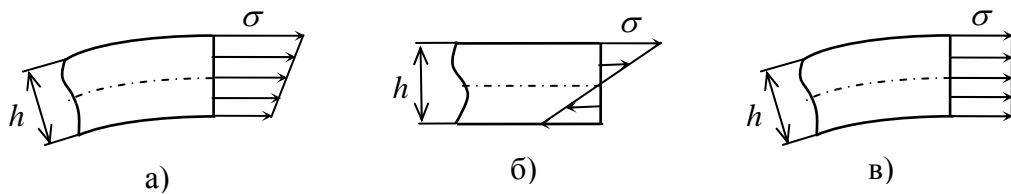


Рисунок 1 – Распределение напряжений по толщине оболочки (а), пластины (б) и мембраны (в)

В МКЭ для определения деформированного состояния конечного элемента оболочки (или пластины) необходимо выполнить аппроксимацию перемещений срединной поверхности и углов поворота нормали через узловые перемещения. При использовании классической гипотезы Кирхгофа-Лява аппроксимации подлежат только перемещения срединной поверхности, а углы поворота нормали выражаются через производные от этих перемещений. Такой подход наталкивается на серьезные трудности, связанные с необходимостью обеспечить непрерывность поля перемещений, т.е. совместность конечных элементов. Применение же несовместных элементов не позволяет контролировать точность расчета.

Отмеченные трудности можно обойти, если воспользоваться независимой аппроксимацией перемещений и углов поворота нормали (т.е. гипотезой типа Тимошенко). Благодаря этому удастся построить семейства конечных

элементов изопараметрического типа, пригодных для расчета пластин и оболочек произвольной конфигурации.

Следует отметить, что изопараметрическими называются элементы, в которых аппроксимация перемещений и геометрии осуществляется с помощью одних и тех же соотношений.

В отличие от пластин оболочки за счет кривизны работают главным образом на растяжение-сжатие, а не на изгиб и кручение, что позволяет более выгодно использовать материал.

В инженерных расчетах довольно часто встречаются задачи, в которых напряжения практически не изменяются по толщине (рисунок 1,в). Напряжения в этом случае не создают моментов, и поэтому такое напряженное состояние называют безмоментным. При создании несущих тонкостенных конструкций всегда стремятся обеспечить их работу в основном как безмоментных оболочек (или мембран). В данном случае они получаются наиболее легкими. Таким образом, мембрана – это также частный случай оболочки, когда ее изгибная жесткость полагается равной нулю.

Следует отметить, что тонкостенные конструкции без подкрепляющих ребер жесткости (поясов), как правило, не используются. Следовательно, часто возникает потребность в учете этих подкреплений. Для их моделирования в МКЭ обычно применяют одноосные стрелневые (ферменные) элементы. Когда пояса обладают достаточно высокой изгибной и крутильной жесткостью, используют также и балочные элементы.

Если пояса мощные, а оболочка (обшивка) тонкая, то можно пренебречь ее работой на растяжение-сжатие и считать, что она работает только на сдвиг. Таким образом, приходим к расчетной схеме в виде сдвиговой панели. Очевидно, что сдвиговая панель является частным случаем мембраны.

3 Типы элементов, используемые в программе ANSYS для моделирования тонкостенных конструкций

В программе ANSYS к категории оболочечных (SHELL) относятся следующие типы элементов: SHELL28, SHELL41, SHELL43, SHELL63, SHELL91, SHELL93, SHELL99 и SHELL181. Имеются еще не отмеченные здесь элементы осесимметричной оболочки (или оболочки вращения).

SHELL28 – 4-узловой элемент сдвиговой или закручиваемой панели. Он используется для передачи нагрузок сдвига в рамных конструкциях. При KEYOPT(1) = 0 данный элемент применяется в качестве сдвиговой панели и

имеет три степени свободы в каждом узле: перемещения UX , UY и UZ . Если $KEYOPT(1) = 1$, рассматривается закручиваемая панель, степенями свободы которой являются уже повороты $ROTX$, $ROTY$ и $ROTZ$. Элемент SHELL28 следует использовать только совместно с каркасом из балочных или стержневых элементов, поскольку в противном случае трудно обеспечить геометрическую неизменяемость модели.

SHELL41 – 4-узловой элемент мембраны. Он обладает только мембранной жесткостью (в своей плоскости) и предназначен для моделирования безмоментных оболочек. В каждом узле здесь определяются только поступательные перемещения UX , UY и UZ .

SHELL63 – элемент упругой оболочки, обладающий мембранной и изгибной жесткостями. Он чаще других используется для моделирования тонкостенных конструкций, поэтому рассмотрим его более детально.

Элемент SHELL63 определяется четырьмя узлами (I, J, K и L), значениями толщины в узлах ($TK(I)$, $TK(J)$, $TK(K)$ и $TK(L)$), жесткостью упругого основания (EFS) и свойствами материала. В каждом узле он имеет шесть степеней свободы: перемещения UX , UY , UZ и повороты $ROTX$, $ROTY$, $ROTZ$. Если материал является ортотропным, то его главные направления связываются с системой координат элемента (рисунок 2).

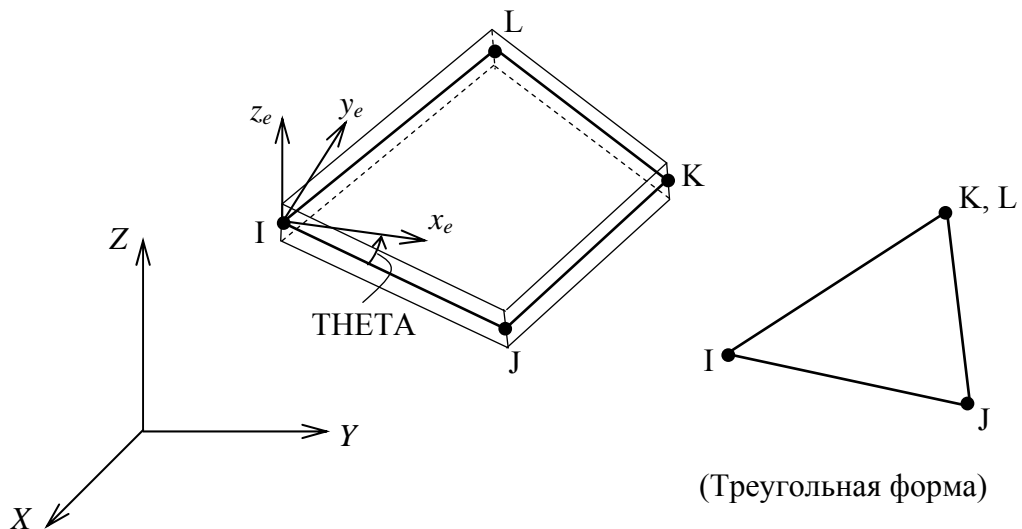


Рисунок 2 – Элемент упругой оболочки SHELL63

По умолчанию ось x_e системы координат элемента направляется от узла I к узлу J, ось z_e нормальна к поверхности элемента (ее направление определяется правилом правой руки при обходе узлов в порядке I, J и K), а ось y_e

перпендикулярна осям x_e , z_e и образует с ними правую систему координат. Если задан параметр THETA (в градусах), система координат элемента поворачивается на соответствующий угол относительно оси z_e .

Если элемент имеет постоянную толщину, то при задании реальных постоянных можно указать значение только в первом узле ТК(I), в противном случае необходимо задать значения для всех четырех узлов.

Для приближенного моделирования неоднородных (например, многослойных) оболочек здесь дополнительно можно определить следующие геометрические характеристики: RMI – отношение изгибного момента инерции, который будет использоваться в расчетах, к моменту инерции, вычисленному на основе заданной толщины (по умолчанию RMI = 1); STOR и SBOT – расстояния от срединной поверхности до крайних верхних и нижних волокон соответственно, которые используются для вычисления напряжений. Значения STOR и SBOT должны быть положительными; если они не указываются, напряжения вычисляются исходя из заданной толщины.

Кроме того, можно задать присоединенную (неконструкционную) массу на единицу площади (ADMSUA).

При помощи опции KEYOPT(1) можно удалить из элемента SHELL63 мембранную или изгибную жесткость:

- = 0 – мембранная и изгибная жесткости (по умолчанию);
- = 1 – только мембранная жесткость;
- = 2 – только изгибная жесткость.

Четыре узла рассматриваемого элемента должны лежать в одной плоскости (допускается только малое отклонение от плоскости). При указании для узлов K и L одного и того же номера данный элемент будет иметь треугольную форму.

В заключение отметим, что элемент SHELL63 строится на базе классической гипотезы Крихгофа-Лява, т.е. без учета деформаций поперечного сдвига. Следовательно, его можно применять лишь для моделирования тонких оболочек. Кроме того, он не учитывает пластичность, но может использоваться при анализе больших перемещений.

SHELL43 – 4-узловой элемент оболочки со свойствами пластичности. Его можно применять для расчета искривленных и умеренно толстых оболочек, поскольку он в первом приближении учитывает деформации поперечного сдвига. Данный элемент обладает свойствами пластичности, ползучести,

изменения жесткости при приложении нагрузок, а также позволяет учитывать большие перемещения и большие деформации. Если при анализе больших деформаций здесь возникают проблемы со сходимостью, рекомендуется использовать элемент SHELL181.

SHELL93 – 8-узловой элемент оболочки второго порядка. Его обычно применяют для моделирования искривленных оболочек. Он позволяет учитывать пластичность, изменение жесткости при приложении нагрузок, большие перемещения и большие деформации. Деформации поперечного сдвига здесь также полагаются постоянными по толщине.

SHELL181 – 4-узловой элемент оболочки с конечными деформациями. Он хорошо подходит для расчета как тонких, так и умеренно толстых оболочек. Данный элемент может применяться в линейных и нелинейных задачах. При этом в нелинейных задачах учитываются большие повороты и/или деформациями, пластичность, гиперупругость, вязкопластичность и ползучесть, а также изменение толщины. Для ввода толщины и прочей информации здесь можно использовать как реальные постоянные, так и поперечные сечения. Первый способ применим только для однослойных оболочек. Более общим методом указания геометрических характеристик оболочки является использование поперечных сечений. Команды создания поперечных сечений позволяют определять толщину в виде функции глобальных координат. Кроме того, они дают возможность задавать структуру многослойного пакета, что характерно для композитов.

Следует отметить, что SHELL181 совместно с элементами многослойной оболочки SHELL91 и SHELL99 подробно рассматриваются в последующих темах при изложении вопросов, связанных с моделированием композитов.

РАСЧЕТ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

1 Расчетные схемы стержневых конструкций

В любой конструкции, как правило, имеются элементы, которые не участвуют в силовой работе. Если подобные элементы исключить, то получим силовую схему. Для того чтобы упростить расчет, обычно отбрасывают второстепенные элементы, оставляя лишь наиболее существенные. В результате получают расчетную схему. Итак, расчетной схемой называется упрощенное изображение действительной конструкции, которое фигурирует в процессе расчета. Для одной и той же конструкции можно использовать различные расчетные схемы.

Рассмотрим конструкцию, состоящую из стержней, соединенных по концам (рисунок 1, а). Стержни обычно крепятся заклепками, болтами или сваркой. Для данной стержневой системы можно предположить, что узлы жесткие, т.е. в качестве расчетной схемы взять раму (рисунок 1, б). Это более близко к истине, но расчет будет достаточно трудоемким (рассматриваемая рама будет девять раз статически неопределимой).

Если все стержни заменить их осями и предположить, что в узлах они пересекаются в одной точке и соединяются посредством идеальных шарниров, то мы придем к расчетной схеме в виде фермы (рисунок 1, в). Под действием внешних сил (которые считаются приложенными в узлах) в стержнях фермы возникают только осевые силы. При этом рассматриваемая система будет статически определимой и расчет существенно упрощается.

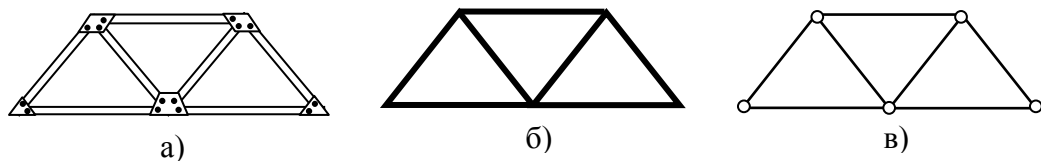


Рисунок 1 – Стержневая конструкция и ее расчетные схемы

На выбор расчетной схемы здесь влияет соотношение между длиной стержня и его поперечными размерами. Для длинных тонких стержней расчетная схема в виде фермы дает вполне удовлетворительные результаты.

Следует отметить, что для проектировочных расчетов обычно применяют более грубые расчетные схемы, а для поверочных – более точные.

2 Ферменный и балочный элементы

Для конечно-элементного моделирования ферм используется одноосный стержневой элемент (или ферменный элемент). Ферменным элементом называется прямолинейный стержень, который присоединяется к другим конструктивным элементам посредством идеальных шарниров. Если к нему не приложены поперечные силы, то он будет испытывать лишь растяжение или сжатие.

Матрица жесткости такого элемента наиболее просто записывается в местной системе координат \bar{x} , связанной с продольной осью стержня (рисунок 2):

$$[\bar{K}] = \frac{EF}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости; F – площадь поперечного сечения стержня; l – длина элемента.

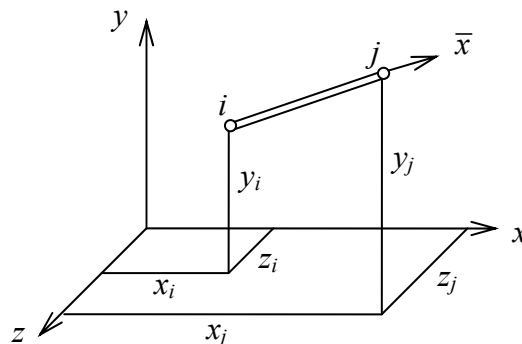


Рисунок 2 – Ферменный элемент

В общей системе координат x, y, z , в которой задана вся конструкция, матрица жесткости ферменного элемента находится как

$$[K^e] = \frac{EF}{l} \begin{bmatrix} d & | & -d \\ \hline -d & | & d \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $[d] = [\lambda_0]^T [\lambda_0]$ – подматрица размером 3×3 ; $[\lambda_0] = [\lambda_{xx} \ \lambda_{xy} \ \lambda_{xz}]$ – матрица-строка направляющих косинусов, причем

$$\lambda_{xx} = \frac{x_j - x_i}{l}; \quad \lambda_{xy} = \frac{y_j - y_i}{l}; \quad \lambda_{xz} = \frac{z_j - z_i}{l}.$$

Таким образом, ферменный элемент однозначно определяется двумя узлами, площадью поперечного сечения стержня и модулем упругости материала. В узлах здесь задаются только поступательные перемещения.

Для моделирования балок и рам используется балочный элемент. Балочным элементом называется прямолинейный брус, способный воспринимать в общем случае все виды нагрузок (растяжение-сжатие, изгиб в двух плоскостях и кручение). В каждом из двух узлов здесь рассматривается по шесть перемещений (три линейных и три угловых) и соответствующие им силовые факторы.

Наиболее просто матрица жесткости такого элемента записывается в местной системе координат, когда ось \bar{x} совпадает с продольной осью стержня, а оси \bar{y} и \bar{z} с главными центральными осями его поперечного сечения. В этом случае узловые силы и перемещения распадаются на четыре группы, которые можно рассматривать независимо друг от друга. При соответствующем расположении сил и перемещений матрицу жесткости балочного элемента в местной системе координат можно представить в блочно-диагональном виде

$$[\bar{K}] = \begin{bmatrix} \bar{K}_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{K}_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{K}_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{K}_d \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $[\bar{K}_a]$ – подматрица, характеризующая работу на растяжение-сжатие (размер 2x2); $[\bar{K}_b]$ и $[\bar{K}_c]$ – подматрицы, описывающие изгиб в плоскостях $\bar{x}\bar{y}$ и $\bar{x}\bar{z}$ соответственно (размер каждой 4x4); $[\bar{K}_d]$ – подматрица, определяющая работу на кручение (размер 2x2).

Очевидно, что $[\bar{K}_a]$ полностью совпадает с матрицей жесткости ферменного элемента в местной системе координат (см. формулу (1)).

Как известно, широко используемая на практике техническая теория изгиба балки базируется на гипотезе плоских сечений Бернулли-Эйлера, согласно которой плоские до деформации поперечные сечения балки остаются после деформации плоскими и ортогональными к изогнутой оси. Очевидно, что эта гипотеза не учитывает деформации поперечного сдвига и применима для достаточно длинных балок.

Используя данную кинематическую модель, можно получить

$$[\bar{K}_b] = \frac{EI_{\bar{z}}}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $I_{\bar{z}}$ – момент инерции поперечного сечения относительно оси \bar{z} . При этом аппроксимация прогибов здесь осуществляется при помощи полинома третьей степени.

На практике также достаточно часто используется другая кинематическая модель, основанная на гипотезе Тимошенко, согласно которой плоские до деформации поперечные сечения балки остаются после деформации плоскими, но не обязательно ортогональными к изогнутой оси. Такой подход позволяет в первом приближении учесть деформации поперечного сдвига (они считаются постоянными по сечению). Аппроксимация линейных и угловых перемещений здесь выполняется независимо, что дает возможность строить изопараметрические элементы различных порядков.

Подматрицу $[\bar{K}_c]$ можно получить из $[\bar{K}_b]$, меняя знаки во втором и четвертом столбцах, а также во второй и четвертой строках, соответствующих моментам и углам поворота. Кроме того, вместо $I_{\bar{z}}$ следует подставить $I_{\bar{y}}$ (момент инерции поперечного сечения относительно оси \bar{y}).

И, наконец, рассматривая кручение бруса, находим

$$[\bar{K}_d] = \frac{GJ}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где G – модуль сдвига; J – момент инерции на кручение (константа Сен-Венана).

Здесь также требуется преобразование матрицы жесткости к общей системе координат.

Таким образом, балочный элемент однозначно определяется двумя узлами, площадью поперечного сечения, моментами инерции сечения относительно двух главных центральных осей, моментом инерции на кручение и свойствами материала.

Следует отметить, что при решении трехмерных задач здесь возникают трудности, связанные с ориентацией сечения бруса (т.е. осей \bar{y} и \bar{z}).

3 Типы элементов, используемые в программе ANSYS для моделирования стержневых систем

В программе ANSYS к ферменным элементам относятся следующие типы: LINK1, LINK8 и LINK180.

LINK1 – это двухмерный одноосный стержневой элемент, способный воспринимать растяжение и сжатие. Он не работает на изгиб и кручение. Данный элемент определяется двумя узлами (I и J), площадью поперечного сечения (AREA), начальной деформацией (ISTRN) и свойствами материала. В каждом узле здесь задается по две степени свободы: перемещения UX и UY в направлении осей x и y узловой системы координат. Система координат элемента имеет одну ось, направленную от узла I к узлу J.

LINK8 – это трехмерный одноосный стержневой элемент, в каждом узле которого определяются три степени свободы: UX, UY и UZ. В остальном он аналогичен предыдущему.

LINK1 и LINK8 позволяют учитывать различные нелинейные эффекты, такие как пластичность, ползучесть, радиационное набухание, изменение жесткости при наличии нагрузок и большие перемещения.

LINK180 – также трехмерный ферменный элемент, но в отличие от LINK8 он дает возможность учитывать большие (конечные) деформации. При этом его площадь поперечного сечения является функцией осевой деформации. По умолчанию она изменяется в процессе деформирования так, чтобы объем элемента сохранялся неизменным. Кроме того, для этого элемента вместо начальной деформации можно задавать дополнительную (неконструкционную) погонную массу (ADDMAS).

Основными балочными элементами пакета ANSYS являются: BEAM3, BEAM4, BEAM54, BEAM44, BEAM188 и BEAM189.

BEAM3 – это двухмерный элемент упругой балки, работающий на растяжение-сжатие и изгиб. Он определяется двумя узлами (I и J), площадью поперечного сечения (AREA), моментом инерции сечения (IZZ), высотой балки (HEIGHT) и свойствами материала. Кроме того, здесь можно задавать коэффициент поперечного сдвига (SHEARZ), начальную деформацию (ISTRN) и дополнительную погонную массу (ADDMAS). Для пренебрежения деформацией поперечного сдвига следует положить $SHEARZ = 0$. Данный элемент имеет три степени свободы в каждом узле: перемещения UX, UY и поворот ROTZ относительно оси z узловой системы координат.

BEAM4 – это трехмерный элемент упругой балки, работающий на растяжение-сжатие, изгиб в двух плоскостях и кручение. Он определяется двумя узлами (I и J), площадью поперечного сечения (AREA), моментами инерции сечения (IZZ и IYY), высотой (TKY) и толщиной (TKZ) балки, углом ориентации системы координат элемента (THETA), моментом инерции на кручение (IXX) и свойствами материала. Здесь также можно задавать коэффициенты поперечных сдвигов (SHEARZ и SHEARY), начальную деформацию (ISTRN) и дополнительную погонную массу (ADDMAS). Данный элемент имеет шесть степеней свободы в узле: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY и ROTZ.

Ось x_e системы координат элемента направляется от узла I (первый конец) к узлу J (второй конец). Если дополнительный (ориентационный) узел K не задан и THETA = 0, ось y_e автоматически располагается параллельно плоскости XY глобальной декартовой системы координат. В случае, когда элемент параллелен глобальной оси Z (или отклоняется от нее не более чем 0,01%), ось y_e элемента ориентируется в направлении глобальной оси Y. Третья ось z_e проводится так, чтобы получилась правая система координат. Дополнительный узел K используется для альтернативного задания системы координат элемента. Он совместно с узлами I и J определяет плоскость $x_e z_e$. Кроме того, угол θ (THETA) позволяет поворачивать систему координат элемента относительно оси x_e . Несколько вариантов ориентации трехмерного балочного элемента показаны на рисунке 3. Следует отметить, что ориентационные узлы создаются автоматически при генерации балочных элементов на линии, если для нее в качестве атрибута задана ориентационная точка.

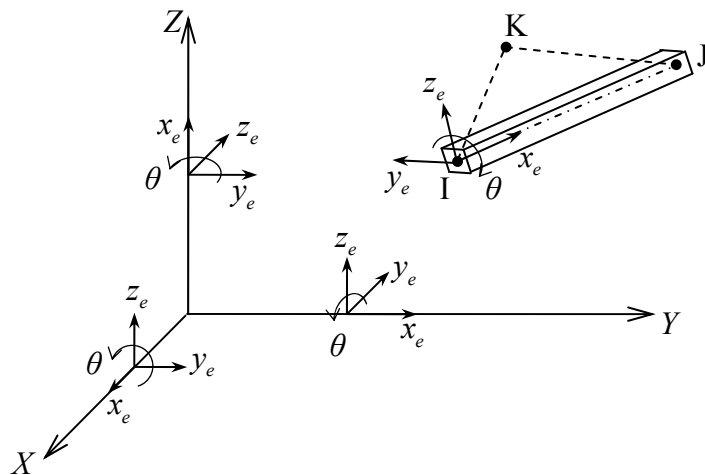


Рисунок 3 – Варианты ориентации балочного элемента

Типы BEAM54 и BEAM44 представляют собой соответственно двухмерный и трехмерный балочные элементы переменного сечения. В отличие от рассмотренных выше элементов здесь можно задавать в узлах I и J разные геометрические характеристики поперечных сечений, а также смещения узлов относительно оси балки (т.е. так называемые эксцентриситеты).

Два новых типа BEAM188 и BEAM189 являются трехмерными балочными элементами первого и второго порядков соответственно, построенными на базе кинематической модели Тимошенко. Кроме шести основных степеней свободы (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY и ROTZ) с помощью опции KEYOPT(1) = 1 здесь можно определить еще одну – депланацию WARP, характеризующую отклонение сечения от плоского. Отличительная особенность данных элементов заключается в учете различных нелинейных эффектов, таких как пластичность, вязкоупругость, вязкопластичность, ползучесть, конечные деформации и т.п.

BEAM188 и BEAM189 не используют реальные постоянные. Вместо ввода числовых значений геометрических характеристик здесь необходимо задать форму сечения.

В простых случаях сделать это можно путем выбора нужного сечения из одиннадцати predetermined (стандартных) типов сечений балок и ввода соответствующих размеров:

Main Menu>Preprocessor>Sections>Beam>Common Sections.

Здесь также можно изменить установленные по умолчанию параметры разбиения сечения на четырехугольные 8-узловые ячейки. Такая вспомогательная сетка используется для вычисления геометрических характеристик сечения.

Кроме того, программа ANSYS позволяет пользователю создавать собственные сечения произвольной формы. Для задания собственного сечения необходимо выполнить следующие шаги:

1. Построить плоскую модель, состоящую из поверхностей. Если для описания геометрии сечения используется несколько поверхностей, то их необходимо при помощи булевых операций объединить или склеить.

2. На всех кромках поверхности (или поверхностей) задать число делений на конечные элементы. Для этого можно воспользоваться, например, инструментальной панелью «MeshTool».

3. Записать сетку пользователя в файл:

Main Menu>Preprocessor>Sections>Beam>Custom Sections>Write From Areas.

Здесь необходимо при помощи мыши указать в рабочем окне нужную поверхность (или несколько поверхностей), а также ввести имя выходного файла (по умолчанию для него используется расширение SECT). При этом программа ANSYS автоматически создаст ячейки и полученную таким образом сетку запишет в текстовый файл с заданным именем.

4. Считать сетку пользователя из файла для вычисления геометрических характеристик сечения:

Main Menu>Preprocessor>Sections>Beam>Custom Sections>Read Sect Mesh.

Здесь необходимо указать имя создаваемого сечения и ввести имя файла, в который ранее была записана сетка пользователя.

Отметим, что по умолчанию узлы балочных элементов BEAM188 и BEAM189 располагаются в центре тяжести сечения. Однако их можно сместить в центр сдвига, в начало системы координат сечения или в произвольную точку сечения.

4 Моделирование шарнирных соединений

В узлах ферменных элементов задаются только поступательные степени свободы, что автоматически обеспечивает их шарнирное соединение. Следовательно, для ферм не требуются какие-либо дополнительные операции по моделированию шарниров в узлах.

Как известно, в узлах балочных элементов помимо поступательных перемещений присутствуют еще и углы поворота. Поэтому если в конструкции рамы или балки имеется шарнир, то для его моделирования следует воспользоваться специальными приемами.

Рассмотрим случай, когда два балочных элемента имеют общую концевую точку, в которой располагается сферический шарнир. В этой точке оба элемента должны иметь одинаковые поступательные перемещения UX, UY и UZ, в то время как углы поворота ROTX, ROTY и ROTZ могут быть, вообще говоря, различными. Именно поэтому в общей концевой точке для этих двух конечных элементов не может быть общего узла. Здесь должны существовать два разных узла с одинаковыми координатами. Кроме того, для таких узлов нужно связать между собой по отдельности узловые степени свободы UX, UY и UZ так, чтобы обеспечить их равенство.

Для связывания отдельных степеней свободы двух или более узлов в программе ANSYS имеется следующая команда:

Main Menu>Preprocessor>Coupling/Ceqn>Couple DOFs.

Здесь указываются узлы и их компоненты перемещения. При этом каждому набору связанных степеней свободы присваивается уникальный ссылочный номер.

Отметим, что для представления цилиндрического шарнира нужно связать все степени свободы за исключением одной – поворота вокруг оси вращения шарнира.

Для идеализации цилиндрического шарнира можно также воспользоваться элементом COMBIN7 (рисунок 4). Он задается двумя совпадающими узлами I, J и необязательным ориентационным узлом K, определяющим ось вращения шарнира. Если узел K не задан, то ось вращения направляется параллельно оси Z глобальной декартовой системы координат.

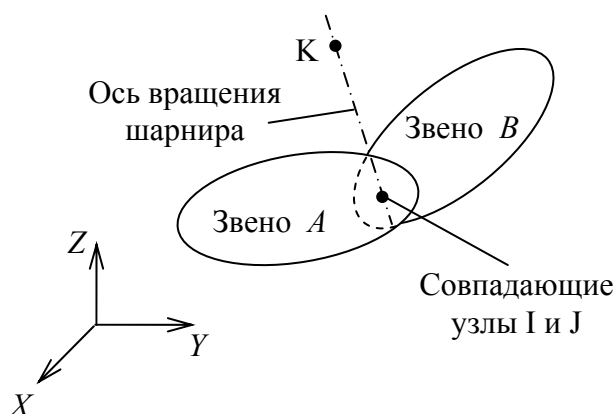


Рисунок 4 – Элемент COMBIN7

В случае применения балочного элемента BEAM44 задача моделирования шарнира несколько упрощается. Данный элемент имеет специальные опции KEYOPT(7) и KEYOPT(8), позволяющие обнулять жесткости соответственно в узлах I и J по выбранным направлениям. Это делает возможным организацию шарнира в одном общем узле.

РЕШЕНИЕ ДВУХМЕРНЫХ ЗАДАЧ

1 Плоская задача

Существует широкий класс важных в практическом отношении задач, в которых перемещения, деформации и напряжения зависят лишь от двух координат (например, x и y). Этот класс задач под общим названием «плоская задача теории упругости» подразделяется на плоскую деформацию и обобщенное плоское напряженное состояние.

Если в процессе нагружения все точки тела перемещаются только параллельно одной плоскости (плоскости $xу$, например), то соответствующее деформированное состояние называется плоской деформацией. Таким образом, в случае плоской деформации для перемещений имеем $u_x = u_x(x, y)$, $u_y = u_y(x, y)$, $u_z = 0$. В соответствии с уравнениями Коши деформации ε_{zz} , ε_{yz} и ε_{zx} оказываются равными нулю, а из закона Гука вытекает, что касательные напряжения σ_{yz} и σ_{zx} также равны нулю. Остальные компоненты деформации и напряжения являются функциями только координат x и y .

Примером здесь может служить тело, помещенное между двумя абсолютно жесткими плитами, расстояние между которыми остается неизменным, и сжимаемое силами, параллельными плоскостям плит (рисунок 1,а).

В таких же условиях работает длинное призматическое или цилиндрическое тело при действии нагрузки, перпендикулярной оси тела и постоянной вдоль нее. Близкими к этому случаю являются задачи о плотине (рисунок 1,б), тоннеле метрополитена и т.д.

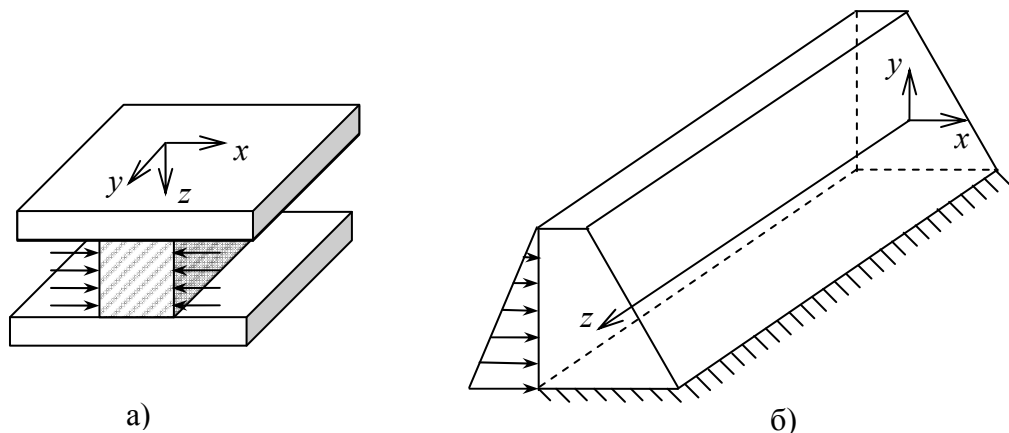


Рисунок 1 – Примеры плоской деформации

Если, далее, тонкая пластина, параллельная плоскости xu , нагружена объемными и по контуру поверхностными силами, параллельными ее плоскости и равномерно распределенными по толщине (рисунок 2), то имеем дело с обобщенным плоским напряженным состоянием. В этом случае можно пренебречь компонентами напряжения σ_{zz}, σ_{yz} и σ_{zx} , а σ_{xx}, σ_{yy} и σ_{xy} считать постоянными по толщине:

$$\sigma_{zz} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0;$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xx}(x, y); \quad \sigma_{yy} = \sigma_{yy}(x, y); \quad \sigma_{xy} = \sigma_{xy}(x, y).$$

Из закона Гука следует, что при обобщенном плоском напряженном состоянии деформации сдвига $\varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = 0$, а остальные компоненты деформации представляются как функции только координат x и y .

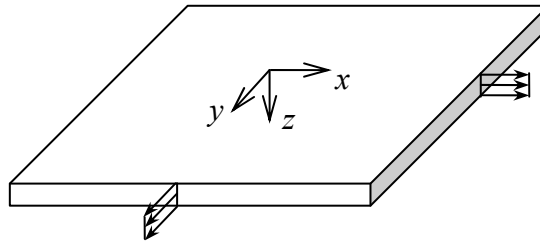


Рисунок 2 – Пример обобщенного плоского напряженного состояния

Выпишем основные уравнения теории упругости применительно к плоской задаче. Из трех дифференциальных уравнений равновесия остается два. В отсутствие объемных сил они имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

или в матричной записи

$$\frac{\partial [\sigma_x]}{\partial x} + \frac{\partial [\sigma_y]}{\partial y} = 0,$$

где $[\sigma_x] = \{\sigma_{xx} \ \sigma_{xy}\}$; $[\sigma_y] = \{\sigma_{yx} \ \sigma_{yy}\}$.

Из уравнений Коши остается только три соотношения:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}. \quad (2)$$

Эти соотношения можно также записать в матричной форме

$$[\varepsilon] = [L][u],$$

где $[\varepsilon] = \{\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{xy}\}$; $[u] = \{u_x \ u_y\}$.

$$[L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Как известно, закон Гука можно представить в форме $[\varepsilon] = [\Phi][\sigma]$ или $[\sigma] = [\kappa][\varepsilon]$, где $[\sigma] = \{\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{xy}\}$. При этом для обобщенного плоского напряженного состояния имеем

$$[\Phi] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & 0 \\ -\mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$[\kappa] = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Здесь E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

Для плоской деформации выражения для матриц $[\Phi]$ и $[\kappa]$ получаются из (4) и (5) с помощью замены

$$E \rightarrow E' = \frac{E}{1-\mu^2}; \quad \mu \rightarrow \mu' = \frac{\mu}{1-\mu}.$$

Отметим, что в случае плоской деформации нормальное напряжение σ_{zz} отлично от нуля, но оно не имеет самостоятельного значения, поскольку выражается через σ_{xx} и σ_{yy} по формуле

$$\sigma_{zz} = \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}).$$

Точно так же в обобщенном плоском напряженном состоянии деформация $\varepsilon_{zz} \neq 0$, но может быть найдена через ε_{xx} и ε_{yy} :

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\mu}{1-\mu}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}).$$

Эти соотношения вытекают из закона Гука.

Таким образом, с учетом замены E и μ на E' и μ' при решении задач о плоской деформации и обобщенном плоском напряженном состоянии можно пользоваться одними и теми же уравнениями и объединить обе задачи в одну – плоскую задачу теории упругости.

2 Осесимметричная задача

Осесимметричное тело (или тело вращения) получается вращением плоской фигуры относительно некоторой оси, называемой осью вращения или центральной осью. Здесь удобно ввести цилиндрическую систему координат r, θ, z (рисунок 3).

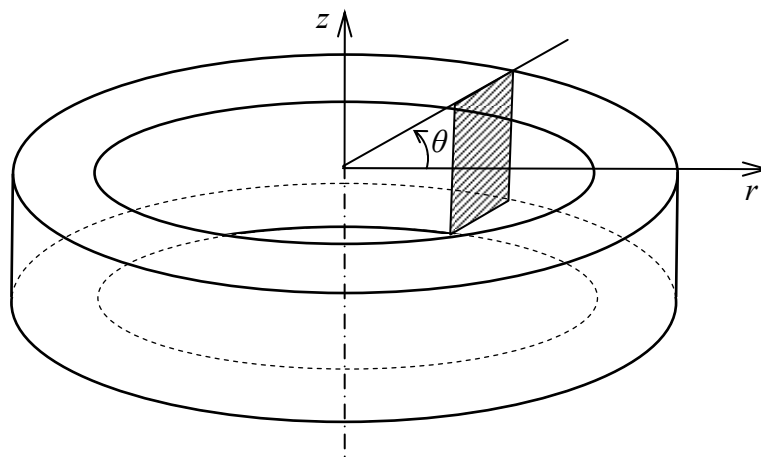


Рисунок 3 – Осесимметричное тело

Если нагрузка и граничные условия также симметричны относительно оси вращения тела, то его напряженно-деформированное состояние (НДС) не будет зависеть от окружной координаты θ , и все поперечные сечения будут находиться в одинаковых условиях. В этом случае вместо всего тела можно рассматривать лишь одно его сечение, т.е. свести трехмерную задачу теории упругости к двумерной, что существенно упрощает решение.

При таком деформировании окружные перемещения u_θ равны нулю, а радиальные и осевые перемещения будут являться функциями только двух координат: $u_r = u_r(r, z)$; $u_z = u_z(r, z)$.

Из трех дифференциальных уравнений равновесия здесь так же, как и в случае плоской задачи, остается лишь два:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} = 0. \quad (6)$$

Геометрические соотношения Коши имеют вид

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r}; \quad \varepsilon_{rz} = \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z}. \quad (7)$$

При этом сдвиговые деформации $\varepsilon_{r\theta}$ и $\varepsilon_{\theta z}$, а также соответствующие им касательные напряжения $\sigma_{r\theta}$ и $\sigma_{\theta z}$ тождественно равны нулю. Следует отметить, что окружные деформации $\varepsilon_{\theta\theta}$ и напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ здесь могут иметь немаловажное значение.

Если нагрузка не является осесимметричной, то ее можно разложить в ряд Фурье на гармонические составляющие. Полное решение в данном случае находится как суперпозиция отдельных решений для каждой составляющей. Очевидно, что такой подход справедлив только для линейных задач.

3 Типы элементов, используемые в программе ANSYS для решения двумерных задач

Для решения плоской и осесимметричной задач механики деформируемого твердого тела в программе ANSYS используются следующие типы элементов: PLANE2, PLANE42, PLANE82, PLANE182 и PLANE183.

PLANE2 является треугольным элементом второго порядка, т.е. определяется шестью узлами. PLANE42 представляет собой четырехугольный элемент первого порядка и имеет четыре узла. PLANE82 – это четырехугольный элемент второго порядка с восьмью узлами. Следует отметить, что четырехугольные элементы могут вырождаться в элементы треугольной формы путем определения совпадающих узлов.

В каждом узле здесь задается по две степени свободы: перемещения в направлении осей x и y узловой системы координат. Элементы PLANE2, PLANE42 и PLANE82 позволяют учитывать различные нелинейные эффекты, такие как пластичность, ползучесть, радиационное набухание, изменение жесткости при наличии нагрузок, большие перемещения и большие деформации. Формулировка этих элементов (element behavior) задается опцией KEYOPT(3):

- 0 – обобщенное плоское напряженное состояние (plane stress);
- 1 – осесимметричное поведение (axisymmetric);
- 2 – плоская деформация (plane strain);
- 3 – обобщенное плоское напряженное состояние с указанием толщины (plane str w/thk).

Моделирование здесь следует проводить в плоскости XU глобальной декартовой системы координат. При этом для осесимметричных элементов ось U должна являться осью симметрии, а X – радиальной осью (отрицательные значения координаты X не допускаются). Следует отметить, что все узлы, расположенные на оси симметрии U , должны быть закреплены от перемещения в радиальном направлении. Кроме того, на осесимметричную модель необходимо наложить хотя бы одну связь в осевом направлении, чтобы устранить возможность ее перемещения как жесткого целого.

Для плоских элементов толщина полагается равной единице (кроме специальных случаев, когда она указывается пользователем). В отличие от них осесимметричные элементы представляют полную модель (для 360°). Поэтому, например, при задании погонной кольцевой нагрузки q следует вводить полное значение силы $2\pi r q$ (где r – радиус окружности, по которой действует погонная нагрузка). Выходные величины (например, реакции) также указываются для 360° .

Последние типы PLANE182 и PLANE183 – это четырехугольные элементы первого и второго порядков соответственно. Они обладают дополнительными возможностями. В частности, они позволяют моделировать вязкоупругие и вязкопластичные материалы, а также полностью несжимаемые гиперупругие материалы.

В заключение следует отметить еще осесимметричные гармонические элементы PLANE25 и PLANE83, предназначенные для моделирования осесимметричных конструкций при неосесимметричном нагружении. Это четырехугольные элементы первого и второго порядков соответственно. В каждом узле здесь определяется уже по три степени свободы: перемещения в направлении осей x , y и z узловой системы координат. Как отмечалось ранее, нагрузка в данном случае определяется в виде ряда гармонических функций.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1 Использование активного набора

При построении сложной модели удобно (например, для задания нагрузок, просмотра результатов и увеличения скорости графического изображения) работать не со всей моделью, а лишь с ее отдельной частью. Программа ANSYS позволяет пользователю выбирать любые объекты (подсистемы), помещая их в активный набор. При этом остальные объекты данного типа становятся недоступными.

Активный набор является совокупностью геометрических и конечно-элементных объектов, с которой пользователь может работать в данный момент времени. Объекты, не входящие в активный набор, не удаляются из базы данных, но они не отображаются на экране, к ним нельзя прикладывать нагрузки и т.д.

Операции выбора объектов в активный набор часто применяются в процессе приложения нагрузок. Например, выбрав узлы на поверхности, можно приложить силы ко всем узлам данной подсистемы вместо того, чтобы задавать нагрузку в каждом отдельном узле.

Другой важной особенностью операций выбора является то, что можно выбрать подсистему объектов и назначить ей имя. Такие именованные подсистемы называются компонентами (components). При этом несколько компонентов можно сгруппировать в сборку (assembly). Имена компонентов и сборок можно затем использовать в командах вместо указания списка номеров объектов.

Для выбора объектов используется следующий пункт меню:

Utility Menu>Select>Entities.

При выполнении данной команды появляется диалоговая панель, показанная на рисунке 1. В верхней части этой панели имеются два списка. В первом указывается тип выбираемых объектов (точки, линии, поверхности, объемы, элементы или узлы). Во втором содержится список критериев отображения объектов:

- By Num/Pick – по номеру или путем указания на экране;
- Attached to – связанных с ранее выбранными объектами другого типа (например, выбор линий, связанных с поверхностями);
- By Location – на основе координат;

- By Attributes – на основе атрибутов;
- Exterior – на внешних границах;
- By Results – на основе результатов расчета.



Рисунок 1 – Диалоговая панель выбора объектов в активный набор

Различные подсистемы объектов можно выбирать, используя комбинацию из следующих восьми функций (рисунок 2):

- From Full – выбор объектов в новый активный набор из полной модели (системы);
- Reselect – повторный выбор из текущей подсистемы выбранных объектов;
- Also Select – добавление объектов, выбираемых из полной системы, к текущей активной подсистеме;
- Unselect – удаление части объектов из текущего активного набора;
- Select All – выбор всех объектов указанного типа;
- Select None – удаление из активного набора всех объектов указанного типа;
- Invert – передача в активной набор всех неактивных объектов и удаление из активного набора всех ранее активных объектов;
- Select Below – активизация всех объектов нижних уровней, входящих в состав активных объектов указанного типа.

В заключение следует отметить, что при запуске задачи на счет программой учитываются только активные узлы и элементы. Поэтому перед решением задачи, как правило, необходимо выбрать все объекты, имеющиеся в базе данных. Сделать это можно с помощью команды

Utility Menu>Select>Everything.

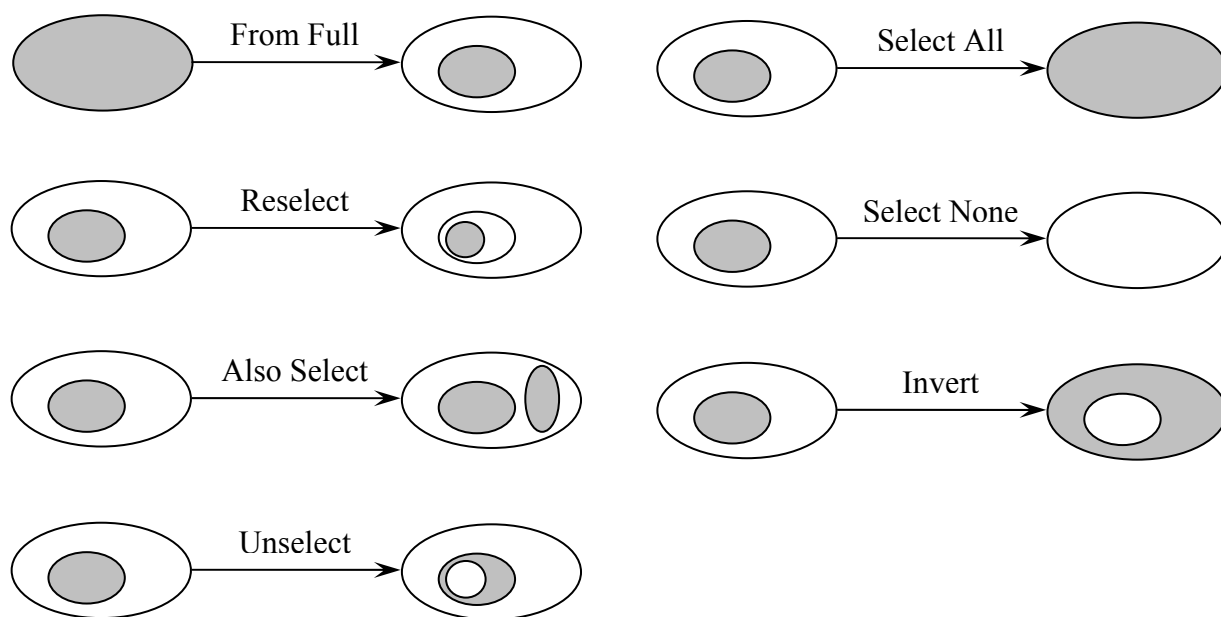


Рисунок 2 – Графическое представление основных функций выбора

2 Управление графическим изображением модели

Для изменения проекции, панорамирования, масштабирования и вращения отображаемой на экране дисплея модели предусмотрена команда

Utility Menu>PlotCtrls>Pan, Zoom, Rotate,

при выполнении которой появляется диалоговая панель, приведенная на рисунке 3 (слева). В последних версиях программы ANSYS она дублируется постоянно находящейся на экране инструментальной панелью управления видом (показана справа на том же рисунке).

С помощью этих панелей можно установить следующие предопределенные проекции: *Front* – вид спереди (на плоскость XY); *Back* – вид сзади; *Top* – вид сверху (на плоскость XZ); *Bot* – вид снизу; *Right* – вид справа (на плоскость YZ); *Left* – вид слева; *Iso* – изометрия; *Obliq* – косой вид; *WP* – вид на рабочую плоскость.

Кнопки приближения *Zoom*, *Box Zoom* и *Win Zoom* позволяют увеличить фрагмент изображения модели. Для этого нужно выделить указателем мыши (удерживая нажатой левую кнопку) соответствующий фрагмент и затем щелкнуть левой кнопкой. Кнопка *Back Up* восстанавливает предыдущий масштаб.

С помощью кнопок панорамирования можно перемещать изображение по рабочему окну, приближать или отодвигать его.



Рисунок 3 – Панели управления видом

Отметим, что вращение графического изображения модели (см. соответствующие кнопки) здесь выполняется относительно осей глобальной декартовой системы координат.

Если активизировать флажок «Dynamic Mode» (динамический режим), то перемещать изображение модели можно непосредственно мышью, удерживая нажатой левую кнопку, а вращать – с помощью правой кнопки.

Здесь следует обратить внимание на кнопку *Fit*, которая устанавливает подходящий масштаб так, чтобы вся модель целиком помещалась в рабочем окне.

В заключение отметим, что для перерисовки текущего графического изображения (т.е. для повторного выполнения последней команды вычерчивания объектов) можно воспользоваться следующим пунктом меню:

Utility Menu>Plot>Replot.

Другая аналогичная команда

Utility Menu>Plot>Multi-Plot

приводит к вычерчиванию всех хранящихся в базе данных и активных в данный момент объектов.

3 Задание единиц измерения величин при работе с МКЭ-пакетами

Отметим, что универсальные МКЭ-пакеты, такие как ANSYS, не контролируют единицы измерения величин и не выполняют их преобразование. Пользователь сам должен позаботиться о том, в каких единицах следует задавать исходные данные и в каких единицах будут выводиться результаты расчета.

Здесь можно предложить следующий подход. Введем обозначения: $\langle l \rangle$ – единица длины; $\langle F \rangle$ – единица силы; $\langle t \rangle$ – единица времени; $\langle p \rangle$ – единица давления; $\langle E \rangle$ – единица модуля упругости; $\langle \sigma \rangle$ – единица напряжения; $\langle u \rangle$ – единица перемещения; $\langle v \rangle$ – единица скорости; $\langle a \rangle$ – единица ускорения; $\langle m \rangle$ – единица массы; $\langle \rho \rangle$ – единица плотности; $\langle \rho g \rangle$ – единица удельного веса.

При работе с МКЭ-пакетом удобно в качестве основных единиц выбрать единицы длины $\langle l \rangle$, силы $\langle F \rangle$ и времени $\langle t \rangle$. При этом остальные единицы будут производными, они выражаются через основные как

$$\begin{aligned} \langle p \rangle = \langle E \rangle = \langle \sigma \rangle &= \frac{\langle F \rangle}{\langle l \rangle^2}; & \langle u \rangle &= \langle l \rangle; & \langle v \rangle &= \frac{\langle l \rangle}{\langle t \rangle}; & \langle a \rangle &= \frac{\langle l \rangle}{\langle t \rangle^2}; \\ \langle m \rangle = \frac{\langle F \rangle}{\langle a \rangle} &= \frac{\langle F \rangle}{\langle l \rangle} \cdot \langle t \rangle^2; & \langle \rho \rangle &= \frac{\langle m \rangle}{\langle l \rangle^3} = \frac{\langle F \rangle}{\langle l \rangle^4} \cdot \langle t \rangle^2; & \langle \rho g \rangle &= \frac{\langle m \rangle}{\langle l \rangle^3} \cdot \langle a \rangle = \frac{\langle F \rangle}{\langle l \rangle^3}. \end{aligned}$$

Единица массы здесь определяется согласно второму закону Ньютона.

Рассмотрим два примера задания единиц измерений величин.

Пример 1: Рекомендуемые единицы в статических задачах.

Основные единицы:

$$\langle l \rangle = \text{мм}; \quad \langle F \rangle = \text{Н}; \quad \langle t \rangle = \text{с}.$$

Производные единицы:

$$\begin{aligned} \langle p \rangle = \langle E \rangle = \langle \sigma \rangle &= \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} = \text{МПа}; & \langle u \rangle &= \text{мм}; & \langle v \rangle &= \frac{\text{мм}}{\text{с}}; & \langle a \rangle &= \frac{\text{мм}}{\text{с}^2}; \\ \langle m \rangle = \frac{\text{Н}}{\text{мм}} \cdot \text{с}^2 &= \text{т}; & \langle \rho \rangle &= \frac{\text{Н}}{\text{мм}^4} \cdot \text{с}^2 = \frac{\text{т}}{\text{мм}^3}; & \langle \rho g \rangle &= \frac{\text{Н}}{\text{мм}^3}. \end{aligned}$$

При определении нагрузки от собственного веса можно плотность задать в кг/мм^3 , а ускорение свободного падения в м/с^2 , тогда

$$\langle \rho g \rangle = \frac{\text{кг}}{\text{мм}^3} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{мм}^3}.$$

Пример 2: Рекомендуемые единицы в динамических задачах.

Основные единицы:

$$\langle l \rangle = \text{м}; \quad \langle F \rangle = \text{Н}; \quad \langle t \rangle = \text{с}.$$

Производные единицы:

$$\langle p \rangle = \langle E \rangle = \langle \sigma \rangle = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}; \quad \langle u \rangle = \text{м}; \quad \langle v \rangle = \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad \langle a \rangle = \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

$$\langle m \rangle = \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot \text{с}^2 = \text{кг}; \quad \langle \rho \rangle = \frac{\text{Н}}{\text{м}^4} \cdot \text{с}^2 = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \langle \rho g \rangle = \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}.$$

В заключение отметим, что в программе ANSYS есть команда /UNITS (недоступна из меню), позволяющая задавать систему единиц, но это лишь своего рода комментарий.

4 Практические рекомендации и некоторые замечания

- Запускайте каждую задачу в отдельной рабочей директории и используйте различные имена для разных моделей и типов анализа.
- Вводите как можно больше скалярных параметров. Это позволит в дальнейшем облегчить процесс усовершенствования модели, а также параметризовать ее.
- Поверхности вращения лучше строить с помощью операции выдавливания путем вращения линии вокруг оси. Это позволит исключить искажение геометрии поверхности.
- Не выполняйте операции вычитания (subtract) и перекрытия (overlap) для соприкасающихся объектов.
- Реже пользуйтесь «твердыми» точками.
- Реже пользуйтесь операциями волочения (dragging) и натягивания (skinning).
- Реже пользуйтесь цилиндрической и сферической системами координат при «восходящем» моделировании.
- Выполняйте булевы операции до разбивки модели на элементы (после разбивки булевы операции невозможны).
- Не проводите булевых операций, если в модели имеются конкатенированные линии и поверхности.
- Назначайте атрибуты элементов геометрическим объектам. Это позволит избежать необходимости каждый раз менять активные атрибуты в процессе разбивки. Следует отметить, что алгоритмы генерации сеток рабо-

тают наиболее эффективно, когда все объекты разбиваются на элементы одновременно (одной командой).

- Правильность задания атрибутов элементов можно проверить путем вычерчивания элементов с нумерацией (*Utility Menu>PlotCtrls>Numbering*). Здесь можно включить нумерацию типов элементов, наборов реальных постоянных и свойств материала.

- В идеале геометрию под разбивку лучше всего создавать непосредственно в программе ANSYS, однако очень часто приходится ее импортировать. Проверяйте импортированную геометрию на наличие ленточных (очень вытянутых) поверхностей, пустот, зазоров и т.п. Мелкие маловажные детали не должны включаться в модель. Их лучше удалить еще до передачи модели из CAD-системы в пакет ANSYS.

- Для проверки сплошности (непрерывности) модели следует отобразить только внешние границы (*Utility Menu>PlotCtrls>Style>Edge Options*).

- Просмотрите в файле Jobname.err все сообщения об ошибках и разберитесь в причинах появления предупреждений.

- Удаляйте все «дополнительные» конечные элементы (т.е. контактные, предварительной затяжки, поверхностного эффекта) до очистки модели от разбивки.

- В программе ANSYS отсутствует команда отката (т.е. отмены выполненного действия), а также опция автосохранения, поэтому периодически сохраняйте базу данных, особенно перед выполнением сложных операций (например, булевых).

- Реальные конструкции не содержат сингулярностей. Они возникают при упрощении модели. Сингулярности – это участки конечно-элементной модели, где напряжения неограниченны. Причинами их появления являются:

- точечная нагрузка (например, сосредоточенные силы и моменты);
- точечное закрепление (сила реакции ведет себя подобно сосредоточенной силе);
- угол с нулевым радиусом скругления.

В окрестности сингулярности по мере сгущения сетки значение напряжения увеличивается без верхних ограничений (если не учитывать пластичность). Следует отметить, что указанные выше причины не приводят к появлению сингулярностей при моделировании стержневых конструкций одноосными (ферменными) и балочными элементами.

- Если сингулярности отдалены от наиболее важных зон, их можно просто игнорировать при анализе результатов расчета. Например, перед отображением на экране дисплея поля напряжений здесь можно удалить из активного набора соответствующие элементы.

- Если же сингулярности расположены в интересующей зоне, следует скорректировать модель:

- заменить точечную силу эквивалентным давлением;
- «разнести» точечное закрепление на группу узлов;
- ввести скругления углов.

- При высоких требованиях к точности вычисления напряжений необходимо использовать подробную (мелкую) разбивку с детальным моделированием интересующих зон конструкции. Любые упрощения модели могут привести к большим погрешностям. Здесь обязательно должна быть проверена сходимость решения по напряжениям.

- Если интерес представляют лишь перемещения или номинальные напряжения, то можно использовать сравнительно грубую сетку. Незначительные детали геометрии здесь могут быть опущены.

- При выполнении модального анализа или анализа общей устойчивости также можно опустить мелкие детали. Низшие формы колебаний можно отследить на достаточно грубой сетке. Сложные формы колебаний могут потребовать равномерной, сравнительно мелкой разбивки.

- Всегда следует проверять решение на приемлемость и логичность. Здесь необходимо дать ответы на следующие вопросы:

- Прежде всего, убедитесь, правильны ли перемещения? Напряжения являются результатами уже «второй очереди».
- Согласуются ли результаты МКЭ-анализа с «ручными» расчетами или с экспериментом?
- Уравновешивают ли силы реакции приложенные нагрузки?
- Где обнаружены максимальные напряжения? Если это область сингулярности, то данные значения, вообще говоря, бессмысленны.
- Адекватна ли разбивка?

- Если перемещения являются достаточно большими (т.е. соизмеримыми с размерами тела) или напряжения превысили предел текучести, то либо неправильно задана нагрузка, либо следует выполнить уже нелинейный анализ.

- Для проверки качества разбивки можно воспользоваться следующими способами:

- Если слишком различаются напряжения при отображении узлового (осредненного) и элементного (неосредненного) решений, то сетка является грубой.
- Аналогично, если сильно различаются напряжения при режимах Power Graphics и Full Model, то сетка также слишком грубая.
- Повторите расчет с удвоенным числом элементов и сравните результаты (этот способ, правда, не всегда реализуем на практике).
- И, наконец, можно оценить адекватность разбивки, определив погрешность по энергии.

ПРОСМОТР РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

1 Чтение результатов расчета

Обычно для обработки результатов расчета используется общий пост-процессор (General Postprocessor). Как отмечалось ранее, он позволяет просматривать выходные данные на всей модели (или ее выбранной части) на одном подшаге. Поэтому, если в анализе использовалось пошаговое нагружение, в первую очередь здесь необходимо считать результаты, соответствующие определенному уровню нагрузок (или конкретному моменту времени). Существует несколько вариантов выбора данных из файла результатов в базу данных программы для дальнейшего использования. Нужные данные можно идентифицировать по номеру основного или промежуточного шага по нагрузке, номеру набора результатов, времени или частоте:

Main Menu>General Postproc>Read Results>

First Set (для первого подшага),

Next Set (для следующего подшага),

Last Set (для последнего подшага),

By Load Set (для подшага заданного шага нагружения),

By Time/Freq (для указанного момента времени или частоты).

Если указан момент времени, для которого отсутствуют результаты, то выполняется линейная интерполяция по двум ближайшим точкам.

2 Построение таблицы элементов

Таблица элементов (Element Table) выполняет две основные функции. Во-первых, она обеспечивает доступ к выходным данным линейных элементов, которые нельзя отобразить на экране обычными средствами. Во-вторых, она является удобным инструментом для выполнения различных арифметических операций над выходными величинами.

Для построения таблицы элементов применяется команда

Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table.

При заполнении каждого столбца рассматриваемой таблицы, прежде всего, необходимо в поле «Lab» назначить ему имя, которое в дальнейшем будет использоваться для идентификации соответствующей переменной. Помещаемые в столбец данные выбираются путем указания predetermined-

ного имени величины Item и компонента Comp. Например, для напряжения σ_{xx} – Item = S, Comp = X.

Выходные величины, получаемые для линейных элементов (балочных, трубных и т.п.), здесь определяются с помощью метода сквозной нумерации (By sequence number). Эти данные разбиты на группы (такие как LS, NMISC, SMISC и т.д.). Каждая величина внутри группы имеет свой порядковый номер. Таким образом, они загружаются в таблицу путем указания идентификатора группы в качестве параметра Item и порядкового номера как аргумента Comp. Например, изгибные напряжения в узле I для элемента трубы PIPE16 имеют Item = NMISC и Comp = 90 (см. описание по конечным элементам).

3 Графическое изображение результатов расчета

Следует отметить, что программа ANSYS поддерживает два способа графического изображения: Full Model (полной модели) и PowerGraphics (высокопроизводительный). В интерактивном режиме по умолчанию используется PowerGraphics. Он обладает следующими преимуществами:

- четкость графики, плавность и фотореализм;
- изображение больших моделей строится намного быстрее;
- стороны и грани элементов второго порядка изображаются в виде криволинейных (квадратичных) линий и поверхностей;
- имеется защита от осреднения результатов в местах сопряжения двух разных материалов или резкого (скачкообразного) изменения геометрических характеристик;
- результаты для оболочечных элементов изображаются на верхней и нижней поверхностях одновременно.

К недостаткам этого способа можно отнести следующее:

- осреднение результатов выполняется лишь с использованием данных на поверхностях модели;
- минимальное и максимальное значения определяются только для результатов на поверхностях модели.

Для отключения (или повторного включения) способа PowerGraphics можно воспользоваться кнопкой POWRGRPH панели инструментов (ANSYS Toolbar).

Общий постпроцессор предусматривает следующие виды графического изображения выходных величин:

- Contour Plot – контурное изображение;
- Deformed Shape – изображение деформированного состояния;
- Vector Plot – векторное изображение;
- Path Plot – изображение изменения величины вдоль определенной пользователем траектории;
- Reaction Force Display – изображение сил реакции.

Рассмотрим некоторые из них. Так, контурное изображение используется для многоцветного представления на модели поля выходной величины (например, компонента вектора перемещения, тензора напряжений и т.п.). Здесь доступны следующие команды:

Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>

Nodal Solu (узловое решение),

Element Solu (элементное решение),

Elem Table (результаты из таблицы элементов),

Line Elem Res (результаты линейных элементов).

При этом пункт меню «Nodal Solu» используется для вычерчивания непрерывных по модели контурных линий. Данная команда позволяет изображать поля как основных величин (DOF Solution – степеней свободы, т.е. в структурном анализе – перемещений), так и производных (например, Stress – напряжений, Strain – деформаций), причем производные величины, которые обычно терпят разрыв при переходе от элемента к элементу, здесь осредняются в узлах.

Строка «Element Solu» предназначена для вычерчивания контурных линий, которые терпят разрыв на границах элементов. Этой командой обычно изображаются поля производных величин.

Следующий пункт меню «Elem Table» используется для построения контурных изображений величин, хранящихся в таблице элементов.

И, наконец, последняя команда «Line Elem Res» строит на линейных элементах эпюры величин, помещенных в таблицу элементов. При этом значения в узлах I и J (т.е. на концах элемента) просто соединяются прямой линией вне зависимости от того, как данная величина изменяется по длине элемента.

Кроме того, программа ANSYS позволяет выводить различные результаты в указанной курсором мыши точке модели:

Main Menu>General Postproc>Query Results>Subgrid Solu.

После выбора требуемой выходной величины здесь появляется панель указания, позволяющая курсором мыши указывать в любое место модели для запроса значения. При этом номер узла, его координаты и значение выходной переменной также показываются в данной панели. С помощью кнопки Min или Max можно узнать максимальное или минимальное значение выбранной результирующей величины и место его локализации. Кнопка Reset используется для удаления выведенных на экран дисплея значений.

Известно, что при оценке прочности конструкций наиболее важными параметрами являются напряжения. При этом программа ANSYS позволяет выводить следующие компоненты и инвариантные величины тензора напряжений:

SX, SY, SZ, SXY, SYZ, SXZ – компоненты $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}$;

S1, S2, S3 – главные напряжения;

SINT – интенсивность напряжений, или эквивалентное напряжение по теории прочности наибольших касательных напряжений:

$$\sigma_i = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|);$$

SEQV – напряжение по Мизесу, или эквивалентное напряжение по теории прочности энергии формоизменения:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \right]}.$$

При выполнении прочностных расчетов часто возникает необходимость видеть форму модели после приложения нагрузки. Это может быть полезным, например, для контроля правильности задания граничных условий и приложения внешней нагрузки. Для изображения деформированного состояния модели применяется следующий пункт меню:

Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape.

Следует отметить, что в нелинейном анализе здесь используются истинные перемещения, однако в линейном анализе истинные перемещения малы по сравнению с размерами конструкции, и поэтому их масштабируют (т.е. пропорционально увеличивают так, чтобы максимальное перемещение составляло примерно 10% габаритного размера конструкции).

Масштаб отображения перемещений можно изменить с помощью команды

Utility Menu>PlotCtrls>Style>Displacement>Scaling.

Для анимации деформированного состояния нужно выбрать следующий пункт меню:

Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Deformed Shape.

При векторном представлении результатов используются отрезки со стрелками для показа абсолютного значения и направления векторной выходной величины, например, перемещения.

На практике при обработке результатов расчета часто приходится строить двумерные графики различных выходных величин. Программа ANSYS позволяет строить такие графики вдоль определенной пользователем траектории.

Для создания траектории путем прямого указания лежащих на ней узлов доступна следующая команда:

Main Menu>General Postproc>Path Operations>Define Path>By Nodes.

Здесь после указания узлов появляется диалоговая панель (рисунок 1), где в поле «Define Path Name» необходимо задать имя создаваемой траектории, в поле «Number of data sets» определяется максимально возможное число выходных величин, отображаемых на траектории, в поле «Number of divisions» указывается число промежуточных отрезков, создаваемых между каждой парой узлов, определяющих траекторию (чем больше промежуточных точек, тем более гладким получается график).

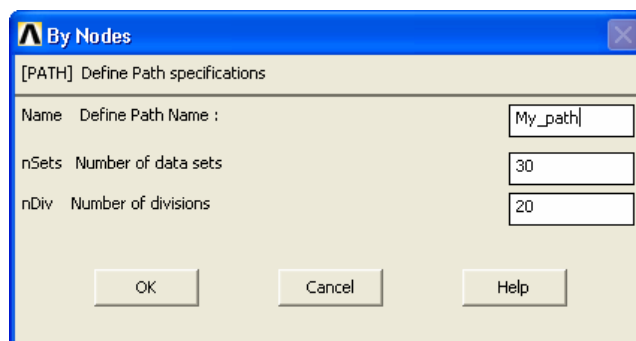


Рисунок 1 – Определение траектории

Затем следует выбрать выходные данные, предназначенные для отображения вдоль созданной траектории:

Main Menu>General Postproc>Path Operations>Map onto Path.

Здесь каждой величине необходимо присвоить имя (нельзя использовать зарезервированные имена XG, YG, ZG и S).

После того как интересующая величина привязана к кривой, можно получить зависимость этой переменной от выбранного пути в табличной форме:

Main Menu>General Postproc>Path Operations>Plot Path Item>List Path Items

или в виде двухмерного графика:

Main Menu>General Postproc>Path Operations>Plot Path Item>On Graph.

К выделенным таким образом массивам значения возможно применение ряда математических операций (таких как интегрирование, дифференцирование, умножение, скалярное и векторное произведение).

В заключение отметим, что общий постпроцессор имеет также специализированные средства для быстрого просмотра результатов «Results Viewer», включающие пиктографическое меню и графическую систему. Они удобны, например, при использовании пошагового нагружения конструкции.

4 Вывод списка результатов расчета

Составление списка выходных данных (т.е. отображение результатов в текстовом виде) – это эффективный путь документации результатов анализа (т.е. подготовки отчета). Здесь доступны следующие команды:

- вывод списка значений выходных величин в узлах:

Main Menu> General Postproc >List Results>Nodal Solution;

- вывод списка значений выходных величин в элементах:

Main Menu> General Postproc >List Results>Element Solution;

- вывод списка сил реакций и приложенных сил:

Main Menu> General Postproc >List Results>Reaction Solu;

- расчет и вывод списка суммарных сил и моментов для выбранной системы узлов:

Main Menu> General Postproc >Nodal Calcs>Total Force Sum;

- вывод списка данных из таблицы элементов:

Main Menu> General Postproc >List Results>Elem Table Data

или

Main Menu> General Postproc >Element Table>List Elem Table.

Кроме того, программа ANSYS обладает системой генерации отчетов в формате HTML:

Utility Menu>File>Report Generator.

При использовании данного генератора процесс составления отчета частично автоматизируется. Он позволяет легко сохранять рисунки, листинги, таблицы и другую важную информацию.

5 Представление результатов в постпроцессоре истории нагружения

В общем случае все операции, выполняемые в постпроцессоре истории нагружения, вызываются из одной диалоговой панели (рисунок 2), которая появляется автоматически при входе в данный сегмент программы.

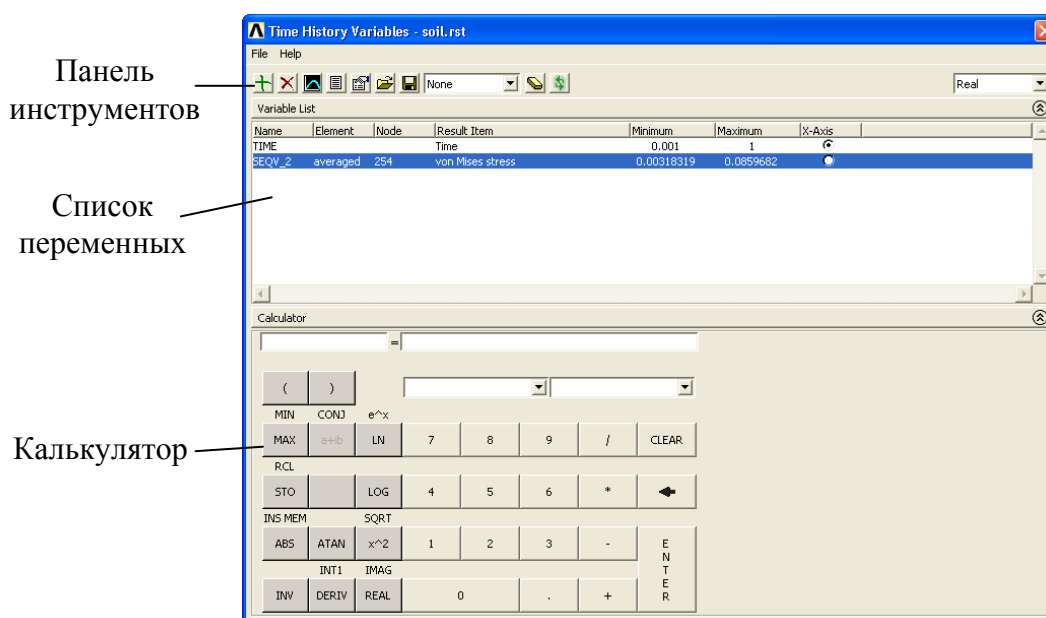


Рисунок 2 – Диалоговая панель для работы с переменными в постпроцессоре истории нагружения

Работа в этом постпроцессоре предполагает определение так называемых переменных (Variables), которые описывают поведение модели в конкретных ее точках в ходе всей истории нагружения, и дальнейшие операции с этими переменными.

Диалоговая панель для работы с переменными включает в себя панель инструментов, список переменных и калькулятор.

В состав панели инструментов входят следующие пиктограммы (слева на право):

- Add Data – создание новой переменной;
- Delete Data – удаление ранее созданной переменной;
- Graph Data – изображение переменной на экране в виде графика;
- List Data – вывод списка значений переменной в текстовом виде;
- Data Properties – указание свойств переменных;
- Import Data – импорт значений переменной из внешнего файла;
- Export Data – экспорт значений переменной в массив или внешний файл;
- Overlay Data – замена данных;
- Clear Time-History Data – удаление всех переменных;
- Refresh Time-History Data – обновление списка переменных.

Список переменных (Variable List) содержит собственно имена переменных (определяются пользователем), а также номера узлов и элементов, на основе которых были получены данные переменные, тип переменной (перемещение, напряжение и т.п.), минимальное и максимальное значения переменной и признак использования переменной в качестве оси абсцисс при построении графика.

Калькулятор (Calculator) содержит кнопки, позволяющие выполнять различные операции для создания новых переменных на основе существующих. Например, после определения переменной для перемещения при анализе переходного динамического процесса можно вычислить скорость или ускорения путем применения операции дифференцирования по времени.

Для получения новой переменной на базе имеющихся необходимо в верхнем поле калькулятора присвоить ей уникальное имя и в соседнем поле (после знака равенства) ввести соответствующее выражение, используя кнопки калькулятора. При этом выбор существующих переменных осуществляется из расположенного ниже второго списка. Ввод новой переменной завершается нажатием кнопки ENTER.

ЗАДАНИЕ НАГРУЗОК И ВЫПОЛНЕНИЕ АНАЛИЗА

1 Выбор типа анализа

Как отмечалось ранее, на втором этапе МКЭ-анализа используется блок решения (Solution). Здесь, прежде всего, необходимо выбрать тип анализа и задать его опции. Этот выбор в первую очередь зависит от условий нагружения и реакции системы, которую предполагается получить.

Программа ANSYS позволяет выполнять следующие типы анализов:

- Static – статический анализ (задается по умолчанию);
- Modal – модальный анализ (т.е. расчет частот и форм собственных колебаний);
- Harmonic – гармонический анализ (т.е. расчет вынужденных колебаний конструкции при действии нагрузок, изменяющихся по синусоидальному закону);
- Transient – анализ переходных динамических процессов (как правило, кратковременных, например, ударного характера);
- Spectrum – спектральный анализ (т.е. анализ случайных колебаний);
- Eigen Buckling – анализ начальной устойчивости (линеаризованный подход);
- Substructuring – анализ подконструкций (суперэлементов).

Для определения типа анализа используется следующая команда:

Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis.

Опции анализа дают возможность уточнить параметры проводимого расчета. При выполнении статического или переходного динамического анализа для указания большого числа данных опций можно воспользоваться универсальной диалоговой панелью «Solution Controls», вызываемой командой

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

Здесь можно, например, включить учет геометрической нелинейности (Large Displacement); активизировать опцию создания начальных напряжений (Calculate prestress effect) для использования их в последующих расчетах (например, для расчета собственных колебаний предварительно нагруженной конструкции); выбрать метод решения системы линейных алгебраических

уравнений (Equation Solver); выбрать один из вариантов итерационного метода Ньютона-Рафсона (Newton-Raphson option) и т.д.

Следует отметить, что решение системы линейных алгебраических уравнений может выполняться от долей секунды до нескольких часов в зависимости от размера задачи и характеристик компьютера. Линейный статический расчет требует одного такого решения, а нелинейный или динамический расчет может потребовать десятков, сотен или даже тысяч решений. Поэтому важно правильно выбрать метод решения.

Для решения систем уравнений равновесия МКЭ применяют как прямые, так и итерационные методы. Каждый подход обладает определенными преимуществами и недостатками, но чаще всего в настоящее время пользуются все же прямыми методами, основанными на исключении по Гауссу.

Имеющиеся в программе ANSYS методы решения систем уравнений делятся на три группы:

1) прямые:

- Frontal direct – фронтальный метод;
- Sparse direct – для разреженных матриц, т.е. содержащих много нулей (выбирается по умолчанию);

2) итерационные:

- PCG – предобусловленный метод сопряженных градиентов;
- ICCG – метод сопряженных градиентов с неполным разложением Холецкого;
- JCG – метод сопряженных градиентов Якоби;

3) для параллельных вычислений (требуется отдельная лицензия):

- AMG – метод, используемый в многопроцессорных компьютерах;
- DDS – метод, применяемый при наличии распределенной вычислительной системы.

В большинстве случаев выбираемый по умолчанию метод Sparse direct обеспечивает хорошую надежность и скорость решения. Метод Frontal direct рекомендуется использовать тогда, когда важна надежность или при ограниченной памяти ЭВМ. Отличительной особенностью фронтального метода является то, что он не требует построения полной матрицы жесткости конструкции. При его использовании выполняется формирование только тех уравнений, которые необходимы для исключения очередных неизвестных (степеней свободы).

Итерационный метод PCG обеспечивает высокую скорость решения для больших систем, особенно при использовании объемных элементов. Метод ICCG эффективен в задачах мультифизики, а JCG рекомендуется использовать в тех случаях, когда в каждом узле определяется лишь одна степень свободы (как, например, в тепловом анализе).

2 Приложение нагрузок

Используемое в терминологии программы ANSYS слово Loads (нагрузки) включает в себя как граничные условия в виде ограничений на перемещения, так и внешне и внутренне приложенные силы. Нагрузки в настоящей программе разделяются на шесть категорий:

- DOF Constraints – ограничения степеней свободы (граничные условия);
- Forces – сосредоточенные силы и моменты;
- Surface Loads – поверхностные нагрузки (например, давление);
- Body Loads – объемные нагрузки (например, температура);
- Inertial Loads – инерционные нагрузки, связанные с массой конструкции (возникают при действии, например, ускорения свободного падения, перегрузок, угловой скорости и углового ускорения);
- Coupled-field Loads – нагрузки связанных полей (используются для передачи результатов расчета одного анализа в качестве нагрузки для другого анализа).

Большинство из перечисленных выше нагрузок можно прикладывать либо к геометрическим объектам (т.е. к точкам, линиям, поверхностям и объемам), либо непосредственно к конечно-элементной модели (т.е. к узлам и элементам). Первый способ здесь представляется более удобным, поскольку определять нагрузки на геометрических объектах можно как до, так и после разбиения модели на конечные элементы. Кроме того, приложенные таким образом нагрузки не пропадут и при модификации сетки элементов. Следует отметить, что при запуске задачи на счет эти нагрузки будут автоматически переноситься на соответствующие узлы и конечные элементы. Недостатки первого способа проявляются в том случае, когда узлы имеют разные системы координат. При этом сосредоточенные силы и граничные условия при переносе будут ориентироваться в соответствии с системой координат каждого узла.

Ввод нагрузок возможен как в модуле Solution, так и из меню препроцессора. Приведем некоторые команды, используемые для задания различных видов нагрузок:

- задание перемещений (граничных условий):

Main Menu>Solution>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Displacements>

On Keypoints (в точках),

On Lines (на линиях),

On Areas (на поверхностях),

On Nodes (в узлах),

Symmetry B.C. (задание условий симметрии);

- задание сосредоточенных сил и моментов:

Main Menu>Solution>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>

On Keypoints (в точках),

On Nodes (в узлах);

- задание давления:

Main Menu>Solution>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>

On Lines (на линиях),

On Areas (на поверхностях),

On Elements (на элементах),

On Beams (на балочных элементах);

- задание температуры:

Main Menu>Solution>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Temperature>

On Keypoints (в точках),

On Lines (на линиях),

On Areas (на поверхностях),

On Nodes (в узлах);

On Elements (в элементах),

Uniform Temp (единой для всей модели);

- задание гравитационной нагрузки, т.е. ускорений свободного падения в направлении осей глобальной декартовой системы координат (ускорение должно быть направлено в сторону, противоположную направлению силы тяжести):

Main Menu>Solution>Loads>Define Loads>Apply>Inertia>Gravity.

Следует отметить, что при выборе расчетной схемы всегда необходимо учитывать симметрию конструкции и приложенных нагрузок, если таковая

имеется. Это позволяет моделировать не всю конструкцию, а лишь ее часть, что существенно сокращает время решения задачи. В данном случае для узлов, расположенных в плоскости симметрии, необходимо закрепить линейное смещение в направлении, перпендикулярном этой плоскости, и два других угла поворота (т.е. относительно осей, лежащих в плоскости симметрии). Подчеркнем, что в программе ANSYS имеются средства для автоматического задания условий симметрии.

С целью проверки приложенных нагрузок может потребоваться заново отрисовать соответствующие им символы. Это можно сделать путем активации нужных опций диалоговой панели «Symbols», появляющейся при выборе пункта меню

Utility Menu>PlotCtrls>Symbol.

Для вывода списка заданных нагрузок следует воспользоваться командами подменю

Utility Menu>List>Loads.

3 Задание опций пошагового нагружения

Необходимо различать термины «шаг нагружения» и «шаг решения». Под «шагом нагружения» (Load Step) в программе ANSYS понимается просто конфигурация (совокупность) нагрузок, для которой находится решение. Задание нескольких шагов по нагрузке обычно используется для моделирования сложного непропорционального нагружения. Здесь можно, например, сначала (на первом шаге) приложить одну систему нагрузок, затем (на втором шаге) добавить другую, после чего (на третьем шаге) выполнить разгрузку и т.д. Значения нагрузок могут меняться постепенно (плавно) от шага к шагу или скачком. Последний вариант используется, например, для моделирования резкого нагружения при анализе переходных динамических процессов.

В нелинейном и переходном динамическом анализе для повышения точности решения и улучшения его сходимости рекомендуется разбивать каждый шаг нагружения на несколько дополнительных подшагов (Substeps), в которых будут вычисляться промежуточные решения (рисунок 1). Эти подшаги называются также «шагами решения» или временными шагами, т.е. шагами, соответствующими определенному моменту времени. Здесь следует отметить, что ANSYS использует понятие времени (time) не только в динамическом анализе, но и в статическом. При анализе динамических процессов,

а также процессов, связанных со скоростью (например, при учете ползучести или вязкопластичности), величина *time* представляет собой действительное хронологическое время (измеряемое в секундах, минутах или часах). В статическом анализе без временных эффектов *time* является просто удобной переменной для обозначения различных уровней нагружения и играет роль счетчика для идентификации подшагов по нагрузке.

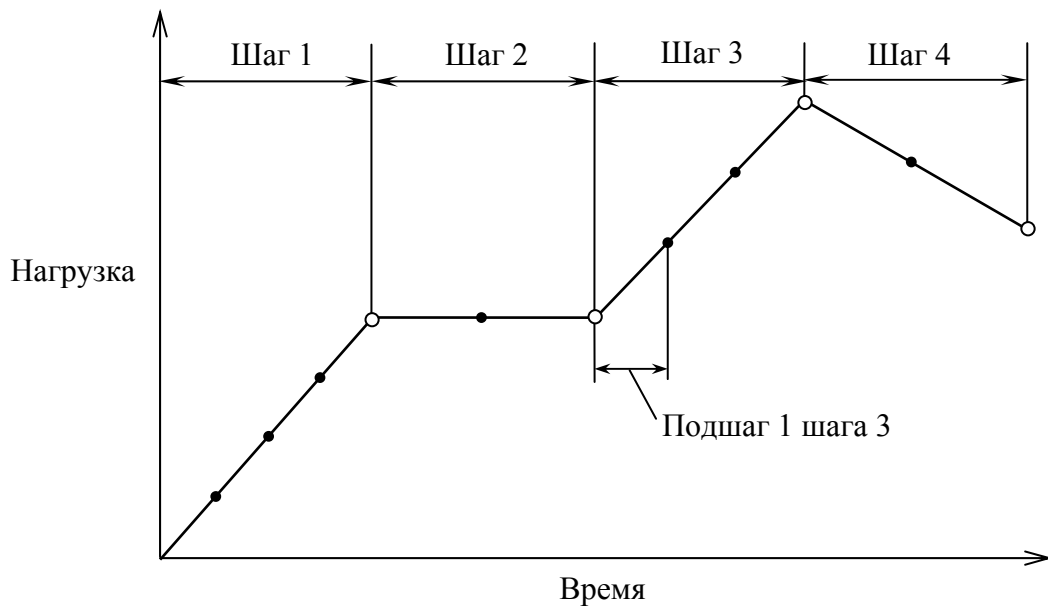


Рисунок 1 – Шаги нагружения и шаги решения (подшаги)

Опциями шага нагружения являются такие параметры, которые могут меняться от одного шага к другому (например, количество промежуточных подшагов, время окончания шага нагружения, контроль выходных данных и т.п.). При выполнении статического или переходного динамического анализа для задания этих и других опций удобно воспользоваться диалоговой панелью «Solution Controls» (команда *Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls*). Данная панель содержит пять вкладок (рисунок 2):

- Basic (общие опции) – выбор типа анализа, настройка параметров времени, а также указание типов результатов, записываемых в файл;
- Transient (опции переходного процесса) – указание эффектов переходного процесса, плавного или скачкообразного приложения нагрузок, задание демпфирования, определение параметров интегрирования по времени;
- Sol'n Options (опции расчета) – выбор метода решения системы линейных алгебраических уравнений, а также параметров «рестарта» для многошагового повторного расчета;

- Nonlinear (опции нелинейного расчета) – выбор стратегии итерационного решения, задание максимального числа итераций, указание признака деления шага решения пополам, выбор критерия сходимости;
- Advanced NL (расширенные опции нелинейного расчета) – указание критерия прекращения расчета, включение метода длины дуги.

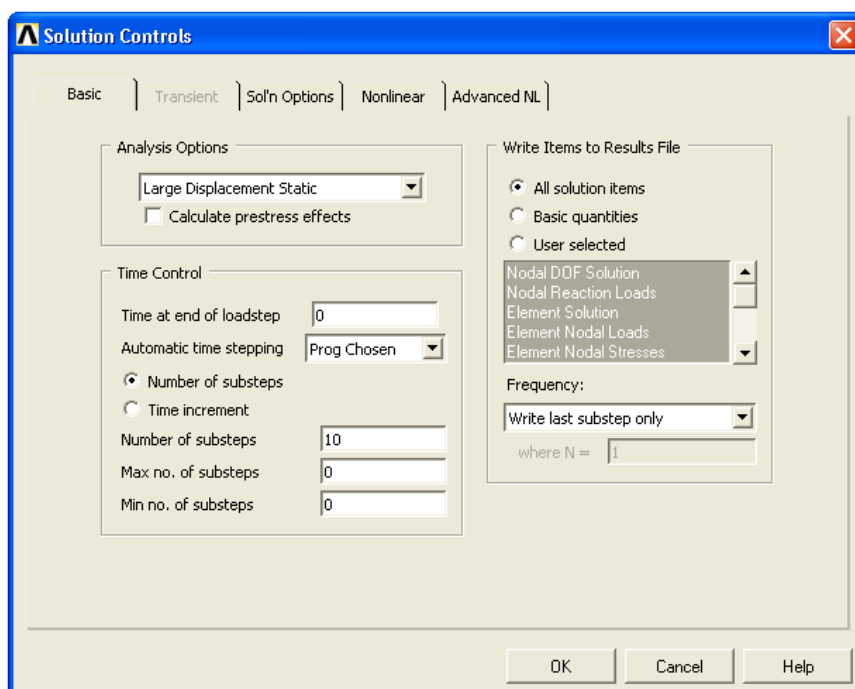


Рисунок 2 – Задание опций анализа и шага нагружения

Например, для ввода количества подшагов здесь необходимо выбрать вкладку «Basic» и в поле «Number of substeps» раздела «Time Control» ввести соответствующее число. Альтернативным способом задания этого параметра является указание размера шага по времени (Time increment).

По умолчанию ANSYS автоматически назначает время в конце первого шага нагружения, равное 1.0, в конце второго шага нагружения 2.0 и т.д. Для промежуточных подшагов время определяется при помощи линейной интерполяции. При анализе процессов, не зависящих от скорости, удобно синхронизировать значение нагрузки и время ее приложения. Например, для приложения силы в 100 единиц следует ввести время, также равное 100. В этом случае при просмотре результатов расчета в постпроцессоре истории нагружения временные зависимости выходных величин будут являться фактически зависимостями от нагрузки.

В нелинейном анализе на каждом подшаге программа выполняет итерационное уточнение решения. При этом максимально допустимое число

итераций можно задать путем выбора вкладки «Nonlinear» и ввода значения в поле «Maximum number of iterations». Для исследования закритического деформирования конструкции (т.е. после потери устойчивости) необходимо включить так называемый метод длины дуги. Сделать это можно путем выбора вкладки «Advanced NL» и последующей активизации опции «Active arc-length method».

Следует отметить, что по умолчанию сохраняются результаты расчета лишь для последнего подшага каждого шага нагружения. Для изменения этой установки необходимо выбрать основную вкладку «Basic». Здесь в разделе «Write Item to Result File» для параметра «Frequency», определяющего частоту записи результатов в файл, доступны следующие значения:

- Write last substep only – записывать только последний подшаг;
- Write every Nth substep – записывать каждый N-ый подшаг;
- Write every substep – записывать каждый подшаг.

Если выбирается опция записи результатов для нескольких подшагов, то в дальнейшем с помощью постпроцессора истории нагружения можно будет строить графики и таблицы различных выходных величин в зависимости от времени.

4 Запуск задачи на счет

Для запуска сформированной задачи на счет используется следующая команда:

Main Menu>Solution>Solve>Current LS.

При этом программа ANSYS берет из базы данных информацию по конечно-элементной модели и текущему шагу нагружения и вычисляет решение. Если после завершения счета, не выходя из блока решения, изменить условия нагружения и снова выполнить приведенную выше команду, то будет получено решение для следующего шага и т.д. Результаты расчетов записываются в файл результатов (Jobname.rst), а также в базу данных. При этом в базе данных может храниться только один набор результатов, тогда как в файле могут быть записаны результаты для всех шагов решения.

Если предварительно с помощью команды

Main Menu>Solution>Load Step Opts>Write LS File

записать последовательно шаги нагружения в текстовые файлы (именуемые Jobname.s01, .s02, .s03 и т.д.), то тогда можно будет за один раз получить решения сразу для нескольких шагов по нагрузке:

Main Menu>Solution>Solve>From LS Files.

ПОСТРОЕНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ

1 Методы построения МКЭ-модели

Следует отметить, что для решения задачи в программе ANSYS требуется расчетная (конечно-элементная) модель, причем геометрическая информация в расчетах вообще не используется.

Построение МКЭ-модели – это процесс получения узлов и элементов, адекватно описывающих геометрию тела. Для этих целей в программе ANSYS предусмотрены два метода: базирующийся на геометрическом моделировании (solid modeling) и прямое генерирование (direct generation). В первом случае сначала описывается геометрия тела, а затем геометрические объекты автоматически разбиваются программой на конечные элементы. При этом имеется возможность управлять размером и формой создаваемых таким образом элементов. Во втором случае приходится вручную определять положение каждого узла и связи каждого элемента. Для удобства ввода здесь предусмотрено несколько операций, таких как копирование множества существующих узлов и элементов, симметричное отображение и т.п.

Очевидно, что метод, базирующийся на геометрическом моделировании, является более мощным и универсальным, нежели прямое генерирование и чаще используется на практике. Однако метод прямого генерирования обеспечивает более полный контроль над геометрией и нумерацией каждого узла и элемента. Поэтому иногда возникают ситуации, где данный метод становится более предпочтительным.

При построении конечно-элементной модели при помощи метода, базирующегося на геометрическом моделировании, в самом общем случае выполняются следующие шаги:

- 1) запуск препроцессора (*Main Menu>Preprocessor*);
- 2) задание рабочей плоскости;
- 3) описание основных особенностей геометрии тела с помощью примитивов и булевых операций;
- 4) активизация подходящей системы координат;
- 5) генерация «снизу-вверх» других элементов геометрии тела путем построения точек, а затем определения линий, поверхностей и объемов;
- 6) использование булевых операций и команд контроля над нумерацией объектов для объединения различных частей модели;
- 7) построение таблиц атрибутов элементов;

- 8) назначение различным частям модели подходящих атрибутов элементов;
- 9) установка параметров разбиения на конечные элементы для получения сетки требуемой густоты;
- 10) построение узлов и конечных элементов с помощью генерации сеток на геометрических объектах модели;
- 11) учет дополнительных особенностей модели путем введения контактных элементов, связанных степеней свободы и уравнений ограничений;
- 12) сохранение введенных данных в файле Jobname.db;
- 13) выход из препроцессора.

2 Задание атрибутов элементов

На каком бы этапе формирования модели конечный элемент не создавался, с ним всегда связываются текущие (активные) атрибуты элементов: тип элемента, наборы «реальных» постоянных и физических свойств материала, система координат и поперечное сечение.

Библиотека конечных элементов программы ANSYS содержит более 150 различных типов элементов. Каждый тип имеет свое имя, состоящее из уникального номера и префикса, определяющего категорию элемента (SHELL63, PIPE16 и т.п.). Основными категориями здесь являются:

- LINK – стержневые элементы;
- BEAM – балочные элементы;
- PIPE – элементы трубы;
- PLANE – плоские и осесимметричные элементы;
- SHELL – оболочечные элементы;
- SOLID – объемные элементы (т.е. элементы трехмерного тела);
- COMBINation – комбинированные элементы (комбинация шарниров, пружин, вязких демпферов и т.п.);
- CONTACT – контактные элементы;
- MASS – элементы массы.

Выбрать нужные типы элементов, которые будут использоваться в данной задаче, можно с помощью команды (рисунок 1):

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

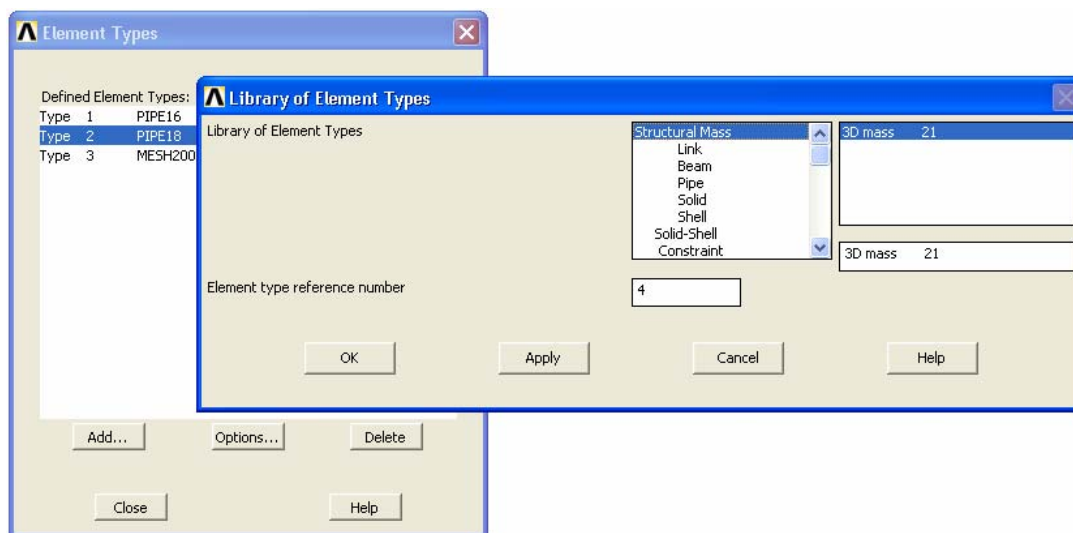


Рисунок 1 – Выбор типов элементов

При этом формируется таблица элементов, в которой каждому используемому в задаче типу присваивается ссылочный номер. Большинство типов элементов позволяют здесь с помощью кнопки «Options» задавать также и дополнительные опции KEYOPT, предназначенные для включения или отключения некоторых параметров, связанных с работой элементов, с системой координат или со способом представления результатов (см. описание по конечным элементам).

«Реальные» постоянные (real constants) являются свойствами (геометрическими характеристиками), зависящими от типа элемента. Как правило, они включают в себя характеристики, не описываемые геометрией конечного элемента. Например:

- Балочный элемент определяется линией, соединяющей два узла, т.е. известна лишь длина. Для задания характеристик поперечного сечения (таких как площадь и моменты инерции) следует использовать «реальные» постоянные.
- Оболочечный элемент – это трех- или четырехугольная поверхность, т.е. известна лишь площадь. Для задания толщины применяются «реальные» постоянные.
- Большинство объемных элементов не требуют «реальных» постоянных, поскольку их геометрия полностью определяется координатами узлов.

Если в модели используется нескольких типов элементов, то обычно для каждого типа следует задавать свой набор геометрических характеристик. Однако не все типы элементов требуют определения «реальных» по-

стоянных. Кроме того, различные элементы одного и того же типа могут иметь разные значения этих характеристик.

Для задания «реальных» постоянных используется следующая команда:

Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete.

Здесь также формируется таблица (называемая таблицей «реальных» постоянных), в которой каждому набору геометрических характеристик присваивается свой ссылочный номер.

Следует отметить, что программа выдаст предупреждение, если несколько типов элементов будут ссылаться на один и тот же набор «реальных» постоянных. Однако один тип элементов может ссылаться на несколько наборов геометрических характеристик.

Большинство типов элементов требуют также задания физических свойств материала (т.е. модуля упругости, коэффициента Пуассона, плотности и т.д.). В зависимости от задачи свойства материалов могут быть линейными или нелинейными, изотропными, ортотропными или анизотропными, постоянными или зависящими от температуры.

Зависимость свойств от температуры имеет форму полинома (вплоть до четвертой степени) или задается таблично. Нелинейные соотношения, такие как кривые деформирования материала для различных видов упрочнения, кривые ползучести, описание гиперупругих свойств, обычно вводятся в табличном виде.

Для задания свойств материала следует воспользоваться командой

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models.

На рисунке 2 показан пример ввода свойств линейно-упругого изотропного тела (где E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона). При этом для отображения таблицы зависимости свойств от температуры необходимо нужное количество раз нажать кнопку «Add Temperature». После ввода свойств для изображения на экране дисплея графика зависимости модуля упругости (или коэффициента Пуассона) от температуры следует воспользоваться кнопкой «Graph».

Здесь также каждый набор свойств материала имеет свой уникальный ссылочный номер.

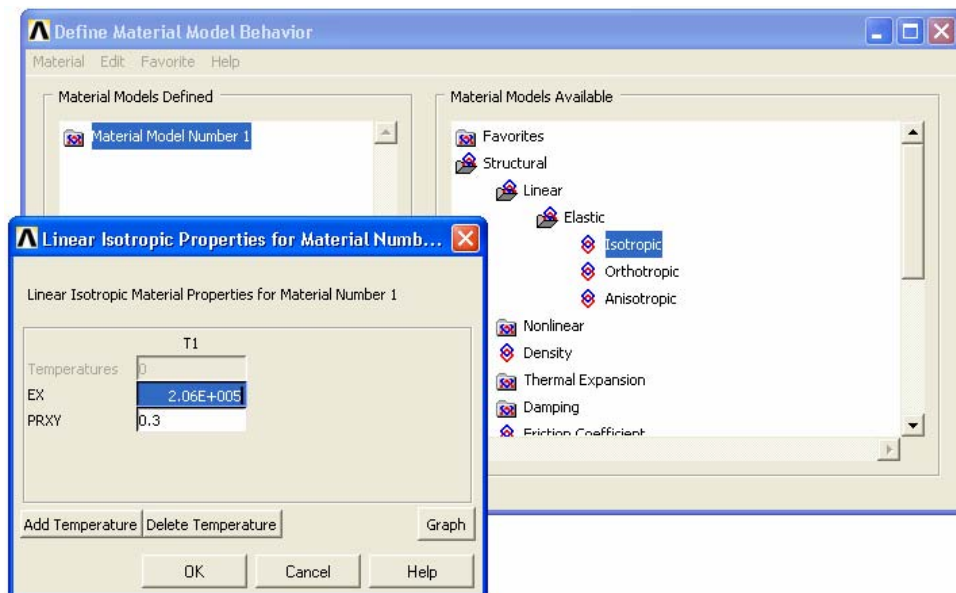


Рисунок 2 – Задание свойств материала

Поперечные сечения обычно задаются для балочных элементов (таких как BEAM44, BEAM188 и BEAM189). Для этих целей используется команда

Main Menu>Preprocessor>Sections>Beam>Common Sections,

отображающая на экране диалоговую панель для выбора predetermined типов сечений балок (рисунок 3).

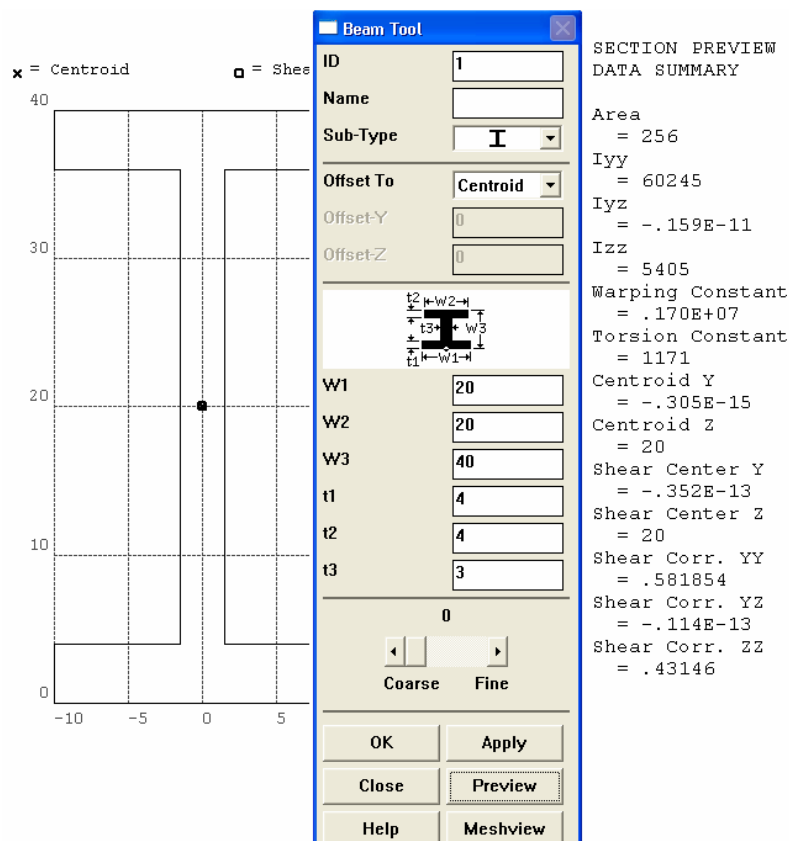


Рисунок 3 – Задание поперечного сечения балки

В заключение отметим, что для просмотра введенных таблиц атрибутов элементов используется команда

Utility Menu>List>Properties>property type,

где *property type* – тип свойств.

3 Генерация сеток конечных элементов

Процедура построения узлов и конечных элементов состоит из следующих основных шагов:

- назначение объектам атрибутов элементов;
- установка параметров управления сеткой конечных элементов;
- генерация сетки элементов.

После построения таблиц атрибутов можно назначить разные атрибуты элементов различным частям модели. При этом используются соответствующие ссылочные номера, включающие номер материала (MAT), номер набора «реальных» постоянных (REAL), номер типа элементов (TYPE), номер локальной системы координат, применяемой в качестве системы координат элемента, (ESYS) и номер сечения (SECNUM). Здесь можно либо назначить атрибуты выбранным геометрическим объектам модели тела (до их разбивки на элементы), либо определить активный набор атрибутов (по умолчанию MAT = 1, REAL = 1, TYPE = 1, SECNUM = 1), который будет использоваться для всех конечных элементов, создаваемых в последующих операциях построения сеток.

Следует отметить, что для балочных элементов дополнительно требуется указание ориентационной точки в качестве атрибута линии, используемого для ориентации в пространстве поперечных сечений балки.

Для назначения атрибутов непосредственно геометрическим объектам (точкам, линиям, поверхностям и объемам) применяется один из следующих методов:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>

All Keypoints (всем точкам),

Picked KPs (указанным точкам),

All Lines (всем линиям),

Picked Lines (указанным линиям),

All Areas (всем поверхностям),

Picked Areas (указанным поверхностям),

All Volumes (всем объемам),
Picked Volumes (указанным объемам).

Для определения активного набора атрибутов доступны две команды:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Default Attribs;
Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes.

Следует отметить, что атрибуты, назначенные геометрическим объектам, подавляют текущие активные атрибуты. Таким образом, при генерации сеток конечных элементов, если объекту назначены атрибуты, то именно они будут автоматически присваиваться создаваемым там элементам. В противном случае будут использоваться активные в данный момент атрибуты.

Параметры управления сеткой позволяют задавать положение среднего узла (для элементов второго порядка), форму и размеры конечных элементов. От установки этих параметров зависит качество получаемой в дальнейшем сетки элементов, т.е. точность и экономичность выполняемого анализа.

Основная предпосылка МКЭ-расчетов заключается в том, что по мере увеличения количества элементов (плотности сетки) решение сходится к точному. Однако при этом возрастают потребные ресурсы ЭВМ. Здесь необходимо найти баланс между точностью и скоростью решения задачи.

Таким образом, при практическом использовании МКЭ часто встает вопрос о том, сколько для получения приемлемой точности следует взять конечных элементов. В отсутствие опыта здесь приходится экспериментировать, т.е. начиная с грубой сетки и далее сгущая ее, исследовать сходимость решения.

Необходимо помнить, что МКЭ – приближенный метод, точность которого зависит от правильного выбора типов и размеров конечных элементов. Так, например, более мелкая сетка требуется там, где ожидаются большие градиенты напряжений. В то же время более грубая сетка может применяться в зонах с более или менее постоянными напряжениями, а также в областях, не представляющих особого интереса. В связи с этим пользователь должен предвидеть области концентрации напряжений.

Следует отметить, что форму элементов необходимо задавать лишь для тех типов элементов, которые допускают использование более одной формы. Например, многие поверхностные элементы могут иметь как треугольную, так и четырехугольную форму, а объемные – как форму тетраэдра, так и гексаэдра.

Размер генерируемых программой конечных элементов определяется путем задания либо длины стороны элемента (Element edge length), либо числа делений линии на элементы (No. of element divisions):

- определение глобального размера элементов:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Global>Size;

- определение размера элементов вблизи точек:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Keypoints>All KPs (Picked KPs);

- определение размера элементов на линиях:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines>All Lines (Picked Lines).

Перечисленные выше команды можно использовать вместе. При этом для разрешения конфликтных ситуаций здесь имеется определенная иерархия. Например, локальные установки подавляют глобальные и т.п. Глобальный размер элементов используется лишь для тех объектов, для которых не определены какие-либо другие параметры разбивки.

Если параметры управления сеткой вообще не заданы, программа ANSYS выбирает размер элементов, исходя из минимального и максимального количества делений, соотношения сторон и, прежде всего, порядка элемента. Иногда получается вполне удовлетворительная сетка.

И, наконец, автоматическое разбиение геометрических объектов на конечные элементы осуществляется с помощью команд генерации сеток (Meshing):

- генерация точечных элементов:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Keypoints;

- генерация линейных элементов:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Lines;

- генерация поверхностных элементов:

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

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Free;

- генерация объемных элементов:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Mapped>4 or 6 sided,

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Free.

Здесь следует отметить, что для поверхностей и объемов программа ANSYS использует два типа сеток: свободные (free) и регулярные (mapped).

При этом генерация свободных сеток возможна на любых поверхностях или объемах без ограничений. При разбиении поверхностей свободная сетка может состоять из четырехугольных и треугольных элементов (смешанная сетка) или только из треугольных элементов. Однако при разбиении объемов здесь используются лишь элементы, имеющие форму тетраэдра (смешанная сетка не допускается).

Генерация регулярных сеток (изосеток) требует, чтобы поверхности и объемы были «правильными», т.е. удовлетворяли определенным критериям. Так, поверхности должны быть трех- или четырехсторонними, а объемы – шестигранными (гексаэдр), пятигранными (клин, призма) или четырехгранными (тетраэдр). Заданное количество делений на сторонах здесь также должно удовлетворять некоторым критериям. При этом изосетка на поверхностях состоит только из четырехугольных элементов, а в объемах – из шестигранных.

Отметим, что регулярная сетка является более экономичной и более удобной при анализе результатов расчета. Однако во многих случаях геометрия модели такова, что составляющие ее поверхности имеют более четырех сторон, а объемы – более шести граней. Для преобразования объектов в регулярные здесь может потребоваться один из следующих приемов:

- Разбиение поверхностей (объемов) на меньшие простой формы при помощи булевой операции деления (divide). При этом в качестве режущего инструмента удобно использовать рабочую плоскость, которая легко устанавливается в нужное положение.
- Применение операции конкатенации (concatenate) для уменьшения числа сторон (граней) путем «фиктивного» объединения, только в целях разбивки, двух или более линий (поверхностей):

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Concatenate>Lines (Areas).

Для удобства пользователя все перечисленные выше команды объединены в одной диалоговой панели «Mesh Tools» (рисунок 4), которая появляется при выполнении следующей команды:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tools.

По умолчанию в данной панели флажок «Smart Size» отключен, т.е. интеллектуальные средства построения сеток не используются. Их рекомендуется применять лишь при генерации свободных сеток. В этом случае программа ANSYS будет автоматически определять размеры элементов, уста-

навливая количество делений на каждой линии с учетом ее кривизны, расстояния от отверстий и других границ, а также порядка элементов. Желаемый уровень разбивки здесь может меняться от 1 (Fine – очень мелкая сетка) до 10 (Coarse – очень грубая сетка). По умолчанию он равен 6.

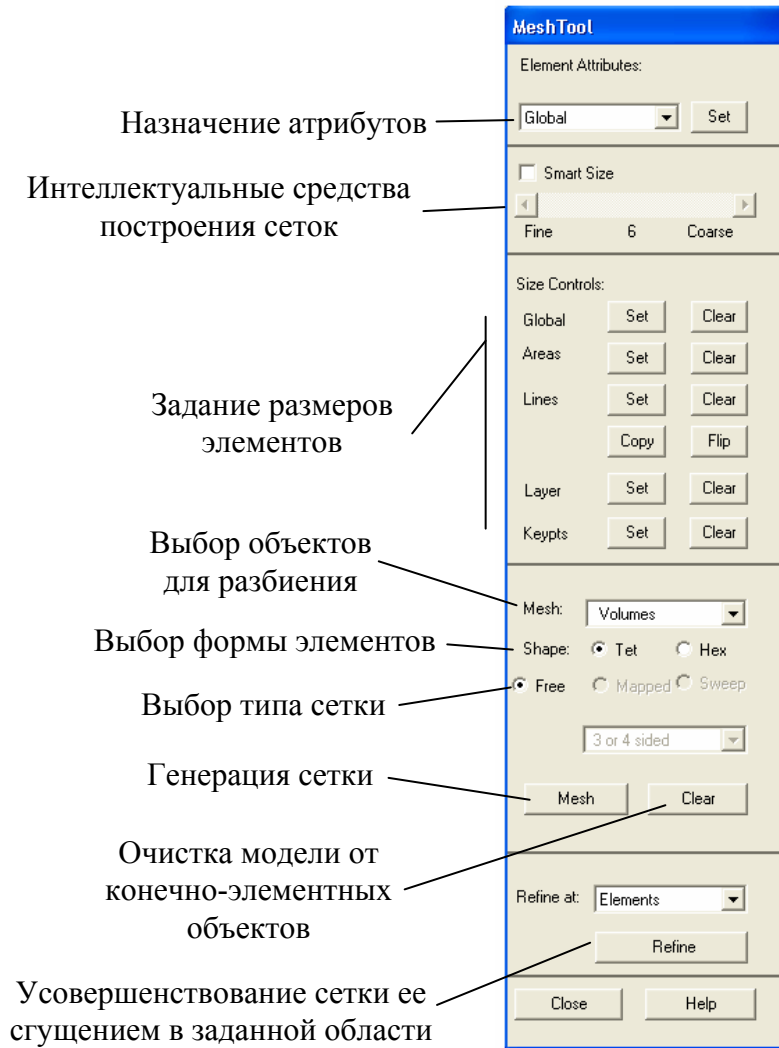


Рисунок 4 – Инструментарий для построения сеток

В заключение отметим, что помимо обычных способов построения сеток программа ANSYS позволяет вытягивать поверхностные элементы в объемные, имеющие форму гексаэдра или призмы (рисунок 5). Например, при выдавливании объема перемещением поверхности вдоль определенного пути или вращением поверхности вокруг заданной оси можно одновременно выдавить и элементы, разбивая объем. Такой прием называется методом экструзии (mesh extrusion). Очевидно, что для выполнения данной операции соответствующая поверхность должна быть разбита на элементы. Для этих це-

лей часто используют фиктивные элементы MESH200, которые не учитываются в расчетах.

Другим приемом вытягивания поверхностных элементов в объемные является метод прогонки (sweep meshing). Он отличается от метода экструзии лишь тем, что сетка строится уже в существующем объеме.

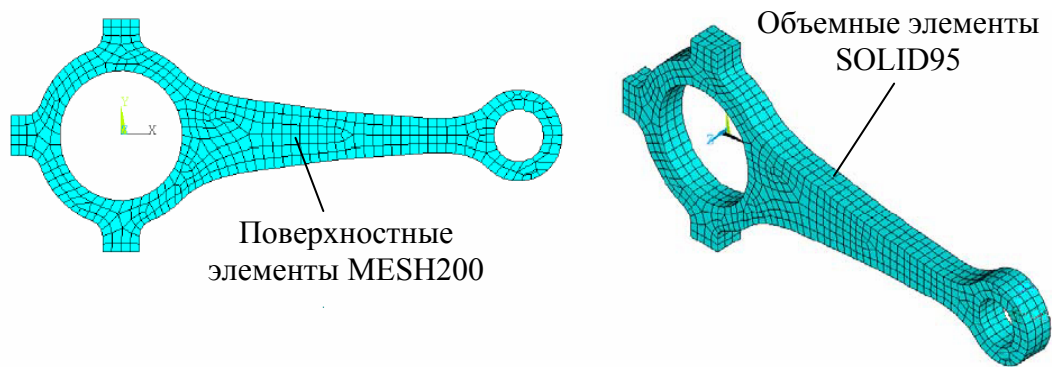
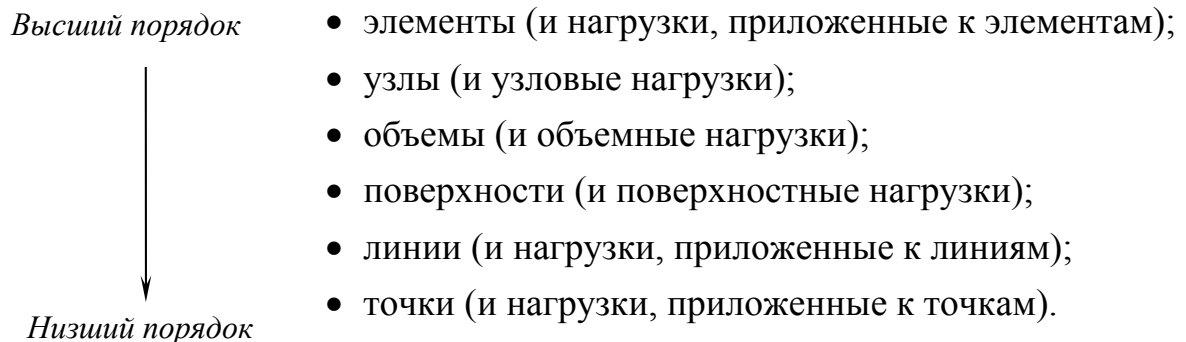


Рисунок 5 – Вытягивание поверхностных элементов в объемные

4 Редактирование модели

При редактировании модели, прежде всего, необходимо знать иерархию геометрических и конечно-элементных объектов. Дело в том, что нельзя удалить объекты, если они связаны с объектами более высокого порядка. Так, например, нельзя удалить объем, если он покрыт сеткой конечных элементов; нельзя также удалить линию, связанную с поверхностью и т.д. Кроме того, если объект связывается с любой нагрузкой, то его удаление или перепределение приводит к удалению из базы данных и соответствующей нагрузки.

Приведем полную иерархию ANSYS-объектов:



Если требуется исправить модель после того, как она была покрыта сеткой, то сначала обычно следует удалить узлы и элементы в той части модели, которая будет изменена:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Clear>Keypoints (Lines, Areas, Volumes).

Далее из очищенной от конечно-элементных объектов модели можно удалить любые геометрические объекты (в порядке сверху вниз) и затем переопределить их.

Программа ANSYS допускает и другой способ редактирования модели. Он заключается в непосредственной модификации точек с помощью одной из следующих команд:

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move/Modify>Keypoints>
Set of KPs (множества точек),
Single KP (одной точки).*

В этом случае автоматически очищается модель, и переопределяются связанные с данными точками линии, поверхности и объемы.

После исправления модели необходимо заново разбить на конечные элементы те части модели, которые были очищены.

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

1 Способы построения геометрической модели

Геометрическое моделирование позволяет существенно упростить трудоемкий процесс создания сложной расчетной (конечно-элементной) модели.

Строительными блоками, из которых составляется геометрическая модель тела, являются точки, линии, поверхности, объемы и примитивы. При этом точки (keypoints) определяют вершины модели и представляют собой геометрические объекты низшего порядка. Они являются составной частью всех остальных геометрических объектов.

Линии (lines) главным образом используются для представления кромок различных объектов. Кроме того, линии требуются для генерации линейных элементов (например, одноосных, балочных и т.п.) или для построения по ним поверхностей.

Поверхности (areas) используются для представления оболочек и граней трехмерных тел. Плоские поверхности применяются для описания геометрии двумерных моделей (например, плоских или осесимметричных тел). Поверхности требуются для генерации поверхностных элементов или для построения по ним объемов.

Объемы (volumes) применяются для представления трехмерных тел и требуются лишь в случае использования объемных элементов.

Данные геометрические объекты имеют следующую иерархию. Объемы (объекты высшего порядка) ограничены поверхностями, последние ограничены линиями, которые в свою очередь ограничены точками (объектами самого низшего порядка).

И, наконец, примитивы (primitives) – это наиболее часто используемые при моделировании простейшие плоские и объемные геометрические фигуры (такие как прямоугольник, круг, шар, цилиндр, конус и т.п.), создаваемые одной командой без предварительного определения точек.

Перечислим доступные в программе ANSYS способы построения геометрической модели:

- 1) «снизу-вверх» («восходящее» моделирование);
- 2) «сверху-вниз» («нисходящее» моделирование);
- 3) импорт модели.

В первом случае сначала создаются объекты низшего порядка – точки, а затем по ним определяются объекты более высокого порядка (т.е. линии,

поверхности и объемы). При этом здесь нет необходимости строго следовать иерархии объектов, например, поверхности и объемы можно непосредственно определять через точки, расположенные в их вершинах, причем промежуточные объекты будут генерироваться автоматически.

Во втором случае моделирование сразу начинается с построения объектов высокого порядка – примитивов, которые затем объединяются в единую систему, например, при помощи булевых операций. Можно легко комбинировать эти два подхода.

Кроме того, программа ANSYS позволяет импортировать геометрию посредством файлов стандарта IGES с помощью команды

Utility Menu>File>Import>IGES.

Эти файлы называются нейтральными. Они специально предназначены для обмена информацией между CAD- и CAE-системами. Импорт IGES обычно не вызывает затруднений, но из-за многоэтапности стопроцентная передача данных очень часто в этом случае не достижима. Помогают решить эту проблему специальные программы-коннекторы, позволяющие читать «родные» файлы таких CAD-пакетов, как Pro/ENGINEER, Unigraphics, SAT, Parasolid, CATIA. Для использования коннекторов необходимо приобрести соответствующую лицензию.

2 Булевы операции

Для удобства геометрического моделирования в арсенале пакета ANSYS имеются такие мощные инструменты, как булевы операции (*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans*). Следует отметить, что по умолчанию после выполнения данных операций исходные объекты удаляются. К булевым относятся следующие операции.

1). *Common Intersect* (общее пересечение) – определяет новую систему объектов, которая является общей для каждого исходного объекта, включенного в данную операцию. Другими словами, эта команда определяет область перекрытия двух или более объектов. Новая система объектов может иметь ту же или меньшую мерность, нежели исходные. Например, пересечением двух линий может быть точка (или система точек) либо линия (или система линий), как показано на рисунке 1.

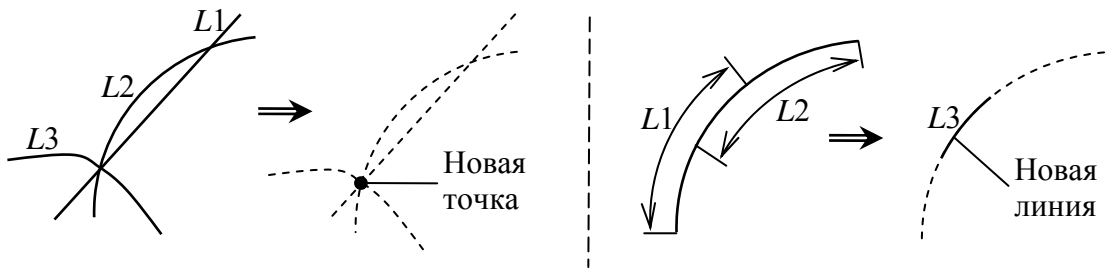


Рисунок 1 – Общее пересечение линий

2). *Pairwise Intersect* (попарное пересечение) – определяет новую систему объектов, которая является любым перекрытием исходных объектов. Другими словами, она представляет область перекрытия, по крайней мере, двух исходных объектов (рисунок 2).

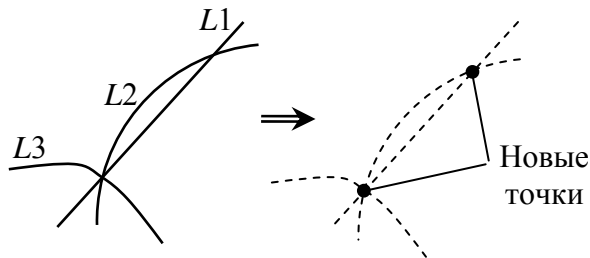


Рисунок 2 – Попарное пересечение линий

3). *Add* (сложение) – определяет новый объект, который включает в себя все части исходных, т.е. объединяет несколько объектов в один (рисунок 3). В программе ANSYS складывать можно линии, объемы, а также плоские поверхности.

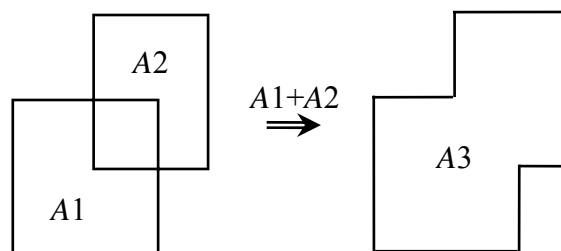


Рисунок 3 – Сложение поверхностей

4). *Subtract* (вычитание) – удаляет из одного объекта (или системы объектов) область перекрытия с другим объектом (или объектами), если она имеет ту же мерность, что и у первого объекта (рисунок 4). Данная операция

удобна для создания отверстий, а также для отрезания отдельных фрагментов.

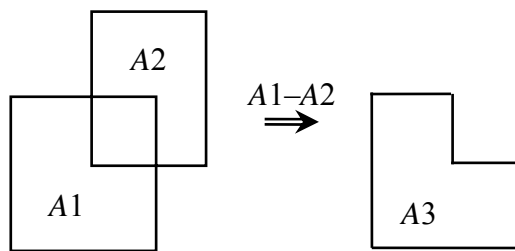


Рисунок 4 – Вычитание поверхностей

5). *Divide* (деление) – разрезает один объект на два или более новых в местах перекрытия с другим объектом, если эти области перекрытия имеют меньшую мерность, нежели первый объект (рисунок 5). По умолчанию новые объекты будут связаны друг с другом общими границами (т.е. склеены). Если же при выполнении данной операции для аргумента *SEPO* выбирается значение *SEPO*, то получаются независимые объекты. В качестве инструмента для резания здесь можно использовать рабочую плоскость, линию, поверхность и даже объем.

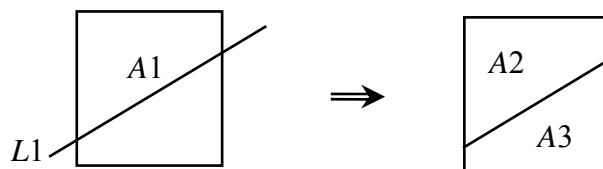


Рисунок 5 – Деление поверхности

6). *Overlap* (перекрывание) – аналогична операции сложения за исключением того, что вокруг зон перекрывания создаются границы (рисунок 6).

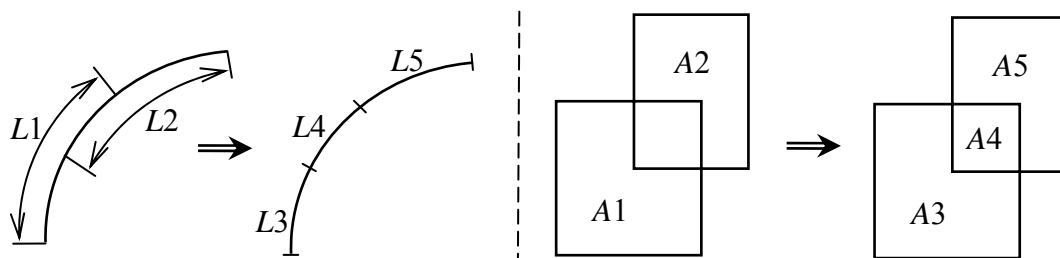


Рисунок 6 – Перекрывание линий и поверхностей

7). *Partition* (расчленение) – разделяет два или более пересекающихся объектов на множество частей, связанных друг с другом общими границами. Эта операция аналогична предыдущей, если область перекрытия имеет ту же мерность, что и исходные объекты. Однако неперекрывающиеся исходные объекты здесь не удаляются (рисунок 7).

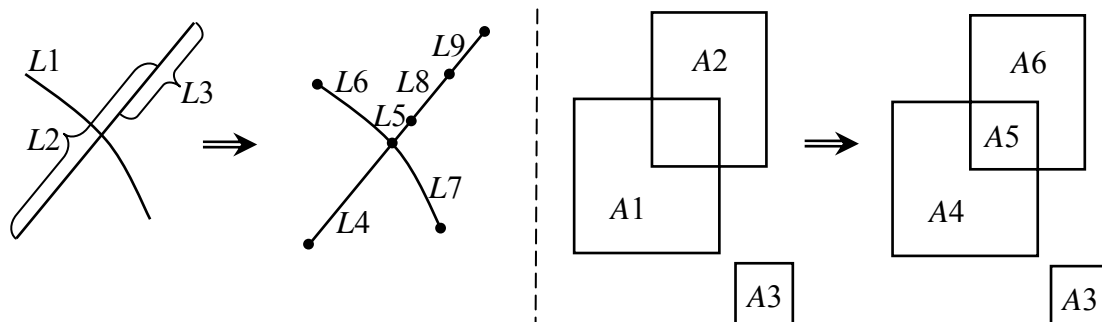


Рисунок 7 – Расчленение линий и поверхностей

8). *Glue* (склеивание) – переопределяет исходные объекты так, чтобы они имели на общих границах общие точки, линии и поверхности. Данная операция аналогична *Overlap* за исключением того, что она применяется только в том случае, когда пересечение объектов происходит на границе и имеет на одну мерность меньше, нежели исходные объекты. Объекты здесь сохраняют свою особенность (они не складываются), но они становятся связанными в местах их пересечения (рисунок 8).

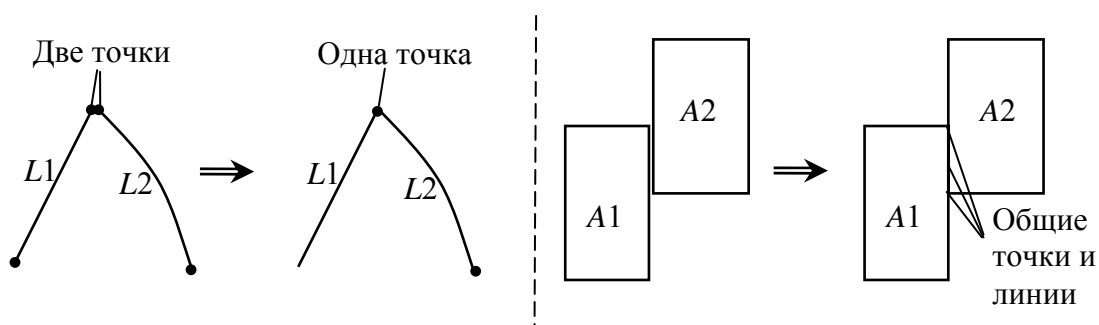


Рисунок 8 – Склеивание линий и поверхностей

Булевы операции достаточно удобны в использовании, однако иногда они требуют больших затрат машинного времени. В таких случаях более эффективным может оказаться конструирование модели с помощью операции выдавливания (*extrude*) объектов вдоль заданного пути или вращением относительно определенной оси, что позволяет строить сложные объекты, имею-

щие более высокий порядок, нежели исходные. Кроме того, здесь полезными могут оказаться операции масштабирования (scale), перемещения (move), копирования (copy), отражения (reflect), слияния (merge) и скругления (fillet).

3 Системы координат и рабочая плоскость

Программа ANSYS для разных целей использует различные типы систем координат (Coordinate System):

- глобальная и локальная системы координат применяются для определения местоположения геометрических и конечно-элементных объектов в пространстве;
- система координат изображения определяет систему, в которой выводятся объекты при составлении их списка или графическом изображении на экране дисплея;
- узловая система координат определяет направления степеней свободы каждого узла и ориентацию узловых выходных величин;
- система координат элемента определяет ориентацию свойств материала и выходных величин элемента;
- система координат результатов используется для преобразования узловых и элементных выходных величин к виду, требующемуся для просмотра в текстовом и графическом режимах, а также для иных операций общего постпроцессора.

По умолчанию при вводе точек (или узлов) их координаты определяются в глобальной декартовой системе. Для некоторых моделей, однако, более удобным может оказаться использование другой системы координат. ANSYS позволяет вводить геометрию в любой из трех predetermined (глобальных) систем координат или в определенной пользователем (локальной) системе координат.

Все три глобальные системы координат (декартова, цилиндрическая и сферическая) являются правыми и имеют общее начало. Они идентифицируются следующими номерами: 0 – для декартовой системы (Cartesian); 1 – для цилиндрической (Cylindrical) и 2 – для сферической (Spherical).

Задать локальную систему координат можно одним из следующих способов:

- определение локальной системы координат с помощью рабочей плоскости (при этом плоскость xu локальной системы координат будет совпадать с рабочей плоскостью):

Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate System>Create Local CS>

At WP Origin;

- построение локальной системы координат по трем существующим точкам:

Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate System>Create Local CS>

By 3 Keypoints;

- построение локальной системы координат по трем существующим узлам:

Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate System>Create Local CS>

By 3 Nodes;

- построение локальной системы координат путем задания начала и трех последовательных поворотов в одной из глобальных систем координат:

Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate System>Create Local CS>

At Specified Loc.

При этом каждой локальной системе координат должен быть присвоен идентификационный номер (≥ 11). Она может быть декартовой, цилиндрической или сферической.

В каждый момент времени только одна система координат может быть активной. По умолчанию активной является глобальная декартова система координат. Однако при задании локальной системы она автоматически становится активной. Для активизации любой из ранее определенных систем координат используются следующие команды:

Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>

Global Cartesian – активизирует глобальную декартову систему,

Global Cylindrical – активизирует глобальную цилиндрическую систему,

Global Spherical – активизирует глобальную сферическую систему,

Specified Coord Sys – активизирует одну из определенных ранее

локальных систем координат.

Следует отметить, что при задании точки или узла программа использует стандартное обозначение координат X , Y и Z , причем вне зависимости от того какая система координат активна. Если активная система координат не является декартовой, то здесь мысленно необходимо сделать соответствующую

щую подстановку (для цилиндрической системы координат $X = R$, $Y = \theta$, $Z = Z$; для сферической – $X = R$, $Y = \theta$, $Z = \varphi$).

По умолчанию при выводе списка точек или узлов показываються их глобальные декартовы координаты даже в том случае, когда эти объекты определяются в разных системах координат. Для изменения системы координат изображения используются следующие команды:

*Utility Menu>WorkPlane>Change Display CS to>Global Cartesian,
Global Cylindrical,
Global Spherical,
Specified Coord Sys.*

Необходимо подчеркнуть, что каждый узел имеет свою собственную систему координат, оси которой по умолчанию параллельны осям глобальной декартовой системы координат (вне зависимости от того, в какой системе координат был определен узел). Повернуть узловую систему координат любого узла можно одним из следующих способов:

- поворот узловой системы координат к активной системе координат (при этом узловая ось x становится параллельной оси X или R активной системы координат, узловая ось y – параллельной оси Y или θ , а ось z – параллельной оси Z или φ):

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>Rotate Node CS>
To Active CS;*

- поворот узловой системы координат путем задания трех последовательных углов поворота:

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>Rotate Node CS>
By Angles;*

- поворот узловой системы координат путем задания для каждой оси направляющих косинусов:

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>Rotate Node CS>
By Vectors.*

Список углов поворота узловых систем координат относительно глобальной декартовой можно вывести на экран дисплея с помощью следующей команды:

Utility Menu>List>Nodes.

Отметим, что входные данные, такие как граничные условия и внешние сосредоточенные силы, всегда интерпретируются относительно узловой сис-

темы координат. В постпроцессоре истории нагружения выходные данные (перемещения, узловые силы и реакции) выводятся также в узловой системе координат. Однако в общем постпроцессоре для этих величин используется не узловая, а система координат результатов.

Выходные величины (т.е. результаты расчета) хранятся в базе данных и в файле результатов в системе координат узла или элемента. Однако при их графическом изображении на экране дисплея, выводе списка и построении таблиц элементов они в общем случае преобразуются к системе координат результатов (по умолчанию к глобальной декартовой системе). Для изменения системы координат результатов можно воспользоваться одним из следующих приемов:

Main Menu>General Postproc>Options for Outp

или

Utility Menu>List>Results>Options.

В заключение отметим, что хотя курсор является точкой на экране дисплея, в действительности он представляет линию в пространстве, перпендикулярную плоскости экрана. Для того чтобы с помощью курсора можно было задавать местоположение точек, здесь необходимо определить воображаемую плоскость, точка пересечения линии курсора с которой будет давать единственную точку в пространстве. Эта воображаемая плоскость и называется рабочей плоскостью (*Working Plane*). В программе ANSYS она играет важную роль, например, построение геометрических примитивов всегда выполняется относительно рабочей плоскости.

По умолчанию рабочая плоскость совпадает с плоскостью XY глобальной декартовой системы координат. Однако с помощью команд, сосредоточенных в подменю

Utility Menu>WorkPlane>Align WP with,

можно определить новую рабочую плоскость. Например, команда *Keypoints* позволяет строить рабочую плоскость по трем точкам (задающим начало, ось x и плоскость xy).

Для перемещения рабочей плоскости следует воспользоваться командами подменю

Utility Menu>WorkPlane>Offset WP to.

При этом начало системы координат рабочей плоскости можно перенести в заданную точку, узел или начало активной системы координат.

Кроме того, команда

Utility Menu>WorkPlane> Offset WP by Increments

легко позволяет перемещать и поворачивать рабочую плоскость путем задания трех смещений и трех углов поворота относительно осей ее системы координат.

4 «Восходящее» моделирование

Любая модель тела, построенная «снизу-вверх», определяется с помощью точек, линий, поверхностей и объемов. При этом точки являются вершинами, линии – кромками, поверхности – гранями, а объемы – внутренностью тела. Следует отметить, что все ANSYS-объекты имеют свои собственные идентификационные номера, которые используются для ссылки на них.

4.1 Точки

Программа ANSYS предоставляет различные способы для построения точек:

- задание точки ее координатами в активной системе координат:

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

- задание точки на рабочей плоскости с помощью мыши:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>On Working Plane;

- определение точки на существующей линии:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>On Line,

On Line w/Ratio;

- определение точки в существующем узле:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>On Node.

Кроме того, располагая созданными ранее точками, можно сгенерировать дополнительные точки одним из следующих способов:

- построение точки между двумя существующими точками:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>KP between KPs;

- построение множества точек между двумя существующими точками:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>Fill between KPs;

- построение точки в центре дуги окружности, задаваемой тремя точками:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>KP at Center;

- копирование множества точек:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Keypoints;

- симметричное (зеркальное) отображение множества точек:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Keypoints;

- перенос точек в другую систему координат:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move/Modify>Transfer Coord >Keypoints;

- перемещение точки в место пересечения геометрических объектов:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move/Modify>Keypoints>To Intersect;

- изменение координат определенных ранее точек:

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move/Modify>Keypoints>Set of KPs,
Single KP.*

Для просмотра и удаления точек доступны следующие команды:

- вывод списка существующих точек:

*Utility Menu>List>Keypoints>Coordinates+Attributes,
Coordinates only;*

- вычерчивание выбранных точек:

Utility Menu>Plot>Keypoints;

- вычисление расстояния между точками:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Check Geom>KP Distance;

- удаление точек:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Keypoints.

Кроме обычных точек в программе ANSYS имеются специальные так называемые «твердые», или прикрепленные, точки (hard points). Они требуются, например, для указания места приложения внешней нагрузки. «Твердые» точки можно задавать на существующих линиях или поверхностях. При генерации конечно-элементных сеток в них обязательно образуется узел.

Для построения «твердых» точек используются следующие команды:

- задание «твердой» точки на существующей линии:

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>Hard PT on Line>
Hard PT by ratio,
Hard PT by coord,
Hard PT by picking;*

- задание «твердой» точки на существующей поверхности:

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>Hard PT on Line>
Hard PT by ratio,
Hard PT by coord,
Hard PT by picking.*

4.2 Линии

Для построения линий программа ANSYS располагает значительно большим числом команд:

- построение прямой линии по двум точкам:

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

- построение линии между двумя заданными точками в активной системе координат (если активна декартова система, то линия будет прямой):

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>In Active Coord;

- построение кратчайшей линии между двумя точками, лежащими на поверхности:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Overlaid on Area;

- построение линии, касательной к существующей линии:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Tangent to Line;

- построение линии, касательной к двум существующим линиям:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Tan to 2 Lines;

- построение прямой линии под заданным углом к существующей линии:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>

Normal to Line (под прямым углом),

At angle to Line (под любым заданным углом);

- построение линии под заданным углом к двум существующим линиям:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>

Norm to 2 Lines (под прямым углом),

Angle to 2 Lines (под любым заданным углом);

- построение дуги окружности:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Arcs>

Through 3 KPs (по трем точкам),

By End KPs & Rad (по двум конечным точкам и радиусу),

By Cent & Radius (по центру и радиусу),

Full Circle (полная окружность);

- построение кубических линий с использованием *B*-сплайна, приблизительно проходящего через заданные точки:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Splines>

Spline thru Locs (по точкам, заданным своими координатами),

Spline thru KPs (по существующим точкам);

- построение сегментированного сплайна, проходящего через заданные точки:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Splines>Segmented Spline;

- построение дуги скругления между двумя пересекающимися линиями:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Line Fillet;

- выдавливание линии перемещением точки вдоль заданного пути (определяемого линией или непрерывным набором линий):

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Keypoints>Along Lines;

- выдавливание линии путем вращения точки вокруг заданной оси (определяемой двумя точками):

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Keypoints>About Axis.

По созданным ранее линиям можно построить другие. Для этих целей предназначены следующие команды:

- копирование множества линий:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Lines;

- симметричное отображение множества линий:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Lines;

- перенос линий в другую систему координат:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move/Modify>Transfer Coord >Lines;

- деление линии на части:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans >Divide>

Line into 2 Ln's (на две части),

Line into N Ln's (на несколько частей),

Lines w/Options (с помощью опций);

- объединение двух или более линий в одну:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans >Add>Lines;

- продление линии:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extend Line.

Для просмотра и удаления линий доступны следующие команды:

- вывод списка существующих линий:

Utility Menu>List>Lines;

- вычерчивание линий:

Utility Menu>Plot>Lines;

- удаление линий:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>

Lines Only (удаление только линий),

Line and Below (удаление линии и принадлежащих ей точек).

4.3 Поверхности

Перечислим команды, позволяющие строить поверхности:

- построение произвольной поверхности по точкам, представляющим ее вершины:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>Through KPs;

- построение произвольной поверхности по линиям, представляющим ее кромки:

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

- построение поверхности с использованием формы существующей поверхности:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>

Overlaid on Area;

- построение поверхности путем натягивания на заданные направляющие линии:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>Skinning;

- построение поверхности скругления между двумя пересекающимися поверхностями:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Area Fillet;

- выдавливание поверхности перемещением линии вдоль определенного пути:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Lines>Along Lines;

- выдавливание поверхности путем вращения линии вокруг заданной оси:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Lines>About Axis.

Для копирования, симметричного отображения, просмотра и удаления поверхностей здесь используются те же команды, что и для линий.

4.4 Объемы

Для создания объемов имеются следующие команды:

- построение произвольного объема по точкам, представляющим его вершины:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Arbitrary>Through KPs;

- построение произвольного объема по поверхностям, представляющим его грани:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Arbitrary>By Areas;

- выдавливание объема перемещением поверхности вдоль определенного пути:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Areas>Along Lines;

- выдавливание объема путем вращения поверхности вокруг заданной оси:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Areas>About Axis.

5 «Нисходящее» моделирование

Построение геометрической модели с использованием примитивов называется моделированием «сверху-вниз», поскольку они являются объектами достаточно высокого порядка, создаваемыми без предварительного определения точек.

Двухмерные примитивы включают в себя прямоугольники, круги, равносторонние треугольники и другие правильные многоугольники (квадраты, пентагоны, гексагоны, септагоны, октагоны), а трехмерные примитивы – параллелепипеды, цилиндры, призмы, шары, торы и конусы.

При создании двухмерного примитива ANSYS строит плоскую поверхность, а также принадлежащие ей линии и точки. При создании же трехмерного примитива ANSYS строит объем, а также принадлежащие ему поверхности, линии и точки.

Следует отметить, что примитивы размещаются и ориентируются с помощью рабочей плоскости.

5.1 Двухмерные примитивы

Для создания плоских примитивов используются следующие команды:

- построение прямоугольника:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>

By 2 Corners (по координатам вершины и размерам прямоугольника),

By Centr & Cornr (по координатам центра и размерам прямоугольника),

By 2 Dimension (по координатам двух противоположащих вершин);

- построение круга:

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Solid Circle,
By End Points;*

- построение кольца:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Annulus;

- построение кругового (или кольцевого) сектора:

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Partial Annulus,
By Dimensions;*

- построение правильного многоугольника:

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Polygon>
Triangle (треугольник),
Square (квадрат),
Pentagon (пятиугольник),
Hexagon (шестиугольник),
Septagon (семиугольник),
Octagon (восьмиугольник).*

5.2 Трехмерные примитивы

Для создания объемных примитивов доступны такие команды, как:

- построение прямоугольного параллелепипеда:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Block>

By 2 Corners & Z (по координатам вершины и размерам параллелепипеда),

By Centr, Cornr, Z (по координатам центра и размерам параллелепипеда),

By Dimensions (по координатам противоположащих вершин);

- построение цилиндра:

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Cylinder>Solid Cylinder,
By End Pts & Z;*

- построение полого цилиндра:

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Cylinder>
Hallow Cylinder;*

- построение сектора полого цилиндра:

*Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Cylinder>
Partial Cylinder,
By Dimensions;*

- построение правильной призмы:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Prism>

Triangular,

Square,

Pentagonal,

Hexagonal,

Septagonal,

Octagonal;

- построение шара:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Sphere>Solid Sphere,

By End Points;

- построение полого шара:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Sphere>Hollow Sphere;

- построение сектора полого шара:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Sphere>By Dimensions;

- построение усеченного конуса:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Cone>By Picking;

- построение сектора усеченного конуса:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Cone> By Dimensions;

- построение сектора полого тора:

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Torus.

ОСНОВЫ РАБОТЫ С МКЭ-ПАКЕТОМ ANSYS

1 Запуск программы

Для запуска программы ANSYS используется диалоговая панель «Launcher» (рисунок 1). Список «Simulation Environment» здесь предназначен для выбора расчетной среды, например ANSYS, ANSYS Workbench, ANSYS Batch, LS-DYNA Solver и т.п. Кроме того, в списке «License» указывается программный продукт, на который имеется лицензия.

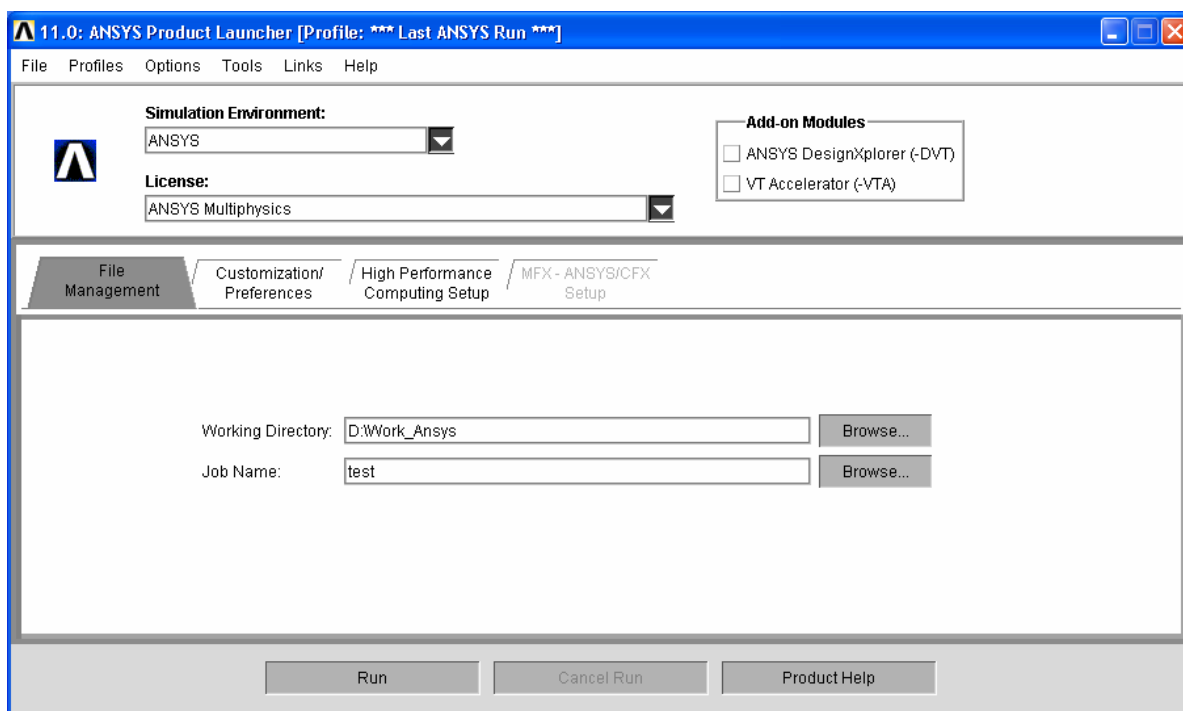


Рисунок 1 – Панель запуска программы ANSYS

Первая вкладка «File Management» применяется для задания рабочей директории (Working Directory), в которую будут записываться создаваемые программой файлы, а также выбранного пользователем имени задачи (Job Name).

Опции вкладки «Customization/Preferences» без особой необходимости и опыта менять не следует. В частности, здесь указываются настройки памяти, тип графического устройства и язык, который используется пакетом ANSYS (по умолчанию американский диалект английского языка).

И, наконец, во вкладке «High Performance Computing Setup» задаются опции многопроцессорного расчета.

После определения всех опций собственно запуск программы ANSYS осуществляется нажатием кнопки *Run*.

2 Графический интерфейс пользователя

Комплекс ANSYS допускает два режима работы: пакетный (Batch) и интерактивный (Interactive). Первый режим особенно эффективен при решении задач, не требующих постоянной связи с компьютером. Работа ANSYS в этом случае определяется программой пользователя, предварительно записанной в текстовый файл. Первая строка в файле должна быть `\BATCH`, обозначающая пакетный режим. Данная программа состоит из ANSYS-команд, каждая из которых выполняет определенную функцию. Типичная команда содержит имя и несколько разделенных запятыми аргументов.

Интерактивный режим предполагает постоянное взаимодействие с программой через многооконный «графический интерфейс пользователя (Graphical User Interface, или сокращенно GUI)», представленный на рисунке 2. Средства GUI позволяют работать с ANSYS при малых знаниях о командах пакета или даже при отсутствии таковых.

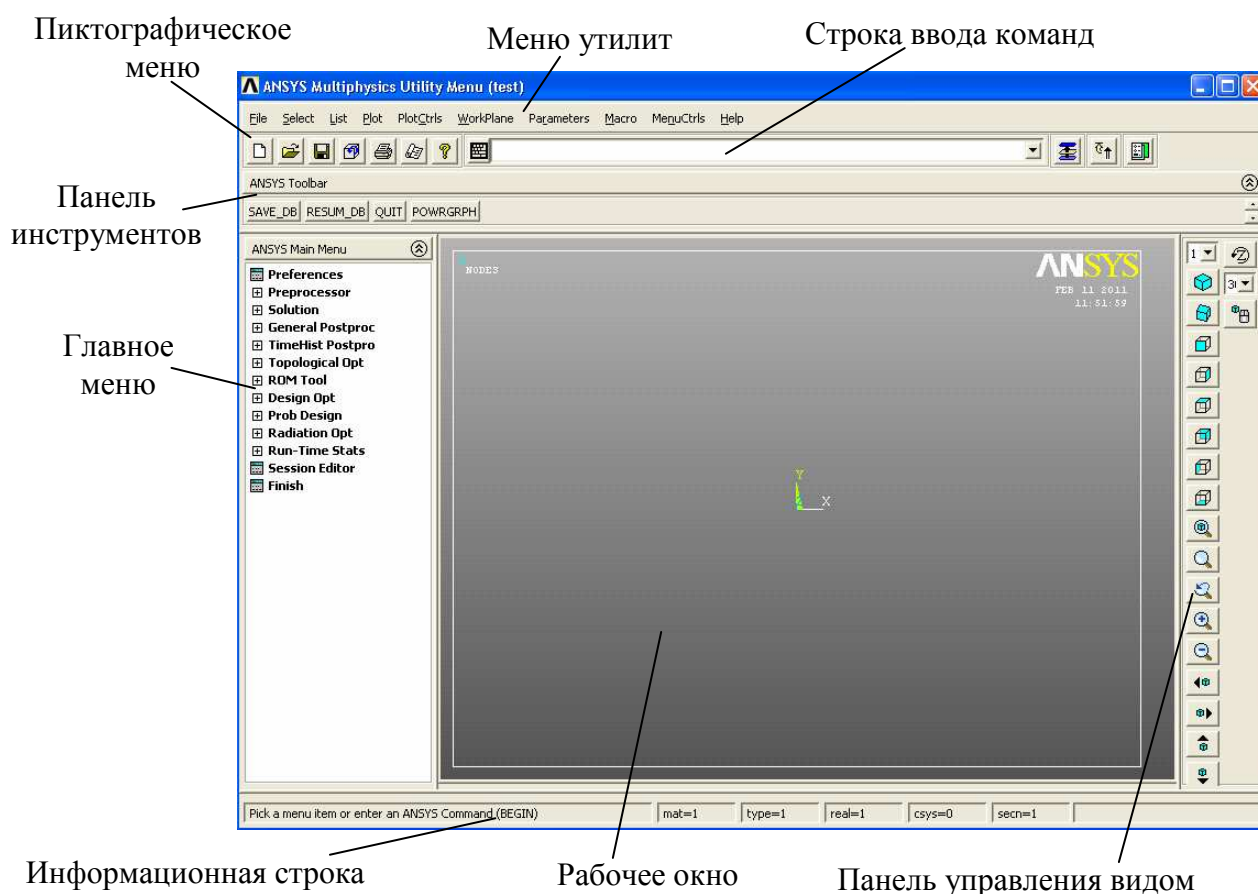


Рисунок 2 – Система панелей, окон и меню программы ANSYS

Главное меню (Main Menu) имеет древовидную структуру. Это та часть программы, с которой в основном и работает пользователь. Его базовыми

ветвями (модулями) являются: препроцессор (Preprocessor), блок решения (Solution), общий постпроцессор (General Postproc) и постпроцессор истории нагружения (TimeHist Postpro). Они соответствуют следующим трем фазам типового МКЭ-анализа:

- 1) построение модели;
- 2) задание нагрузок (в том числе и граничных условий) и получение решения;
- 3) просмотр результатов расчета.

Препроцессор используется для построения конечно-элементной модели тела, которое включает в себя определение типов конечных элементов, наборов реальных постоянных и свойств материалов, описание геометрии тела и генерацию конечно-элементных сеток.

Блок решения предназначен для задания граничных условий и внешней нагрузки, определения типа анализа и запуска задачи на счет.

Общий постпроцессор применяется для просмотра результатов расчета на всей модели или выбранной ее части на одном подшаге (т.е. временном шаге), а постпроцессор истории нагружения главным образом используется для просмотра изменения результатов во времени (для всего рассматриваемого диапазона) в определенных точках модели.

Выпадающее меню утилит (Utility Menu) содержит дополнительные сервисные команды, увеличивающие возможности программы и доступные в любой момент сеанса работы. Здесь в подменю «File» сосредоточены команды для работы с файлами и базами данных. Команды группы «Select» позволяют выбирать геометрические и конечно-элементные объекты по определенному пользователем критерию и помещать их в активный набор. Группы «List» и «Plot» используются соответственно для составления списков и вычерчивания различных объектов на экране дисплея. Команды подменю «PlotCtrls» применяются для управления изображением модели в рабочем окне. Команды, сосредоточенные в группе «WorkPlane», предназначены для работы с системами координат. В подменю «Parameters» доступны команды для создания, редактирования и удаления скалярных параметров, а также массивов параметров. Команды группы «Macro» применяются для вызова макросов (часто используемых последовательностей команд), а также для создания редактирования и удаления аббревиатур, отображаемых в виде кнопок панели инструментов. Группа «MenuCtrls» предназначена для настройки

средств GUI. Последнее подменю «Help» содержит развернутую информацию по теории и командам ANSYS.

В пиктографическом меню (Icon Toolbar Menu) располагаются графические кнопки, которые вызывают часто применяемые ANSYS-команды (рисунок 3).

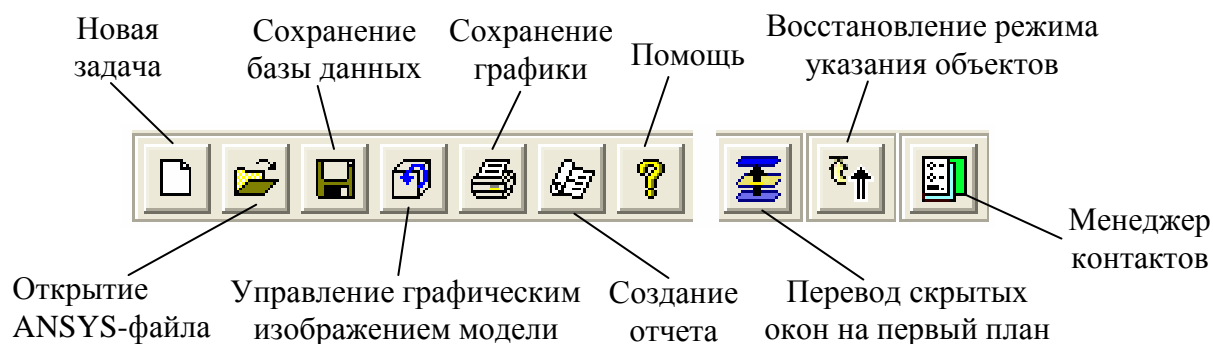


Рисунок 3 – Пиктографическое меню

Панель инструментов (ANSYS Toolbar) содержит аббревиатуры (сокращения) наиболее часто используемых команд и операций. Ее можно модифицировать путем добавления пользовательских кнопок. По умолчанию в данной панели имеются кнопки, применяемые для записи (т.е. сохранения) базы данных в файл (SAVE_DB), чтения базы данных из файла (RESUM_DB) и завершения сеанса работы с программой (QUIT).

Здесь следует отметить, что при вводе геометрических и конечно-элементных объектов они автоматически помещаются в базу данных, которая является общей для всех фаз МКЭ-анализа. В процессе построения сложной модели во избежание потери вводимой информации рекомендуется периодически сохранять базу данных. При этом в случае последующих ошибок при вводе можно всегда вернуться к предыдущей копии базы данных, считывая ее из файла. Кнопка RESUM_DB часто также используется в начале сеанса при повторной работе с задачей для чтения данных, введенных во время предыдущего сеанса.

Строка ввода команд (Input) позволяет пользователю вручную с помощью клавиатуры вводить ANSYS-команды. Этот способ является более быстрым, нежели использование меню, однако здесь необходим большой опыт работы с программой. Все введенные ранее команды здесь содержатся в вы-

падающем списке, из которого можно выбрать любую команду для ее повторного выполнения.

В информационной строке (Status and Prompt Area) имеется область «подсказки», где описываются возможные или требуемые в данный момент действия, а также указываются текущие активные атрибуты элементов (номер материала *mat*, номер типа элементов *type*, номер набора реальных постоянных *real*, номер сечения *secn*) и номер активной системы координат *csys*.

Имеется еще не показанное на рисунке 2 окно вывода (Output Window), предназначенное для вывода различных текстовых сообщений программы (откликов команд, замечаний, предупреждений, ошибок и т.п.). Обычно оно располагается позади остальных объектов графического интерфейса пользователя. Следует подчеркнуть, что закрытие данного текстового окна приводит к завершению работы программы.

3 Графическое указание объектов

Многие ANSYS-команды требуют задания в качестве аргументов различных объектов. Например, для построения линии по точкам необходимо указать номера последних. Программа ANSYS позволяет выбирать объекты, используемые в качестве аргументов команд, непосредственно на экране дисплея путем их указания с помощью мыши. Для этих целей предусмотрены специальные панели, называемые панелями указания. Они имеют стандартный вид. Пример такой панели показан на рисунке 4.

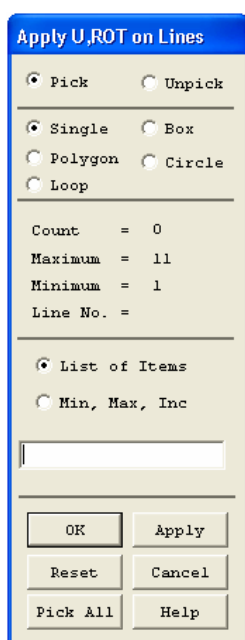


Рисунок 4 – Панель указания

При включенной селекторной кнопке *Pick* объекты здесь можно указывать при помощи левой кнопки мыши. Другая кнопка *Unpick* применяется для снятия указания. Для переключения между этими операциями можно также воспользоваться правой кнопкой мыши. При указании объектов курсор мыши имеет вид стрелки, направленной вверх, а при снятии указания – вид стрелки, направленной вниз.

Для идентификации объектов при их указании здесь используется понятие

«горячей» точки. Например, если два объекта являются смежными, то выбирается тот, «горячая» точка которого наиболее близка к курсору мыши. Для поверхностей, объемов и конечных элементов данная точка располагается вблизи их центра тяжести. Линии имеют три «горячие» точки – на концах и в середине. Если «горячие» точки двух или более объектов совпадают, то при их указании появляется панель «Multiple Entities» (совпадающие объекты). При этом необходимо с помощью кнопки *Next* (следующий) или *Prev* (предыдущий) выбрать нужный объект и нажать *OK*.

Активизация селекторной кнопки *Single* позволяет указывать отдельные объекты. Включение же кнопки *Box*, *Polygon* или *Circle* дает возможность выбора сразу нескольких объектов, находящихся внутри построенного курсором мыши прямоугольника, многоугольника или круга соответственно. Кнопка *Loop* позволяет выбирать замкнутую последовательность линий или поверхностей путем указания лишь одного объекта из этого набора.

И, наконец, кнопка *Pick All* используется для выбора всех объектов требуемого типа.

4 Файлы

Программа ANSYS широко использует файлы как для временного, так и для постоянного хранения различных данных, особенно во время решения задачи. При этом заданное имя задачи (*Jobname*) становится первой частью имени всех создаваемых программой файлов. Если данная величина не определена, файлы получают стандартное имя *file*. Имя *Jobname* можно задать непосредственно при запуске программы ANSYS либо с помощью команды

Utility Menu>File>Change Jobname.

Расширения ANSYS-файлов используются для идентификации хранящихся в них данных. Основными здесь являются следующие файлы:

- *Jobname.db* – двоичный файл базы данных;
- *Jobname.dbb* – резервная (предыдущая) копия базы данных;
- *Jobname.rst* – двоичный файл результатов расчета;
- *Jobname.err* – текстовый файл, содержащий предупреждения и сообщения об ошибках;
- *Jobname.log* – текстовый файл протокола сеанса, содержащий полную запись о проведенном сеансе работы в виде последовательности команд;

- Jobname.lgw – текстовый файл протокола команд базы данных, создаваемый командой *Utility Menu>File>Write DB Log File*.

Необходимо отметить, что log- и lgw-файлы в сочетании с командой *Utility Menu>File>Read Input from*

часто применяются для воссоздания модели при утрате ее база данных в результате системного сбоя или ошибок пользователя. Кроме того, эти файлы можно использовать в качестве исходного материала при разработке собственных программ-макросов.

5 Выход из программы

Выйти из программы ANSYS можно тремя различными способами:

- путем нажатия кнопки QUIT панели инструментов;
- с помощью меню утилит *Utility Menu>File>Exit*;
- путем набора */EXIT* в строке ввода команд с последующим нажатием клавиши *Enter*.

При завершении работы с программой выдается запрос о том, какие объекты базы данных необходимо сохранить при записи в файл:

- Save Geom+Loads – сохранить геометрию и нагрузки;
- Save Geo+Ld+Solu – сохранить геометрию, нагрузки и результаты решения;
- Save Everything – сохранить все;
- Quit – No Save! – ничего не сохранять.

РЕАЛИЗАЦИЯ МКЭ В ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ

МКЭ полностью ориентирован на использование ЭВМ. Это обусловлено необходимостью выполнения большого количества однотипных операций. Однако есть два важных этапа расчета, плохо поддающихся автоматизации и требующих больших затрат ручного труда. Это, во-первых, подготовка и ввод исходных данных и, во-вторых, обработка и анализ результатов расчета.

В настоящее время создано достаточно много программных продуктов, реализующих МКЭ. Они называются МКЭ-пакетами и относятся к классу систем инженерного анализа, или CAE-систем (Computer Aided Engineering).

Самые мощные МКЭ-пакеты (называемые тяжелыми или универсальными) позволяют решать линейные и нелинейные, статические и динамические задачи анализа конструкций, а также задачи усталостной прочности, теплопроводности и термоупругости, механики жидкости и электромагнетизма и т.д. Их библиотеки конечных элементов насчитывают более сотни разнообразных типов элементов, что позволяет моделировать практически любые конструкции.

Для преодоления трудностей, связанных с вводом исходных данных и представлением результатов расчета, рассматриваемые пакеты имеют мощные препроцессоры и постпроцессоры, широко использующие графические возможности компьютера. Препроцессоры позволяют вводить исходные данные в интерактивном (диалоговом) режиме. При этом сначала с помощью геометрических примитивов, а также с использованием команд генерации геометрических объектов строится модель тела, называемая геометрической или твердотельной (рисунок 1), и затем выполняется автоматическое разбиение модели на конечные элементы (рисунок 2). Использование стандартных форматов здесь позволяет строить модель в одной программе, а затем использовать ее в другой. Это очень важно, так как можно взять уже готовую геометрическую модель, построенную, например, в системе автоматизированного проектирования, или CAD-системе (Computer Aided Design), что существенно экономит время.

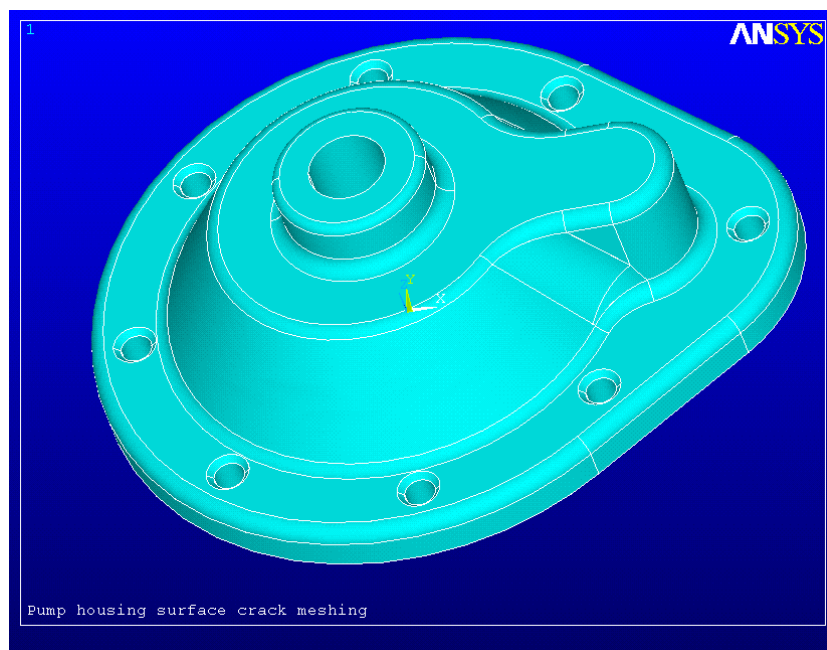


Рисунок 1 – Геометрическая модель кожуха насоса

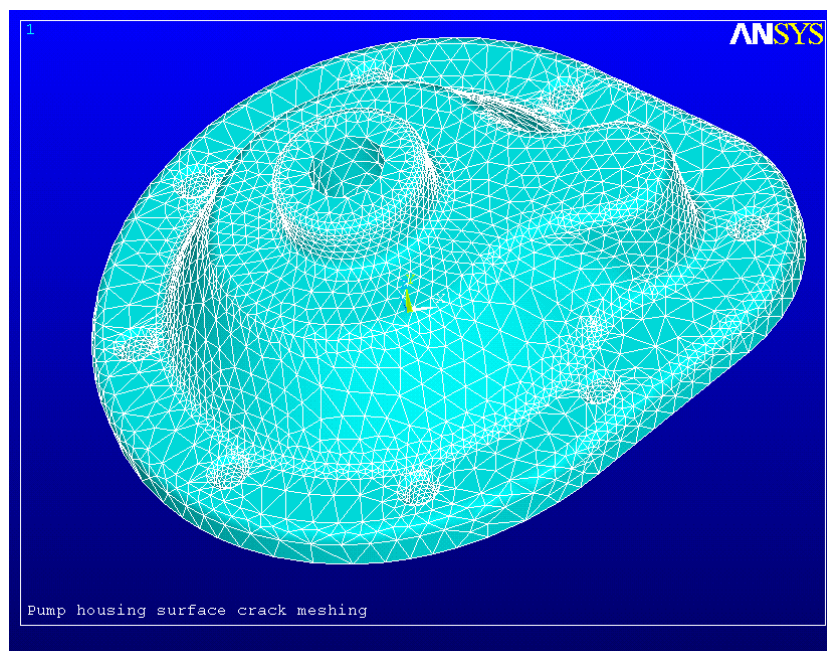


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель кожуха насоса

Простейшим способом представления результатов МКЭ-анализа является вывод на печать перемещений и напряжений в характерных точках (например, в узлах). При этом объем выводимой информации часто оказывается настолько большим, что даже простой ее просмотр требует значительного времени. Постпроцессоры обеспечивают выдачу результатов в удобной для практического использования форме. Это может быть визуализация (или анимация) деформированного состояния, многоцветное представление полей деформаций и напряжений (рисунок 3), представление данных полей с по-

мощью изоповерхностей, построение графиков интересующих нас величин (рисунок 4) и т.д.

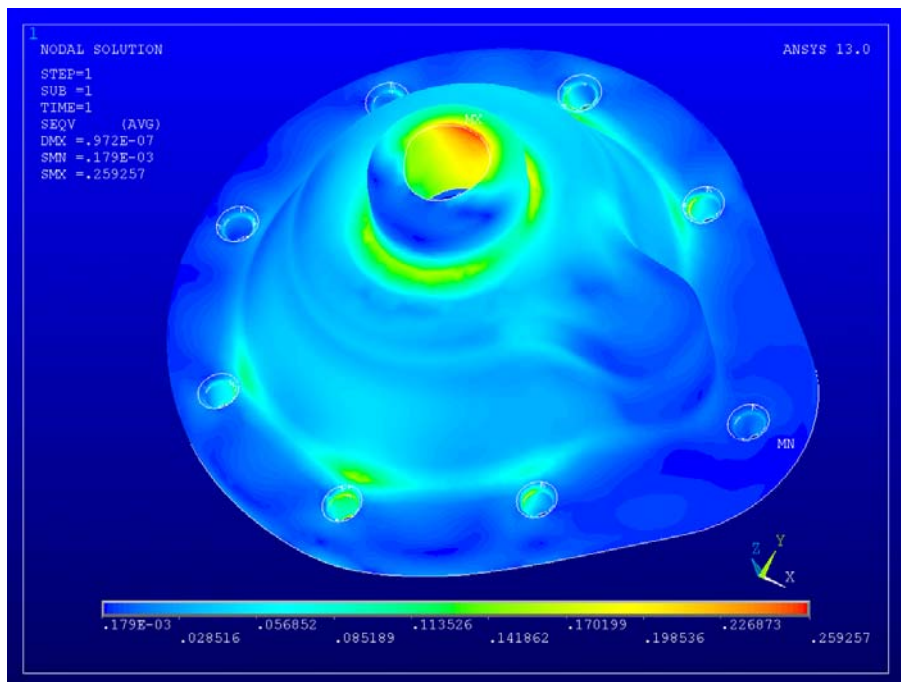


Рисунок 3 – Многоцветное представление поля напряжений по Мизесу

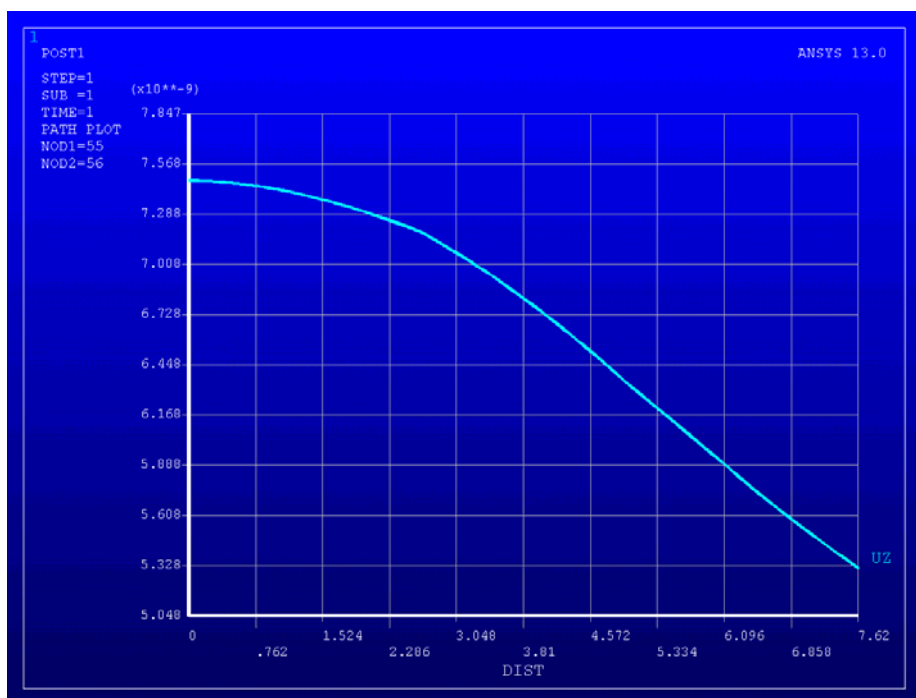


Рисунок 4 – Построение двухмерного графика

Следует отметить, что в настоящее время среди систем инженерного анализа наиболее широко используемыми в мире являются программные продукты корпорации MSC.Software (MacNeal-Schwendler Corporation). MSC основана в 1963 году. В 1965 году, выиграв тендер, она начала разработку

МКЭ-системы NASTRAN для Национального комитета США по авиации и космическим исследованиям NASA (Nasa STRuctural ANalysis – анализ конструкций для NASA). В 1972 году был создан главный продукт фирмы – решатель MSC.Nastran. Это универсальный тяжелый МКЭ-пакет. Сейчас данная система стала фактически мировым стандартом сертификации для аэрокосмических предприятий. В 1978 году для программы MSC.Nastran американской фирмой PDA Engineering был разработан пре- и постпроцессор PATRAN (Patches for NASTRAN – дополнения для NASTRAN), которая в 1994 году вошла в состав корпорации MSC.

В настоящее время создание хорошего конкурентно способного изделия невозможно без использования компьютерных технологий виртуальной разработки изделий VPD (Virtual Product Development). VPD-технологии являются самым верхним, самым современным, качественно новым уровнем в области систем инженерного анализа.

Корпорация MSC.Software предлагает широкий спектр VPD-систем, обмен данными между которыми существенно облегчен. Геометрическая информация здесь легко передается из одной системы в другую, и результаты одного из этапов работ являются исходными данными для другого. Такая тесная интеграция дает возможность применения многодисциплинарного подхода.

Основными программными продуктами корпорации MSC.Software являются:

- MSC.Patran – интегрирующая универсальная среда для систем инженерного анализа и моделирования (пре- и постпроцессор);
- MSC.Nastran – основной МКЭ-решатель;
- MSC.Marc – МКЭ-решатель для комплексного нелинейного анализа конструкций с учетом сложных трехмерных контактов, больших пластических и упругих деформаций, сложных моделей материалов;
- MSC.Dytran – МКЭ-решатель для анализа быстропротекающих процессов ударного характера и разрушения конструкций;
- MSC.Super Form – программа для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением на основе решателя MSC.Marc;
- MSC.Super Forge – тоже, но на основе решателя MSC.Dytran;
- MSC.Fatigue – система анализа долговечности, усталости, ресурса, появления и роста трещин и оптимизация конструкций по долговечности;

- MSC.Adams – программа для виртуального моделирования и анализа динамики машин и механизмов;
- MSC.Actran – МКЭ-решатель для анализа распространения акустических волн;
- MSC.visual Nastran for Windows – автономная МКЭ-система, имеющая свой встроенный пре- и постпроцессор Femap;
- MSC.Sim Designer for CATIA – программа для выполнения прочностных расчетов непосредственно в среде системы автоматизированного проектирования CATIA на основе возможностей базовых функций решателей Nastran, Marc и Adams.

Необходимо подчеркнуть, что VPD-технологии – это создание высокоточных компьютерных моделей изделий на основе применения нескольких десятков глубоко интегрированных CAE-систем. Стоимость покупки совокупности таких систем составляет десятки миллионов долларов. Такие затраты вызывают проблемы даже у ведущих мировых фирм.

Предлагаемая корпорацией MSC.Software система лицензирования и поставки MSC.Master Key делает доступными для небольших предприятий с ограниченным бюджетом самые современные VPD-технологии. Ее суть заключается в том, что в рамках любого MSC VPD-контракта поставляется весь основной комплекс систем, включающий более сотни программ. Каждая программа требует для запуска определенного числа жетонов. Система лицензирования лишь отслеживает, чтобы в текущий момент времени цена работающих программ в жетонах не превышала общего числа купленных жетонов.

Следует отметить, что наряду с пакетом MSC.Nastran система ANSYS (разработанная американской фирмой ANSYS, Inc, основанной в 1970 году) входит в число лидирующих универсальных тяжелых МКЭ-комплексов уже более 30 лет. Начало развитию данной программы положил ученый с мировым именем Dr. John Swanson. Ее базовой отраслью является атомная энергетика. В отличие от Nastran система ANSYS имеет свой встроенный графический пре- и постпроцессор. Отличительными особенностями ANSYS являются уникальные возможности решения связанных multidisciplinary задач (multiphysics), объединяющих прочность, теплофизику, электромагнетизм и гидрогазодинамику в рамках одной программы и модели. Кроме того, система ANSYS первой среди МКЭ-пакетов получила сертификат серии ISO 9001.

Многоцелевые функции комплекса ANSYS обеспечиваются наличием в нем многочисленного семейства отдельных специализированных программ, имеющих много общих функций, однако математическое обеспечение которых рассчитано на решение отдельных классов задач. Основными программами здесь являются:

- ANSYS/Multiphysics – программа для широкого круга инженерных дисциплин, позволяющая проводить расчеты в области прочности, распространения тепла, механики жидкости и газа, электромагнетизма, а также решать связанные задачи;
- ANSYS/Mechanical – программа для выполнения проектных разработок, анализа и автоматизации, позволяющая решать сложные задачи прочности конструкций, теплопередачи и акустики (является подмножеством ANSYS/Multiphysics);
- ANSYS/Structural – программа, позволяющая выполнять сложный прочностной анализ конструкций с учетом разнообразных нелинейных эффектов (является подмножеством ANSYS/Mechanical);
- ANSYS/Thermal – это отдельная программа, выделенная из пакета ANSYS/Mechanical, для решения тепловых стационарных и нестационарных задач;
- ANSYS/LS-DYNA – программа для анализа высоконелинейных и быстропротекающих процессов в задачах прочности конструкций;
- ANSYS/ED – учебная версия программы ANSYS/Multiphysics, имеющая ограничения по размеру расчетной модели.

В заключение особо следует отметить МКЭ-пакеты, предназначенные для анализа высоконелинейных и быстропротекающих процессов в задачах механики твердого и жидкого тел. К таковым системам в первую очередь следует отнести программу LS-DYNA, первая версия которой была выпущена в 1976 году корпорацией LSTC (Livermore Software Technology Corp.). Данная программа была первой в своей области и послужила основой для всех современных пакетов высоконелинейного анализа, оставаясь на лидирующих позициях до сегодняшнего дня. Другой системой такого типа является MSC.Dytran. Эти пакеты позволяют решать сложнейшие задачи, такие как столкновение конструкций с разрушением (например, краш-тесты, т.е. соударение автомобиля с препятствием), попадание птицы в авиадвигатель, обрыв лопатки, взрывы, штамповка металла, пробивание снарядом конструкции и т.д. Данные пакеты опираются на самые современные достижения нау-

ки. Здесь используется Лагранжево-Эйлеровый алгоритм пространственно-временной дискретизации, что позволяет описывать взаимодействие жидкости или газа с деформируемым телом. При этом применяется явная схема интегрирования по времени, которая существенно уменьшает время счета.

К рассматриваемому классу программных средств можно отнести также МКЭ-пакет ABAQUS, который имеет два решателя: общего назначения (Standard) и явный (Explicit), предназначенный для анализа высоконелинейных переходных динамических процессов. Данная система разработана одноименной компанией (ABAQUS Inc.), основанной в 1978 году. Ее базовой отраслью является ядерная промышленность.

Существует мнение, что о МКЭ-пакете следует судить по тому, как в нем реализован алгоритм решения контактных задач. В этом плане ABAQUS, наряду с Marc и ANSYS, занимает лидирующее место в мире.

ВВЕДЕНИЕ В МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1 Основные соотношения

В практике прочностных расчетов используют как аналитические, так и численные методы. Первые базируются на математических методах решения краевых задач, обычно сложных и трудоемких. Они применяются, как правило, к телам простой конфигурации и зачастую оказываются бессильными, если требуется найти распределение напряжений в сложной реальной конструкции.

Численные (или вычислительные) методы позволяют свести получение численного значения решения к последовательности арифметических операций над численными значениями входных данных, и поэтому хорошо приспособлены к расчетам на ЭВМ. Они не ограничены ни формой тел, ни способом приложения нагрузки. Существует много различных численных методов, пригодных для эффективного решения тех или иных частных задач. Начиная с конца 60-х годов прошлого столетия, предпочтение все больше отдается методу конечных элементов как наиболее гибкому и универсальному.

Метод конечных элементов (МКЭ), получивший в последние годы широкое развитие, представляет собой приближенный метод решения разнообразных задач математической физики. В задачах механики деформируемого твердого тела МКЭ позволяет распространить известные принципы расчета дискретных систем (таких как фермы, рамы) на случай непрерывных тел и сложных конструкций. В настоящее время МКЭ является основным расчетным инструментом для исследования прочности разнообразных конструкций.

Суть данного метода заключается в следующем. Рассмотрим непрерывное тело, нагруженное произвольным образом. Сеткой секущих поверхностей мысленно разобьем тело на отдельные подобласти (рисунок 1). Полученные подобласти имеют хотя и малые, но все же конечные размеры, откуда и происходит название «конечные элементы».

На границах между отдельными элементами выбираются некоторые точки – узлы. Перемещения узлов в направлении координатных осей (а иногда и угловые перемещения) принимаются в качестве основных неизвестных.

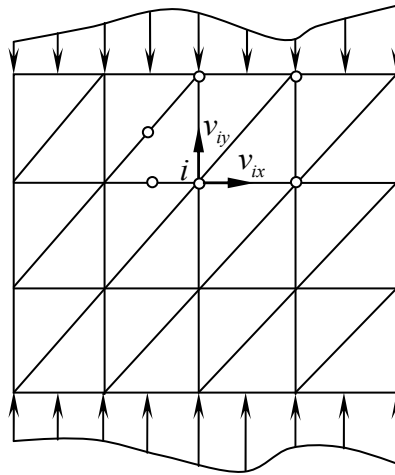


Рисунок 1 – Разбивка тела сеткой секущих поверхностей

В МКЭ, прежде всего, встает вопрос о том, как найти перемещения (а, следовательно, деформации и напряжения) внутри каждого конечного элемента, зная перемещения принадлежащих ему узлов. Для сплошного тела эта задача решается приближенно, если сделать те или иные предположения о характере поля перемещений в элементе. Точнее, необходимо выбрать некоторую совокупность функций, которые позволяют аппроксимировать поле перемещений внутри конечного элемента по известным узловым перемещениям. Выбор таких аппроксимирующих функций является одним из наиболее ответственных и важных этапов в МКЭ. В матричных обозначениях это означает существование равенства

$$[u] = [\alpha][v^e], \quad (1)$$

где $[u]$ – матрица-столбец перемещений в направлении координатных осей произвольной точки внутри элемента; $[v^e]$ – матрица-столбец узловых перемещений элемента “e”; $[\alpha]$ – прямоугольная матрица, элементами которой являются некоторые функции координат (аппроксимирующие функции).

Например, для плоского элемента (рисунок 2) данные матрицы будут иметь следующую структуру:

$$[u] = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}; \quad [\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \end{bmatrix}; \quad [v^e] = \{v_i \mid v_j \mid \dots \mid v_m\},$$

причем $[v_r] = \begin{bmatrix} v_{rx} \\ v_{ry} \end{bmatrix} \quad (r = i, j, \dots, m).$

Здесь и далее фигурные скобки обозначают матрицу-столбец, а штриховые линии означают, что элементами матрицы являются подматрицы.

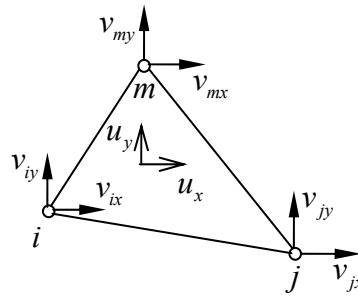


Рисунок 2 – Плоский треугольный элемент

Если такой выбор сделан, то напряженно-деформированное состояние (НДС) будет однозначно определяться узловыми перемещениями:

$$[\varepsilon] = [\beta][v^e]; \quad [\sigma] = [\kappa][\beta][v^e], \quad (2)$$

где $[\varepsilon] = \{\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{xy}\}$ – матрица-столбец деформаций; $[\sigma] = \{\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{xy}\}$ – матрица-столбец напряжений; $[\beta]$ – прямоугольная матрица, получаемая с использованием геометрических соотношений Коши; $[\kappa]$ – квадратная матрица упругих постоянных материала, получаемая с помощью закона Гука.

Например, для случая плоского напряженного состояния

$$[\beta] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \alpha_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \alpha_y}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_x}{\partial y} \end{bmatrix}; \quad [\kappa] = \frac{E}{1 - \mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \mu}{2} \end{bmatrix}.$$

Здесь E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

Таким образом, при известной матрице аппроксимирующих функций $[\alpha]$ напряженное и деформированное состояние конечного элемента однозначно определяется узловыми перемещениями $[v^e]$. Поэтому под конечным элементом следует понимать не просто некоторую малую область тела, а область тела в совокупности с заданными в ней аппроксимирующими функциями.

Вторая трудность возникает при объединении конечных элементов в единую систему. Если мы выделим конечный элемент, то на его границах будут возникать распределенные силы (рисунок 3). Эти силы в МКЭ заменяются эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми силами.

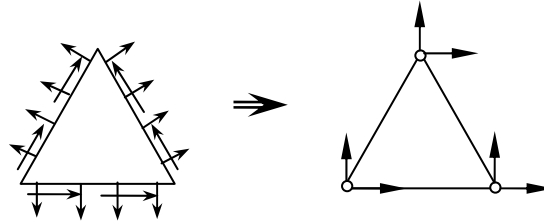


Рисунок 3 – Замена распределенных сил эквивалентными узловыми

Внешние поверхностные и объемные нагрузки также заменяются эквивалентными им в энергетическом смысле сосредоточенными силами, действующими в узлах.

Используя вариационный принцип возможных перемещений, можно получить выражение для матрицы жесткости конечного элемента:

$$[K^e] = \int_{\tau^e} [\beta]^T [\kappa] [\beta] d\tau, \quad (3)$$

где интегрирование выполняется по объему элемента.

Учитывая блочную структуру матрицы узловых перемещений $[v^e]$, матрицу жесткости также можно представить в блочном виде

$$[K^e] = \begin{bmatrix} K_{ii}^e & K_{ij}^e & \dots & K_{im}^e \\ K_{ji}^e & K_{jj}^e & \dots & K_{jm}^e \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{mi}^e & K_{mj}^e & \dots & K_{mm}^e \end{bmatrix}.$$

Следует отметить, что размер матрицы жесткости определяется произведением числа узлов на число степеней свободы (перемещений) в каждом из них. Например, для изображенного на рисунке 2 элемента матрица жесткости будет иметь размер 6х6.

Выполнив дискретизацию упругого тела, можно теперь составить уравнения равновесия узлов и прийти к системе уравнений относительно перемещений

$$[K][v] = [P], \quad (4)$$

где $[v] = \{v_1 \mid v_2 \mid \dots \mid v_n\}$ – матрица-столбец узловых перемещений (n – общее число узлов при принятой схеме дискретизации); $[P] = \{P_1 \mid P_2 \mid \dots \mid P_n\}$ – матрица столбец внешних (сосредоточенных и эквивалентных) узловых сил; $[K]$ – матрица жесткости всего тела (или конструкции), которая может быть представлена также в блочном виде

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix}.$$

Матрица жесткости конструкции формируется из матриц жесткости отдельных элементов по следующему правилу:

- 1) $[K_{ij}] = 0$, если узлы i и j не относятся к одному конечному элементу;
- 2) $[K_{ij}] = \sum_e [K_{ij}^e]$, где суммирование производится по тем конечным элементам, которые одновременно содержат узлы i и j ;
- 3) $[K_{ii}] = \sum_e [K_{ii}^e]$, где суммирование производится по всем конечным элементам, сходящимся в узле i .

Если конструкция не закреплена, то непосредственно из уравнения (4) перемещения найти нельзя, так как матрица жесткости всей конструкции $[K]$ является вырожденной. Поэтому при расчете свободной системы ее нужно предварительно закрепить минимально необходимым числом правильно ориентированных связей, т.е. устранить возможность ее перемещения как жесткого целого.

В системе уравнений (4) вычеркивая строки и столбцы, соответствующие известным нулевым перемещениям (в направлении наложенных связей), приходим к матричному уравнению

$$[K_{\alpha\alpha}][v_\alpha] = [P_\alpha], \quad (5)$$

решение которого дает матрицу неизвестных узловых перемещений

$$[v_\alpha] = [K_{\alpha\alpha}]^{-1}[P_\alpha].$$

Здесь $[K_{\alpha\alpha}]$ так называемая сокращенная матрица жесткости конструкции.

После определения узловых перемещений можно вычислить напряжения в каждом конечном элементе.

2 Основные типы конечных элементов

Для решения задач механики деформируемого твердого тела используются линейные элементы (представляемые линиями), поверхностные элементы (описываемые поверхностями) и объемные элементы (задаваемые объемами).

2.1 Линейные элементы

Линейные элементы можно разделить на два основных вида – одноосные стержневые, работающие лишь на растяжение-сжатие (или на кручение) вдоль своей оси, и балочные, способные в общем случае воспринимать все виды нагрузок (растяжение-сжатие, изгиб в двух плоскостях и кручение).

Одноосные элементы показаны на рисунке 4. В каждом узле здесь задаются только поступательные перемещения (или только углы поворота). При этом элементы первого порядка содержат два узла и имеют прямолинейную форму, а элементы второго порядка – три узла и могут иметь криволинейную форму. Конечные элементы данного типа используются для моделирования стержневых систем (например, ферменных конструкций), а также подкрепляющих ребер жесткости (например, стрингеров, поясов лонжеронов и т.п.).

Следует отметить, что при равном количестве элементов конечные элементы второго порядка дают большую точность вычислений, так как они более точно воспроизводят криволинейную геометрию модели и имеют более точные функции формы (аппроксимирующие функции).

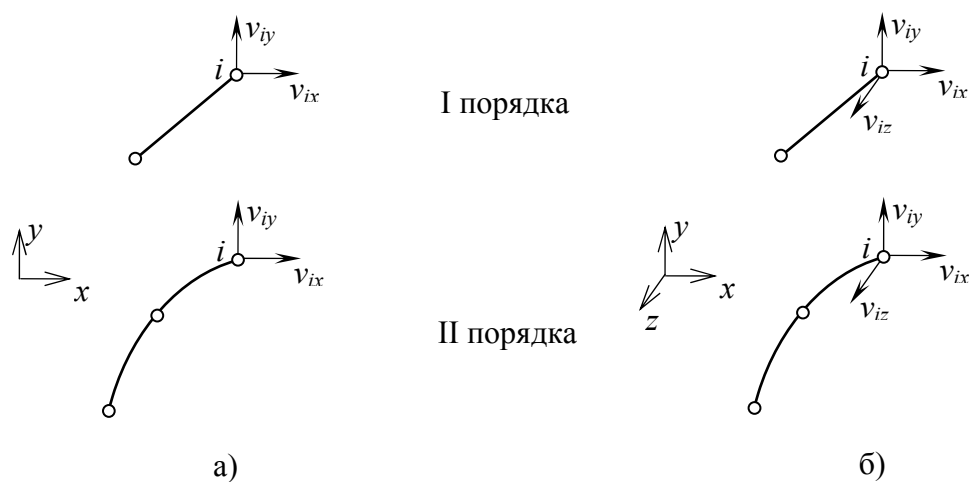


Рисунок 4 – Двухмерные (а) и трехмерные (б) одноосные элементы

В отличие от предыдущего случая в узлах балочных элементов имеются как поступательные, так и угловые перемещения (рисунок 5). Они применяются для моделирования различных стержневых систем (например, балок и рам), а также мощных подкрепляющих ребер жесткости (например, лонжеронов, шпангоутов и т.п.).

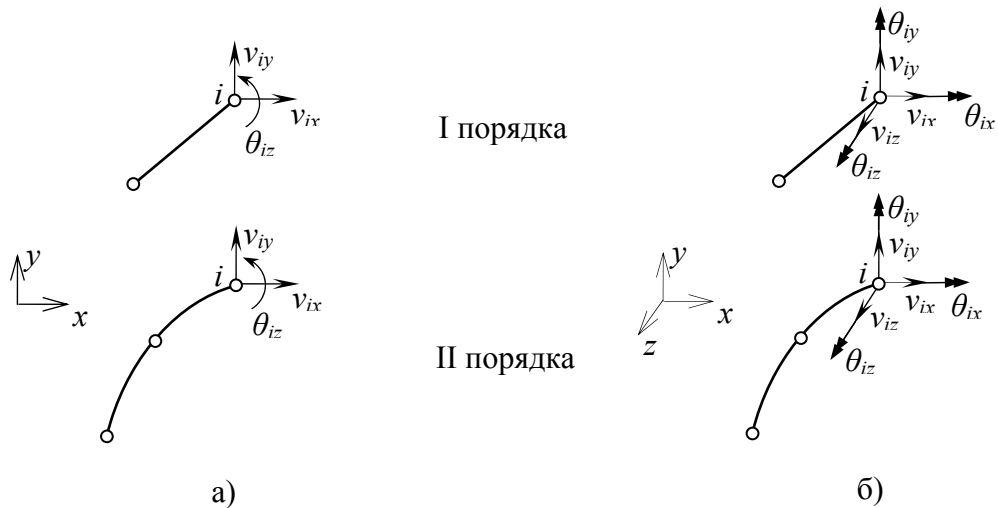


Рисунок 5 – Двухмерные (а) и трехмерные (б) балочные элементы

2.2 Поверхностные элементы

Поверхностные элементы могут иметь как треугольную, так и четырехугольную форму. В элементах первого порядка узлы располагаются в вершинах, а в элементах второго порядка вводятся еще дополнительные узлы на сторонах, причем последние могут иметь криволинейную форму.

Следует отметить, что двухмерные поверхностные элементы, называемые плоскими, используются при решении плоской задачи теории упругости, а также для моделирования осесимметричных тел. В их узлах определены лишь поступательные перемещения в направлении двух координатных осей (рисунок 6).

Трехмерные поверхностные элементы называются оболочечными. Они применяются для моделирования как оболочек, так и пластин. В их узлах помимо смещений в направлении трех координатных осей задаются также углы поворота нормали относительно этих осей (рисунок 7).

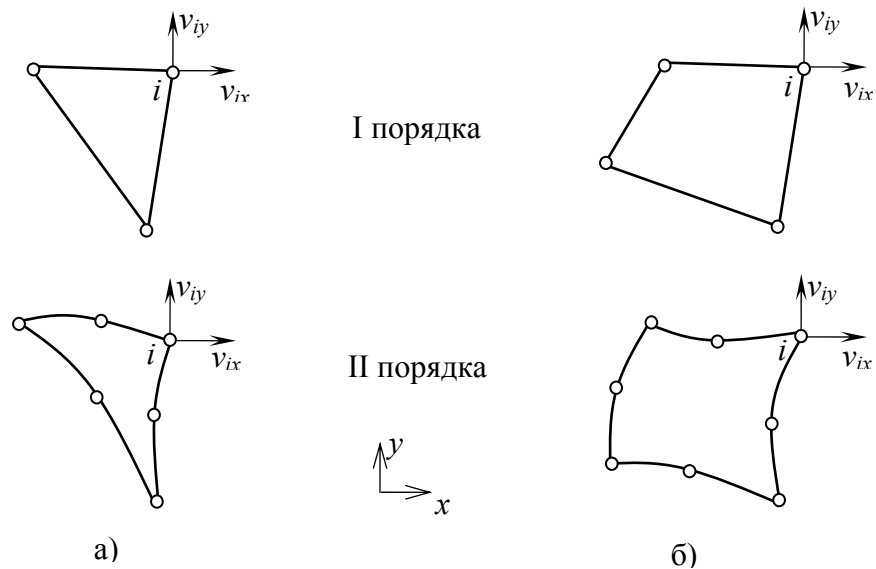


Рисунок 6 – Треугольные (а) и четырехугольные (б) плоские элементы

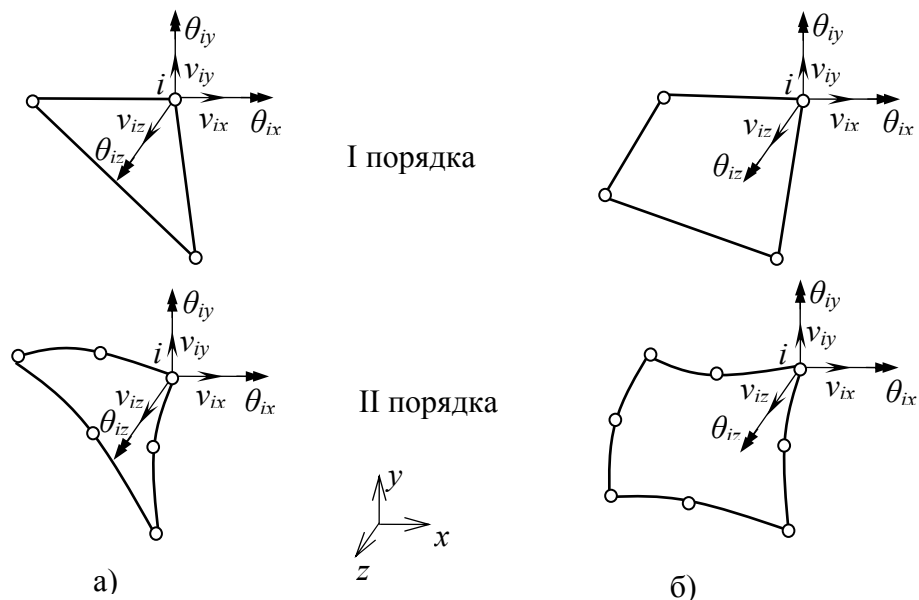


Рисунок 7 – Треугольные (а) и четырехугольные (б) оболочечные элементы

2.3 Объемные элементы

Объемные элементы применяются для моделирования трехмерных деталей, узлов и элементов конструкций. Наибольшее распространение получили шестигранные элементы (в форме гексаэдра) и четырехгранные (в форме тетраэдра). При этом элементы первого порядка имеют прямолинейные стороны и узлы в вершинах, а элементы второго порядка, содержащие дополнительные узлы на сторонах, могут иметь криволинейную форму. В узлах

объемных элементов задаются только поступательные перемещения (рисунок 8).

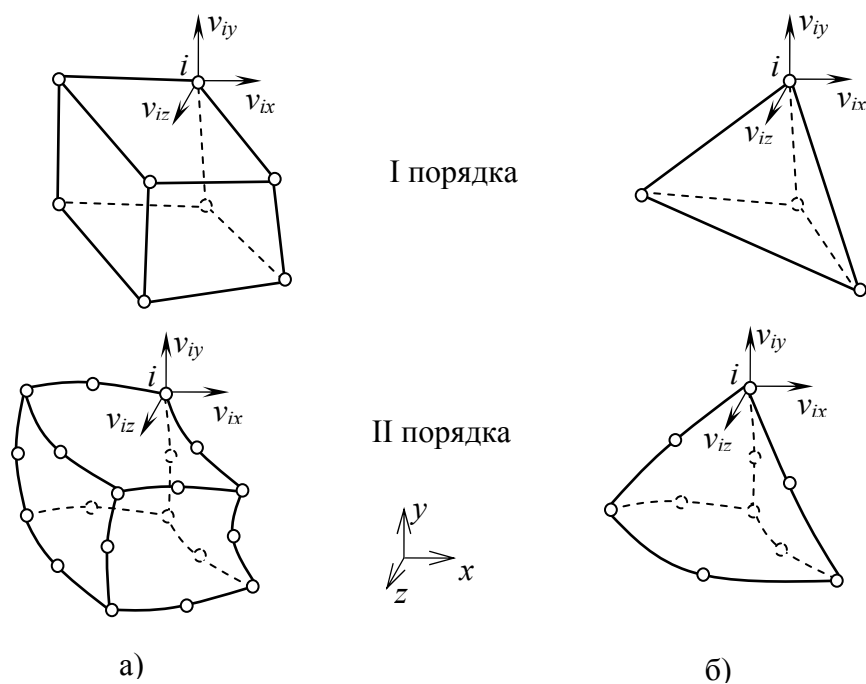


Рисунок 8 – Шестигранные (а) и четырехгранные (б) объемные элементы

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 20

«Определение параметров механики разрушения при растяжении пластины с трещинами»

Исходные данные: достаточно толстая прямоугольная пластина 200x400 мм с центральным отверстием диаметром 40 мм растягивается напряжением 30 МПа (рисунок 1). Из отверстия симметричным образом исходят две радиальные трещины в направлении, перпендикулярном действию растягивающей нагрузки; расстояние между вершинами трещин 80 мм. Материал пластины – сталь 45 (модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; вязкость разрушения $K_{Ic} = 17 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} = 537,6 \text{ Н/мм}^{3/2}$).

Допущение: предполагается, что имеет место плоская деформация.

Цель: исследовать напряженно-деформированное состояние пластины; вычислить коэффициент интенсивности напряжений и J -интеграл.

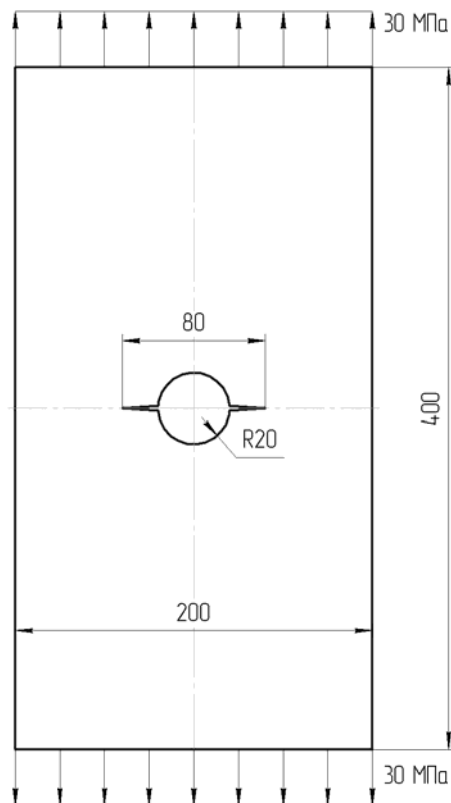


Рисунок 1 – Пластина с двумя трещинами

Наличие двойной симметрии в этой задаче позволяет ограничиться рассмотрением лишь одной четверти пластины, закрепив ее подходящим образом в узлах, расположенных на осях симметрии. Начало системы координат поместим в центр отверстия и будем исследовать часть пластины, лежащую в первом квадранте (рисунок 2).

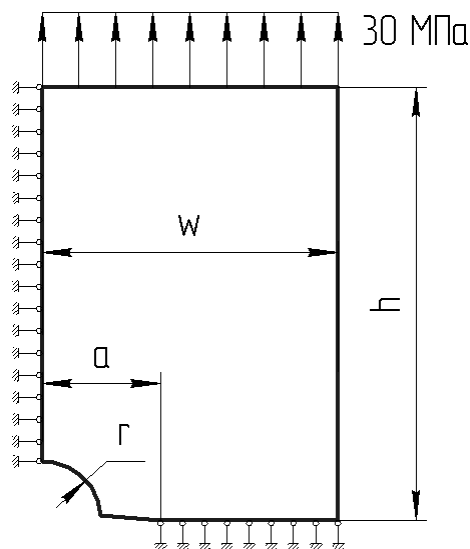


Рисунок 2 – Расчетная схема

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab20.
2. Установить тип используемых в расчете конечных элементов – 8-узловой плоский элемент PLANE183 с формулировкой «плоская деформация»:
M_M>Preprocessor>Element Type>Add/ Edit/Delete.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Quad 8node 183, OK.*

В окне «Element types» нажимаем *Options* и для опции K3 устанавливаем значение *Plane Strain.*

Далее *OK* и *Close.*

3. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models.*

В правом окне последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic.*

Вводим:

EX: 2e5 (модуль упругости, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

Закрываем панель.

4. Для удобства ввода исходных данных определить скалярные параметры:
U_M>Parameters>Scalar Parameters.
 В поле «Selection» последовательно вводим: $r = 20$; $w = 100$; $h = 200$; $a = 40$. После каждого ввода здесь необходимо нажать кнопку *Accept* (принять). Закрываем панель кнопкой *Close*.
5. Построить геометрическую модель четверти пластины.
 Как видно из рисунка 2, геометрическая модель рассматриваемой части пластины может быть получена путем вычитания из прямоугольника $w \times h$ круга радиусом r , центр которого совпадает с левым нижним углом прямоугольника.
 - 5.1. Построить прямоугольник: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners.*
 Вводим следующие параметры: координаты левого нижнего угла $WP X = WP Y = 0$; ширина $Width = w$; высота $Height = h$. Нажимаем *OK*.
 - 5.2. Построить круг: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Solid Circle.*
 Вводим: координаты центра круга $WP X = WP Y = 0$; радиус $Radius = r$. *OK*.
 Включаем нумерацию геометрических объектов: *U_M>PlotCtrls>Numbering*; отмечаем флаги «KP numbers», «Area numbers» и «Line numbers».
 - 5.3. Выполнить булеву операцию вычитания круга из прямоугольника: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Boolean>Subtract>Areas.*
 На первый запрос указываем поверхность A1 (прямоугольник), *OK*.
 На второй запрос указываем поверхность A2 (круг), *OK*.
6. Для генерации более мелкой сетки вокруг вершины трещины создать область в виде половины круга радиусом $a/4$ с центром в вершине трещины.
 - 6.1. Построить полукруг: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Partial Annulus.*
 Вводим следующие параметры: координаты центра полукруга $WP X = a$ и $WP Y = 0$; внешний радиус $Rad-1 = a/4$; начальный угол сектора $Theta-1 = 0$; внутренний радиус $Rad-2 = 0$; конечный угол сектора $Theta-2 = 180$. Нажимаем *OK*.
 - 6.2. Выполнить операцию перекрытия поверхностей: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Boolean>Overlap>Areas.*

Кнопкой *Pick All* указываем все поверхности.

7. Для построения регулярной сетки вдали от отверстия и трещины разрезать основную поверхность на две части.

7.1. Сместить рабочую плоскость на 30 мм вдоль оси *WY* и повернуть ее на 90° вокруг оси *WX*: *U_M > WorkPlane > Offset WP by Increments*.

В соответствующие поля вводим:

«X,Y,Z offsets»: 0,30,0 (смещения, мм)

«XY,YZ,ZX Angles»: 0,90,0 (углы поворота, град)

OK.

7.2. Разрезать поверхность рабочей плоскостью: *M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Area by WrkPlane*.

Нажимаем *Pick All*.

Получаемые при этом поверхности показаны на рисунке 3.

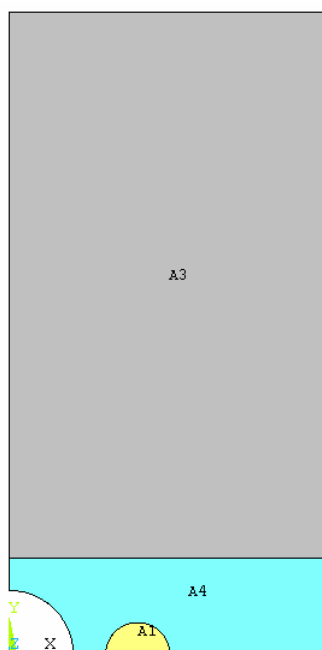


Рисунок 3 – Поверхности с нумерацией

8. В вершине трещины назначить точку концентрации напряжений: *M_M > Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > Concentrat KPs > Create*.

Указываем вершину трещины (т.е. точку 8), *OK*.

В соответствующие поля вводим:

«Keypoint for concentration»: 8 (номер точки концентрации)

«Radius of 1st row of elems»: $a/40$ (радиус первого ряда элементов)

«Radius ratio (2nd row/1st)»: 1 (отношение толщины 2-го ряда элементов к радиусу 1-го)

«No of elems around circumf»: 8 (количество элементов в окружном направлении)

«midside node position»: Skewed 1/4pt (смещение средних узлов на четверть длины стороны элемента к точке концентрации для создания сингулярности)

OK.

9. Разбить поверхности на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool.*

В разделе «Size Controls» нажимаем кнопку *Set* строки «Areas».

Указываем верхнюю прямоугольную поверхность A3, *OK.* В поле «Element edge length» (размер длины стороны элемента) вводим значение 8 (в мм), *Apply.*

Указываем поверхность сложной формы A4, *OK.* В поле «Element edge length» вводим значение 6 (в мм), *Apply.*

И, наконец, указываем полукруглую поверхность A1, *OK.* В поле «Element edge length» вводим значение 4 (в мм), *OK.*

Далее устанавливаем режим *Mapped* (регулярная сетка).

Нажимаем кнопку *Mesh* и указываем прямоугольник A3. *OK.*

Отображаем на экране все объекты: *U_M>Plot>Multi-Plots.*

Затем установим режим *Free* (свободная сетка).

Опять нажимаем кнопку *Mesh* и указываем две другие поверхности (т.е. A1 и A4), *OK.*

Предупреждение о том, что в модели присутствуют элементы со смещенными промежуточными узлами, следует проигнорировать.

Получаемая при этом разбивка показана на рисунке 4.

Для удобства выполнения следующей операции отображаем на экране линии: *U_M>Plot>Lines.*

10. Задать граничные условия симметрии: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines.*

Сначала указываем лежащие на вертикальной оси симметрии линии L11 и L14, *OK.* В списке «DOFs to be constrained» выбираем *UX*, *Apply.*

Затем указываем лежащие на горизонтальной оси симметрии линии L6 и L7 (линии L4 и L8, представляющие поверхность трещины, здесь указывать не следует), *OK.* В списке «DOFs to be constrained» выбираем *UY*, *OK.*

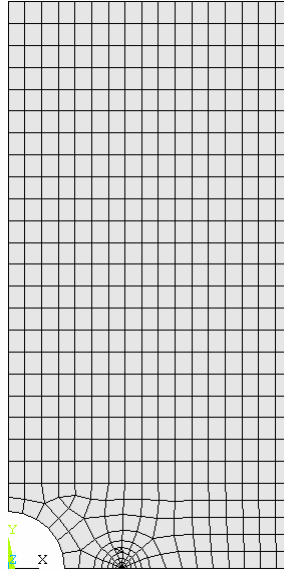


Рисунок 4 – Конечно-элементная модель с точкой концентрации напряжений

11. Приложить нагрузку: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Lines.*

Указываем линию L3 (верхнюю короткую сторону), ОК. В поле «Value Load PRES value» для задания растягивающей нагрузки вводим отрицательное значение -30 (в МПа), ОК.

12. Записать в компонент CRACK узел в вершине трещины.

Сначала соответствующий узел помещаем в активный набор: *U_M>Select>Entities.*

В диалоговой панели «Select Entities» вводим:

Тип объектов: *Nodes* (узлы)

Критерий выбора: *By Num/Pick* (путем указания на экране)

Функция выбора: *From Full* (из полной системы)

ОК.

Указываем узел в вершине трещины (совпадает с точкой 8), ОК.

Далее для создания компонента CRACK используем команду *U_M>Select>Comp/Assembly>Create Component.*

В поле «Component name» (имя компонента) вводим метку CRACK, а в списке «Component is made of» (компонент создается из) выбираем строку Nodes (узлы). ОК.

13. Инициализировать вычисление *J*-интеграла.

Для этого в строке ввода команд, не выходя из модуля Solution, с помощью клавиатуры необходимо ввести следующие команды (каждая строка завершается нажатием клавиши *Enter*):

CINT,NEW,1	! Определение уникального номера трещины = 1
CINT,CTNC,CRACK	! Указание узла вершины трещины
CINT,NCON,10	! Задание числа контуров интегрирования
CINT,SYMM,ON	! Включение условия симметрии для трещины
CINT,NORM,0,2	! Определение нормали к плоскости трещины

Последняя команда указывает, что плоскость трещины перпендикулярна оси *Y* (ось 2) глобальной декартовой системы координат (с номером 0).

14. Вернуть все объекты модели в активный набор: *U_M>Select>Everything*.

15. Запустить задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

Сообщение о том, что в модели присутствуют элементы со смещенными промежуточными узлами, закрываем кнопкой *Yes*.

16. Отобразить на экране дисплея поле напряжений по Мизесу: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu*.

Из списка доступных результатов выбираем *Nodal Solution>Stress>von Mises stress* (напряжение по Мизесу), *OK*.

Для отображения результатов на полной модели воспользуемся командой *U_M>PlotCtrls>Style>Symmetry Expansion>Periodic/Cyclic Symmetry*.

Указываем опцию «1/4 Dihedral Sym», *OK*.

Для возвращения к отображению расчетной модели следует выполнить предыдущую команду и выбрать опцию «No Expansion».

17. Вывести на экран список значений *J*-интеграла для всех заданных контуров интегрирования.

Не выходя из модуля General Postprocessor, в строке ввода команд с помощью клавиатуры набираем:

PRCINT,1 ! 1 – идентификационный номер трещины

После нажатия клавиши *Enter* на экране дисплея в отдельном текстовом окне появится список рассчитанных значений *J*-интеграла по всем 10 контурам (размерность Н/мм = кДж/м²):

***** POST1 J-INTEGRAL RESULT LISTING *****

```
CrackID = 1
Crack Front Node = 1219
```

Contour Values =	-0.65248	-0.72146	-0.72163	-0.72177
Contour Values =	-0.72183	-0.72177	-0.72173	-0.72171
Contour Values =	-0.72515	-0.73087		

Следует отметить, что знак J -интеграла в программе ANSYS зависит от направления обхода контура. Его можно проигнорировать, взяв значения по абсолютной величине.

Значение J -интеграла по первому контуру, охватывающему первый ряд примыкающих к вершине трещины элементов, получается менее точным. Девятый и десятый контуры при используемой сетке элементов достигают внешней границы, что вносит определенную погрешность. Данные по этим контурам следует исключить из рассмотрения. Оставшиеся значения демонстрируют хорошую инвариантность, т.е. независимость от выбора контура интегрирования.

Таким образом, в качестве среднего значения J -интеграла можно принять 0,7217 Н/мм.

18. Вычислить коэффициент интенсивности напряжений K_I .

Сначала увеличим область вершины трещины так, чтобы хорошо были видны кольцевые ряды элементов вокруг вершины (первый ряд элементов должен занимать не менее половины изображения на экране). После этого следует изменить режим отображения: *U_M>Plot>Nodes*.

18.1. Определить локальную систему координат в вершине трещины по трем узлам: *U_M>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>By 3 Nodes*.

В качестве узлов, определяющих соответственно начало, ось X и плоскость XY локальной системы координат, указываем сначала узел в вершине трещины, затем справа и сверху от нее, как показано на рисунке 5. *OK*.

Ничего не меняя, закрываем диалоговую панель кнопкой *OK*. При этом будет создана локальная система координат с номером 11.

Она должна быть также системой координат результатов, для чего следует в строке ввода команд набрать текст *RSYS,11* и нажать клавишу *ENTER*.

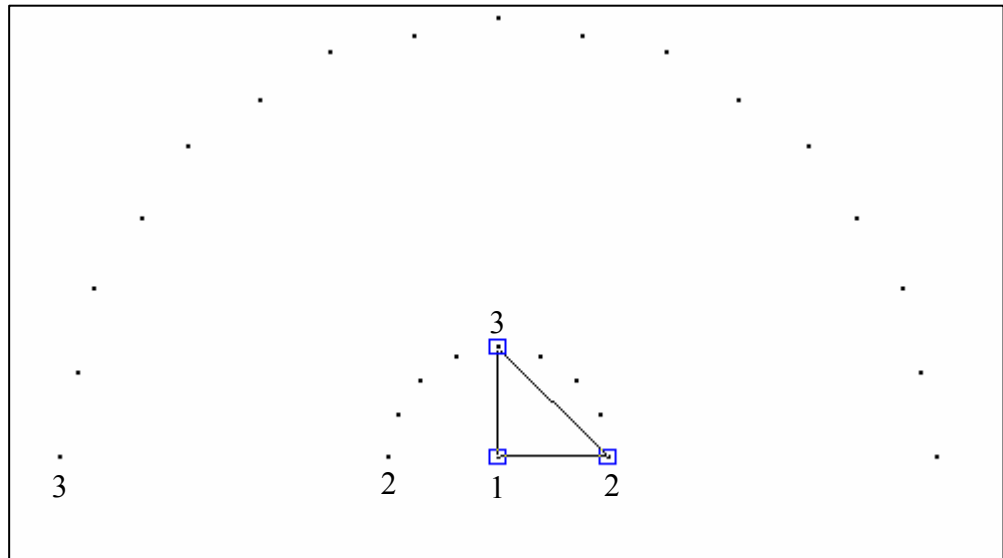


Рисунок 5 – К определению системы координат трещины и траектории вдоль поверхности трещины

18.2. Задать траекторию вдоль поверхности трещины по трем узлам: *M_M>General Postproc>Path Operations>Define Path>by Nodes*.

Указываем узел в вершине трещины, а затем слева от нее – еще два узла в направлении берега трещины (причем сначала указывается узел более близкий к вершине), как показано на рисунке 5. *OK*.

Для траектории задаем имя, например *Face*, остальные параметры оставляем без изменения. Завершаем создание траектории кнопкой *OK* и закрываем окно сводной информации о существующих траекториях.

18.3. Вывести на экран значения коэффициентов интенсивности напряжений: *M_M>General Postproc>Nodal Calcs>Stress Int Factr*.

В списке «*Disp extrapolat based on*» (модель аппроксимации перемещений) выбираем значение *Plane Strain* (плоская деформация); в поле «*Model type*» (тип модели трещины) указываем *Half – symm b.c.* (модель половины трещины с граничными условиями симметрии). *OK*.

При этом появляется текстовое окно, где содержится сводная информация по трещине, а в нижней строке представлены значения коэффициентов интенсивности напряжений K_I , K_{II} и K_{III} (размерность Н/мм^{3/2}):

```
**** KI = 399.09, KII = 0.0000, KIII = 0.0000 ****
```

Сравним данный результат со значением, вычисленным через J -интеграл:

$$K_I = \sqrt{\frac{E}{1-\mu^2}} J = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5}{1-0,3^2}} \cdot 0,7217 = 398,3 \text{ Н/мм}^{3/2}.$$

Наблюдается хорошее совпадение двух решений.

Поскольку рассчитанное значение K_I меньше вязкости разрушения $K_{Ic} = 537,6 \text{ Н/мм}^{3/2}$, рассматриваемая трещина при заданной статической нагрузке не приведет к разрушению пластины.

19. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя Lab20.lgw.

20. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 19

«Исследование прочности композитной пластины»

Исходные данные: композитная пластина, геометрия которой показана на рисунке 1, находится под действием растягивающей нагрузки интенсивностью $q = 100 \text{ Н/мм}$. Пластина представляет собой 4-слойный пакет, составленный из слоев углепластика (каждый толщиной 0,3 мм) с углами армирования $[45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ]$. Свойства углепластика: $E_1 = 16 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; $E_2 = 8 \cdot 10^3 \text{ МПа}$; $G_{12} = 4,8 \cdot 10^3 \text{ МПа}$; $\mu_{12} = 0,25$; $\sigma_{1B}^+ = 1100 \text{ МПа}$; $\sigma_{1B}^- = -450 \text{ МПа}$; $\sigma_{2B}^+ = 33 \text{ МПа}$; $\sigma_{2B}^- = -80 \text{ МПа}$; $\sigma_{12B} = 27 \text{ МПа}$.

Допущение: игнорируется кромочный эффект, связанный с существенным увеличением межслоевых напряжений вблизи свободных от нагрузки кромок.

Цель: оценить прочность композитной пластины с помощью различных критериев разрушения; определить критическую (разрушающую) нагрузку.

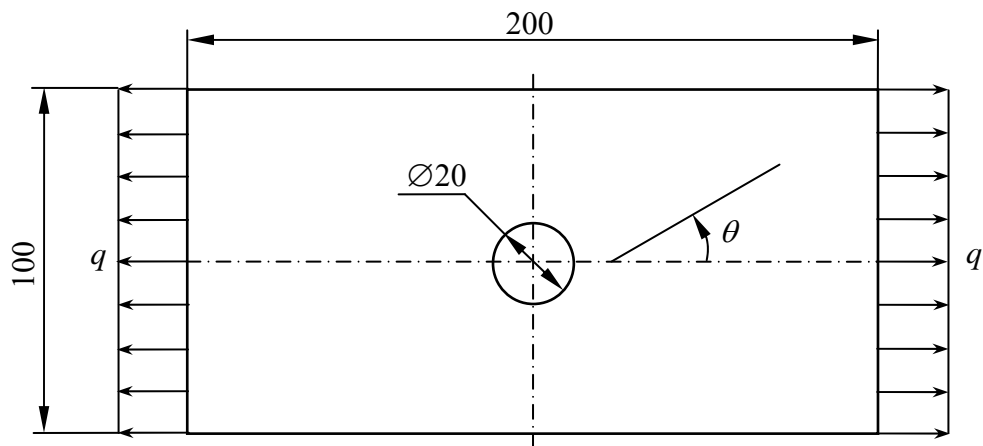


Рисунок 1 – Геометрия пластины

Данная конструкция и нагрузка симметричны относительно двух осей, однако структура пакета слоев несимметрична относительно срединной плоскости. Поэтому пластину здесь следует моделировать полностью. Начало системы координат поместим в центр отверстия, причем ось X направим вправо, а ось Y – вверх.

Следует отметить, что при расчете композитов часто возникает проблема, связанная с нехваткой исходных данных. Так, например, в нашем случае для углепластика известны лишь характеристики в плоскости слоя. Для вычисления недостающих данных можно предложить следующий прием. При равномерном распределении волокон в однонаправленном материале, показанном на рисунке 2, его можно считать трансверсально изотропным с плоскостью изотропии (2, 3). При этом в плоскости изотропии $E_3 = E_2$ и $G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \mu_{23})}$. Если принять $\mu_{23} = 0,3$, то получим $G_{23} = 3,08 \cdot 10^3$ МПа. Кроме того, в плоскостях (1, 2) и (1, 3), перпендикулярных плоскости изотропии, упругие свойства должны быть одинаковыми: $G_{13} = G_{12}$ и $\mu_{13} = \mu_{12}$.

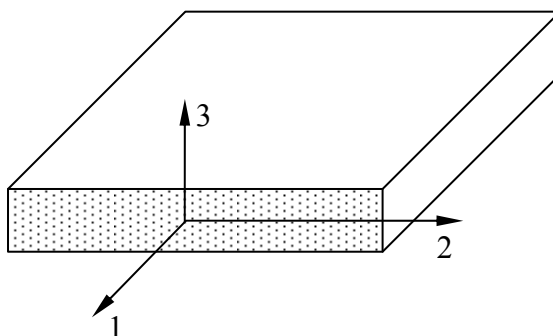


Рисунок 2 – Трансверсально изотропный материал

Неопределенными для нас остались лишь пределы прочности $\sigma_{3в}^+$, $\sigma_{3в}^-$, $\sigma_{23в}$ и $\sigma_{13в}$, характеризующие в основном расслоение композита. В нашем случае, поскольку кромочный эффект игнорируется, эти величины можно задать произвольно большими.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab19.
2. Установить тип используемых в расчете конечных элементов – 4-узловой оболочечный элемент SHELL181: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Shell>Elastic 4node 181, OK*.

В окне «Element types» нажимаем *Options* и для опции «Storage of layer data K8» (хранение выходных данных в слоях) устанавливаем значение *All layers* (все слои).

Следует отметить, что по умолчанию в файл результатов записываются только данные для нижней поверхности первого (нижнего) слоя, для верхней поверхности последнего (верхнего) слоя и для слоя с максимальным значением критерия разрушения.

Далее *OK* и *Close*.

3. Задать свойства углепластика: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

Поскольку однонаправленный материал является ортотропным, в правом окне последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Orthotropic*.

При этом появляется диалоговая панель, где кнопка *Choose Poisson's Ratio* (выбор коэффициента Пуассона) позволяет установить, будет ли использоваться большее (*Major_Pr*) или меньшее (*Minor_Nu*) значение коэффициента Пуассона в каждой плоскости. По умолчанию используется большее значение. Поэтому, например, в поле *PRXY* следует вводить значение коэффициента μ_{12} , а не μ_{21} .

В соответствующие поля вводим:

EX: 16e4 (модуль упругости вдоль оси *x* материала, МПа)

EY: 8e3 (модуль упругости вдоль оси *y* материала, МПа)

EZ: 8e3 (модуль упругости вдоль оси *z* материала, МПа)

PRXY: 0.25 (наибольший коэффициент Пуассона в плоскости *xy*)

PRYZ: 0.3 (наибольший коэффициент Пуассона в плоскости *yz*)

PRXZ: 0.25 (наибольший коэффициент Пуассона в плоскости *xz*)

GXY: 4.8e3 (модуль сдвига в плоскости *xy*, МПа)

GYZ: 3.08e3 (модуль сдвига в плоскости *yz*, МПа)

GXZ: 4.8e3 (модуль сдвига в плоскости *xz*, МПа)

OK.

Закрываем панель.

4. Ввести информацию по критериям разрушения: *M_M>Preprocessor>Material Props>Failure Criteria>Add/Edit*.

При этом появляется окно, где можно выбрать номер материала, для которого будут вводиться данные по разрушению. Закрываем его кнопкой *OK*.

В новой диалоговой панели в строке «*Stress in Tension*» вводим значения разрушающих напряжений для углепластика при растяжении, в строке «*Stress in Compression*» – при сжатии и в строке «*Stress in Shear*» – при сдвиге, как показано на рисунке 3. В конце нажимаем *OK*.

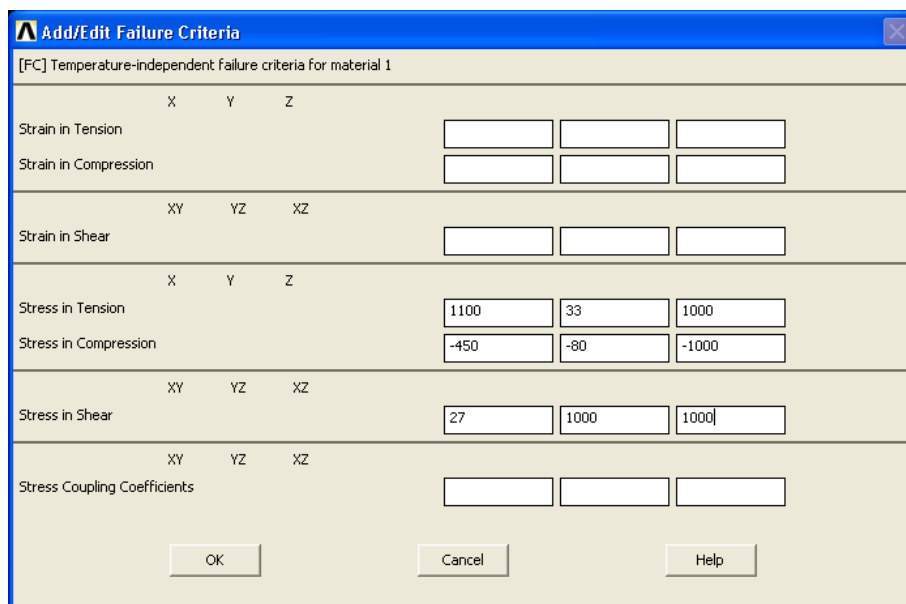


Рисунок 3 – Ввод разрушающих напряжений

5. Задать структуру пакета слоев: *M_M>Preprocessor>Sections>Shell>Lay-up>Add/Edit.*

В поле «Name» указываем имя Sect и заполняем строки таблицы снизу вверх:

	Thickness	Material ID	Orientation	Integration Pts
4	0.3	1	-45	3
3	0.3	1	90	3
2	0.3	1	0	3
1	0.3	1	45	3

Для добавления новой строки здесь следует нажать кнопку *Add Layers.*
OK.

6. Построить геометрическую модель пластины.

Как видно из рисунка 1, геометрическая модель рассматриваемой пластины может быть получена путем вычитания из прямоугольника 200x100 мм круга радиусом 10 мм, центр которого совпадает с центром прямоугольника.

6.1. Построить прямоугольник: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners.*

Вводим следующие параметры: координаты левого нижнего угла WP X = -100 и WP Y = -50; ширина Width = 200; высота Height = 100. Нажимаем *OK.*

- 6.2. Построить круг: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Solid Circle*.
- Вводим: координаты центра круга $WP X = WP Y = 0$; радиус $Radius = 10$. *OK*.
- 6.3. Выполнить булеву операцию вычитания круга из прямоугольника: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Boolean>Subtract>Areas*.
- На первый запрос указываем поверхность A1 (прямоугольник). Поскольку центры тяжести прямоугольника и круга совпадают, здесь появится панель «Multiple_Entities» (совпадающие объекты). Закрываем ее кнопкой *OK*. Нажимаем *OK* в панели указания.
- На второй запрос указываем поверхность A2 (круг). В панели «Multiple_Entities» нажимаем *Prev* или *Next* для выбора круга, *OK*. Нажимаем *OK* в панели указания.
7. Задать локальную систему координат (которая в дальнейшем будет определять систему координат слоистых элементов): *U_M>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>At WP Origin*.
- Ничего не меняя, закрываем диалоговую панель кнопкой *OK*. При этом будет создана новая локальная система координат с номером 11, полностью совпадающая с глобальной декартовой системой координат.
8. Задать атрибуты элементов: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.
- В диалоговой панели «Mesh Tool» в верхнем списке «Element Attributes» выбираем *Global* и нажимаем распложенную правее кнопку *Set*.
- Далее появляется новая панель, где указаны атрибуты элементов по умолчанию. Меняем здесь только номер системы координат элементов:
- «Element type number»: 1 SHELL181 (номер типа элементов)
 - «Element coordinate sys»: 11 (номер системы координат элементов)
 - «Section number»: 1 Sect (номер сечения)
- OK*.
9. Разбить поверхность на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.
- В разделе «Size Controls» нажимаем кнопку *Set* строки «Global» и в поле «Element edge length» (размер длины стороны элемента) вводим значение 5 (в мм), *OK*.
- Для сгущения сетки в области концентрации напряжений с помощью кнопки *Set* строки «Lines» дополнительно установим меньший размер элементов на контуре отверстия. При этом на данном контуре указываем че-

тыре линии, нажимаем *OK* и в поле «Element edge length» вводим значение 1 (в мм), *OK*.

Используем режим построения свободной сетки *Free*.

Для генерации сетки нажимаем кнопку *Mesh* и указываем все поверхности (*Pick All*).

Для проверки отобразим системы координат элементов: *U_M > PlotCtrls > Symbols*; включаем флаг «Element coordinate sys». *OK*.

При этом ось x_e будет изображаться белым цветом, ось y_e – зеленым, а z_e – синим.

Оси x_e систем координат всех элементов должны быть направлены вправо, а y_e – вверх. Угол ориентации каждого слоя отсчитывается от оси x_e (причем положительный в направлении оси y_e). Ось z_e определяет направление укладки слоев.

После этого опцию отображения систем координат элементов следует отключить.

10. Задать граничные условия.

В рассматриваемой задаче пластина не закреплена, т.е. является свободной. Для устранения возможности перемещения как жесткого целого ее нужно закрепить минимально необходимым числом правильно ориентированных связей. Так, для трехмерного случая следует наложить шесть связей, направления которых не должны пересекаться на одной линии.

Для этого воспользуемся командой задания перемещений в точках: *M_M > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Keypoints*.

Указываем нижний левый угол пластины, *OK*. В списке «DOFs to be constrained» выделяем три компоненты *UX*, *UY* и *UZ*, *Apply*.

Далее указываем верхний левый угол пластины, *OK*. В списке «DOFs to be constrained» выделяем две компоненты *UX* и *UZ*, *Apply*.

И, наконец, указываем нижний правый угол пластины, *OK*. В списке «DOFs to be constrained» выделяем лишь одну компоненту *UZ*, *OK*.

11. Приложить нагрузку.

В рассматриваемой задаче нагружение пластины осуществляется погонными силами интенсивностью 100 Н/мм, распределенными по коротким сторонам (см. рисунок 1).

Следует отметить, что в программе ANSYS давление, приложенное к сторонам оболочечных элементов, будет являться фактически погонной нагрузкой.

Воспользуемся командой задания давления на линиях: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Lines*.

На запрос указываем две короткие стороны пластины (т.е. линии L2 и L 4) и нажимаем *OK*. В поле «Load PRES value» вводим значение -100 (в Н/мм; знак минус требуется для задания растягивающей нагрузки). *OK*.

12. Запустить задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

13. Отобразить поле перемещений: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu*.

Из списка доступных результатов выбираем *Nodal Solution>DOF Solution>Z-Component of displacement* (перемещение по оси Z), *OK*.

Вращая изображение модели, можно заметить, что происходит сильный изгиб и закручивание пластины. Это обусловлено несимметричностью укладки слоев относительно срединной плоскости.

14. Оценить прочность композитной пластины.

Прежде всего, выбираем слой и указываем его поверхность, для которой будут отображаться результаты расчета: *M_M>General Postproc>Options for Outp*.

В поле «Specified layer number» вводим номер слоя (в нашем случае от 1 до 4) и в списке «Shell results are from» выбираем верхнюю (Top layer) или нижнюю (Bottom layer) поверхность слоя. *OK*.

Далее воспользуемся обычной командой изображения узлового решения: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu*.

Из списка доступных результатов выбираем один из феноменологических критериев разрушения: *Nodal Solution>Failure Criteria>Maximum Stress* (критерий максимальных напряжений), Tsai-Wu Strength Index (показатель прочности по критерию Цая-Бу) или Inverse of Tsai-Wu Strength Ratio Index (инверсия коэффициента запаса прочности по критерию Цая-Бу). *OK*.

Анализируя результаты, можно обнаружить, что наибольшие значения критериев разрушения достигаются на верхней поверхности (TOP) последнего четвертого слоя (LAYR = 4), как показано на рисунке 4.

Отметим, что максимальное значение критерия максимальных напряжений $\xi_2^{\max} = 2,272$, максимальное значение показателя прочности по крите-

рию Цая-Ву $\xi_{3a}^{\max} = 5,307$ и максимальное значение инверсии коэффициента запаса прочности по критерию Цая-Ву $\xi_{3b}^{\max} = 2,582$. Поскольку по обоим критериям они больше единицы, при заданной нагрузке $q = 100 \text{ Н/мм}$ произойдет разрушение рассматриваемой композитной пластины.

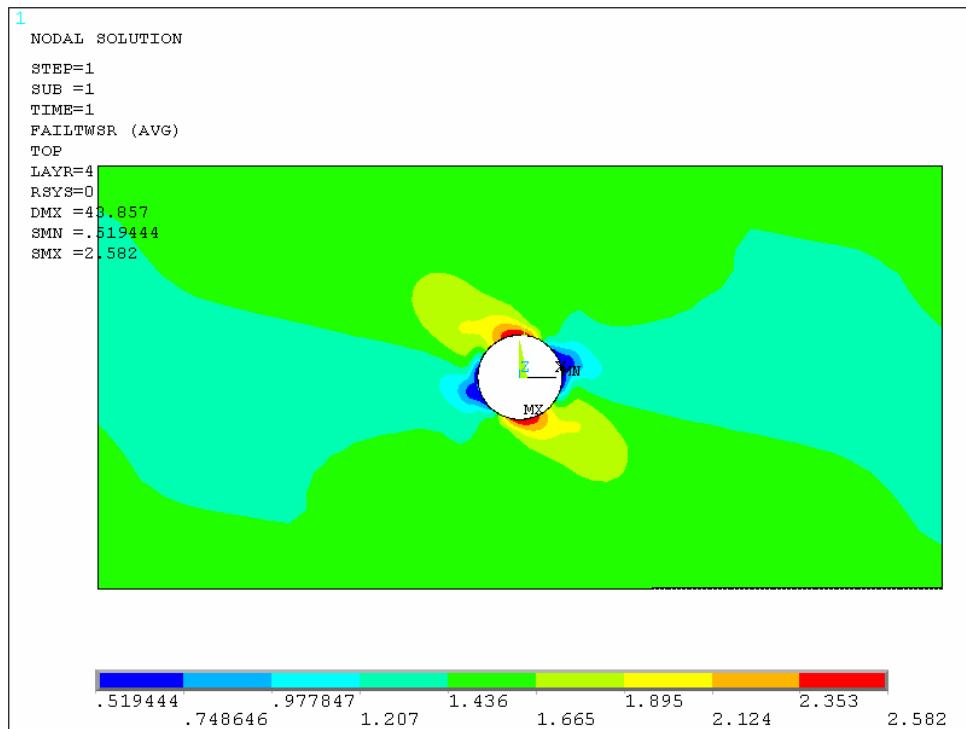


Рисунок 4 – Поле значений инверсии коэффициента запаса прочности по критерию Цая-Ву на верхней поверхности четвертого слоя

Определим критическую нагрузку.

Очевидно, что по критерию максимальных напряжений она будет равна

$$q_{\text{кр}} = \frac{q}{\xi_2^{\max}} = \frac{100}{2,272} = 44,01 \text{ Н/мм.}$$

Однако данный критерий не учитывает взаимное влияние напряжений на прочность композитной конструкции.

Рассмотрим критерий Цая-Ву.

При расчете величины ξ_{3a} используется стандартная запись данного критерия. Поскольку он является квадратичным, по значению ξ_{3a}^{\max} сложно судить о близости нагрузки к критической. Здесь можно говорить лишь о том, произойдет разрушение или нет.

При вычислении же ξ_{3b} применяется модифицированная запись критерия Цая-Ву. При этом величина, обратная ξ_{3b}^{\max} , будет по сути дела коэффициентом запаса прочности.

Таким образом, по критерию Цая-Ву критическая нагрузка оказывается равной

$$q_{\text{кр}} = \frac{q}{\xi_{3b}^{\max}} = \frac{100}{2,582} = 38,73 \text{ Н/мм.}$$

Если к рассматриваемой пластине приложить такую нагрузку, то максимальные значения ξ_{3a}^{\max} и ξ_{3b}^{\max} будут, очевидно, равны единице.

15. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя Lab19.lgw.

16. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

Замечание: В рассматриваемой задаче наблюдается сильный изгиб пластины, причем прогибы значительно превышают толщину многослойного пакета. Поэтому для уточнения решения здесь следует выполнить геометрически нелинейный анализ, т.е. учесть изменение конфигурации тела из-за больших перемещений (Large Displacement). Однако в этом случае критическую нагрузку можно будет найти лишь с использованием метода последовательных приближений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 18

«Расчет болтового соединения с предварительной затяжкой»

Исходные данные: две круглые пластины диаметром 67 мм разной толщины (15 мм и 9 мм) скреплены болтом М6, поставленным с зазором 0,5 мм. Сила предварительной затяжки болта составляет 861 Н. Предполагается, что нижняя пластина жестко закреплена по внешнему контуру, а на верхнюю пластину действует распределенная по окружности нагрузка интенсивностью $q = 15 \text{ Н/мм}$, как показано на рисунке 1. Пластины изготовлены из алюминиевого сплава (модуль упругости $7 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона 0,3), а болт и гайка – из стали (модуль упругости $2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона 0,3).

Допущение: головка болта и гайка имеют цилиндрическую форму без граней под ключ, что позволяет ограничиться решением осесимметричной задачи.

Цель: исследовать напряженно-деформированное состояние болтового соединения; проверить раскрытие стыка соединяемых деталей под нагрузкой.

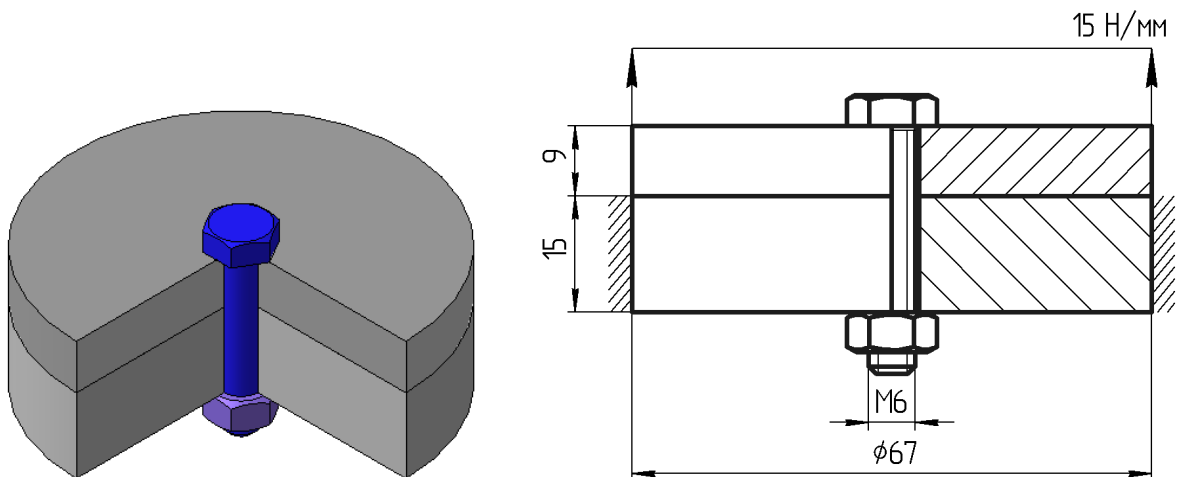


Рисунок 1 – Болтовое соединение пластин

В осесимметричной постановке болтовое соединение будем представлять его сечением, параметрические размеры которого показаны на рисун-

ке 2. Начало системы координат поместим в центр нижней поверхности гайки, причем ось X направим вправо, а ось Y – вверх по оси симметрии.

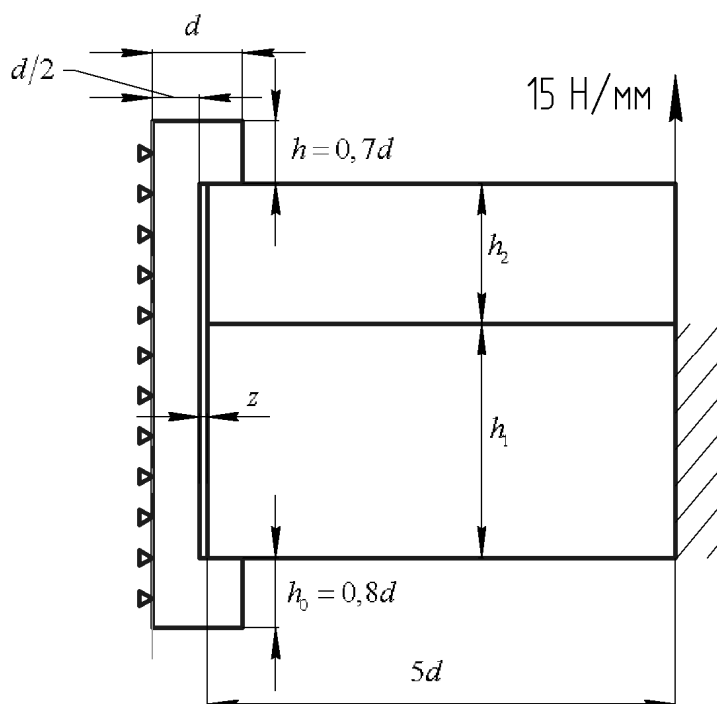


Рисунок 2 – Расчетная схема

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab18.
2. Установить тип используемых в расчете конечных элементов – 4-узловой плоский элемент PLANE182 с формулировкой «осесимметричное поведение»: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete.*

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Quad 4node 182, OK.*

В окне «Element types» нажимаем *Options* и для опции К3 устанавливаем значение *Axisymmetric.* Далее *OK* и *Close.*

3. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models.*

Сначала определяем первую модель материала (Material Model Number 1), содержащую свойства стали. Для этого в правом окне последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic.*

Вводим:

EX: 2.1e5 (модуль упругости стали, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона стали)

OK.

Добавляем вторую модель материала со свойствами алюминиевого сплава.

В меню «Material» панели «Define Material Model Behavior» выбираем пункт «New model». В появившемся окне «Define material ID» в поле «Define material ID» вводим номер 2 и нажимаем кнопку ОК.

При этом в левом окне «Material Models Defined», где содержится список имеющихся моделей материалов, появляется новая запись: Material Model Number 2.

Далее в правом окне «Material Models Available» последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

В соответствующие поля вводим:

EX: $7e4$ (модуля упругости алюминиевого сплава, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициента Пуассона алюминиевого сплава)

Завершаем процесс ввода кнопкой *OK* и закрываем панель.

4. Для удобства ввода исходных данных определить скалярные параметры: *U_M>Parameters>Scalar Parameters*.

В поле «Selection» последовательно вводим значения параметров, характеризующих размеры сечения (см. рисунок 2): $d=6$; $z=0.5$; $h=0.7*d$; $h_0=0.8*d$; $h_1=15$; $h_2=9$. После каждого ввода здесь необходимо нажать кнопку *Accept* (принять). Закрываем панель кнопкой *Close*.

5. Построить геометрическую модель сечения болтового соединения.

Как видно из рисунка 2, данная модель может быть получена при помощи комбинирования прямоугольников.

- 5.1. Построить прямоугольники, представляющие сечения болта и гайки: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners*.

Для первого прямоугольника (цилиндрическая часть болта) вводим следующие параметры: координаты левого нижнего угла WP X = 0 и WP Y = 0; ширина Width = $d/2$; высота Height = $h_0+h_1+h_2+h$. Нажимаем кнопку *Apply* (применить) для продолжения данной операции.

Для второго прямоугольника (гайка) задаем: WP X = 0; WP Y = 0; Width = d ; Height = h_0 . *Apply*.

Для третьего прямоугольника (головка болта) вводим: WP X = 0; WP Y = $h_0+h_1+h_2$; Width = d ; Height = h . Завершаем построение сечения крепежной пары кнопкой *OK*.

- 5.2. Построить прямоугольники, представляющие сечения скрепляемых деталей.

Переместим сначала рабочую плоскость так, чтобы ось WP X была направлена вдоль линии опирания гайки на деталь, а ось WP Y от-

стояла на 0,5 мм от цилиндрической части болта (для образования зазора между болтом и деталями): *U_M>WorkPlane>Offset WP to>XYZ Locations*. В панели указания активизируем опцию «Global Cartesian» (глобальные декартовы координаты) и в поле ниже вводим: $d/2+z, h_0, 0$. Нажимаем *OK*.

Опять выбираем команду *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners*.

Строим четвертый прямоугольник со следующими параметрами: $WP X = 0$; $WP Y = 0$; $Width = 1.5*d$; $Height = h_1$. *Apply*.

Завершаем формирование сечения нижней пластины построением пятого прямоугольника: $WP X = 1.5*d$; $WP Y = 0$; $Width = 3.5*d$; $Height = h_1$. *Apply*.

В заключение аналогично строим шестой и седьмой прямоугольники, представляющие сечение верхней пластины.

Для шестого прямоугольника: $WP X = 0$; $WP Y = h_1$; $Width = d$; $Height = h_2$. *Apply*.

Для седьмого: $WP X = d$; $WP Y = h_1$; $Width = 4*d$; $Height = h_2$. Завершаем построение кнопкой *OK*.

Включаем нумерацию геометрических объектов: *U_M>PlotCtrls>Numbering*; отмечаем флаг «Area numbers».

Для удобства дальнейших построений можно скрыть изображение рабочей плоскости: *U_M>WorkPlane>Display Working Plane*.

- 5.3. Выполнить булеву операцию перекрытия поверхностей, образующих крепежную пару: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Overlap>Areas*.

Указываем поверхности A1, A2 и A3. *OK*.

- 5.4. Склеить попарно поверхности, образующие каждую из скрепляемых деталей: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Glue>Areas*.

Сначала указываем поверхности A4 и A5 (нижняя пластина), *Apply*.

Затем указываем поверхности A6 и A7 (верхняя пластина), *OK*.

Геометрическая модель построена.

6. Разбить геометрическую модель на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

Здесь сначала следует назначить атрибуты поверхностям, так как в рассматриваемой задаче используются два материала.

Для этого в разделе «Element Attributes» диалоговой панели «MeshTool» в выпадающем списке выбираем Areas (поверхности), рядом нажимаем кнопку *Set*.

Указываем поверхности A8, A9, A10, A11 и A12, представляющие элементы крепежа (изготовленные из стали), *OK*.

Появляется диалоговая панель «Area Attributes», где по умолчанию установлены следующие значения:

MAT «Material number»: 1 (номер материала)

TYPE «Element type number»: 1 PLANE182 (номер типа элементов).

Поскольку они нас устраивают, нажимаем *Apply*.

Теперь указываем поверхности A1, A2, A4 и A6, описывающие соединяемые пластины из алюминиевого сплава, *OK*.

В поле «Material number» выбираем номер 2 (модель материала для алюминиевого сплава). *OK*.

В разделе «Size Controls» устанавливаем глобальный размер элементов с помощью кнопки *Set* строки «Global»; в поле «Element edge length» (длина стороны элемента) вводим значение 1 (в мм), *OK*.

Далее в списке «Mesh» в качестве объектов для разбиения выбираем Areas (поверхности), в поле «Shape» (форма элементов) указываем Quad (четырёхугольная). И, наконец, выбираем режим построения регулярной сетки Mapped, так как все поверхности имеют «правильную» топологию.

После нажатия кнопки *Mesh* указываем все поверхности (*Pick All*).

Получаемая здесь разбивка изображена на рисунке 3.

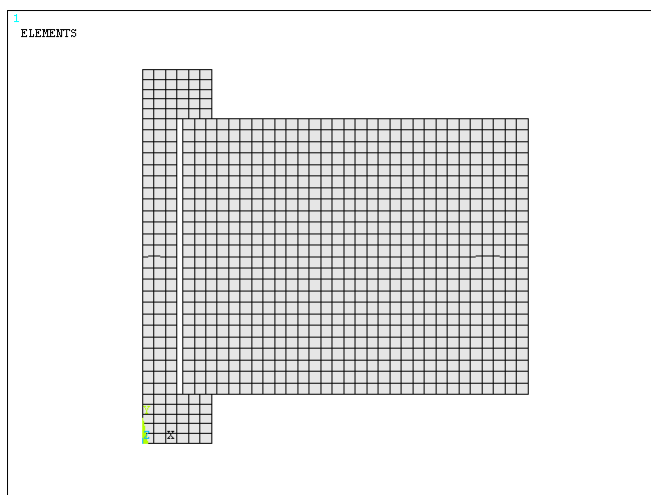


Рисунок 3 – Сетка конечных элементов

Далее удобно включить нумерацию линий: *U_M>PlotCtrls>Numbering*; отмечаем флаг «Line numbers».

7. Создать контактную пару для описания взаимодействия скрепляемых пластин.

Для этого сначала запускаем специальный инструмент «Contact Manager» (Менеджер контактов) путем нажатия одноименной кнопки пиктографического меню программы ANSYS либо командой *M_M>Preprocessor>Create>Contact Pair*.

В появившейся панели нажимаем первую кнопку, предназначенную для вызова средств Мастера контактов «Contact Wizard», и создаем контактную пару между скрепляемыми пластинами, выполняя следующие шаги.

- 7.1. Указать ответную поверхность.

В разделе «Target Surface» в качестве объектов, используемых для определения ответной поверхности, выбираем Lines (линии).

В разделе «Target Type» (тип ответной поверхности) выбираем Flexible (деформируемая поверхность).

Нажимаем кнопку *Pick Target* и указываем линии L4 и L15 (представляющие верхнюю границу нижней более толстой пластины).

Далее нажимаем *Apply* (поскольку после нажатия *OK* кнопка *Next* может оставаться неактивной).

На экран вернется диалоговая панель «Contact Wizard», в которой будет активна кнопка *Next*.

Нажимаем *Next* для перехода к следующему шагу.

- 7.2. Указать контактную поверхность.

В разделе «Contact Surface» в качестве объектов, используемых для определения контактной поверхности, выбираем Lines (линии).

В разделе «Contact Element Type» (тип модели контакта) выбираем Surface-to-Surface (поверхность – поверхность).

Нажимаем кнопку *Pick Contact* и указываем линии L5 и L21 (представляющие нижнюю границу верхней пластины).

Далее нажимаем *Apply*, а не *OK*.

В диалоговой панели Мастера контактов нажимаем кнопку *Next* для перехода к следующему шагу.

- 7.3. Задать параметры контакта.

Отключаем опцию начального внедрения (проникновения) «Include initial penetration».

Для коэффициента трения в поле «Coefficient of Friction» вводим значение 1.1 (алюминий-алюминий, чистая несмазанная поверхность).

И, наконец, для создания собственно контактной пары нажимаем кнопку *Create*.

Для завершения процесса создания контактной пары в последнем информационном окне нажимаем кнопку *Finish*.

8. Создать контактную пару для описания взаимодействия гайки и нижней пластины.

В панели Менеджера контактов снова нажимаем кнопку для вызова средств Мастера контактов и создаем вторую контактную пару, выполняя те же шаги, что и в предыдущем случае. Однако в качестве ответной поверхности указываем линию L13 (короткая линия нижней границы нижней пластины), а за контактную – принимаем линию L36 (верхний край гайки). Для коэффициента трения вводим значение 0.6 (сталь-алюминий, чистая несмазанная поверхность).

9. Создать контактную пару для описания взаимодействия головки болта и верхней пластины.

В панели Менеджера контактов опять нажимаем кнопку для вызова средств Мастера контактов и создаем третью контактную пару, выполняя те же шаги, что и в предыдущих случаях. Однако в качестве ответной поверхности указываем линию L23 (короткая линия верхней границы верхней пластины), а за контактную – принимаем линию L38 (нижний край головки болта). Коэффициент трения равен 0,6.

В конце следует закрыть диалоговую панель Менеджера контактов.

Отобразим на экране дисплея построенную геометрическую модель в виде линий: *U_M>Plot>Lines*.

10. Создать дополнительный узел для учета затяжки болта: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS*.

Для удобства дальнейшего использования этого узла ему следует присвоить легко запоминающийся номер (заведомо превышающий число узлов в модели), например 9999. Положение данного узла не имеет существенного значения, главное чтобы он был легко доступным при графическом указании.

Учитывая это, в поле «Node number» (номер узла) вводим 9999, а в поля «X, Y, Z Location in active CS» (координаты узла в активной системе координат) – соответственно $6*d; h+h1; 0$. ОК.

Отообразим поверхности: *U_M>Plot>Areas*.

11. Сгенерировать элементы предварительной затяжки болта: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Pretension>Pretensn Mesh>Elements in Area*.

Указываем цилиндрическую часть болта – поверхность A12; *OK*.

Указываем произвольный узел на оси *Y* в сечении цилиндрической части болта, например, узел, находящийся напротив линии стыка алюминиевых деталей, *OK*.

Далее в поле «Section number» (номер сечения) вводим 1, в поле «Section name» (имя сечения) – Bolt и в поле «Pretension node» (контрольный узел предварительной затяжки) – номер, созданного вручную узла, т.е. 9999. В списке «Separation coord system» (система координат разъединения) указываем Global Cartesian; а в списке «Separatn surface norm to» (нормаль к поверхности разъединения) выбираем *Y-axis*. *OK*.

В результате выполнения данной операции конечные элементы, моделирующие болт, делятся на две несвязанные группы, между которыми и создаются элементы предварительной затяжки. При этом усилие затяжки будет действовать по направлению нормали к поверхности разъединения. Следует отметить, что при каждом изменении сетки в центральной части болта необходимо заново генерировать элементы предварительной затяжки.

12. Задать граничные условия.

Поскольку задача является осесимметричной, необходимо ограничить радиальные перемещения всех узлов, лежащих на оси *Y*.

Кроме того, следует жестко закрепить наружный край нижней пластины.

Воспользуемся командой задания перемещений на линиях: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

Указываем линии L29, L33 и L39 (т.е. все линии, лежащие на оси симметрии), *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем UX (запрет поступательных перемещений по оси *X*), *Apply*.

Далее указываем линию L18 (наружный край нижней пластины), *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем All DOF (запрет всех перемещений), *OK*.

13. Приложить усилие предварительной затяжки: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>on Nodes*.

Указываем контрольный узел 9999, имеющий только одну степень свободы. *OK.*

Затем в списке «Direction of force/moment» (направление силы/момента) выбираем направление FX и в поле «Force/moment value» вводим значение 861 (в Н). *OK.*

Следует отметить, что графическое изображение силы здесь не имеет физического смысла.

14. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar>SAVE_DB.*

База данных записывается в файл Lab18.db.

15. Задать опции анализа: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls.*

Отметим, что процесс нагружения для рассматриваемой задачи разбивается на два шага. При этом на первом шаге производится затяжка соединения, а на втором прикладывается основная нагрузка по контуру верхней пластины.

Выбираем вкладку «Basic». В поле «Number of substeps» раздела «Time Control» вводим число подшагов, например 30.

Для сохранения промежуточных результатов на всех подшагах в списке «Frequency» (частота записи выходных величин в файл результатов) выбираем значение Write every substep.

16. Выполнить анализ первого шага нагружения: *M_M>Solution>Solve>Current LS.*

По окончании решения, **не выходя из модуля Solution**, необходимо задать нагрузку на втором шаге и повторно запустить задачу на счет, как описано далее.

Отобразим конечно-элементную модель: *U_M>Plot>Elements.*

17. Зафиксировать затяжку.

Для этого сначала удаляем силу затяжки FX=891 Н в узле 9999: *M_M>Solution>Define Loads>Delete>Structural>Force/Moment>On Nodes.* Указываем узел 9999, *OK.*

В списке «Force/moment to be deleted» выбираем компоненту FX. *OK.*

Затем в этом узле для перемещения UX следует задать значение %_FIX% (включая два символа процента и знак подчеркивания): *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>on Nodes*

Опять указываем узел 9999, *OK.*

В поле «DOFs to be constrained» выбираем UX и в поле «Displacement value» вводим %_FIX%. *OK.*

Появившееся предупреждение о том, что имя `_FIX` является зарезервированным служебным именем, следует проигнорировать.

18. Приложить основную нагрузку.

Напомним, что при решении осесимметричной задачи при задании погонной кольцевой нагрузки q следует вводить полное значение силы $2\pi r q = 2\pi \cdot 24,5 \cdot 15 = 2309$ Н (где $r = d/2 = 49/2 = 24,5$ мм – радиус окружности, по которой действует погонная нагрузка q).

Воспользуемся командой задания сил в точках: `M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints`.

Указываем правую верхнюю точку сечения верхней пластины (т.е. точку 21), *OK*.

В списке «Direction of force/mom» (направление силы/момента) выбираем направление FY и в поле «Force/moment value» вводим число 2309. *OK*.

19. Выполнить анализ второго шага нагружения: `M_M>Solution>Solve>Current LS`.

20. Запустить специальный инструмент «Results Viewer», предназначенный для пошагового просмотра результатов расчета: `M_M>General Postproc>Results Viewer`.

20.1. Изобразить эпюру контактного давления.

В списке результатов выбираем `Nodal Solution>Contact>Contact Pressure` (контактное давление) и нажимаем кнопку `Plot Results` (изображение результатов).

Далее, перемещая движок по полосе подшагов, можно наблюдать картину изменения величины контактного давления в различные моменты времени в рассчитанном интервале.

По умолчанию время в конце первого шага составляет 1 с, а второго – 2 с.

Отметим, что при раскрытии стыка пропадает контактное давление между соединяемыми пластинами. В нашем случае это происходит в момент времени 1,47 с, что соответствует нагрузке

$$q_{\text{раск}} = (1,47 - 1)q = 0,47 \cdot 15 = 7,05 \text{ Н/мм.}$$

Эпюра контактного давления в конце первого шага представлена на рисунке 4.

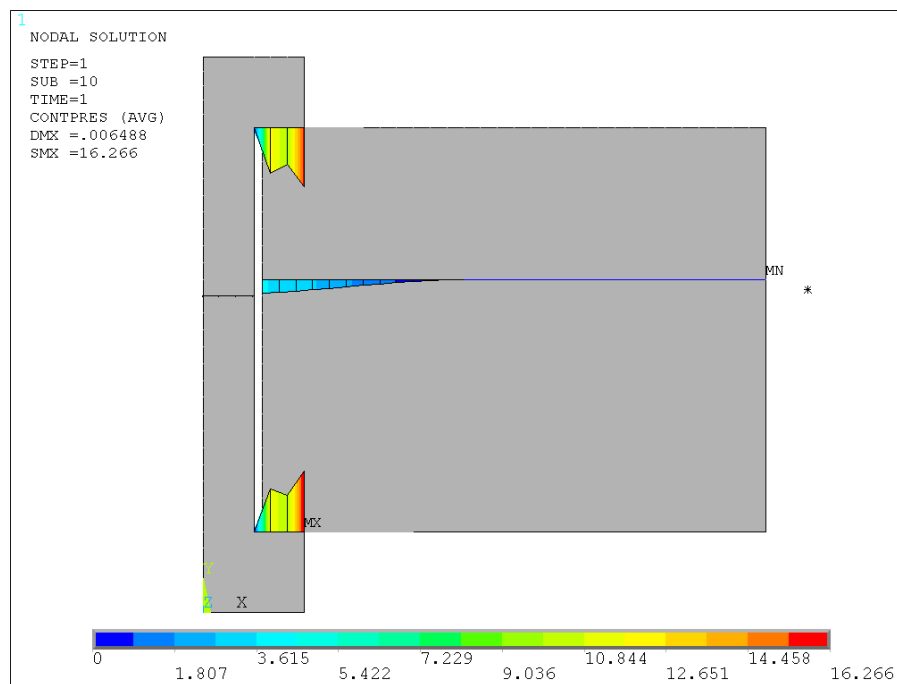


Рисунок 4 – Эпюра контактного давления (в МПа) после затяжки болта

20.2. Построить зависимость осевых напряжений в цилиндрической части болта от времени (параметра нагружения).

В панели «Result Viewer» нажимаем кнопку *Time-History Variable Viewer* (средства просмотра результатов в постпроцессоре истории нагружения).

Для задания новой переменной нажимаем кнопку *Add Data*.

В списке «Result Item» последовательно указываем *Nodal Solution>Stress>Y-Component of stress* (Y-компонента напряжений). В поле «Variable Name» (имя переменной) вводим SY. OK. Далее на экране при помощи мыши указываем узел на оси круговой симметрии в середине цилиндрической части болта. OK.

Затем в списке выбираем переменную SY и нажимаем кнопку *Graph Data*. В результате получим график зависимости осевых напряжений от параметра нагружения в указанной точке болта (рисунок 5), где можно выделить три участка. Первый прямолинейный участок (от 0 до 1 с) соответствует предварительной затяжке болта, т.е. первому шагу нагружения. Далее прикладывается основная нагрузка q , т.е. выполняется второй шаг. При этом, когда стык закрыт (от 1 до 1,47 с), рассматриваемая зависимость, как видно, является нелинейной. И, наконец, третий прямолинейный участок (от 1,47 до 2 с) характеризует нагружение болта после раскрытия стыка.

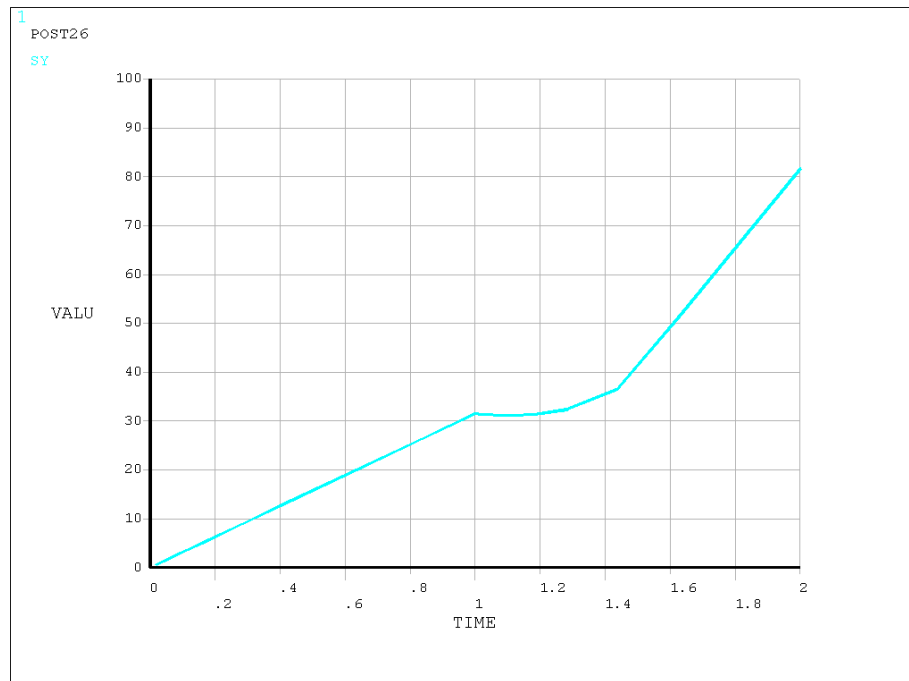


Рисунок 5 – График зависимости напряжений в цилиндрической части болта от параметра нагружения

21. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя Lab18.lgw.

22. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17

«Исследование соударения полого шара с недеформируемой преградой»

Исходные данные: полый шар диаметром 30 мм и толщиной стенки 2 мм ударяется со скоростью 90 км/ч об абсолютно жесткую поверхность (с отскоком), как показано на рисунке 1. Шар изготовлен из алюминиевого сплава Д1, имеющего следующие свойства: модуль упругости $7 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; касательный модуль (или модуль упрочнения) 2500 МПа; предел текучести 200 МПа; плотность 2700 кг/м^3 .

Допущения: поскольку форма недеформируемой преграды не имеет значения, она принимается в виде круглой площадки радиусом 20 мм; при этом задача становится осесимметричной. Диаграмма деформирования материала считается билинейной, т.е. состоящей из двух прямолинейных участков.

Цель: исследовать напряженно-деформированное состояние шара в момент соударения с преградой и после отскока от нее.

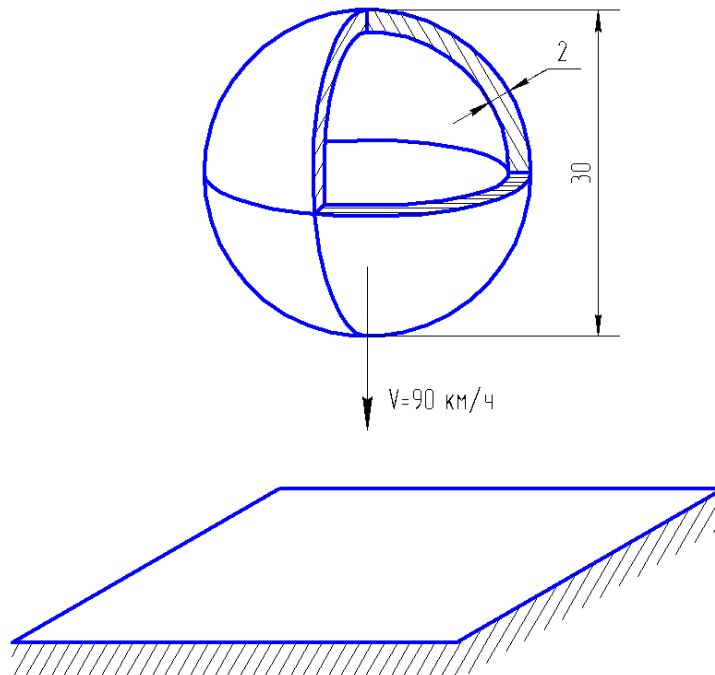


Рисунок 1 – Удар шара о преграду

В осесимметричной постановке полый шар будем представлять его сечением, имеющим форму полукольца с внешним радиусом 15 мм и внутренним – 13 мм; а недеформируемую преграду – линией длиной 20 мм, как показано на рисунке 2. Начало системы координат сечения поместим в центр преграды, причем ось X направим вправо, а ось Y – вверх по оси симметрии.

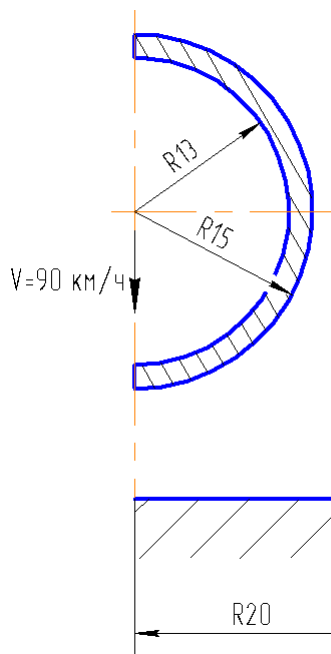


Рисунок 2 – Расчетная схема

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab17.
2. Установить тип используемых в расчете конечных элементов – 4-узловой плоский элемент PLANE182 с формулировкой «осесимметричное поведение»: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Quad 4node 182*, *OK*.

В окне «Element types» нажимаем *Options* и для опции К3 устанавливаем значение *Axisymmetric*. Далее *OK* и *Close*.

3. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

Сначала задаем линейные упругие свойства. Для этого в правом окне последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

Вводим:

EX: $7e4$ (модуль упругости, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

Снова в правом окне выбираем *Structural>Density* и вводим:

DENS: 2700e-12 (плотность, т/мм³)

ОК.

Далее определяем нелинейный участок диаграммы деформирования, выбирая билинейную модель с изотропным упрочнением: *Structural>Nonlinear>Inelastic>Rate independent>Isotropic Hardening Plasticity>Mises Plasticity>Bilinear*.

Вводим:

Yield Stss: 200 (предел текучести, МПа)

Tang Mod: 2500 (касательный модуль, МПа).

Нажимаем кнопку *Graph* для отображения зависимости $\sigma - \epsilon$ в виде графика.

Завершаем процесс ввода кнопкой *ОК* и закрываем панель.

4. Построить точки: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS*.

Вводим координаты точек согласно следующей таблице:

Номер точки	x, мм	y, мм	z, мм
1	0	0	0
2	20	0	0

Включаем нумерацию геометрических объектов: *U_M>PlotCtrls>Numbering*; отмечаем флаги «Keypoint numbers», «Line numbers» и «Area numbers».

5. Построить отрезок прямой линии, представляющий жесткую преграду: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Straight Line*.

Указываем сначала точку 2, а затем точку 1, ОК.

6. Построить полукольцо: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Partial Annulus*.

Вводим следующие параметры: координаты центра полукольца WP X = 0 и WP Y = 50; внешний радиус Rad-1 = 15; начальный угол сектора Theta-1 = -90; внутренний радиус Rad-2 = 13; конечный угол сектора Theta-2 = 90. Нажимаем ОК.

Отобразим на экране дисплея построенную геометрическую модель в виде линий: *U_M>Plot>Lines*.

7. Разрезать построенное полукольцо на две половины.

Данную операцию удобно выполнить с помощью рабочей плоскости.

7.1. Установить рабочую плоскость перпендикулярно дуге полукольца в ее середине: *U_M>WorkPlane>Align WP with>Plane normal to line.*

Указываем одну из дуг, образующих полукольцо, *OK.*

В поле «*Ratio along line*» (безразмерная координата вдоль линии) вводим значение 0.5 (середины линии). *OK.*

7.2. Разрезать все поверхности рабочей плоскостью: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Area by WrkPlane.*

Нажимаем *Pick All.*

8. Разбить поверхности на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool.*

Для получения результатов приемлемой точности здесь следует взять хотя бы четыре элемента по толщине стенки шара. Учитывая данную рекомендацию, глобальный размер стороны элемента примем равным $2/4 = 0,5$ мм. Нажимаем кнопку *Set* строки «Global» и в поле «Element edge length» (размер длины стороны элемента) вводим значение 0.5, *OK.*

Поскольку поверхности являются «правильными», то можно установить режим *Mapped* (регулярная сетка).

Для генерации сетки нажимаем кнопку *Mesh* и указываем все поверхности (*Pick All*).

9. Создать контактную пару для описания взаимодействия жесткого и деформируемого тел.

Для этого сначала запускаем специальный инструмент «Contact Manager» (Менеджер контактов) путем нажатия одноименной кнопки пиктографического меню программы ANSYS либо командой *Main Menu>Preprocessor>Create>Contact Pair.*

Появляющуюся при этом диалоговую панель удобно сместить вниз, чтобы она не перекрывала изображение модели в рабочей области.

В данной панели пока доступна лишь первая кнопка, предназначенная для вызова средств Мастера контактов «Contact Wizard».

Нажимаем эту кнопку и создаем контактную пару, выполняя следующие шаги.

9.1. Указать ответную поверхность.

В разделе «Target Surface» в качестве объектов, используемых для определения ответной поверхности, выбираем *Lines* (линии).

В разделе «Target Type» (тип ответной поверхности) выбираем Rigid (абсолютно жесткая).

Нажимаем кнопку *Pick Target* и указываем прямую линию L1 (представляющую недеформируемую преграду).

Далее нажимаем *Apply* (поскольку после нажатия *OK* кнопка *Next* может оставаться неактивной).

На экран вернется диалоговая панель «Contact Wizard», в которой будет активна кнопка *Next*.

Нажимаем *Next* для перехода к следующему шагу.

9.2. Указать контактную поверхность.

В разделе «Contact Surface» в качестве объектов, используемых для определения контактной поверхности, выбираем Lines (линии).

В разделе «Contact Element Type» (тип модели контакта) выбираем Surface-to-Surface (поверхность – поверхность).

Нажимаем кнопку *Pick Contact* и указываем линию L9 (нижнюю внешнюю границу полукольца).

Далее нажимаем *Apply*, а не *OK*.

В диалоговой панели Мастера контактов нажимаем кнопку *Next* для перехода к следующему шагу.

9.3. Задать параметры контакта.

Отключаем опцию начального внедрения (проникновения) «Include initial penetration», которая требуется лишь в случае, когда контактирующие тела имеют в начале расчета область перекрытия (как, например, при посадке диска на вал с натягом).

Для коэффициента трения в поле «Coefficient of Friction» вводим значение 0.1.

И, наконец, для создания собственно контактной пары нажимаем кнопку *Create*.

9.4. Проверить ориентацию внешних нормалей к контактной и ответной поверхностям.

После нажатия кнопки *Create* Мастер контактов переключится в режим проверки ориентации нормалей. При этом в рабочем окне будут изображаться лишь контактные и ответные элементы с условными значками, показывающими направление нормалей.

Следует отметить, что нормали контактных и ответных элементов должны быть направлены навстречу друг другу.

В нашем случае нормали контактных элементов всегда будут направлены наружу (т.е. правильно).

Однако ориентация нормали к ответной поверхности здесь зависит от направления линии L1 (т.е. от порядка перечисления ее точек).

Если нормаль к ответной поверхности направлена вниз (т.е. неправильно), следует изменить ее ориентацию с помощью кнопки *Flip Target Normal*.

Для завершения процесса создания контактной пары нажимаем кнопку *Finish*. Затем можно закрыть окно «Contact Manager».

Отообразим на экране дисплея построенную геометрическую модель в виде линий: *U_M>Plot>Lines*.

10. Задать граничные условия.

Поскольку задача является осесимметричной, необходимо ограничить радиальные перемещения всех узлов, лежащих на оси Y.

Воспользуемся командой задания перемещений на линиях: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

Указываем линии L3 и L5 (лежащие на оси симметрии), *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем UX (запрет поступательных перемещений по оси X), *OK*.

Следует отметить, что ANSYS по умолчанию автоматически закрепляет жесткую ответную поверхность (линию) от всех перемещений.

11. Установить новый тип анализа – анализ переходных динамических процессов: *M_M>Solution>Analysis Type>New Analysis*.

Указываем анализ Transient, *OK*.

Выбираем метод решения Full (полный), *OK*.

12. Задать опции анализа: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls*.

Выбираем вкладку «Basic».

Для учета больших перемещений в списке «Analysis Options» устанавливаем значение Large Displacement Transient.

Время в конце шага нагружения (поле «Time at end of loadstep» раздела «Time Control») задаем равным 0.0002 (в сек).

В поле «Number of substeps» того же раздела вводим число подшагов, например 50.

И, наконец, для сохранения промежуточных результатов на всех подшагах в списке «Frequency» (частота записи выходных величин в файл результатов) выбираем значение Write every substep.

13. Непосредственно перед запуском задачи на счет задать начальные условия (перемещение и скорость отдельных узлов модели в момент времени $t = 0$): *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Initial Condit'n>Define*.

В панели указания активизируем селекторную кнопку *Box* и, удерживая нажатой левую кнопку мыши, растягиваем прямоугольник выбора так, чтобы в него попали все узлы, относящиеся к шару. *OK*.

В появившейся диалоговой панели «Define Initial Conditions» в поле «DOF to be specified» (определяемая степень свободы) выбираем компоненту *UY*, в поле «Initial value of DOF» (начальное перемещение) вводим -35 (в мм; шар смещается вниз до положения контакта с жесткой поверхностью), а в поле «Initial velocity» (начальная скорость) вводим -25000 (в мм/с; $90 \cdot 10^6 / 3600 = 25000$). *OK*.

14. Выполнить переходный динамический анализ: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

Отметим, что при выходе из модуля *Solution* начальные условия пропадают. Поэтому при повторном анализе их следует задать заново.

15. Запустить специальный инструмент «Results Viewer», предназначенный для пошагового просмотра результатов расчета: *M_M>General Postproc>Results Viewer*.

При этом на экране исчезнет главное меню и появится дополнительная панель, вид которой показан на рисунке 3.

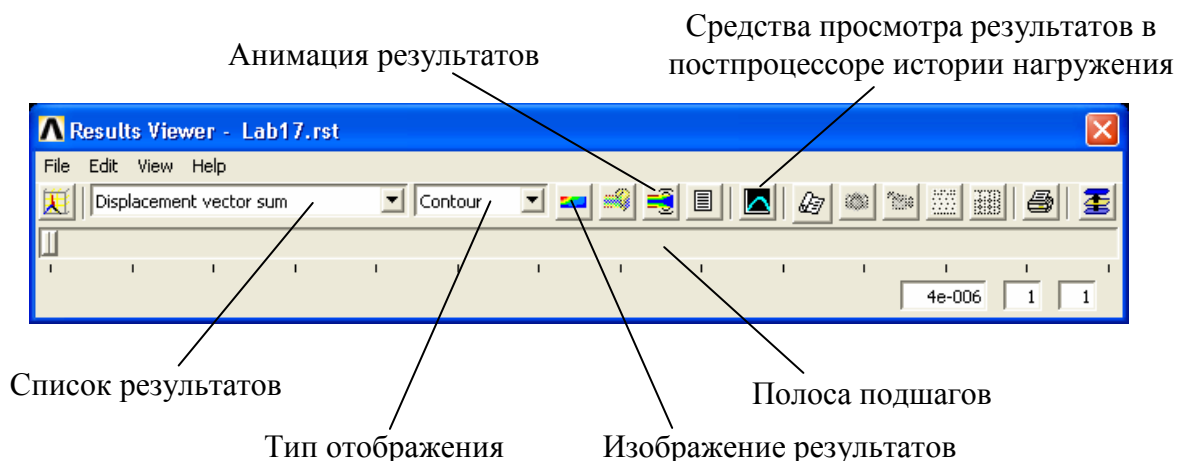


Рисунок 3 – Панель управления пошаговым отображением результатов

15.1. Изобразить эпюру контактного давления.

В списке результатов выбираем *Nodal Solution>Contact>Contact Pressure* (контактное давление) и нажимаем кнопку *Plot Results* (изображение результатов).

Далее, перемещая движок по полосе подшагов, можно наблюдать картину изменения величины контактного давления в различные моменты времени в рассчитанном интервале.

Эпюра контактного давления на первом подшаге представлена на рисунке 4.

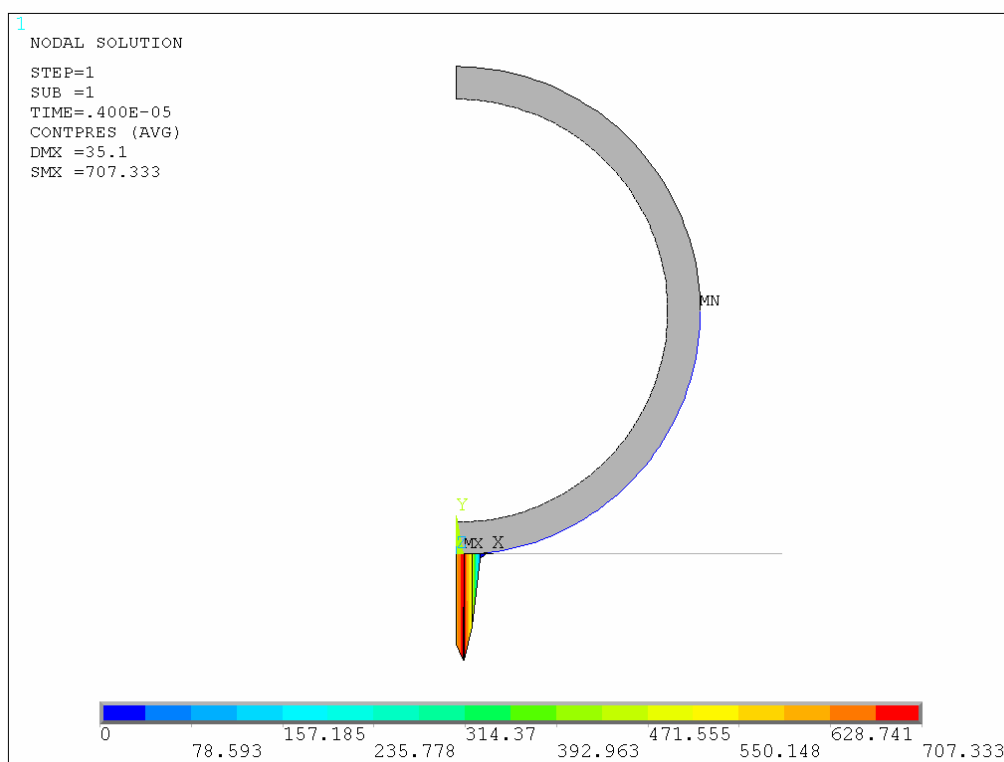


Рисунок 4 – Эпюра контактного давления (в МПа)

Отметим, что контактное взаимодействие здесь длится примерно 0,00009 с, после чего происходит разъединение тел (отскок шара).

Аналогичным образом можно анализировать и другие расчетные величины, входящие в список доступных результатов. Например, интерес могут представлять пластические деформации после соударения и область их локализации: *Nodal Solution>Plastic Strain>von Mises Plastic strain*.

15.2. Включить анимацию изображения результатов расчета.

Нажимаем кнопку *Animate Results* (анимация результатов) в панели «Result Viewer».

При этом появляется новая диалоговая панель, где в разделе «Type of Animation Sequence to Capture» в качестве типа анимации следует указать Over time (по времени), *OK*.

В следующем окне в поле «Number of animations frames» (количество кадров анимации) вводим число в интервале от 10 до 100 (чем больше кадров, тем более плавной будет анимация, но более затратным будет процесс записи видео файла), в поле «Animation time delay» (время задержки между кадрами, сек) вводим 0.1 и в списке «Contour data for animation» выбираем *Use Last Display* (использовать последнее изображение) либо другую выходную величину.

Нажатие кнопки *OK* приводит к формированию и отображению на экране анимированного представления выбранной величины.

15.3. Построить зависимость пластической деформации от времени.

В панели «Result Viewer» нажимаем кнопку *Time-History Variable Viewer* (средства просмотра результатов в постпроцессоре истории нагружения).

Для задания новой переменной нажимаем кнопку *Add Data*.

В списке «Result Item» последовательно указываем *Nodal Solution>Plastic Strain>von Mises plastic strain* (эквивалентная пластическая деформация по Мизесу).

В поле «Variable Name» (имя переменной) вводим *ep1*. *OK*.

Далее на экране при помощи мыши указываем самый нижний узел шара. *OK*.

Затем в списке выбираем переменную *ep1* и нажимаем кнопку *Graph Data*. В результате получим график зависимости пластической деформации от времени в указанной точке шара (рисунок 5).

16. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File*.

Вводим имя *Lab17.lgw*.

17. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT*.

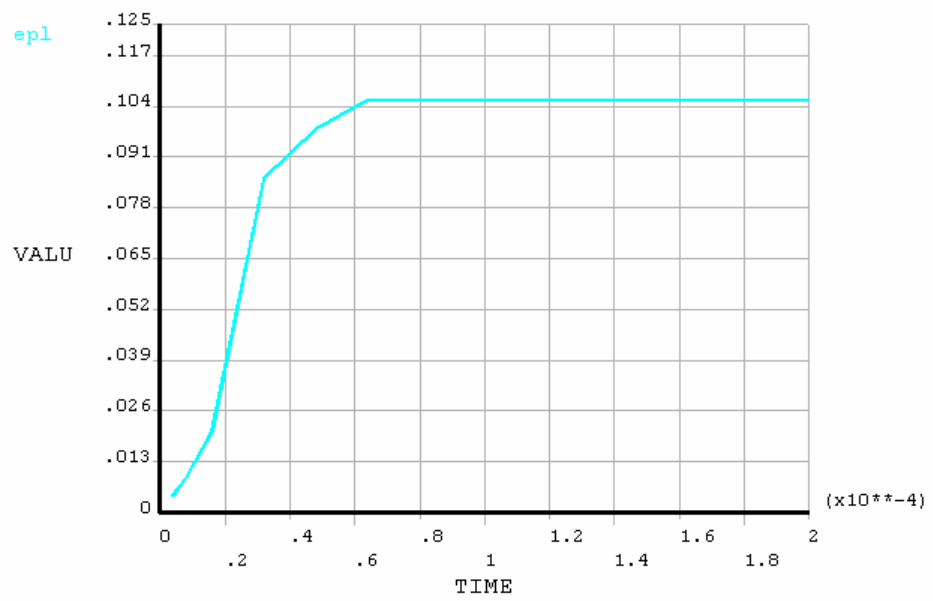


Рисунок 5 – График зависимости пластической деформации от времени

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

«Исследование несущей способности прорывной мембраны»

Исходные данные: круглая в плане мембрана, имеющая кольцевую острую насечку (рисунок 1), нагружена распределенным по нижней поверхности давлением p . Размеры данной конструкции представлены на рисунке 2. Юбка мембраны вставляется в жесткую оправку. Материал – технически чистый алюминий АД0 (модуль упругости $7 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3), условная диаграмма деформирования которого задана точками (таблица 1).

Допущения: поскольку конструкция мембраны и нагрузка симметричны относительно одной оси, можно рассматривать лишь одно сечение и свести трехмерную задачу в двухмерной осесимметричной. Диаграмма деформирования материала аппроксимируется кусочно-линейной зависимостью.

Цель: определить по расходимости итераций критическое значение давления, при котором происходит разрушение мембраны.



Рисунок 1 – Общий вид прорывной мембраны

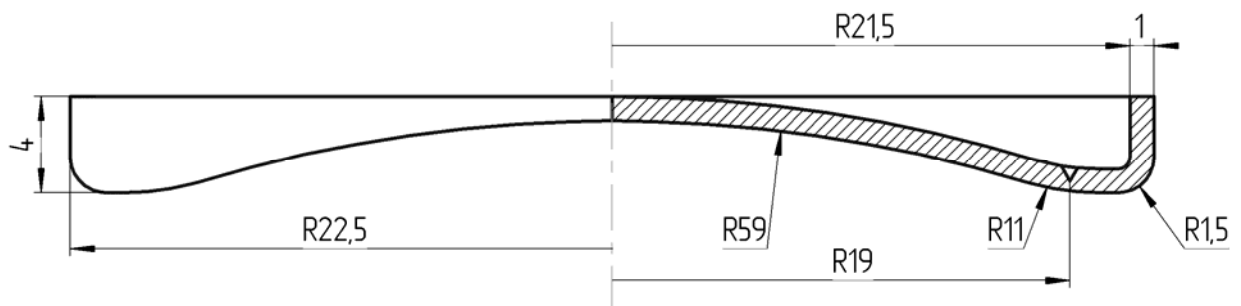


Рисунок 2 – Размеры мембраны

Таблица 1 – Зависимость условного напряжения от деформации

№	ε	σ , МПа
1	0,000554	38,8
2	0,01	49,9
3	0,04	60,0
4	0,10	69,3
5	0,20	75,6
6	0,30	78,1
7	0,40	79,0
8	0,50	78,6
9	0,55	77,4

Поскольку технически чистый алюминий обладает высокой пластичностью, в данной задаче ожидаются большие деформации. Поэтому здесь потребуется действительная диаграмма деформирования, выражающая зависимость действительного напряжения $\bar{\sigma}$ от логарифмической деформации $\bar{\varepsilon}$. Для их вычисления воспользуемся следующими формулами:

$$\bar{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon); \quad \bar{\varepsilon} = \ln(1 + \varepsilon).$$

Рассчитанные таким образом значения сведены в таблицу 2. Следует отметить, что отношение координат первой точки $\bar{\sigma}_1/\bar{\varepsilon}_1$ должно быть равно модулю упругости, поэтому после пересчета их значения оставлены без изменения. В противном случае при запуске задачи на счет ANSYS выдаст сообщение об ошибке.

Таблица 2 – Зависимость действительного напряжения от логарифмической деформации

№	$\bar{\varepsilon}$	$\bar{\sigma}$, МПа
1	0,000554	38,8
2	0,00954	50,4
3	0,0389	62,5
4	0,0956	76,3
5	0,1827	90,8
6	0,2628	101,6
7	0,3369	110,7
8	0,4055	117,9
9	0,4362	119,8

Для сравнения на рисунке 4 представлены условная (штриховая линия) и действительная (сплошная линия) диаграммы деформирования рассматриваемого материала.

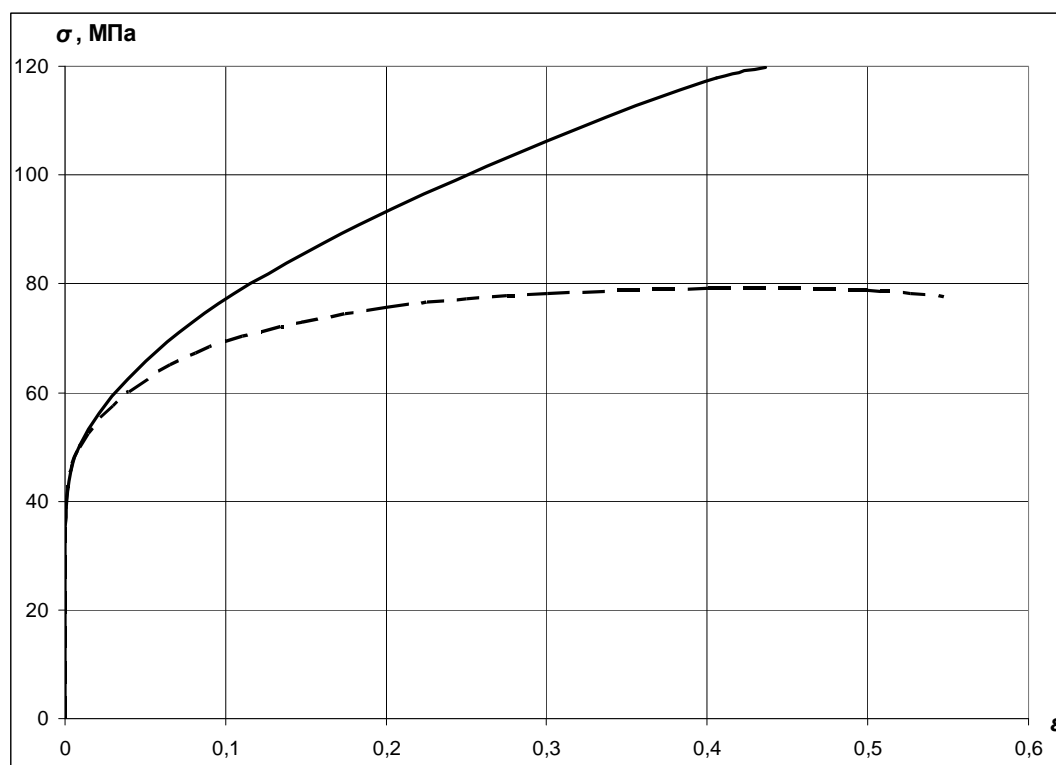


Рисунок 4 – Диаграммы деформирования материала АД0

Следует напомнить, что при решении осесимметричных задач в программе ANSYS глобальная ось Y должна являться осью симметрии, а X – радиальной осью. Начало системы координат сечения поместим в верхнюю точку мембраны, причем ось X направим вправо, а ось Y – вверх, как показано на рисунке 5.

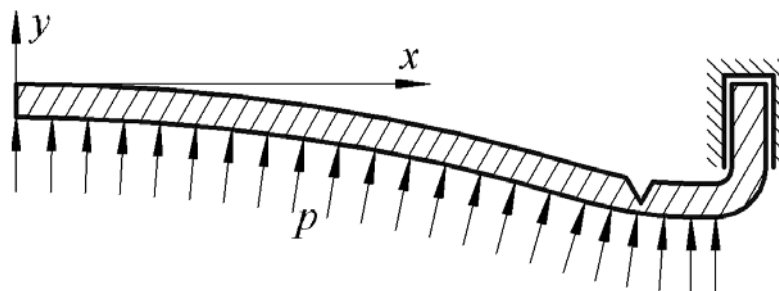


Рисунок 5 – Расчетная схема

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab16.
2. Установить тип используемых в расчете конечных элементов – 8-узловой плоский элемент PLANE183 с формулировкой «осесимметричное поведение»: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Quad 8node 183, OK*.

В окне «Element types» нажимаем *Options* и для опции К3 устанавливаем значение *Axisymmetric*. Далее *OK* и *Close*.

3. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

Сначала задаем линейные упругие свойства. Для этого в правом окне последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

Вводим:

EX: 7e4 (модуль упругости, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

Далее определяем нелинейный участок диаграммы деформирования, выбирая полилинейную модель с изотропным упрочнением: *Structural>Nonlinear>Inelastic>Rate independent>Isotropic Hardening Plasticity>Mises Plasticity>Multilinear*.

При этом появляется диалоговая панель, где по умолчанию установлен режим ввода значений напряжения в зависимости от полной деформации (*Stress versus Total Strain*).

В столбцы «STRAIN» и «STRESS» вводим соответственно значения логарифмической деформации и действительного напряжения из таблицы 2. Для добавления новой строки (т.е. точки) здесь следует воспользоваться кнопкой *Add Point*.

По окончании для проверки введенных значений следует отобразить зависимость $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ в виде графика (кнопка *Graph*).

Завершаем процесс ввода кнопкой *OK* и закрываем панель.

4. Построить геометрическую модель сечения мембраны.

Как видно из рисунка 2, настоящая модель может быть получена путем комбинирования нескольких примитивов (сектора узкого кольца и двух прямоугольников) с последующим скруглением углов.

- 4.1. Построить сектор кольца: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Partial Annulus*.

Вводим следующие параметры: координаты центра кольца WP X = 0 и WP Y = -60; внешний радиус Rad-1 = 60; начальный угол сектора Theta-1 = 70; внутренний радиус Rad-2 = 59; конечный угол сектора Theta-2 = 90. Нажимаем *OK*.

4.2. Построить два прямоугольника: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners*.

Для первого прямоугольника вводим следующие параметры: координаты левого верхнего угла WP X = 21.5 и WP Y = 0; ширина Width = 1; высота Height = -4. Нажимаем кнопку *Apply* для продолжения данной операции.

Для второго прямоугольника задаем: координаты правого нижнего угла WP X = 22.5 и WP Y = -4; Width = -5; Height = 1. Нажимаем *OK* для завершения этой операции.

Включим нумерацию поверхностей: *U_M>PlotCtrls>Numbering*. Отмечаем флаг «Area numbers».

Появляющееся при этом изображение показано на рисунке 6.

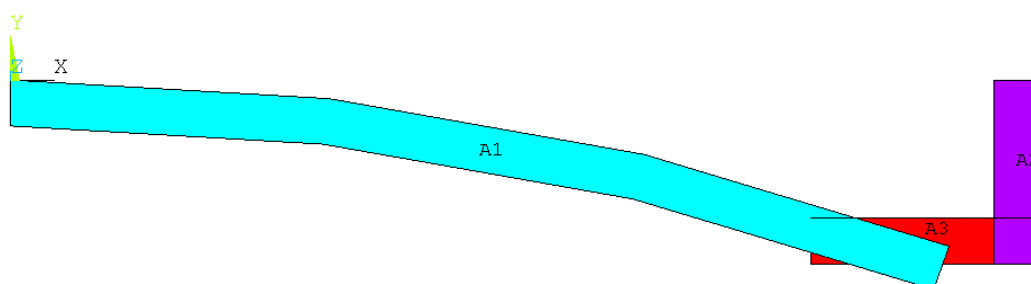


Рисунок 6 – Поверхности с нумерацией

4.3. Выполнить булеву операцию перекрытия двух ближайших к оси вращения поверхностей: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Overlap>Areas*.

Указываем поверхности A1 и A3, *OK*.

4.4. Удалить лишние поверхности: *M_M>Preprocessor>Modeling>Delete>Areas and Below*.

Указываем две расположенные внизу треугольные поверхности (A4 и A5), *OK*.

4.5. С помощью булевой операции сложения объединить все поверхности в одну: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add>Areas*.

Кнопкой *Pick All* указываем все поверхности.

- 4.6. Удалить только поверхность, оставляя ограничивающие ее линии: *M_M>Preprocessor>Modeling>Delete>Areas Only*.

Указываем поверхность, *OK*.

Для отображения линий выбираем последовательность: *U_M>Plot>Lines*.

Включим их нумерацию: *U_M>PlotCtrls>Numbering*. Отмечаем флаг «Line numbers» (рисунок 7).

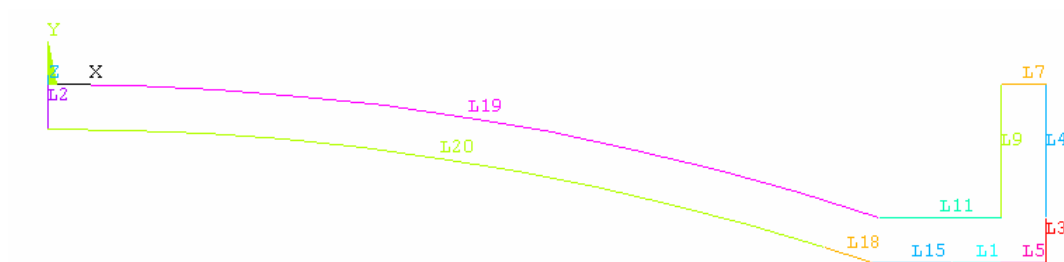


Рисунок 7 – Линии с нумерацией

- 4.7. Объединить линии, образующие стороны сечения мембраны: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add>Lines*.

Сначала указываем линии L20 и L18, *OK*. При этом появляется дополнительное окно, где по умолчанию установлена опция удаления исходных линий. Ничего не меняя, закрываем его кнопкой *Apply*.

Затем аналогичным образом объединяем три линии L15, L1 и L5.

В заключение объединяем линии L3 и L4.

- 4.8. Выполнить скругление углов: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Line Fillet*.

Указываем мышью в рабочем окне две линии L18 и L1, *OK*.

В поле «Fillet radius» вводим число 11 (радиус скругления в мм). Нажимаем кнопку *Apply* для продолжения данной операции.

Аналогично строим скругления радиусом 10 мм между линиями L19 и L11, радиусом 1,5 мм между линиями L1 и L3, радиусом 0,5 мм между линиями L11 и L9.

- 4.9. Построить поверхность по линиям, образующим ее контур: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>By Lines*.

Последовательно указываем линии, обходя контур, например, против хода часовой стрелки: L2, L18, L4, L1, L6, L3, L7, L9, L8, L11, L5 и L19 (всего двенадцать линий).

Для отображения поверхности выбираем последовательность:
U_M>Plot>Areas.

4.10. Для моделирования насечки построить равносторонний треугольник:
M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Polygon>Triangle.

Вводим следующие параметры: координаты центра тяжести треугольника $WP X = 19$ и $WP Y = -3$; радиус описанной окружности $Radius = 0.5$; угол поворота $Theta = 30$.

OK.

4.11. Сделать насечку при помощи булевой операции вычитания поверхностей: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Boolean>Subtract>Areas.*

На первый запрос указываем поверхность A1 (моделирующую сечение мембраны), *OK.*

На второй запрос указываем поверхность A2 (треугольник), *OK.*

В результате геометрическая модель будет представлена поверхностью A3 сложной формы, полностью соответствующей расчетной схеме (см. рисунок 5).

5. Выделить двумя сечениями область насечки для построения в ней более мелкой сетки.

5.1. Сместить начало рабочей плоскости в вершину насечки:
U_M>WorkPlane>Offset WP to>Keypoints.

Указываем мышью точку в вершине насечки, *OK.*

5.2. Повернуть рабочую плоскость на 90° вокруг оси WY: *U_M>WorkPlane>Offset WP by increments.*

Вводим:

«XY, YZ, ZX Angles»: 0,0,90

Apply.

5.3. Сместить рабочую плоскость на 0,5 мм в отрицательном направлении оси WZ.

В диалоговой панели «Offset WP» вводим:

«X, Y, Z offsets»: 0,0,-0.5

Apply.

- 5.4. Разрезать все поверхности рабочей плоскостью: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Area by WrkPlane*.
Нажимаем *Pick All*.
- 5.5. Сместить рабочую плоскость на 1 мм в положительном направлении оси WZ.
В диалоговой панели «Offset WP» вводим:
«X,Y,Z offsets»: 0,0,1
Apply.
- 5.6. Разрезать все поверхности рабочей плоскостью: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Area by WrkPlane*.
Нажимаем *Pick All*.
6. Разбить поверхности на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.
Для определения размера элементов на поверхностях в разделе «Size Controls» нажимаем кнопку *Set* строки «Areas». Указываем все поверхности кнопкой *Pick All* и в поле «Element edge length» (длина стороны элемента) вводим значение 0.3 (в мм). *Apply*.
Для сгущения сетки указываем область насечки, *OK*. В поле «Element edge length» вводим меньшее значение, например 0.1, *OK*.
Далее воспользуемся кнопкой *Set* строки «Lines». Указываем дугу скругления радиусом 0.5 мм, нажимаем *OK* и в поле «Element edge length» вводим значение 0.1, *OK*.
Затем в списке «Mesh» в качестве объектов для разбиения выбираем Areas (поверхности), в поле «Shape» (форма элементов) указываем Quad (четырёхугольная).
Устанавливаем режим Free (свободная сетка).
Для включения интеллектуальных средств построения сеток активизируем опцию «Smart Size». При помощи «бегунка» задаем первый уровень разбивки (Fine).
Для генерации сетки нажимаем кнопку *Mesh* и указываем все поверхности (*Pick All*).
7. Задать граничные условия.
Напомним, что при решении осесимметричной задачи в программе ANSYS все узлы, расположенные на оси симметрии Y, должны быть закреплены от перемещения в радиальном направлении.

Кроме того, на рассматриваемую мембрану наложены связи по контуру юбки (см. рисунок 5).

Воспользуемся командой задания перемещений на линиях: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

Указываем одну вертикальную линию слева (лежащую на оси симметрии) и две вертикальные линии справа (представляющие контур юбки), *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем UX (запрет поступательных перемещений по оси X), *Apply*.

Затем указываем верхнюю горизонтальную линию контура юбки, *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем UY (запрет поступательных перемещений по оси Y) и нажимаем *OK*.

8. Задать давление: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Lines*.

Указываем линии (всего пять) в нижней части контура сечения, *OK*.

В поле «Load PRES value» вводим значение давления, заведомо превышающее критическое, например 4 МПа. *OK*.

На рисунке 8 показана конечно-элементная модель мембраны с заданными граничными условиями и нагрузкой.

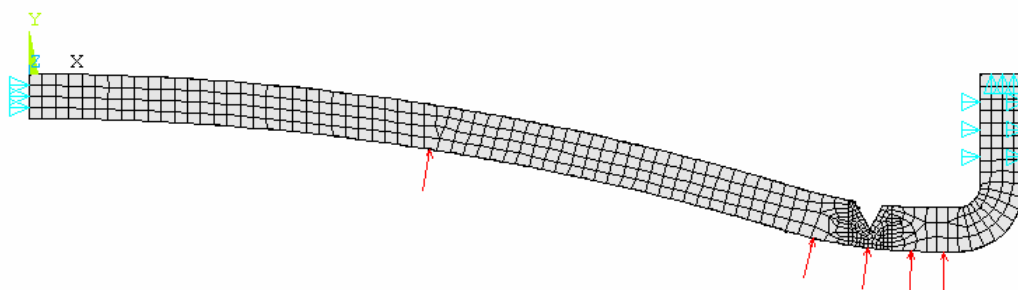


Рисунок 8 – Конечно-элементная модель с граничными условиями и нагрузкой

9. Выполнить геометрически и физически нелинейный анализ.

Сначала меняем опции анализа: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls*.

Выбираем вкладку «Basic».

Для учета больших перемещений (и деформаций) в списке «Analysis Options» выбираем значение Large Displacement Static.

Время в конце шага нагружения (поле «Time at end of loadstep» раздела «Time Control») задаем равным 1.

Таким образом, время t будет меняться в интервале от 0 до 1 и давление в момент времени t будет определяться равенством

$$p = p \cdot t,$$

где p – заданное давление (в нашем случае 4 МПа).

В списке «Automatic time stepping» (автоматический выбор шага по времени) оставляем значение по умолчанию: Prog Chosen (выбирается программой). При этом в случае плохой сходимости программа ANSYS будет автоматически уменьшать приращение нагрузки, что позволяет более точно оценить несущую способность конструкции. При хорошей сходимости размер шага по времени будет увеличиваться.

В поле «Number of substeps» (число подшагов) раздела «Time Control» вводим 200. Учитывая установку предыдущей опции, данное значение не будет соответствовать реальному числу подшагов. Однако оно точно будет определять размер первого шага по времени: $\Delta t_1 = 1/200 = 0,005$ с.

И, наконец, для сохранения промежуточных результатов на всех подшагах в списке «Frequency» (частота записи выходных величин в файл результатов) выбираем значение Write every substep.

После задания опций нелинейного анализа задача посылается на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

10. Оценить несущую способность прорывной мембраны: *M_M>General Postproc>Result Summary*.

При этом на экране появляется список наборов результатов:

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.50000E-02	1	1	1
2	0.10000E-01	1	2	2

43	0.77707	1	43	184
44	0.77736	1	44	196
45	0.77750	1	45	205
46	0.77755	1	46	210
47	0.77760	1	47	222
48	1.0000	1	999999	225

Здесь в первом столбце указывается номер набора результатов, во втором – текущее время, в третьем – номер шага по нагрузке, в четвертом – номер подшага и в пятом – общее (к данному моменту времени) число итераций. Последний подшаг здесь имеет максимально возможный номер 999999. Это говорит о том, что последний набор результатов содержит несошедшееся (т.е. физически недостоверное) решение.

Таким образом, несущую способность (или критическую нагрузку) можно оценить по времени предпоследнего подшага:

$$p_{кр} = 0,7776 p = 3,11 \text{ МПа.}$$

11. Изобразить поле напряжений по Мизесу на предпоследнем подшаге.

Сначала следует считать из файла результатов в базу данных предпоследний набор: *M_M>General Postproc>Read Results>By Pick*.

Указываем предпоследний набор результатов и нажимаем *Read*, а затем *Close*.

Далее используем команду *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu*.

Из списка доступных результатов выбираем *Nodal Solution>Stress>von Mises stress* (напряжение по Мизесу), *OK*.

Получаемое при этом изображение представлено на рисунке 9.

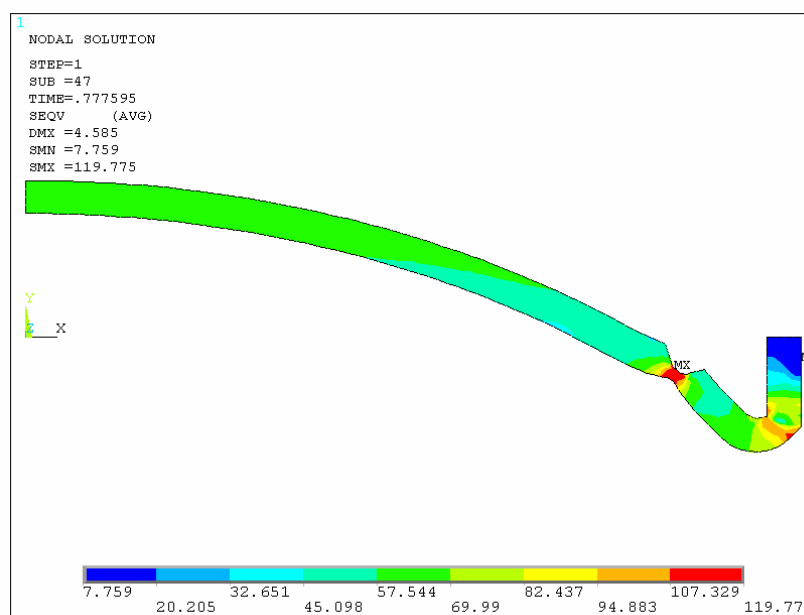


Рисунок 9 – Поле напряжений по Мизесу (МПа)

12. Включить анимацию процесса деформирования во времени: *U_M>PlotCtrls>Animate>Over Time* (данная команда выполнима только в модуле общего постпроцессора).

В поле «Number of animation frames» (число кадров анимации) вводим значение 30 для получения более плавной анимации.

Активизируем опцию «Time Range» (временной диапазон) и ниже вводим границы диапазона: 0; 0.7776.

В списке «Contour data for animation» выбираем выходную величину для изображения ее поля в процессе анимации (например, напряжение по Мизесу).

Остальные параметры оставляем без изменения.

Нажимаем *OK*.

Некоторое время займет формирование видео файла, после чего в рабочем окне будет представлена анимация переходного динамического процесса. Кроме того, появится дополнительная панель «Animation Controller», где следует включить опцию «Forward Only» (только вперед).

«Бегунок» данной панели позволяет управлять задержкой между кадрами (т.е. увеличивать или уменьшать скорость анимации).

Нажав *Stop* и *Close*, можно остановить анимацию и закрыть диалоговую панель «Animation Controller».

13. Построить зависимость пластической деформации в вершине насечки от времени: *M_M>TimeHist Postpro*.

Для задания новой переменной в диалоговой панели постпроцессора истории нагружения нажимаем кнопку *Add Data*.

При этом появляется дополнительное окно, где в списке выходных величин «Result Item» последовательно указываем *Nodal Solution>Plastic Strain>von Mises plastic strain* (эквивалентная пластическая деформация по Мизесу).

В поле «Variable Name» (имя переменной) вводим *ep1*. *OK*.

Далее на экране при помощи мыши указываем узел в вершине насечки. *OK*.

Затем в списке выделяем переменную *ep1* и нажимаем кнопку *Graph Data*.

Отображаемый при этом график представлен на рисунке 10.

14. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File*.

Вводим имя *Lab16.lgw*.

15. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT*.

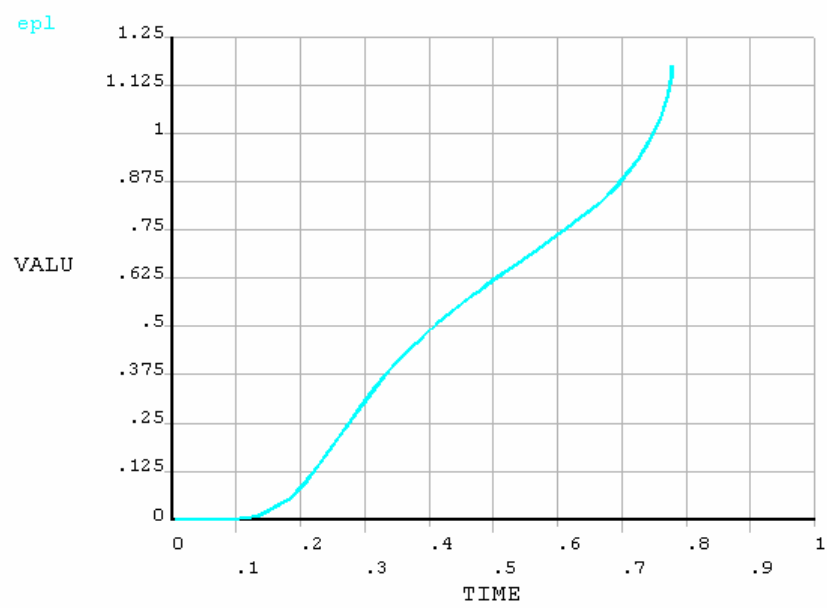


Рисунок 10 – Зависимость пластической деформации от времени

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15

«Исследование устойчивости и закритического деформирования цилиндрической панели»

Исходные данные: цилиндрическая панель нагружена сосредоточенной силой P в центре, как показано на рисунке 1; оболочка шарнирно оперта вдоль ее прямолинейных кромок и свободна вдоль криволинейных; материал линейно-упругий изотропный (модуль упругости $3,1 \cdot 10^3$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3).

Допущение: отношения наименьшей длины стороны панели и радиуса кривизны оболочки к толщине больше 10, что позволяет использовать для ее моделирования оболочечные элементы.

Цель: 1) определить критическую нагрузку методом начальной устойчивости; 2) выполнить анализ с учетом геометрической нелинейности путем задания приращений нагрузки и определить верхнюю критическую нагрузку (сравнить с предыдущим решением); 3) выполнить анализ с учетом геометрической нелинейности путем задания приращений перемещений и определить верхнюю и нижнюю критические нагрузки; 4) исследовать закритическое поведение панели методом длины дуги.

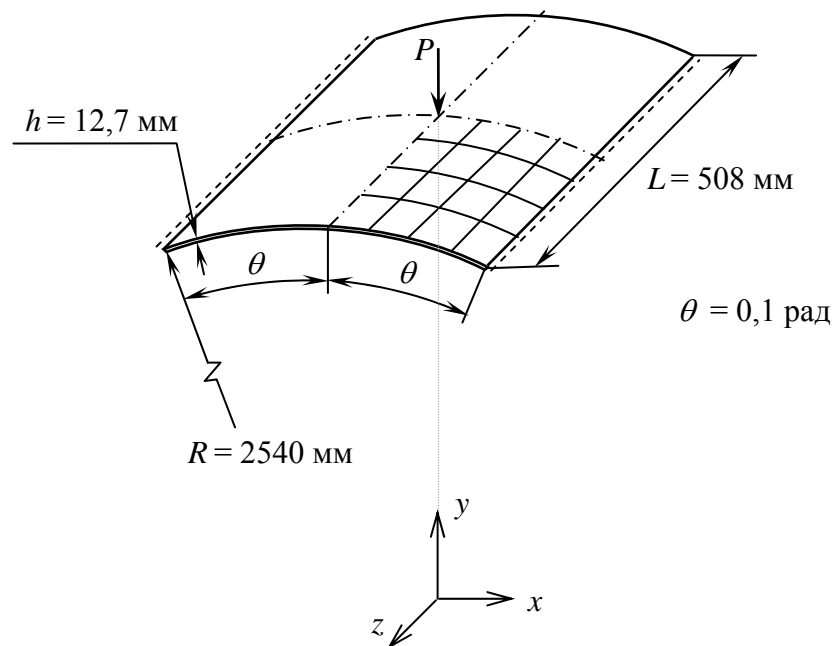


Рисунок 1 – Геометрия оболочки

Благодаря двойной симметрии конструкции и нагрузки здесь можно ограничиться рассмотрением лишь четверти панели. При этом вместо силы P нужно будет прикладывать силу $P/4$.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

I. Метод начальной устойчивости.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab15.
2. Установить тип используемых в расчете элементов – 4-узловой оболочечный элемент SHELL63: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*. Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Shell>Elastic 4node 63*, *OK* и *Close*.
3. Определить реальные постоянные для выбранного типа элементов: *M_M>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete*. Нажимаем *Add* и указываем тип элементов «Type 1 Shell63», *OK*.
В соответствующие поля вводим:
«Real Constant Set No»: 1 (номер набора реальных постоянных)
«Shell thickness at node I» ТК(I): 12.7 (толщина оболочки, мм)
OK.
Закрываем диалоговую панель кнопкой *Close*.
4. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.
В правом окне последовательно (двойным щелчком мыши) выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.
Вводим:
EX: $3.1e3$ (модуль упругости, МПа)
PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)
OK.
Закрываем панель.
5. Для удобства ввода исходных данных определить скалярные параметры: *U_M>Parameters>Scalar Parameters*.
В поле «Selection» последовательно вводим: $R=2540$; $L=508$; $pi=acos(-1)$; $theta=0.1*180/pi$. После каждого ввода здесь необходимо нажать кнопку *Accept* (принять).
Закрываем панель кнопкой *Close*.
6. Построить точки: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS*.

Вводим координаты точек (используя буквенные обозначения скалярных параметров) согласно следующей таблице:

Номер точки	x, мм	y, мм	z, мм
1	0	0	0
2	0	0	$L/2$
3	0	R	0

Включаем нумерацию геометрических объектов: $U_M > PlotCtrls > Numbering$, отмечаем флаги «Keypoint numbers», «Line numbers» и «Area numbers».

Для лучшего обзора точек установить с помощью кнопки *Isometric View* панели управления видом изометрическую проекцию.

Первые две точки здесь являются вспомогательными, они будут использоваться для определения оси вращения и траектории вытягивания. Третья точка представляет собой центральную точку панели.

7. Построить дугу окружности путем вращения точки 3 относительно оси, заданной точками 1 и 2, на угол θ : $M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Keypoints > About Axis$.

При этом необходимо указать курсором мыши сначала точку 3, а затем после нажатия кнопки *OK* точки 1 и 2.

Далее в поле «Arc length in degrees» (длина дуги в градусах) вводим отрицательное значение $-\theta$ (направление вращения здесь определяется правилом правого винта). *OK*.

Отображаем на экране все объекты (команда $U_M > Plot > Multi-Plots$) и устанавливаем подходящий масштаб (кнопка *Fit View* панели управления видом).

8. Определить траекторию вытягивания путем построения прямой линии по точкам 1 и 2: $M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Line$.

Указываем точки 1 и 2, *OK*.

9. Построить цилиндрическую поверхность путем вытягивания дуги вдоль заданной траектории: $M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Lines > Along Lines$.

Сначала указываем дугу (линия L1), а затем после нажатия кнопки *OK* – траекторию (линия L2). *OK*.

10. Удалить вспомогательные геометрические объекты (т.е. линию L2 и принадлежащие ей точки 1 и 2): *M_M>Preprocessor>Modeling>Delete>Line and Below*.

Указываем линию L2, *OK*.

Для отображения поверхности выбираем последовательность *U_M>Plot>Areas* (рисунок 2).

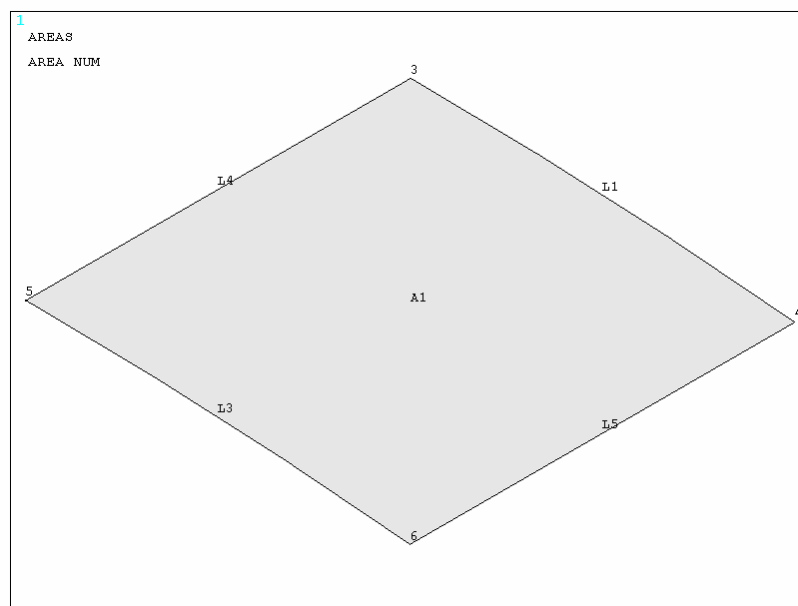


Рисунок 2 – Цилиндрическая поверхность

11. Разбить поверхность на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

Следует отметить, что для получения результатов приемлемой точности здесь достаточно построить сетку 8x8.

Для этого нажимаем кнопку *Set* строки «Global» и в поле «No. of element divisions» (число делений линий на элементы) вводим значение 8.

Затем в списке «Mesh» в качестве объектов для разбиения выбираем Areas (поверхности), в поле «Shape» (форма элементов) указываем Quad (четырёхугольная).

Устанавливаем режим Mapped (регулярная сетка).

Для генерации сетки нажимаем кнопку *Mesh* и указываем поверхность A1, *OK*.

12. Задать граничные условия симметрии: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>Symmetry B.C. >...with Area*.

Сначала указываем линию L1 (см. рисунок 2), выбор фиксируем кнопкой *OK*.

Затем указываем прилегающую к линии поверхность A1, нажимаем *Apply* для продолжения работы с данной командой.

Условия симметрии на линии L4 задаются аналогично.

13. Задать граничные условия шарнирного опирания на прямолинейной кромке: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

Указываем линию L5 (см. рисунок 2) и после нажатия кнопки *OK* выбираем компоненту UX (поступательное перемещение по оси x). *Apply*.

Поскольку при задании граничных условий на линиях можно выбрать только одну компоненту (или сразу все), необходимо повторить данные действия еще дважды, указывая компоненты UY и UZ.

14. Задать сосредоточенную силу в центре панели: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints*.

Поскольку значение силы нам неизвестно, зададим единичную нагрузку, например $P = 1$ кН.

Сначала указываем точку 3 (см. рисунок 2), *OK*.

Затем в списке «Direction of force/moment» (направление силы/момента) выбираем строку FY и в поле «Force/moment value» (значение силы/момента) вводим число -250 (знак минус говорит о том, что сила действует против оси).

Напомним, что здесь мы задаем не полную силу, а $P/4$.

15. Выполнить линейный статический анализ (первый этап).

Как отмечалось ранее, задача начальной устойчивости решается в два этапа. Сначала проводится линейный статический анализ, а затем решается проблема собственных значений.

Проверяем, установлен ли статический анализ (команда *M_M>Solution>Analysis Type>New Analysis*).

Далее в меню выбираем последовательность *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls*; включаем опцию «Calculate prestress effects» для создания начальных напряжений.

И, наконец, посылаем задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

По окончании статического анализа следует выйти из решателя (команда *M_M>Finish*).

16. Выполнить анализ начальной устойчивости (второй этап).

Сначала с помощью команды *M_M>Solution>Analysis Type>New Analysis* выбираем тип анализа Eigen Buckling (анализ начальной устойчивости).

Далее для задания опций анализа используем команду: *M_M>Solution>Analysis Type>Analysis Options*.

В поле «No. of modes to extract» (число извлекаемых собственных значений и векторов) вводим число 1.

Остальные значения данной и следующей диалоговых панелей принимаем по умолчанию (нажатием кнопки *OK*).

Снова посылаем задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

17. Определить критическую силу: *M_M>General Postproc>Result Summary*.

На экране появляется список, где во втором столбце, содержатся собственные значения (в нашем случае только одно, наименьшее):

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	10.620	1	1	1

Для рассматриваемой задачи $\lambda_1 = 10,62$ и, следовательно,

$$P_{кр} = \lambda_1 P = 10,62 \text{ кН.}$$

Можно ли доверять данному решению? Ответить на этот вопрос можно лишь, выполнив нелинейный анализ.

18. Отобразить на экране дисплея форму потери устойчивости.

Сначала нужно считать из файла результаты расчета, соответствующие второму этапу: *M_M>General Postproc>Read Results>Last Set*.

Далее для вывода данного изображения используем команду *M_M>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape*.

Форма потери устойчивости рассматриваемой конструкции представлена на рисунке 3.

Видно, что панель при потере устойчивости прогибается навстречу приложенной силы. Это связано с тем, что собственный вектор (характеризующий в данном случае форму потери устойчивости) даже после нормирования определяется с точностью до знака.

Таким образом, абсолютные значения перемещений, а также их знак здесь не имеют физического смысла.

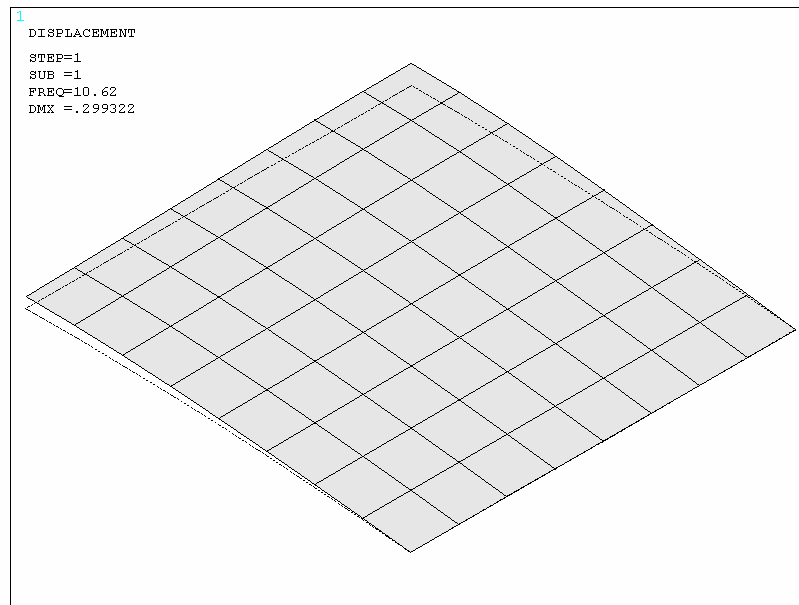


Рисунок 3 – Форма потери устойчивости

II. Геометрически нелинейный анализ (задание приращений нагрузки).

19. Увеличить значение сосредоточенной силы: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints.*

Анализ начальной устойчивости показывает, что критическая нагрузка значительно превышает заданную силу в 1 кН.

Увеличим нагрузку до 4 кН.

Для этого сначала указываем точку 3, а затем для силы FY вместо значения -250 вводим -1000. *OK.*

20. Выполнить геометрически нелинейный анализ.

Сначала с помощью команды *M_M>Solution>Analysis Type>New Analysis* устанавливаем статический анализ (Static).

Далее меняем опции анализа: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls.*

При этом появляется диалоговая панель с большим количеством вкладок. Выбираем вкладку «Basic» (рисунок 4).

Для учета больших перемещений в списке «Analysis Options» выбираем значение Large Displacement Static.

Время в конце шага нагружения (поле «Time at end of loadstep» раздела «Time Control») задаем равным 1.

Таким образом, время t будет меняться в интервале от 0 до 1. В статическом анализе данная переменная является фактически параметром нагружения, т.е. нагрузка в момент времени t будет определяться равенством

$${}^tP = P \cdot t,$$

где P – заданная нагрузка (в нашем случае 4 кН).

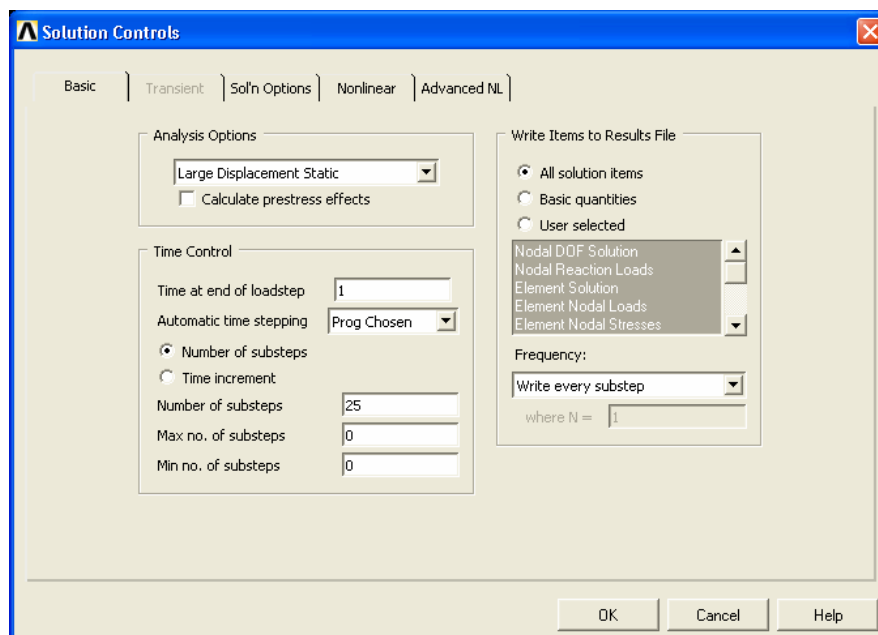


Рисунок 4 – Задание опций нелинейного анализа

С целью повышения точности расчета интервал изменения параметра t (процесс нагружения) делится на ступени (или подшаги) нагружения.

В поле «Number of substeps» раздела «Time Control» вводим число подшагов, например 25.

Здесь следует отметить, что чем больше подшагов, тем точнее получается решение. Обычно число подшагов выбирается из тех соображений, чтобы в пределах каждого подшага перемещения были малы по сравнению с размерами тела.

И, наконец, для сохранения промежуточных результатов на всех подшагах в списке «Frequency» (частота записи выходных величин в файл результатов) выбираем значение Write every substep.

После задания опций нелинейного анализа задача посылается на счет: $M_M > Solution > Solve > Current LS$.

21. Определить верхнюю критическую нагрузку.

Входим в постпроцессор истории нагружения: $M_M > TimeHist Postpro$.

При этом автоматически появляется диалоговая панель для работы с переменными (рисунок 5). По умолчанию здесь определена только одна переменная TIME (время).

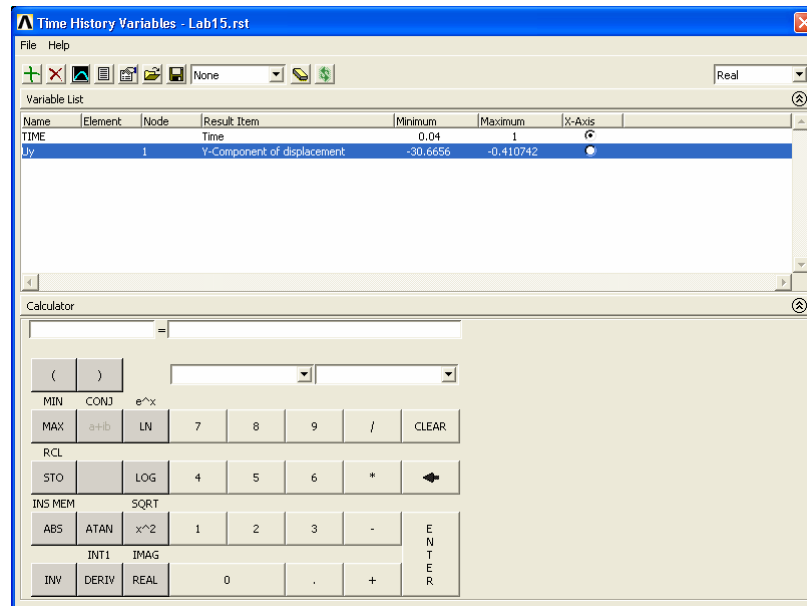


Рисунок 5 – Работа с переменными в постпроцессоре истории нагружения

Для задания новой переменной нажимаем кнопку *Add Data* (первая слева в панели инструментов).

При этом появляется диалоговая панель, где в списке выходных величин «Result Item» последовательно указываем *Nodal Solution*>*DOF Solution*>*Y-Component of displacement* (перемещение по оси *y*).

В поле «Variable Name» (имя переменной) вводим *Uy*. *OK*.

Далее на экране при помощи мыши указываем узел в центре панели, где приложена сила. *OK*.

После этого в списке существующих переменных появляется новая запись.

Для просмотра значений заданной переменной в текстовом формате ее нужно указать в списке и нажать кнопку *List Data* (четвертая слева в панели инструментов):

TIME	Uy
0.40000E-01	-0.410742
0.80000E-01	-0.838741
0.14000	-1.51760
0.23000	-2.63748
0.36500	-4.65229
0.45613	-6.44437
0.54725	-9.31290
0.55971	-10.2799
0.56531	-10.9587
0.56645	-10.8204
0.56758	-27.2309
0.56928	-27.2438
0.57184	-27.2678
0.57567	-27.3037
0.58141	-27.3574
0.59003	-27.4373

0.60296	-27.5559
0.62235	-27.7312
0.65144	-27.9886
0.69508	-28.3628
0.76053	-28.9001
0.85871	-29.6589
1.0000	-30.6656

Видно, что после $t = 0,56645$ происходит скачкообразное увеличение прогиба, т.е. оболочка теряет устойчивость с перескоком. Иногда при этом значении силы решение расходится.

Таким образом, верхняя критическая нагрузка $P_{кр}^B$ для рассматриваемой конструкции составляет $4 \cdot 0,56645 = 2,27$ кН, что почти в пять раз меньше критической нагрузки $P_{кр}^0$, найденной методом начальной устойчивости.

Таким образом, метод начальной устойчивости для решения подобных задач не применим!!!

22. Построить кривую равновесных состояний.

Для изображения зависимости «сила – перемещение» в привычном виде введем новые переменные на основе существующих с помощью калькулятора диалоговой панели постпроцессора истории нагружения (рисунок 5). В первом поле калькулятора перед знаком равенства вводим имя новой переменной: P.

Ниже расположены два списка, причем из второго можно выбирать введенные ранее переменные. Выбираем TIME.

Данная величина появляется в поле после знака равенства.

Далее, используя кнопки калькулятора, выполняем умножение на 4 (т.к. заданная сила равна 4 кН).

Завершаем ввод нажатием кнопки *Enter*.

Для следующей переменной задаем имя W, затем в поле после знака равенства ставим минус и в расположенном ниже списке выбираем значение Uy.

В столбце «X-Axis» списка «Variable List» для переменной W устанавливаем признак использования ее в качестве оси абсцисс.

Далее в этом же списке указываем переменную P и нажимаем кнопку *Graph Data* (третья слева в панели инструментов).

Отображаемый при этом график представлен на рисунке 6.

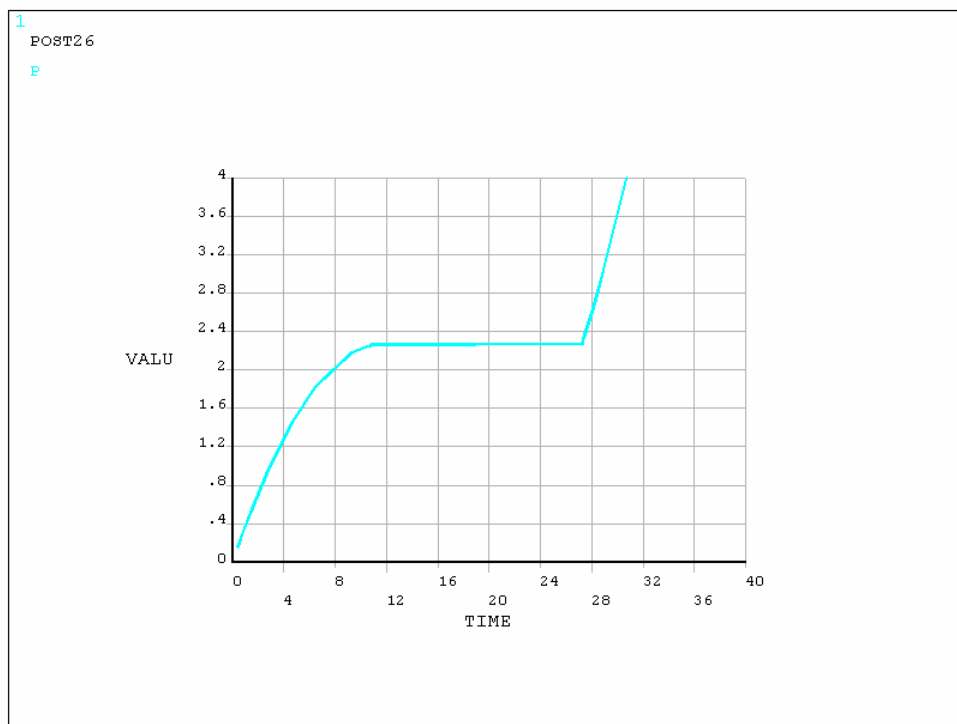


Рисунок 6 – Зависимость сила – перемещение, получаемая при задании приращений нагрузки

Видно, что при задании приращений нагрузки нельзя построить полную кривую равновесных состояний, поскольку данный прием не позволяет проходить через предельные точки. В этих точках матрица тангенциальной жесткости сингулярная, и решение либо расходится, либо происходит перескок на другую устойчивую ветвь кривой равновесных состояний (как в нашем случае).

III. Геометрически нелинейный анализ (задание приращений перемещений).

23. Удалить нагрузку: *M_M>Solution>Define Loads>Delete>Structural>Force/Moment>On Keypoints.*

Указываем точку 3, *OK.*

После этого появляется диалоговая панель, где необходимо выбрать направление удаляемой силы (в нашем случае FY, хотя можно оставить значение по умолчанию ALL, означающее, что будут удалены все силы, действующие в указанной точке). *OK.*

24. Вместо силы приложить в центральной точке перемещение: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints.*

Снова указываем точку 3, *OK.*

В списке «DOFs to be constrained» выбираем компоненту UY и в поле «Displacement value» вводим отрицательное значение -30 (в мм).

OK.

25. Выполнить геометрически нелинейный анализ.

Заданные ранее опции анализа в основном нас устраивают. Поменяем лишь число подшагов и отключим опцию автоматического изменения шага: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls*.

Выбираем вкладку «Basic» и в поле «Number of substeps» вводим число 30. В поле «Automatic time stepping» (автоматическое изменение шага по времени) вместо значения Prog chosen (выбирается программой) указываем Off (отключить). При этом будет использоваться постоянный шаг по времени (нагрузке).

Посылаем задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

26. Построить кривую равновесных состояний.

Входим в постпроцессор истории нагружения: *M_M>TimeHist Postpro*.

Для задания новой переменной нажимаем кнопку *Add Data*.

В древовидной структуре «Result Item» последовательно указываем *Reaction Forces>Structural Forces>Y-Component of force* (реакция по оси y).

В поле «Variable Name» вводим имя Ry. OK.

Далее на экране мышью указываем узел в центре панели, где приложена сила. OK.

С помощью калькулятора определим новые переменные.

В первом поле калькулятора перед знаком равенства вводим имя W.

После знака равенства вводим число 30 (заданное перемещение) и нажимаем кнопку умножения калькулятора. После этого из списка калькулятора выбираем TIME. Завершаем ввод нажатием кнопки *Enter*.

Для следующей переменной определяем имя P, затем в поле после знака равенства вводим: -0.004 (для получения значений силы для полной конструкции в кН), затем нажимаем кнопку умножения и в списке выбираем переменную Ry.

В столбце «X-Axis» списка «Variable List» для переменной W устанавливаем признак использования ее в качестве оси абсцисс.

Далее выбираем переменную P и нажимаем кнопку *Graph Data*.

Получаемый в этом случае график показан на рисунке 7.

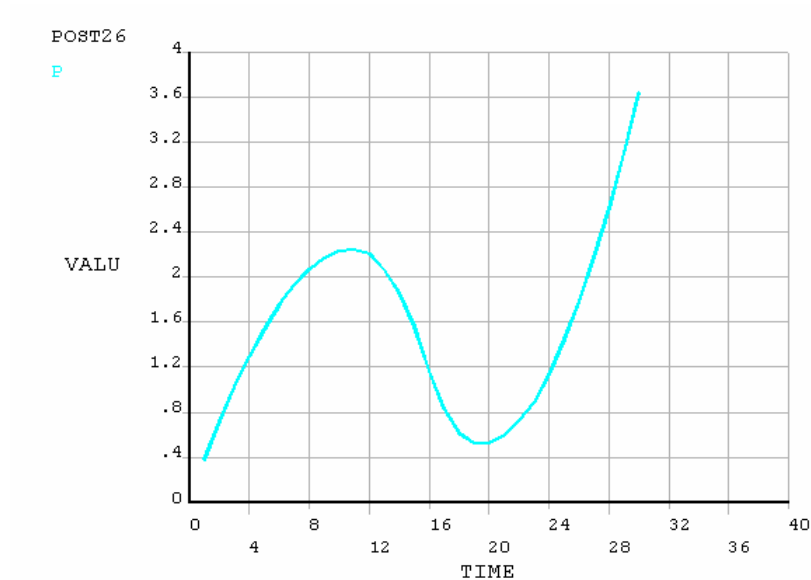


Рисунок 7 – Зависимость сила – перемещение, получаемая при задании приращений перемещений

27. Определить верхнюю и нижнюю критические нагрузки.

Оставаясь в постпроцессоре истории нагружения, нажимаем кнопку *List Data*:

TIME	P
0.33333E-01	0.378526
0.66667E-01	0.720438
0.10000	1.02700
0.13333	1.29922
0.16667	1.53774
0.20000	1.75923
0.23333	1.93177
0.26667	2.06904
0.30000	2.16991
0.33333	2.23118
0.36667	2.24776
0.40000	2.21172
0.43333	2.06778
0.46667	1.86789
0.50000	1.56015
0.53333	1.17250
0.56667	0.828485
0.60000	0.617896
0.63333	0.526659
0.66667	0.525477
0.70000	0.596451
0.73333	0.729056
0.76667	0.890694
0.80000	1.13421
0.83333	1.44735
0.86667	1.78666
0.90000	2.17501
0.93333	2.61268
0.96667	3.10033
1.0000	3.63885

Анализ полученных данных показывает, что сила сначала возрастает до некоторого значения, которое характеризует верхнюю критическую нагрузку, затем убывает до значения, соответствующего нижней критической нагрузке, после чего снова возрастает.

Таким образом, для рассматриваемой конструкции $P_{кр}^B = 2,25$ кН и $P_{кр}^H = 0,53$ кН. Здесь для верхней критической нагрузки получается более точное значение.

Напомним, что данный прием имеет ряд существенных ограничений. Он применим лишь в случае действия сосредоточенной нагрузки и не позволяет определять участки кривой равновесных состояний, не однозначные по перемещению.

IV. Использование метода длины дуги.

28. Удалить заданное в центральной точке перемещение: *M_M>Solution>Define Loads>Delete>Structural>Displacement>On Keypoints.*

Указываем точку 3, *OK.*

В списке «DOFs to be deleted» выбираем UY (направление удаляемого перемещения), *OK.*

29. Снова задать сосредоточенную силу в центре панели: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints.*

Здесь также необходимо сначала указать точку 3, а затем для силы FY ввести значение -1000.

30. Включить метод длины дуги: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls.*

Выбираем вкладку «Advanced NL» и активизируем опцию «Active arc-length method». Появляющееся при этом предупреждение можно проигнорировать; закрываем его кнопкой *Close.*

В поле «Max multiplier» (максимальный множитель) вводим значение 4, а в поле «Min multiplier» (минимальный множитель) – значение 0.1.

Данные параметры используются для задания пределов изменения длины дуги от одного подшага к другому, т.е. в случае хорошей сходимости длина дуги может за один подшаг увеличиться максимум в четыре раза, а при плохой – уменьшиться максимум в десять раз.

OK.

31. Выполнить нелинейный анализ с использованием метода длины дуги: *M_M>Solution>Solve>Current LS.*

32. Построить кривую равновесных состояний.

Входим в постпроцессор истории нагружения: *M_M>TimeHist Postpro.*

Для определения переменной нажимаем кнопку *Add Data.*

В качестве выходной величины выберем перемещение по оси *y* (*Nodal Solution>DOF Solution>Y-Component of displacement*) в узле в центре панели. Присвоим ей имя *Uy.*

В первом поле калькулятора перед знаком равенства вводим имя новой переменной *P.* Из списка калькулятора выбираем *TIME* и выполняем умножение данной переменной на *4.* Завершаем ввод нажатием кнопки *Enter.*

Для следующей переменной задаем имя *W,* затем в поле после знака равенства ставим минус и в списке выбираем значение *Uy.*

В списке «*Variable List*» для переменной *W* устанавливаем признак использования ее в качестве оси абсцисс.

Далее выбираем переменную *P* и нажимаем кнопку *Graph Data.*

Кривая равновесных состояний будет иметь точно такой же вид, как и на рисунке 7.

33. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя *Lab15.lgw.*

34. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

Дополнительное задание: найти верхнюю и нижнюю критические силы для цилиндрической панели, представленной на рисунке 1, но с толщиной $h = 6,3$ мм. Кривую равновесных состояний записать в файл *Lab15000.png:* *U_M>PlotCtrls>Hard Copy>To File.* При этом использовать установки, как показано на рисунке справа.



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

«Расчет устойчивости оболочки в виде усеченного конуса под действием внешнего давления»

Исходные данные: коническая оболочка толщиной 2 см нагружена внешним давлением p и имеет следующие размеры: $L=1$ м; $R_1=1$ м; $R_2=0,5$ м; $\alpha=60^\circ$ (рисунок 1). Свойства материала: модуль упругости $1 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3. Оболочка жестко закреплена по контуру меньшего основания и шарнирно оперта по контуру большего основания.

Допущение: поскольку докритические перемещения малы и возможна бифуркация форм равновесия, можно ограничиться решением задачи начальной устойчивости.

Цель: определить критическое давление и форму потери устойчивости.

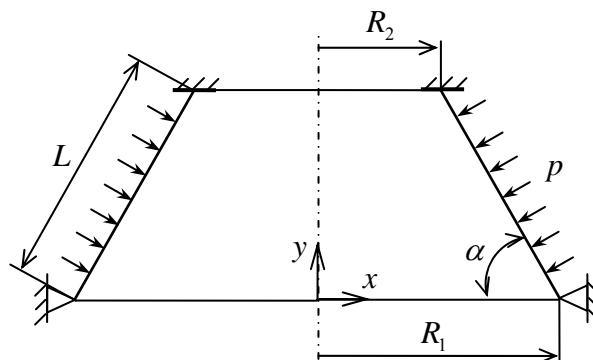


Рисунок 1 – Геометрия оболочки

Рассматриваемая конструкция и нагрузка симметричны относительно оси оболочки. Однако при потере устойчивости могут появиться неосесимметричные формы, поэтому здесь следует моделировать коническую оболочку полностью. Начало системы координат поместим в центр нижнего основания, как показано на рисунке 1.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab14.
2. Установить тип используемых в расчете элементов – 4-узловой оболочечный элемент SHELL63: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete.*

- Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Shell>Elastic 4node 63*, *OK* и *Close*.
3. Определить реальные постоянные для выбранного типа элементов: *M_M>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete*.
- Нажимаем *Add* и указываем тип элементов «Type 1 Shell63», *OK*.
- В соответствующие поля вводим:
- «Real Constant Set No»: 1 (номер набора реальных постоянных)
 «Shell thickness at node I» ТК(I): 20 (толщина оболочки, мм)
- OK*.
- Закрываем диалоговую панель кнопкой *Close*.
4. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.
- В правом окне последовательно (двойным щелчком мыши) выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.
- Вводим:
- EX: $1e5$ (модуль упругости, МПа)
 PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)
- OK*.
- Закрываем панель.
5. Для удобства ввода исходных данных определить скалярные параметры: *U_M>Parameters>Scalar Parameters*.
- В поле «Selection» последовательно вводим: $R1=1000$; $R2=500$; $L=1000$; $pi=acos(-1)$; $H=L*\sin(60*pi/180)$. После каждого ввода здесь необходимо нажать кнопку *Accept* (принять).
- Закрываем панель кнопкой *Close*.
6. Построить точки: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS*.
- Вводим координаты точек (используя буквенные обозначения скалярных параметров) согласно следующей таблице:

Номер точки	x, мм	y, мм	z, мм
1	0	0	0
2	0	H	0
3	R1	0	0
4	R2	H	0

Включаем нумерацию геометрических объектов: *U_M>PlotCtrls>Numbering*, отмечаем флаги «Keypoint numbers», «Line numbers» и «Area numbers».

7. Построить прямую линию – образующую конической поверхности: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line*.

Указываем точки 3 и 4, *OK*.

8. Построить коническую поверхность путем вращения образующей относительно центральной оси: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Lines>About Axis*.

Сначала указываем курсором мыши образующую (линия L1), *OK*.

Затем указываем точки 1 и 2, определяющие ось вращения, *OK*.

В соответствующие поля вводим:

«Arc length in degrees»: 360 (длина дуги в градусах)

«No. of area segments»: 4 (число сегментов деления по окружности)

OK.

При этом срединная поверхность конической оболочки будет представлена четырьмя поверхностями (рисунок 2).

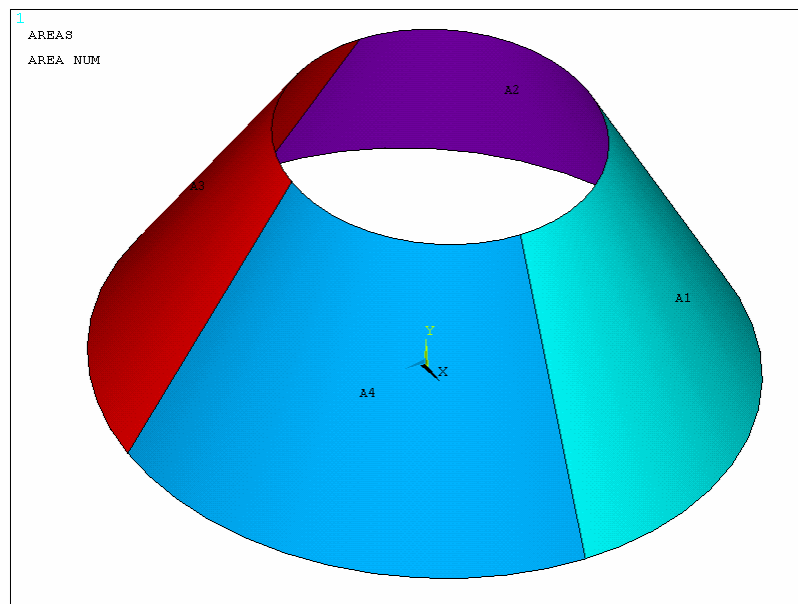


Рисунок 2 – Поверхности с нумерацией

9. Выполнить разбивку геометрической модели на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

Для задания глобального размера элементов нажимаем кнопку *Set* строки «Global» и в поле «Element edge length» вводим число 50 (в мм).

Затем в списке «Mesh» в качестве объектов для разбиения выбираем Areas (поверхности), в поле «Shape» (форма элементов) указываем Quad (четырёхугольная).

Поскольку построенные поверхности являются «правильными», то можно установить режим Mapped (регулярная сетка).

Для генерации сетки далее следует нажать кнопку *Mesh* и указать все поверхности (*Pick All*).

10. Задать граничные условия: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

Сначала указываем четыре линии на контуре меньшего основания, *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» (степени свободы, которые должны быть ограничены) выбираем значение All DOF (все степени свободы).

Apply.

Далее указываем четыре линии на контуре большего основания, *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем значение UX (поступательное перемещение по оси x). *Apply*.

Следует отметить, что при задании граничных условий на линиях можно выбрать только одну компоненту (или сразу все).

Повторяем последнюю операцию еще дважды, указывая компоненты UY и UZ. В конце нажимаем *OK*.

11. Приложить нагрузку: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Areas*.

Поскольку значение внешнего давления нам заранее неизвестно, зададим единичную нагрузку $p = 1$ МПа.

Нажимаем кнопку *Pick All* для указания всех поверхностей.

В поле «Load PRES value» вводим отрицательное число -1, *OK*.

Для проверки правильности задания нагрузки следует изобразить давление в виде стрелок: *U_M>PlotCtrls>Symbols...*

В списке «Show pres and convect as» выбираем Arrows.

Чтобы увидеть стрелки нужно отобразить все объекты (*U_M>Plot>Multi-Plots*) или только поверхности (*U_M>Plot>Areas*), поскольку давление прикладывалось именно к ним.

Стрелки должны быть направлены вовнутрь.

12. Выполнить линейный статический анализ (первый этап).

Напомним, что задача начальной устойчивости решается в два этапа. Сначала проводится линейный статический анализ, а затем решается проблема собственных значений.

Прежде всего, здесь следует с помощью команды *M_M>Solution>Analysis Type>New Analysis* проверить, установлен ли статический анализ (Static).

Далее необходимо выполнить команду *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls* и включить опцию «Calculate prestress effects» для создания начальных напряжений, чтобы можно было их использовать на втором этапе.

Затем командой *M_M>Solution>Solve>Current LS* задача посылается на счет.

По окончании расчета во избежание появления предупреждающего сообщения о том, что нельзя изменить тип анализа, оставаясь в блоке решения, необходимо выйти из решателя (команда *M_M>Finish*).

13. Выполнить анализ начальной устойчивости (второй этап).

Сначала с помощью команды *M_M>Solution>Analysis Type>New Analysis* выбираем тип анализа Eigen Buckling (анализ начальной устойчивости).

Далее для задания опций анализа выбираем следующую последовательность: *M_M>Solution>Analysis Type>Analysis Options*.

В поле «No. of modes to extract» (число извлекаемых собственных значений и векторов) вводим число 1.

Остальные значения данной и следующей диалоговых панелей принимаем по умолчанию (нажатием кнопки *OK*).

Так же как и на первом этапе, задача посылается на счет командой *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

14. Определить критическую нагрузку.

На втором этапе определяется наименьшее собственное значение λ_1 , показывающее во сколько раз критическая нагрузка больше приложенной.

Собственное значение можно вывести на экран дисплея командой *M_M>General Postproc>Result Summary*:

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	8.9802	1	1	1

Для рассматриваемой задачи $\lambda_1 = 8,98$ и, следовательно,

$$p_{кр} = \lambda_1 p = 8,98 \text{ МПа.}$$

15. Отобразить на экране дисплея форму потери устойчивости.

Прежде всего, здесь следует считать результаты расчета, соответствующие второму этапу: *M_M>General Postproc>Read Results>Last Set*.

Далее для вывода данного изображения можно воспользоваться командой *M_M>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape*.

Форма потери устойчивости рассматриваемой конструкции представлена на рисунке 3.

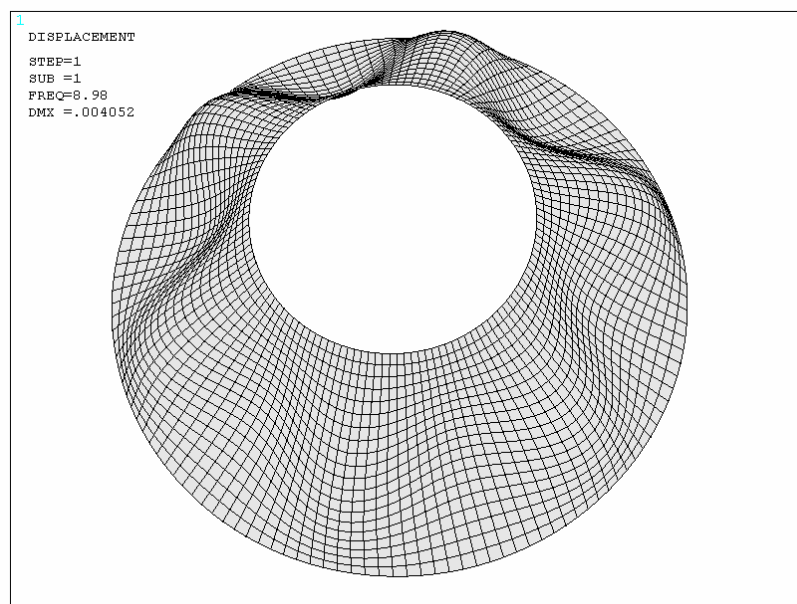


Рисунок 3 – Форма потери устойчивости

Видно, что при потере устойчивости в окружном направлении образуется шесть волн, а в меридиональном – лишь одна полуволна.

Следует отметить, что собственный вектор, характеризующий эту форму, определяется с точностью до постоянного множителя, и поэтому абсолютные значения перемещений и их знак здесь не имеют физического смысла.

16. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File*.

Вводим имя Lab14.lgw.

17. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT*.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

«Исследование неустановившихся колебаний пластины при поперечном ударе»

Исходные данные: рассматривается та же пластина, что и в предыдущей лабораторной работе. Форма импульса поперечной ударной силы P , действующей в центре шайбы, представлена на рисунке 1.

Цель: определить динамический отклик системы на действие ударной нагрузки и построить зависимости прогибов характерных точек от времени.



Рисунок 1 – Форма импульса ударной силы

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab13.
2. Считать из файла предыдущую базу данных: $U_M > File > Resume from...$
Указываем файл Lab12.db.
3. Установить новый тип анализа – анализ переходных динамических процессов: $M_M > Solution > Analysis Type > New analysis$.
Указываем анализ Transient, *OK*.
Выбираем метод решения Full (полный), *OK*.
4. Задать опции первого шага нагружения: $M_M > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls$.
При этом появляется диалоговая панель с большим количеством вкладок.
Выбираем вкладку «Basic».
Время в конце первого шага нагружения (поле «Time at end of loadstep» раздела «Time Control») задаем равным 0.03 (в сек).

В поле «Number of substeps» того же раздела вводим число подшагов равным 200. Здесь следует отметить, что чем больше подшагов, тем точнее получается решение.

Для сохранения промежуточных результатов на всех подшагах в списке «Frequency» (частота записи выходных величин в файл результатов) указываем значение Write every substep (записывать каждый подшаг).

Выбираем вкладку «Transient».

В поле «Stiffness matrix multiplier (BETA)» (множитель β для матрицы жесткости) раздела «Damping Coefficients» (коэффициенты демпфирования) вводим значение $2e-3$ (в сек).

И, наконец, для параметра *KBC* в разделе «Full Transient Options» выбираем значение Stepped loading (ступенчатое приложение нагрузки). При этом нагрузка от шага к шагу будет изменяться скачкообразно, т.е. мгновенно.

5. Задать значение нагрузки в конце первого шага нагружения: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints.*

Указываем «твердую» точку в центре шайбы и нажимаем *OK*.

Затем в списке «Direction of force/mom» выбираем направление силы FZ и в поле «Force/moment value» вводим число 10 (сила, Н).

6. Записать первый шаг нагружения в файл: *M_M>Solution>Load Step Opts>Write LS File.*

В поле «Load step file number» (номер файла шага нагружения) вводим число 1.

При этом данные по первому шагу нагружения будут записаны в текстовый файл Lab13.s01. При необходимости его можно редактировать.

7. Задать опции второго шага нагружения: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls.*

Выбираем вкладку «Basic».

Время в конце второго шага нагружения в поле «Time at end of loadstep» задаем равным 0.5 (в сек).

В поле «Number of substeps» вводим число подшагов равным 300.

Остальные параметры оставляем без изменения.

8. Задать значение нагрузки в конце второго шага нагружения: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints.*

Указываем «твердую» точку в центре шайбы и нажимаем *OK*.

Затем в списке «Direction of force/mom» выбираем направление силы FZ и в поле «Force/moment value» вводим число 0.

9. Записать второй шаг нагружения в файл: *M_M>Solution>Load Step Opts>Write LS File*.

В поле «Load step file number» вводим номер 2.

При этом данные по второму шагу нагружения будут записаны в текстовый файл Lab13.s02.

10. Выполнить переходный динамический анализ: *M_M>Solution>Solve>From LS Files*.

Данная команда позволяет получить решения сразу для нескольких шагов нагружения, информация по которым считывается из файлов.

В соответствующие поля вводим:

«Starting LS file number»: 1 (номер начального файла шага нагружения)

«Ending LS file number»: 2 (номер конечного файла шага нагружения)

«File number increment»: 1 (приращение номеров файлов)

OK.

Следует отметить, что сообщение «Solution is done!» (решение выполнено) здесь будет появляться после завершения счета по каждому шагу нагружения.

11. Построить зависимости прогибов характерных точек от времени: *M_M>TimeHist Postpro*.

При входе в постпроцессор истории нагружения автоматически появляется диалоговая панель для работы с переменными. По умолчанию в переходном динамическом анализе здесь определена только одна переменная TIME (время).

Для задания новой переменной нажимаем кнопку  (*Add Data*).


В списке «Result Item» выбираем перемещение по оси *z* (*Nodal Solution>DOF Solution>Z-Component of displacement*), *OK*.

По умолчанию данной переменной присваивается имя UZ_2.

Указываем узел в центре шайбы, *Apply*.

Аналогично определяем вторую переменную – перемещение по оси *z* в узле, расположенном в свободном углу пластины (имя по умолчанию UZ_3).

Если после нажатия в панели указания кнопки *OK* переменная UZ_3 не появляется в списке, необходимо заново выполнить последнюю команду и в конце вместо *OK* нажать *Apply*. При этом диалоговую панель «Add Time-History Variable» следует закрыть, воспользовавшись кнопкой *Cancel*.

Для построения интересующих нас графиков в списке «Variable List» выбираем переменные UZ_2 и UZ_3 и нажимаем кнопку  (*Graph Data*). Отображаемый при этом график представлен на рисунке 2.

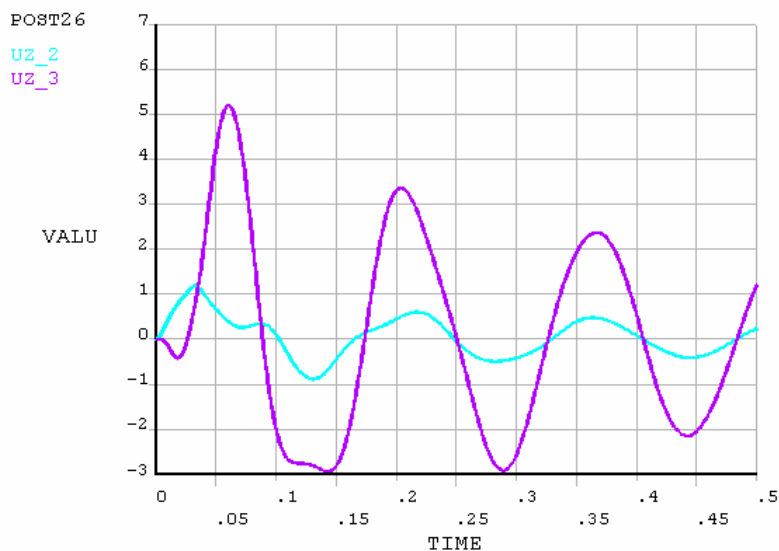


Рисунок 2 – Зависимости прогибов от времени

Следует отметить, что в рассматриваемом случае после удара пластина начинает совершать свободные затухающие колебания, так как было задано демпфирование (при помощи коэффициента β). При этом колебания происходят в основном по первому тону (т.е. с частотой 6,42 Гц), поскольку они менее всего подвержены демпфированию.

Для того чтобы увидеть колебания, соответствующие второму тону и т.д., необходимо отключить демпфирование. Это легко сделать путем изменения файлов шагов нагружения Lab13.s01 и Lab13.s02, задавая для параметра BETAD значение 0. После редактирования данных файлов необходимо заново выполнить анализ переходного динамического процесса.

12. Включить анимацию переходного динамического процесса: *U_M> PlotCtrls>Animate>Over Time* (для выполнения данной команды необходимо предварительно войти в общий постпроцессор).

В поле «Number of animation frames» (число кадров анимации) вводим значение 30 для получения более плавной анимации.

В списке «Contour data for animation» выбираем выходную величину для изображения ее поля в процессе анимации (например, напряжение по Мизесу).

Остальные параметры оставляем без изменения.

Нажимаем *OK*.

Некоторое время займет формирование видео файла, после чего в рабочем окне будет представлена анимация переходного динамического процесса.

Кроме того, появится дополнительная панель «Animation Controller».

«Бегунок» данной панели позволяет управлять задержкой между кадрами (т.е. увеличивать или уменьшать скорость анимации).

Нажав *Stop* и *Close*, можно остановить анимацию и закрыть диалоговую панель «Animation Controller».

13. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File*.

Вводим имя *Lab13.lgw*.

14. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT*.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

«Исследование вынужденных установившихся колебаний пластины»

Исходные данные: прямоугольная дюралевая пластина с круглой стальной шайбой жестко закреплена по двум смежным сторонам (рисунок 1). Размеры пластины $a = 1000$ мм и $b = 600$ мм; радиус шайбы $r = 50$ мм; толщина пластины $h = 2$ мм; толщина шайбы $h_{ш} = 4$ мм. Свойства дюралюминия: модуль упругости $7 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; плотность 2700 кг/м³. Свойства стали: модуль упругости $2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; плотность 7800 кг/м³. В центре шайбы приложена изменяющаяся по гармоническому закону поперечная сила P (амплитуда 10 Н; частота возбуждения может принимать значения до 20 Гц).

Допущение: отношение наименьшего размера пластины b к толщине h , а также диаметра шайбы $2r$ к толщине шайбы $h_{ш}$ больше 10, что позволяет использовать для моделирования данной конструкции оболочечные элементы.

Цель: определить отклик системы на нескольких частотах возбуждения и построить зависимости амплитуд прогибов характерных точек от частоты.

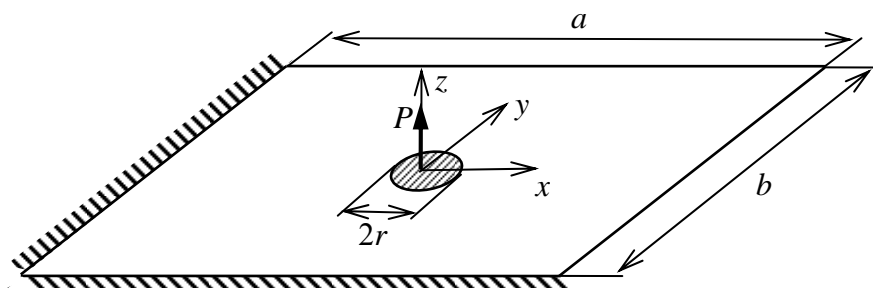


Рисунок 1 – Геометрия пластины

Следует отметить, что перед выполнением гармонического анализа всегда полезно (для отслеживания резонансных явлений) определять частоты собственных колебаний.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab12.
2. Установить тип используемых в расчете элементов – 4-узловой оболочечный элемент SHELL63: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Elastic 4node 63*, *OK* и *Close*.

3. Определить реальные постоянные для выбранных типов элементов: *M_M>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete*.

– Для пластины нажимаем *Add* и указываем тип элементов «Type 1 Shell63», *OK*.

В соответствующие поля вводим:

«Real Constant Set No»: 1 (номер набора реальных постоянных)

«Shell thickness at node I» ТК(I): 2 (толщина пластины, мм)

OK.

– Для шайбы нажимаем *Add* и указываем тип «Type 1 Shell63», *OK*.

Вводим:

«Real Constant Set No»: 2

«Shell thickness at node I» ТК(I): 4 (толщина шайбы, мм)

OK.

Закрываем диалоговую панель кнопкой *Close*.

4. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

– Для дюралюминия определяем первую модель материала (Material Model Number 1). В правом окне выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic* и вводим:

EX: 7e4 (модуля упругости дюралюминия, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициента Пуассона дюралюминия)

OK.

Снова в правом окне выбираем *Structural>Density* и вводим:

DENS: 2700e-12 (плотность дюралюминия, т/мм³)

OK.

– Для стали определяем вторую модель материала (Material Model Number 2). В меню диалоговой панели указываем *Material>New model*, *OK*. В правом окне выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic* и вводим:

EX: 2e5 (модуля упругости стали, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициента Пуассона стали)

OK.

Опять в правом окне выбираем *Structural>Density* и вводим:

DENS: 7800e-12 (плотность стали, т/мм³)

OK.

Закрываем панель.

5. Построить прямоугольник 1000x600 с центром в начале координат: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners*.

Вводим следующие параметры: координаты левого нижнего угла WP X = -500 и WP Y = -300; ширина Width = 1000; высота Height = 600.

OK.

6. Построить круг с центром в начале координат: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Solid circle*.

Вводим: координаты центра WP X = WP Y = 0; радиус Radius = 50.

OK.

7. Выполнить булеву операцию перекрытия двух поверхностей: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Overlap>Areas*.

Указываем все поверхности (кнопкой *Pick All*).

8. Построить «твердую» точку в центре круга: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>Hard PT on Area>Hard PT by coordinates*.

Указываем круглую поверхность. Поскольку центр тяжести круга совпадает с соответствующей точкой прямоугольной поверхности с отверстием, здесь появляется панель «Multiple Entities», где с помощью кнопки *Prev* или *Next* следует выбрать нужную поверхность и нажать *OK*.

После нажатия в панели указания кнопки *OK* вводим координаты точки: 0; 0; 0 (нули можно не вводить). *OK*.

Следует отметить, что «твердую» точка – это специальная точка, в которой при построении сетки обязательно создается узел.

9. Задать атрибуты элементов на поверхностях: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

В диалоговой панели «Mesh Tool» в верхнем списке «Element Attributes» выбираем *Areas* и нажимаем распложенную правее кнопку *Set*.

Далее указываем прямоугольную поверхность с отверстием (также с использованием кнопки *Prev* или *Next* панели «Multiple Entities») и вводим атрибуты для пластины:

«Material number»: 1 (номер материала)

«Real constant set number»: 1 (номер набора реальных постоянных)

«Element type number»: 1 SHELL63 (номер типа элементов)

Apply.

Затем указываем круглую поверхность и вводим атрибуты для шайбы:

«Material number»: 2

«Real constant set number»: 2

«Element type number»: 1 SHELL63

OK.

10. Разбить поверхности на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool.*

Глобальный размер длины стороны элементов задаем равным 60 мм. Для этого нажимаем кнопку *Set* строки «Global» и в поле «Element edge length» вводим соответствующее значение. *OK.*

Размер длины стороны элементов на круглой поверхности определим равным 20 мм. Нажимаем кнопку *Set* уже строки «Areas» и в поле «Element edge length» вводим соответствующее число.

В списке «Mesh» в качестве объектов для разбиения выбираем Areas (поверхности).

Устанавливаем режим Free (свободная сетка).

Для генерации сетки далее следует нажать кнопку *Mesh* и указать все поверхности (*Pick All*).

Получаемая при этом разбивка на элементы показана на рисунке 2.

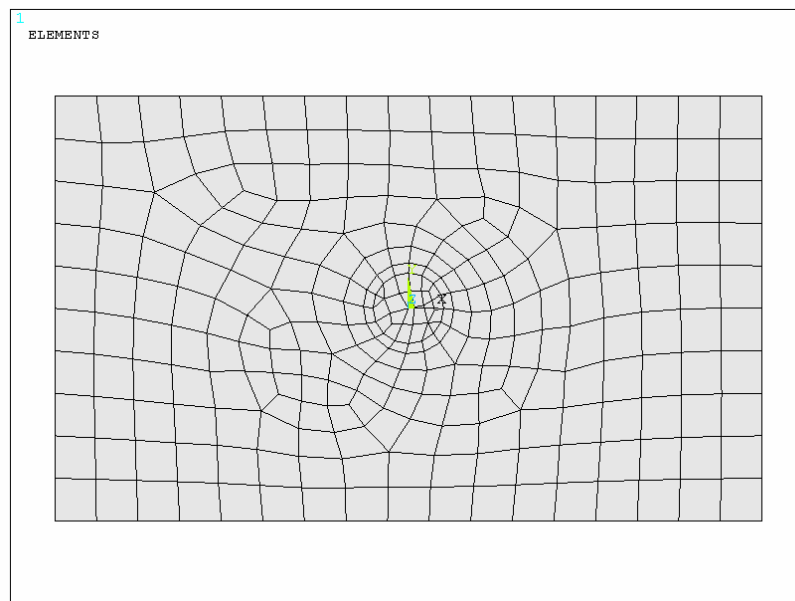


Рисунок 2 – Конечно-элементная сетка

11. Задать граничные условия защемления на двух смежных сторонах пластины (см. рисунок 1): *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

Указываем соответствующие линии ($x = -a/2$ и $y = -b/2$) и после нажатия кнопки *OK* в поле «DOFs to be constrained» (степени свободы, которые должны быть ограничены) выбираем значение All DOF (все степени свободы).

12. Установить новый тип анализа – модальный: *M_M>Solution>Analysis Type>New analysis*.

Выбираем Modal, *OK*.

13. Задать опции модального анализа: *M_M>Solution>Analysis Type>Analysis Options*.

В соответствующие поля вводим:

«Mode extraction method»: *Block Lanczos*

«No. of modes to extract»: 10

«Expand mode shapes»: *Yes*

«No. of modes to expand»: 10

OK.

Вторую панель закрываем кнопкой *OK*, не меняя установки по умолчанию.

14. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar>SAVE_DB*.

База данных записывается в файл Lab12.db.

15. Выполнить модальный анализ: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

16. Вывести список первых десяти низших частот собственных колебаний: *M_M>General Postproc>Results summary*.

При этом появляется текстовое окно:

SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	6.4202		1	1	1
2	15.379		1	2	2
3	30.662		1	3	3
4	34.593		1	4	4
5	42.066		1	5	5
6	62.598		1	6	6
7	63.840		1	7	7
8	84.659		1	8	8
9	91.126		1	9	9
10	96.169		1	10	10

Размерность частот – Гц.

Для просмотра форм собственных колебаний здесь можно воспользоваться приемами, подробно описанными в предыдущей лабораторной работе.

17. Установить новый тип анализа – гармонический: *M_M> Solution>Analysis Type>New analysis>*

Выбираем Harmonic, *OK*.

18. Задать амплитуду поперечной силы: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints*.

Указываем «твердую» точку в центре шайбы и нажимаем *OK*.

Затем в списке «Direction of force/moment» (направление силы/момента) выбираем направление FZ и в поле «Real part of force/moment» (действительная часть силы или момента) вводим число 10 (амплитуда силы, Н).

19. Задать диапазон частот возбуждения: *M_M>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Freq and Substeps*.

В поле «Harmonic freq range» указываем диапазон интересующих частот: 0; 20 (в Гц).

В поле «Number of substeps» (число подшагов) вводим число 40. При этом будет выполняться расчет для следующих частот возбуждения: 0,5; 1; 1,5; 2;...; 20 Гц.

И, наконец, для параметра *KBC* (поле «Stepped or ramped b.c.») выбираем значение Stepped. При этом будет использоваться одинаковая для всех частот возбуждения амплитуда.

20. Задать демпфирование: *M_M>Solution>Load Step Opts>Time/Frequenc>Damping*.


В поле «Stif. matrix multiplier» (множитель β для матрицы жесткости) вводим значение $2e-3$ (в сек). При этом матрица демпфирования $[C]$ будет связываться с матрицей жесткости $[K]$ выражением

$$[C] = \beta [K].$$

21. Выполнить гармонический анализ: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

22. Построить зависимости амплитуд прогибов характерных точек от частоты возбуждения: *M_M>TimeHist Postpro*.

При входе в постпроцессор истории нагружения автоматически появляется диалоговая панель для работы с переменными. По умолчанию в гармоническом анализе определяется только одна переменная FREQ (частота).

Для задания новой переменной следует воспользоваться кнопкой  (Add Data – первая слева в панели инструментов).

При этом появляется окно, где необходимо в списке «Result Item» указать выходную величину, на основе которой создается переменная.

Название переменной вводится в поле «Variable Name».


Далее после нажатия кнопки *OK* на экране при помощи мыши указывается узел (или элемент), в котором определяется выбранная величина.

В качестве первой выходной величины зададим амплитуду перемещения по оси z (*Nodal Solution > DOF Solution > Z-Component of displacement*) в узле в центре шайбы (по умолчанию ей присваивается имя *UZ_2*).

После нажатия в панели указания кнопки *Apply* новая переменная появляется в списке существующих переменных.

Аналогично определяем вторую переменную – амплитуду перемещения по оси z в узле, расположенном в свободном углу пластины (имя по умолчанию *UZ_3*).

Если после нажатия в панели указания кнопки *OK* переменная *UZ_3* не появляется в списке, необходимо заново выполнить последнюю команду и в конце вместо *OK* нажать *Apply*. При этом диалоговую панель «Add Time-History Variable» следует закрыть, воспользовавшись кнопкой *Cancel*.

Для построения интересующих нас графиков в списке «Variable List» выбираем переменные *UZ_2* и *UZ_3* и нажимаем кнопку  (*Graph Data* – третья слева в панели инструментов).

Отображаемые при этом зависимости представлены на рисунке 3.

Видно, что пиковые значения амплитуд (характеризующие резонансные явления) соответствуют первым двум частотам собственных колебаний пластины.

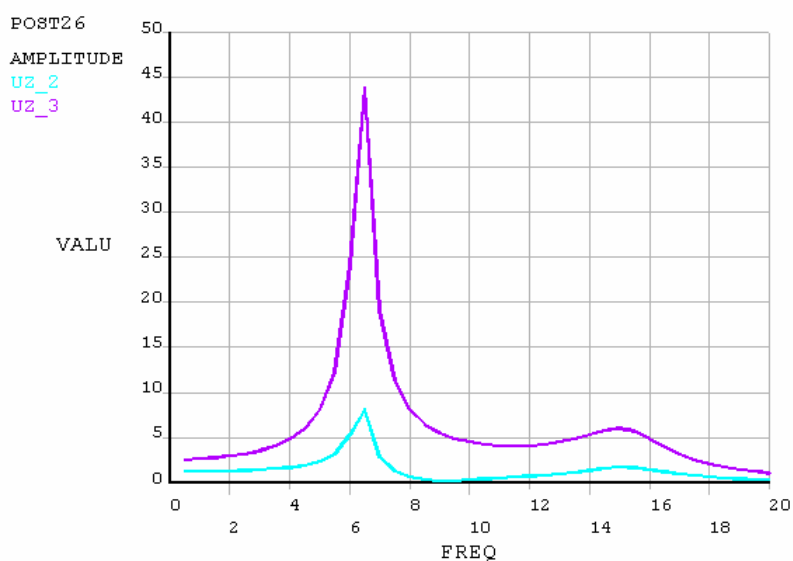


Рисунок 3 – Зависимости амплитуд прогибов от частоты

23. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя Lab12.lgw.

24. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

Замечание: Не удаляйте базу данных Lab12.db, поскольку построенная здесь модель будет использоваться в следующей лабораторной работе для исследования неустановившихся колебаний пластины при поперечном ударе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

«Расчет частот и форм собственных колебаний двойной проушины (вилки)»

Исходные данные: рассматривается та же проушина, что и в предыдущей лабораторной работе; плотность материала 7850 кг/м^3 .

Допущения: нагрузка не учитывается; болт не моделируется.

Цель: определить первые десять низших частот и соответствующих им форм собственных колебаний.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя предыдущей задачи Lab10.
2. Считать базу данных из файла Lab10.db: *ANSYS Toolbar>RESUM_DB*.
3. Дополнительно задать плотность материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

В правом окне последовательно выбираем *Structural>Density*.

Вводим:

DENS: 7850×10^{-12} (плотность, т/мм^3)

OK.

Закрываем панель.

4. В модуле «Solution» установить новый тип анализа – модальный: *M_M>Solution>Analysis Type>New Analysis*.

Выбираем Modal, OK.

5. Задать опции модального анализа: *M_M>Solution>Analysis Type>Analysis Options*.

При этом появляется диалоговая панель, показанная на рисунке 1.

Здесь в списке «Mode extraction method» указывается метод решения проблемы собственных значений (по умолчанию выбирается блочный метод Ланцоша).

В поле «No. of modes to extract» требуется ввести число извлекаемых частот и форм собственных колебаний (в нашем случае 10).

Следующий раздел данной панели позволяет расширить (expand) результаты решения.

Для возможности просмотра в общем постпроцессоре форм собственных колебаний необходимо записать их в файл результатов, для чего следует

включить флаг «Expand mode shapes» и в поле «No. of modes to expand» ввести число записываемых собственных форм.

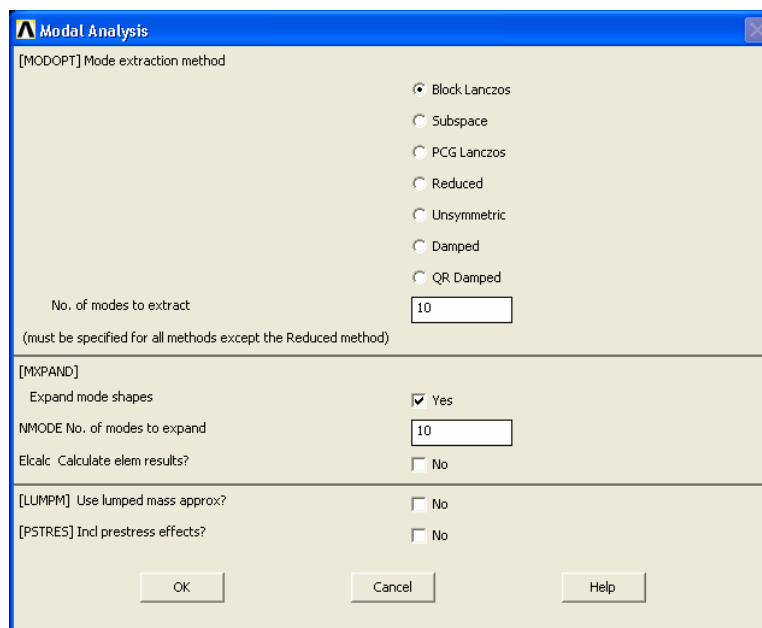


Рисунок 1 – Задание опций модального анализа

При включении флага «Calculate elem results?» будут вычисляться также и элементные результаты (например, напряжения). Однако в модальном анализе абсолютные значения этих величин не имеют какого-либо физического смысла.

Включение флага «Use lumped mass approx?» позволяет значительно уменьшить трудоемкость расчета путем использования диагональной матрицы масс. Кроме того, такой подход для очень тонких оболочечных и балочных моделей часто обеспечивает более точные результаты.

И, наконец, активизация флага «Incl prestress effects?» дает возможность включить эффект начальных напряжений, предварительно найденных при помощи статического анализа.

После нажатия кнопки *OK* появляется новая диалоговая панель, представленная на рисунке 2.

Здесь в поле «Start Freq (initial Shift)» указывается начальная частота диапазона, в котором ищутся собственные частоты, а в поле «End Frequency» – конечная частота.

В списке «Normalize mode shape» выбирается способ нормирования собственных векторов (по умолчанию по матрице масс).

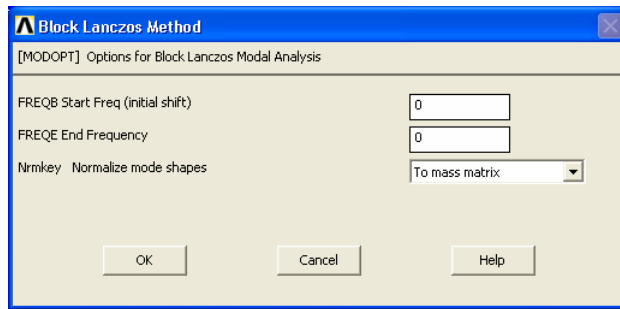


Рисунок 2 – Диалоговая панель блочного метода Ланцоша

В нашем случае в данной панели можно ничего не менять, закрыв ее кнопкой *OK*.

6. Запустить задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.
7. Вывести список рассчитанных частот собственных колебаний: *M_M>General Postproc>Results summary*.

В результате выполнения этой операции на экране появляется текстовое окно, содержащее следующую информацию:

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	418.03	1	1	1
2	551.84	1	2	2
3	1188.5	1	3	3
4	1237.1	1	4	4
5	1390.6	1	5	5
6	2383.3	1	6	6
7	2863.1	1	7	7
8	2883.3	1	8	8
9	3197.6	1	9	9
10	4160.5	1	10	10

Собственные частоты (в Гц) здесь размещаются во втором столбе.

Видно, что первая (наименьшая) собственная частота рассматриваемой конструкции составляет 418 Гц.

8. Отобразить на экране формы собственных колебаний.
Следует отметить, что для расчета каждой формы собственных колебаний организуется отдельный подшаг. Общий постпроцессор позволяет просматривать результаты только на одном подшаге. Поэтому для отображения на экране конкретной собственной формы ее необходимо предварительно считать из файла результатов: *M_M>General Postproc>Read Results>First Set* – первая форма,
Next Set – следующая форма,
Previous Set – предыдущая форма,
Last Set – последняя форма,
By Pick – форма, указанная из списка (выделить и нажать *Read*).

Графическое изображение собственных форм производится точно так же, как и представление деформированного состояния конструкции (или поля перемещений).

Воспользуемся командой контурного изображения узлового решения: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour plot>Nodal Solu.*

Из списка доступных результатов выбираем *Nodal Solution>DOF Solution>Displacement vector sum* (суммарный вектор перемещений), *OK*.

Одна из форм собственных колебаний показана на рисунке 3.

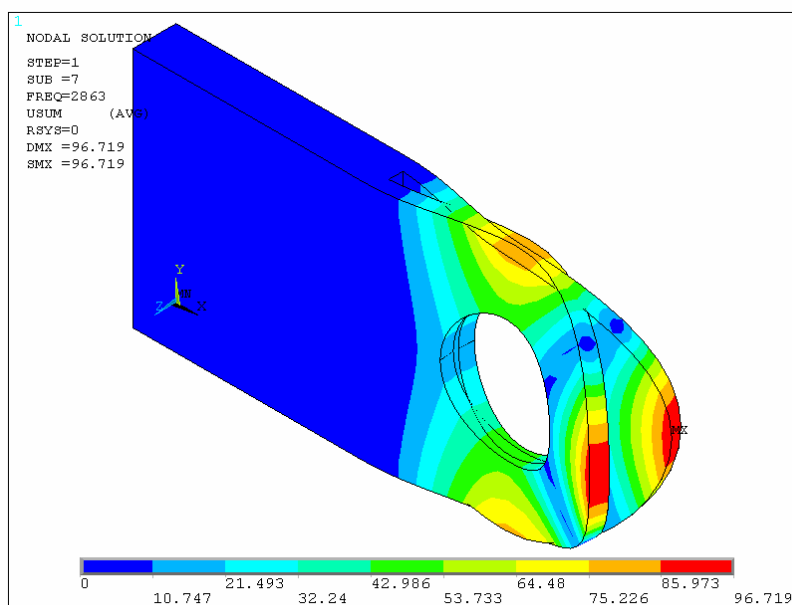


Рисунок 3 – Форма собственных колебаний №7

Следует напомнить, что формы собственных колебаний вычисляются с точностью до произвольного множителя и по умолчанию нормируются относительно матрицы масс конструкции. Поэтому абсолютные значения перемещений здесь могут быть несколько завышенными (они не имеют физического смысла).

После чтения из файла очередной собственной формы для перерисовки изображения можно выбрать последовательность *U_M>Plot>Replot* либо щелкнуть кнопкой мыши в рабочем окне.

9. Включить анимацию форм собственных колебаний.

Сначала установим подходящий вид на модель проушины (например, изометрию).

Далее считываем из файла результатов интересующую нас форму собственных колебаний (см. предыдущий пункт).

Для анимации выбранной собственной формы можно вызвать следующую последовательность: *U_M>PlotCtrls>Animate>Mode Shape*.

В соответствующие поля вводим:

«No. of frames to create»: 25 (число создаваемых кадров – 10...100)

«Time delay (seconds)»: 0.05 (задержка между кадрами, сек)

«Display type»: DOF Solution>Deformed Shape (изображение деформированной формы)

OK.

Некоторое время займет формирование видео файла, после чего в рабочем окне будет представлена анимация соответствующей формы колебаний. Кроме того, появится дополнительная панель «Animation Controller».

«Бегунок» данной панели позволяет управлять задержкой между кадрами (т.е. увеличивать или уменьшать скорость анимации).

Нажав *Stop* и *Close*, можно остановить анимацию и закрыть диалоговую панель, после чего следует считать другую форму и просмотреть ее аналогичным образом.

Во время просмотра анимации нельзя поворачивать и/или масштабировать изображение модели. Для возможности выполнения таких действий следует остановить анимацию (кнопкой *Stop*) и закрыть диалоговую панель (кнопкой *Close*).

После изменения параметров изображения модели необходимо заново вызвать последовательность *U_M>PlotCtrls>Animate>Mode Shape*.

10. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File*.

Вводим имя Lab11.lgw.

11. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT*.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

«Исследование напряженно-деформированного состояния двойной проушины (вилки)»

Исходные данные: геометрия проушины показана на рисунке 1; материал – сталь 08пс (модуль упругости $2,03 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 175 МПа). Проушина нагружена через болт силой 20 кН.

Допущение: болт принимается абсолютно жестким.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние двойной проушины.

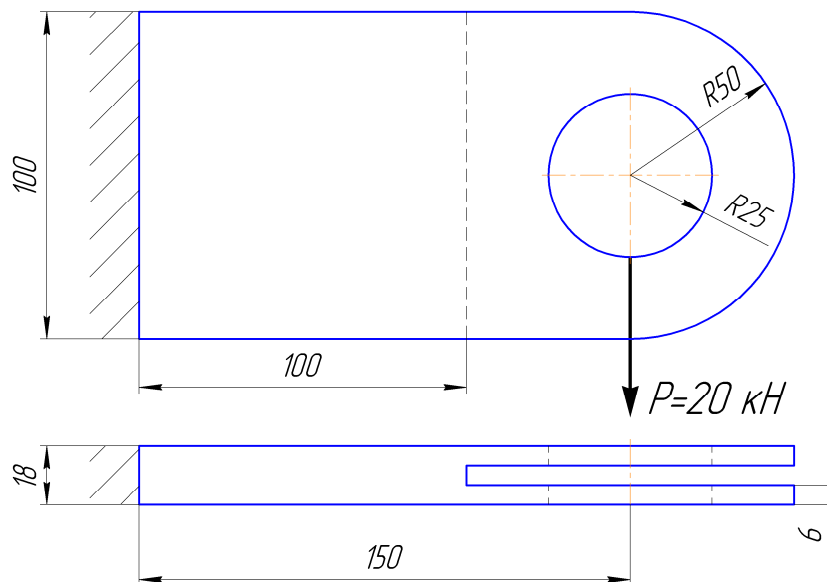


Рисунок 1 – Геометрия проушины

Приведенная на рисунке 1 двойная проушина, а также нагрузка имеют вертикальную плоскость симметрии, что позволяет для исследования напряженно-деформированного состояния ограничиться рассмотрением лишь половины конструкции. Однако здесь мы будем моделировать проушину полностью, поскольку она будет использоваться в следующей лабораторной работе для анализа собственных колебаний (где требуется полная модель). Начало системы координат поместим в левую нижнюю точку.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab10.
2. Установить тип используемых в расчете элементов – 8-узловой шестигранный объемный элемент SOLID45 (или SOLID185 для версии Release 13 и более поздних): *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*. Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Brick 8node 45*, *OK* и *Close*.
3. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

В правом окне последовательно (двойным щелчком мыши) выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

Вводим:

EX: 2.03e5 (модуль упругости, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

Закрываем панель.

4. Построить квадрат 100x100 и прямоугольник 50x100, смещенный по горизонтали на 100 мм: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners*.

Для квадрата вводим следующие параметры: координаты левого нижнего угла WP X = 0 и WP Y = 0; ширина Width = 100; высота Height = 100.

Apply.

Для прямоугольника задаем: WP X = 100; WP Y = 0; Width = 50; Height = 100.

OK.

5. Построить половину круга, смещенную по горизонтали на 150 мм: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Partial Annulus*.

Вводим: координаты центра WP X = 150 и WP Y = 50; внешний радиус Rad-1 = 50; начальный угол сектора Theta-1 = -90; внутренний радиус Rad-2 = 0; конечный угол сектора Theta-2 = 90.

OK.

6. Склеить построенные поверхности для объединения совпадающих точек и линий: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Glue>Areas*.

Нажимаем *Pick All* для выбора всех поверхностей.

7. Построить круг, соответствующий отверстию под болт: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Solid circle*.

Вводим следующие параметры: координаты центра круга WP X = 150 и WP Y = 50; радиус Radius = 25.

ОК.

8. Вырезать отверстие под болт с помощью булевой операции вычитания: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Subtract>Areas*.

Сначала указываем две поверхности, из которых производится вычитание. Это полукруг (поверхность A4) и смежный с ним прямоугольник (поверхность A5). ОК.

Затем указываем вычитаемую поверхность – круг, соответствующий отверстию под болт (поверхность A2). ОК.

Для удобства выполнения последующих операций включим отображение нумерации геометрических объектов: *U_M>PlotCtrls>Numbering*; отмечаем флаги «Keypoint numbers», «Line numbers» и «Area numbers». ОК.

9. Разрезать полученные поверхности на ряд простых (т.е. имеющих по четыре стороны) с целью построения в дальнейшем регулярной сетки.

Разрежем сначала построенную модель на две симметричные половины плоскостью, проходящей через центр отверстия.

Для этого перемещаем рабочую плоскость в середину линии L4, ориентируя ее перпендикулярно этой линии: *U_M>WorkPlane>Align WP with>Plane Normal to Line*.

Указываем линию L4 (левую вертикальную линию проушины), ОК.

Вводим:

«Ratio along line»: 0.5 (безразмерная координата точки на линии)

ОК.

Для выполнения операции резания поверхностей рабочей плоскостью выбираем в меню следующую последовательность: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Area by WrkPlane*.

Нажимаем *Pick All*.

Разделим затем пополам поверхности A8 и A9, имеющие пять сторон.

Для этого смещаем рабочую плоскость в точку 3: *U_M>WorkPlane>Offset WP to>Keypoints*.

Указываем здесь точку 3. ОК.

И поворачиваем ее относительно оси WY на угол -45° : *U_M>WorkPlane>Offset WP by increments*.

Вводим:

«XY,YZ,ZX Angles»: 0,0,-45 (углы поворота, град)

Apply.

Разрезаем рабочей плоскостью поверхность A8: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Area by WrkPlane*.

Указываем поверхность A8 (она сопряжена с левой верхней частью отверстия), *OK*.

Смещаем теперь рабочую плоскость в точку 2: *U_M>WorkPlane>Offset WP to>Keypoints*.

Указываем здесь точку 2. *OK*.

И поворачиваем ее относительно оси *WY* на угол 90° .

Для этого в диалоговой панели «Offset WP» вводим:

«XY,YZ,ZX Angles»: 0,0,90

OK.

Разрезаем рабочей плоскостью поверхность A9: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Area by WrkPlane*.

Указываем поверхность A9 (она сопряжена с левой нижней частью отверстия), *OK*.

Получаемые при этом поверхности показаны на рисунке 2.

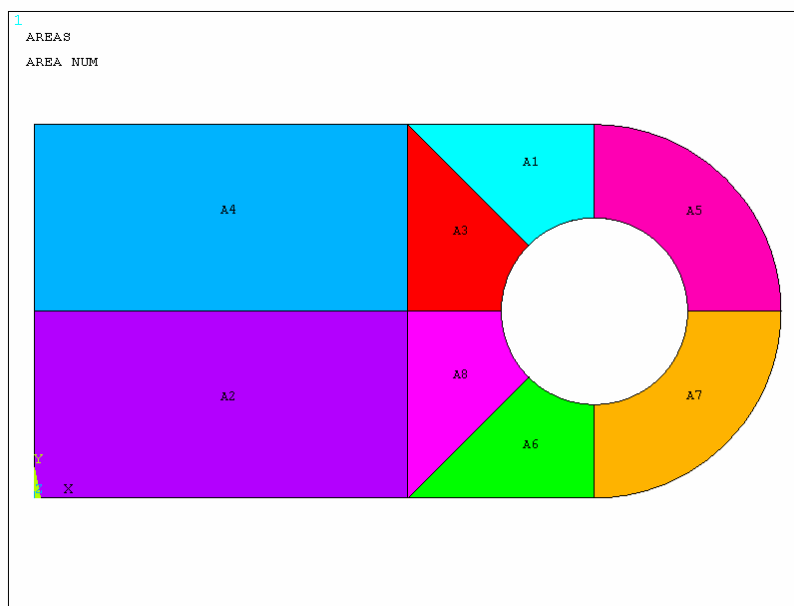


Рисунок 2 – Поверхности с нумерацией

В заключение установим рабочую плоскость в исходное положение (в начало глобальной декартовой системы координат): *U_M>WorkPlane>Align WP with>Global Cartesian*.

10. Выдавить объемы путем перемещения существующих поверхностей в заданном направлении: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Areas>By XYZ Offset.*

Кнопкой *Pick All* указываем все поверхности.

В соответствующие поля вводим:

DX,DY,DZ «Offsets for extrusion»: 0; 0; 6 (отступы в направлении осей активной системы координат)

OK.

Для того чтобы увидеть построенные объемы, здесь следует установить, например, изометрическую проекцию (кнопкой *Isometric View* панели управления видом).

11. Достроить твердотельную модель путем копирования объемов: *M_M>Preprocessor>Modeling>Copy>Volumes.*

Сначала дважды скопируем два левых объема на расстояние 6 мм в направлении оси *Z*.

Для этого указываем объемы *V2* и *V4*, *OK.*

В соответствующие поля вводим:

ITIME «Number of copies»: 3 (число копий, включая исходные)

DZ «Z-offset in active CS»: 6 (отступ в направлении оси *Z*)

OK.

Далее скопируем оставшиеся объемы (которые примыкают к отверстию) на расстояние 12 мм также в направлении оси *Z*: *M_M>Preprocessor>Modeling>Copy>Volumes.*

Указываем шесть объемов *V1, V3, V5...V8*, *OK.*

Вводим:

ITIME «Number of copies»: 2

DZ «Z-offset in active CS»: 12

OK.

12. Склеить существующие объемы для получения сплошной модели: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Glue>Volumes.*

Кнопкой *Pick All* указываем все объемы.

13. На геометрическую модель нанести сетку конечных элементов: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool.*

В списке «*Mesh*» в качестве объектов для разбиения выбираем *Volumes* (объемы), в поле «*Shape*» указываем *Hex* (форма гексаэдра).

Поскольку все построенные объемы являются «правильными», устанавливаем режим *Mapped* (регулярная сетка).

После нажатия кнопки *Mesh* указываем все объемы (*Pick All*).

Получаемая здесь разбивка представлена на рисунке 3.

Следует отметить, что если размеры элементов не заданы (как в нашем случае), они определяются программой автоматически. При этом для простых моделей обычно получается вполне удовлетворительная сетка.

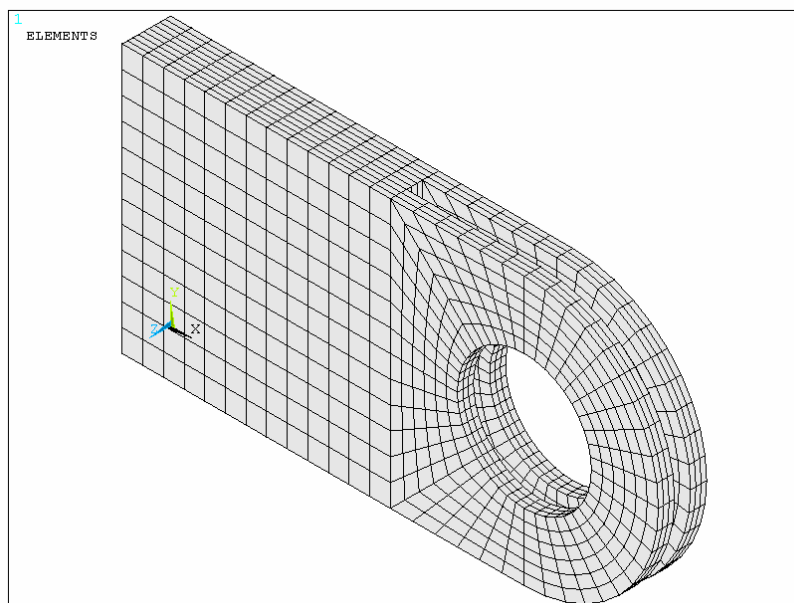


Рисунок 3 – Сетка конечных элементов

14. Задать граничные условия.

Рассматриваемая двойная проушина жестко закреплена по левому торцу (см. рисунок 1).

Здесь удобно воспользоваться командой задания перемещений на поверхностях: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Areas*.

Указываем шесть поверхностей, расположенных на левом торце проушины, *OK*.

В поле «DOFs to be constrained» выбираем *All DOF* (все степени свободы). *OK*.

15. Приложить нагрузку.

Для задания нагрузки в виде силы, передаваемой на проушину через болт, здесь удобно воспользоваться специальным типом элементов трехмерных конструктивных поверхностных эффектов *SURF154*.

С этой целью определяем новый тип элементов: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*.

Нажимаем *Add* и выбираем *Surface Effect>3D Structural 154, OK*.

Нажимаем *Options* и меняем следующие опции:

«Midside nodes» K4: *Exclude* (исключить средние узлы)

«Pres. vector orientation on» K11: *Prj Area w/Tan* (ориентация равнодействующей давления по вектору на проектируемую поверхность; включить тангенциальную составляющую)

OK, Close.

Поместим в активный набор только поверхности, на которые будет передаваться нагрузка через болт: *U_M>Select>Entities*.

В диалоговой панели «Select Entities» вводим:

Тип объектов: *Areas* (поверхности)

Критерий выбора: *By num/Pick* (путем указания на экране)

Функция выбора: *From Full* (из полной системы)

Apply.

Указываем нижние поверхности отверстий обеих половин проушины (всего шесть поверхностей).

OK.

Выбираем далее узлы, связанные с этими поверхностями.

Снова в диалоговой панели «Select Entities» вводим:

Тип объектов: *Nodes* (узлы)

Критерий выбора: *Attached to* (связанные с)

Тип связи: *Areas, all* (с поверхностями, включая их границы)

Функция выбора: *From Full* (из полной системы)

OK.

Активируем тип элементов поверхностных эффектов: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes*.

Вводим атрибуты:

«Element type number»: 2 SURF154

OK.

По выбранным узлам создаем элементы поверхностных эффектов: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Surf/contact>Surf effect>General Surface>No extra Node*.

Нажимаем *Pick All*.

К вновь созданным элементам поверхностных эффектов следует приложить нагрузку. Для этого необходимо предварительно выбрать эти элементы и объединить их в компонент.

Выбираем элементы: *U_M>Select>Entities*.

Вводим:

Тип объектов: *Elements* (элементы)

Критерий выбора: *By attributes* (по атрибутам)

Тип атрибутов: *Elem type num* (номер типа элементов)

«Min, Max, Inc»: 2 (диапазон номеров)

Функция выбора: *From Full* (из полной системы)

Apply.

Нажимаем кнопку *Plot* в диалоговой панели «*Plot*» для отображения выбранных объектов.

Помещаем выбранные элементы в компонент с условным именем *Cont*: *U_M>Comp/Assembly>Create Component*.

Вводим:

«Component name»: *Cont* (назначаемое пользователем имя компонента)

«Component is made of»: *Elements* (компонент создается из элементов)

OK.

После этого можно приложить внешнюю нагрузку: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Element Components*.

Указываем мышью компонент *Cont*, *OK*.

Далее в соответствующие поля вводим:

«Load key, usually face no.»: 5 (ориентация по введенному вектору)

«Load PRES value»: 33.33 (амплитуда давления)

«Load PRES at 2nd node»: 0 (*X*-компонента вектора)

«Load PRES at 3rd node»: -1 (*Y*-компонента вектора)

«Load PRES at 4th node»: 0 (*Z*-компонента вектора)

OK.

Замечания:

1) при ориентации давления по вектору названия полей здесь не соответствуют вводимым величинам;

2) амплитуда прикладываемого давления равна отношению силы к площади проекции пятна контакта:

$$p = \frac{P}{4Rt} = \frac{20000}{4 \cdot 25 \cdot 6} = 33,33 \text{ МПа.}$$

Предупреждение о том, что нагрузка и граничные условия одновременно прикладываются к геометрическим и конечно-элементным объектам можно проигнорировать (нажимаем кнопку *Close*).

Возвращаем в активный набор все объекты: *U_M>Select>Everything*.

Отообразим только элементы (*U_M>Plot>Elements*).

Для изображения давления в виде стрелок следует воспользоваться командой *U_M>PlotCtrls>Symbols...* и в списке «Show pres and convect as» выбрать *Arrows* (стрелки).

Приложенная таким образом нагрузка показана на рисунке 4.

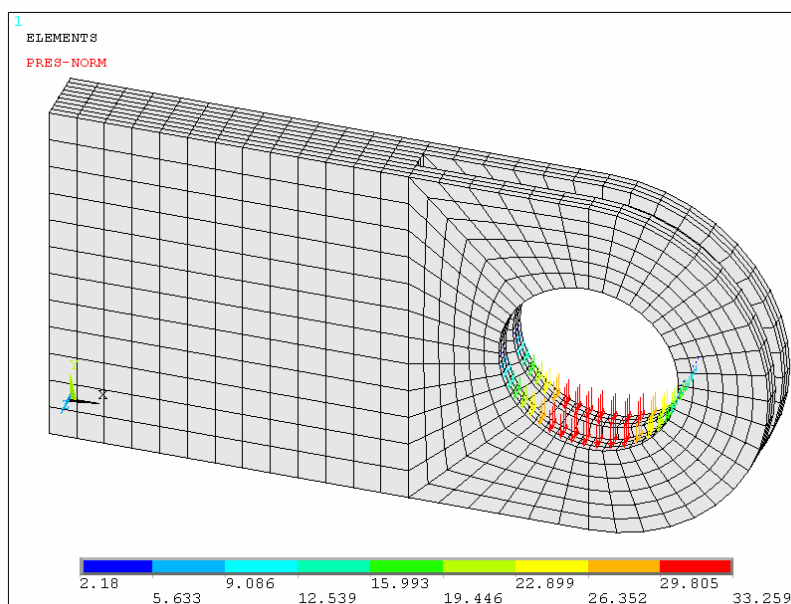


Рисунок 4 – Приложенная нагрузка

16. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar>SAVE_DB*.

База данных записывается в файл *Lab10.db*.

17. Запустить задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

18. Проверить правильность приложения нагрузки.

В данной задаче сумма реакций в узлах закрепления в направлении оси *Y* должна равняться приложенной силе *P*, а в направлении двух других осей – нулю.

Для вывода списка реакций используем команду: *M_M>General Postproc>List Results>Reaction Solu*.

Указываем компоненту *FY*, *OK*. При этом появляется текстовое окно со списком реакций в направлении оси *Y* во всех закрепленных узлах. В конце списка находим суммарную вертикальную реакцию:

TOTAL VALUES
VALUE 19998.

Таким образом, погрешность приложения нагрузки составляет 0,01%.

19. Отобразить деформированное состояние проушины: *M_M>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape.*

Включаем опцию «Def and undef edge» для наложения исходных границ проушины на деформированную модель, *OK.*

20. Отобразить поле напряжений по Мизесу: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu.*

Из списка доступных результатов выбираем *Nodal Solution>Stress>von Mises stress* (напряжение по Мизесу), *OK.*

21. Построить графическое изображение результатов в виде изоповерхностей.

Многоцветное представление поля выходной величины не позволяет увидеть ее изменение внутри модели.

Более удобным способом здесь может оказаться изображение результатов в виде изоповерхностей: *U_M>PlotCtrls>Style>Contours>Contour Style.*

В списке «Style of contour plot» (стиль контурного изображения) выбираем *Isosurface* (изоповерхность), *OK.*

На рисунке 5 показаны изоповерхности напряжений по Мизесу.

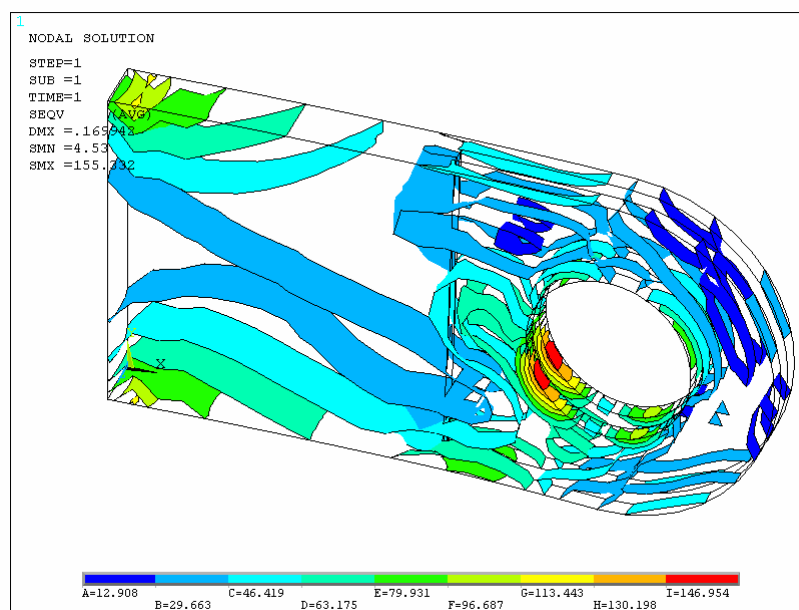


Рисунок 5 – Изображение поля напряжений по Мизесу в виде изоповерхностей

Вращая модель, можно подробно рассмотреть характер распределения напряжений внутри тела.

Для возвращения в обычный режим градиентной заливки следует выполнить ту же команду (*U_M>PlotCtrls>Style>Contours>Contour Style*) и в списке «Style of contour plot» указать Normal, ОК.

22. Построить результаты для «плавающей» секущей плоскости.

Распределение результатов по всей пространственной конструкции имеет сложный характер и слабо поддается анализу. Однако программа ANSYS позволяет просматривать результаты в некотором сечении, положение которого связывается с рабочей плоскости.

Установим рабочую плоскость так, чтобы она проходила через центр отверстия и была параллельна плоскости YZ: *U_M>WorkPlane>Offset WP by increments*.

В диалоговой панели «Offset WP» вводим:

«X,Y,Z Offsets»: 150,50,0

«XY,YZ,ZX Angles»: 0,0,90

ОК.

Активируем режим изображения результатов только в сечении рабочей плоскостью: *U_M>PlotCtrls>Style>Hidden Line options*.

В соответствующие поля вводим:

«Type of Plot»: *Q-Slice Z-buffer*

«Cutting plane is»: *Working Plane*

ОК.

В результате распределение напряжений будет показано только в том сечении модели, которое попадает в рабочую плоскость.

Изменяя положение рабочей плоскости и ее ориентацию (например, командой *U_M>WorkPlane>Offset WP by increments* или иными способами) и выполняя операцию перерисовки изображения *U_M>Plot>Replot*, можно просматривать результаты в любом сечении модели.

Аналогичным образом можно построить изображение результатов, попадающих в плоскость экрана дисплея. При этом выбираем в меню *U_M>PlotCtrls>Style>Hidden Line options*.

В соответствующие поля вводим:

«Type of Plot»: *Q-Slice Z-buffer*

«Cutting plane is»: *Normal to view*

ОК.

Вращая модель с помощью соответствующих инструментов, можно просматривать результаты в плоскости экрана.

Для отображения поля напряжений в обычном виде (т.е. в виде заливки на полной модели) следует воспользоваться той же командой и в списке «Type of Plot» указать Z-buffered, OK.

В заключение следует вернуть рабочую плоскость в исходное положение: *U_M>WorkPlane>Align WP with>Global Cartesian.*

23. Построить результаты для набора секущих плоскостей.

Интерес может представлять сопоставление характера распределения выходной величины по нескольким плоскостям-сечениям конструкции.

Создадим набор плоскостей, последовательно определяя их положение при помощи рабочей плоскости.

Для этого устанавливаем сначала рабочую плоскость в первое положение: *U_M>WorkPlane>Offset WP by increments.*

В диалоговой панели «Offset WP» вводим:

«X,Y,Z Offsets»: 150,0,0

«XY,YZ,ZX Angles»: 0,0,90

Apply.

Создаем плоскость для отображения результатов: *M_M>General Postproc>Surface Operations>Create Surface>On Cuttng Plane.*

В поле «Surface name» вводим имя поверхности, например s1. OK.

Далее смещаем рабочую плоскость на 30 мм по направлению к заделке.

Для этого в диалоговой панели «Offset WP» вводим:

«X,Y,Z Offsets»: 0,0,-30

Apply.

Создаем вторую плоскость для отображения результатов, именуя ее s2 (*M_M>General Postproc>Surface Operations>Create Surface>On Cuttng Plane*).

Аналогичным способом определяем еще три плоскости с именами s3, s4 и s5, также смещая их на 30 мм от предыдущей по направлению к заделке.

На созданные таким образом плоскости наносим интересующие нас результаты: *M_M>General Postproc>Surface Operations>Map Results.*

При этом в поле «Name of mapped result set» вводим имя выходной величины, например Sxx, и из выпадающего списка «Choose a result item» последовательно выбираем: *Nodal Solution>Stress>X-Component of stress* (нормальное напряжение на площадке, перпендикулярной оси X). OK.

И, наконец, для отображения результатов расчета используем команду *M_M>General Postproc>Surface Operations>Plot Results.*

В соответствующих списках указываем:

«Surface name»: *All* (все поверхности)

«Result set name»: *Sxx*

OK.

Получаемое при этом изображение результатов показано на рисунке 6.

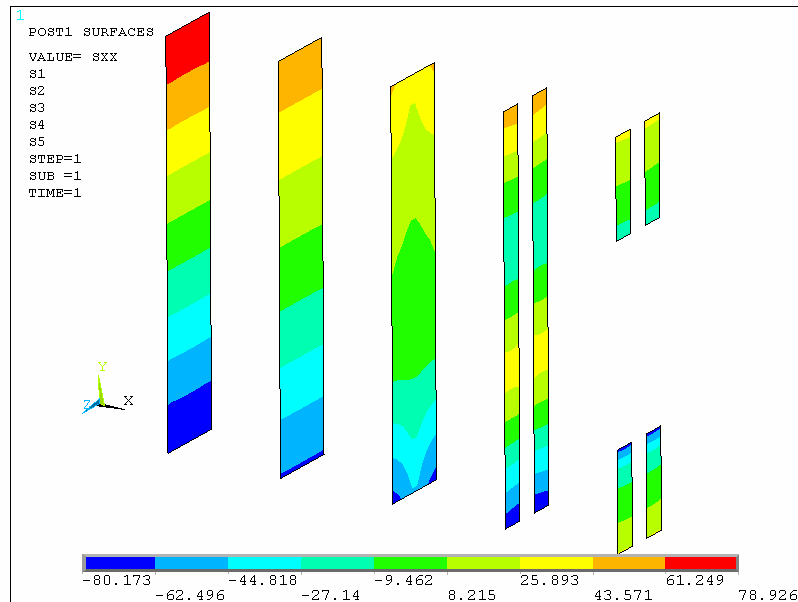


Рисунок 6 – Изображение распределения напряжений в заданных плоскостях

24. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File*.

Вводим имя *Lab10.lgw*.

25. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT*.

Замечание: Не удаляйте базу данных *Lab10.db*, поскольку построенная здесь модель будет использоваться в следующей лабораторной работе для анализа собственных колебаний проушины.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

«Расчет упора, импортированного из CAD-системы»

Исходные данные: упор (рисунок 1) воспринимает нагрузку $F = 10$ кН, равномерно распределенную по лицевой грани; материал – Ст.3 (модуль упругости $2,1 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 235 МПа). Твердотельная модель упора, созданная в одной из CAD-систем, записана в файл стандарта IGES.

Допущение: способ крепления данного упора позволяет в качестве граничных условий принять заделку по внутренним поверхностям больших отверстий.

Цель: импортировать твердотельную модель; упростить геометрию; определить общее напряженно-деформированное состояние упора.

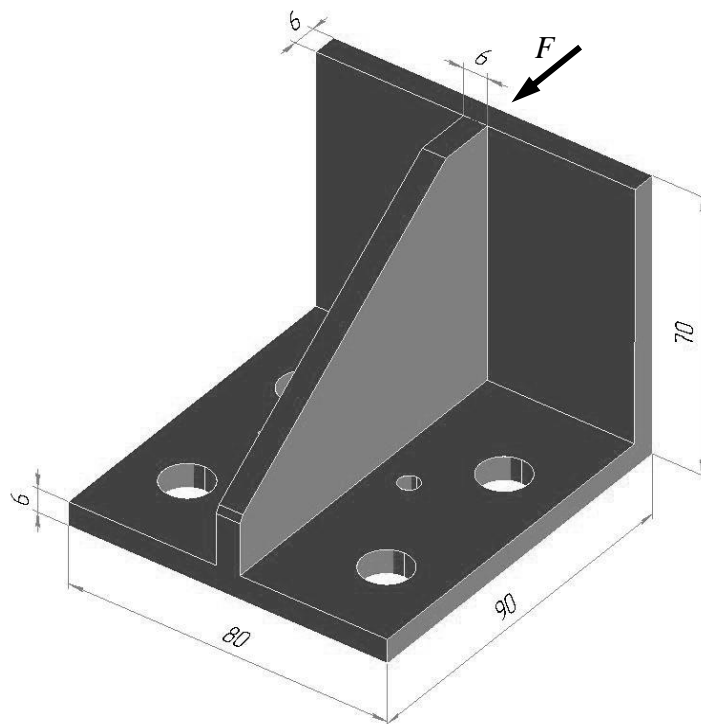


Рисунок 1 – Геометрия упора

Перед началом выполнения данной лабораторной работы файл `support.igs`, содержащий геометрическую модель упора, следует скопировать в рабочую папку программы ANSYS.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab9.
2. Импортировать твердотельную модель из IGES-файла в специальную базу данных, позволяющую упрощать геометрию: *Utility Menu>File>Import>IGES...*

Выбираем метод «Defeature model» (упрощать модель). Все остальные опции оставляем без изменения:

«Merge coincident keypoints?»: *Yes* (сливать совпадающие точки)

«Create solid if applicable»: *Yes* (создавать объемы, если возможно)

«Delete small areas?»: *Yes* (удалять мелкие поверхности)

OK.

В новой диалоговой панели нажимаем кнопку *Browse...* и указываем файл *support.igs*. *OK.*

3. Удалить два маленьких отверстия: *M_M>Preprocessor>Modeling>Simplify>Toolkit>Fill Cavity.*

Указываем мышью две внутренние поверхности одного из маленьких отверстий (рисунок 2), *Apply.*

Затем указываем поверхности другого отверстия, *OK.*

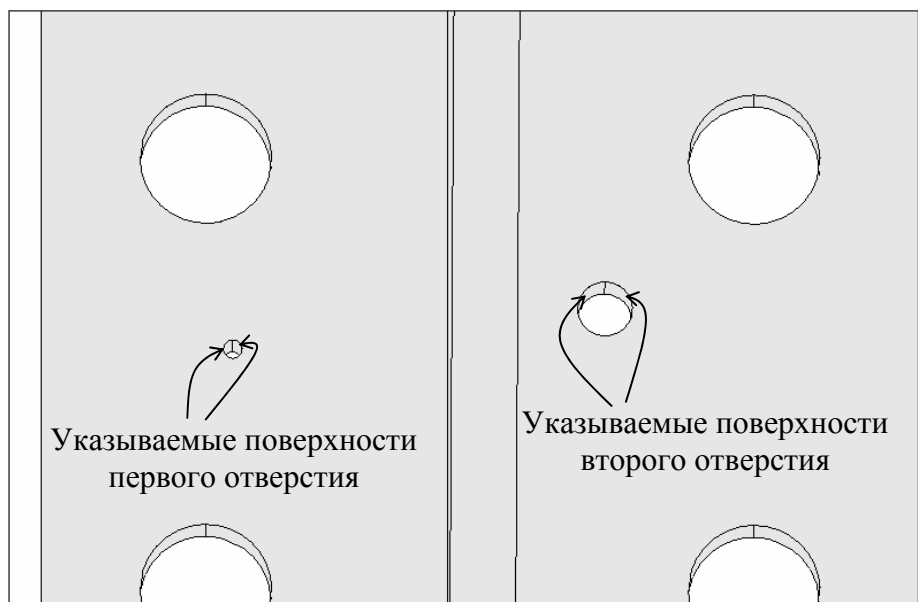


Рисунок 2 – К удалению отверстий

4. Удалить фаску путем сворачивания поверхности в линию: *Main Menu>Preprocessor>Modeling>Simplify>Toolkit>Collapse Areas.*

Сначала мышью указываем подлежащую сворачиванию поверхность фаски (рисунок 3), *ОК*.

Затем указываем линию, в которую будет сворачиваться поверхность, *ОК*.

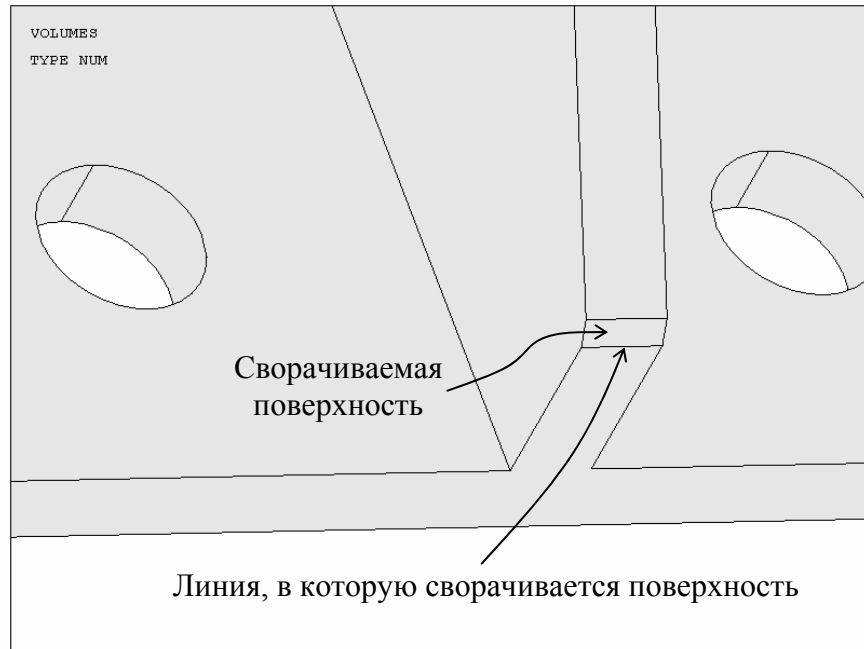


Рисунок 3 – К удалению фаски

5. Установить тип используемых в расчете элементов – 10-узловой четырехгранный объемный элемент второго порядка SOLID187 (имеющий форму тетраэдра): *M_M>Preprocessor>Element Type> Add/Edit/Delete*.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Tet 10node 187*, *ОК* и *Close*.

6. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

В правом окне последовательно (двойным щелчком мыши) выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

Вводим:

EX: 2.1e5 (модуль упругости, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)

ОК.

Закрываем панель.

7. Разбить твердотельную (геометрическую) модель на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

Глобальный размер длины стороны элементов задаем равным 7 мм. Для этого нажимаем кнопку *Set* строки «Global» и в поле «Element edge length» вводим число 7, *OK*.

В списке «Mesh» в качестве объектов для разбиения выбираем Volumes (объемы), в поле «Shape» указываем Tet (форма тетраэдра).

Поскольку объем является сложным, устанавливаем режим Free (свободная сетка).

После нажатия кнопки *Mesh* указываем единственный объем, *OK*.

Появляющееся при этом предупреждение можно проигнорировать, *Close*.

Получаемая здесь разбивка показана на рисунке 4.

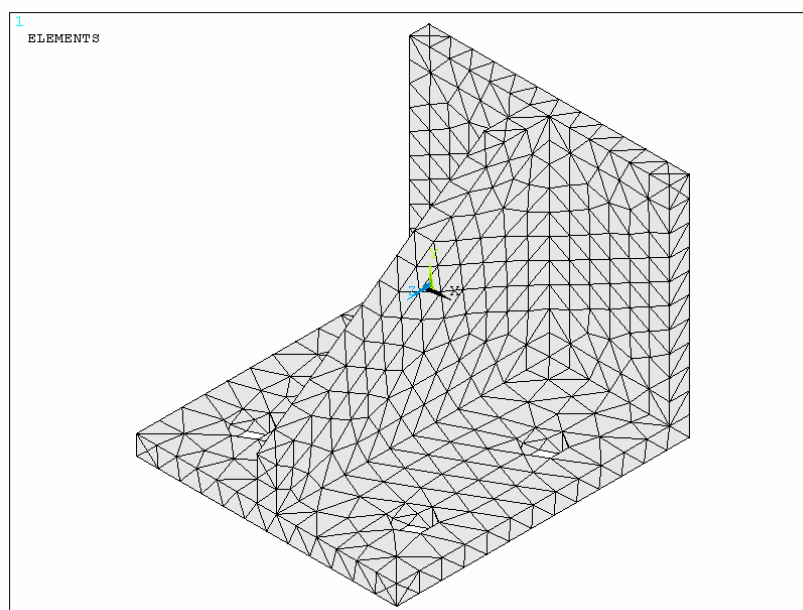


Рисунок 4 – Сетка конечных элементов

Размер элементов в рассматриваемом случае выбирался из тех соображений, чтобы число узлов не превышало 5000 (ограничение учебной версии ANSYS/ED).

Следует отметить, что элементы второго порядка (с промежуточными узлами) позволяют достаточно точно отражать криволинейную геометрию. Однако в данной детали, как видно на рисунке 4, отверстия представляются шестигранниками. Это связано лишь со способом изображения элементов на экране. На самом деле отверстия имеют более или менее круглую форму. В этом можно убедиться, если отобразить только узлы (команда *U_M>Plot>Nodes*).

8. Задать граничные условия.

Согласно принятому допущению рассматриваемый упор жестко зашумлен по всем оставшимся после упрощения геометрии отверстиям.

Здесь удобно воспользоваться командой задания перемещений на поверхностях: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Areas*.

Указываем по две внутренние поверхности каждого из отверстий, *OK*.

В поле «DOFs to be constrained» выбираем All DOF (все степени свободы). *OK*.

9. Приложить нагрузку.

Нагрузку зададим в виде распределенного по лицевой поверхности упора давления, равного отношению силы $F = 10$ кН к площади воспринимающей ее поверхности (см. рисунок 1):

$$p = \frac{10000}{70 \cdot 80} = 1,7857 \text{ МПа.}$$

Выбираем следующую последовательность: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Areas*.

Указываем лицевую поверхность, *OK*.

Вводим:

«Load PRES value»: 1.7857

OK.

Для изображения давления в виде стрелок воспользуемся командой *U_M>PlotCtrls>Symbols...*

В списке «Show pres and convect as» выбираем Arrows (стрелки).

10. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar>SAVE_DB*.

База данных записывается в файл Lab9.db.

11. Запустить задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

12. Отобразить деформированное состояние упора: *M_M>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape*.

Включаем опцию «Def and undef edge» для наложения исходных границ упора на деформированную модель, *OK*.

13. Отобразить поле напряжений по Мизесу: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu*.

Из списка доступных результатов выбираем *Nodal Solution>Stress>von Mises stress* (напряжение по Мизесу), *OK*.

Получаемое при этом изображение представлено на рисунке 5.

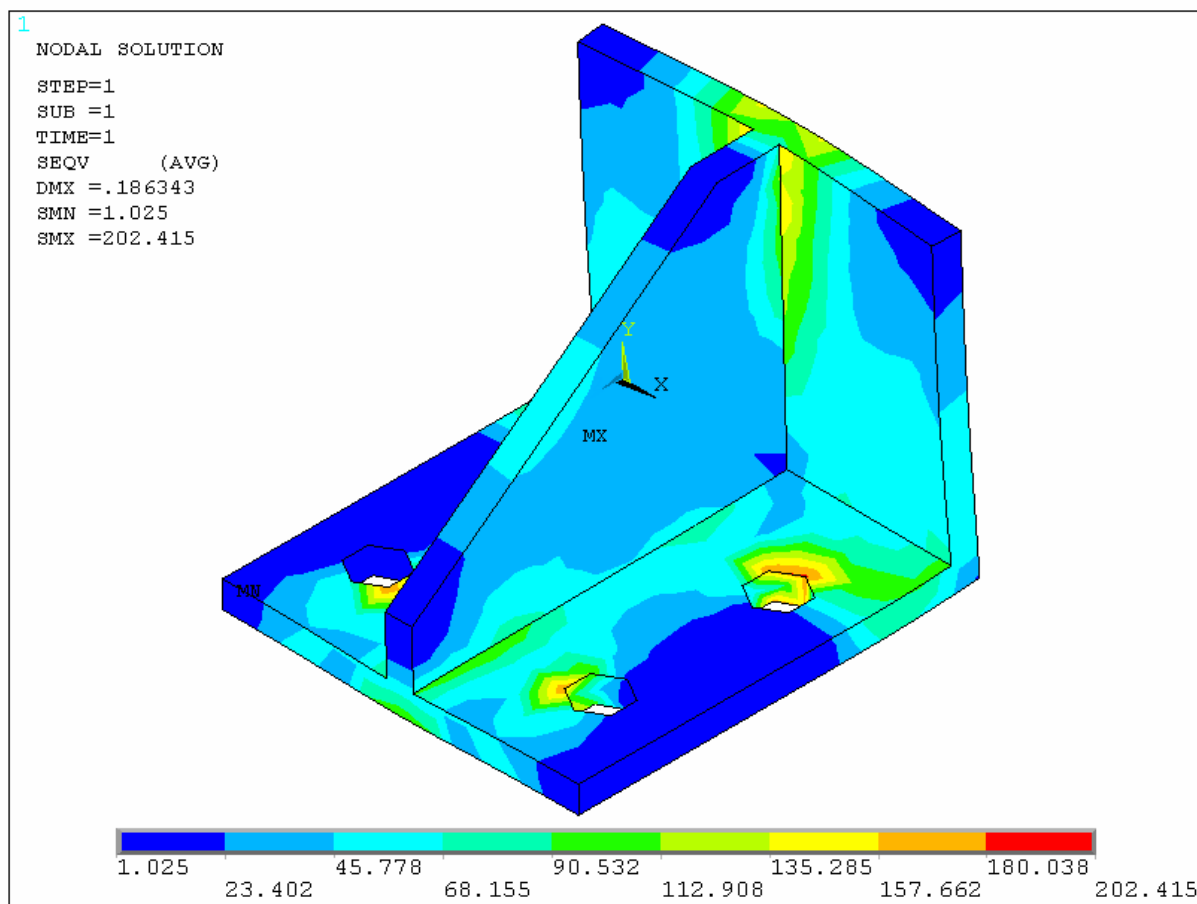


Рисунок 5 – Напряжения по Мизесу (в МПа)

Видно, что максимальное напряжение составляет 202,4 МПа, что меньше предела текучести.

Можно ли доверять такому решению? Для ответа на этот вопрос необходимо исследовать его сходимость, т.е. выполнить расчет для более мелкой разбивки.

14. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя Lab9.lgw.

15. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

«Исследование напряженно-деформированного состояния косозаделанного кессона»

Исходные данные: косозаделанный кессон (угол стреловидности 45°), имеющий четыре стальных пояса площадью сечения 240 мм^2 каждый и дюралевую обшивку толщиной 1 мм, на одном конце нагружен поперечной силой 10 кН, на другом его пояса закреплены неподвижно (рисунок 1). Верхняя и нижняя панели обшивки дополнительно подкреплены дюралевыми стрингерами площадью сечения 40 мм^2 каждый. Конструкция включает в себя пять равномерно расположенных нервюр толщиной 1 мм, перпендикулярных оси кессона; помимо них имеется еще одна нервюра в сечении у заделки. Для стали: модуль упругости $2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона 0,3; для дюралюминия: модуль упругости $7,1 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона 0,3.

Допущение: жесткость на изгиб и кручение поясов и стрингеров невелика, что позволяет использовать для их моделирования одноосные стержневые элементы.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние кессона; построить эпюры осевых напряжений в поясах.

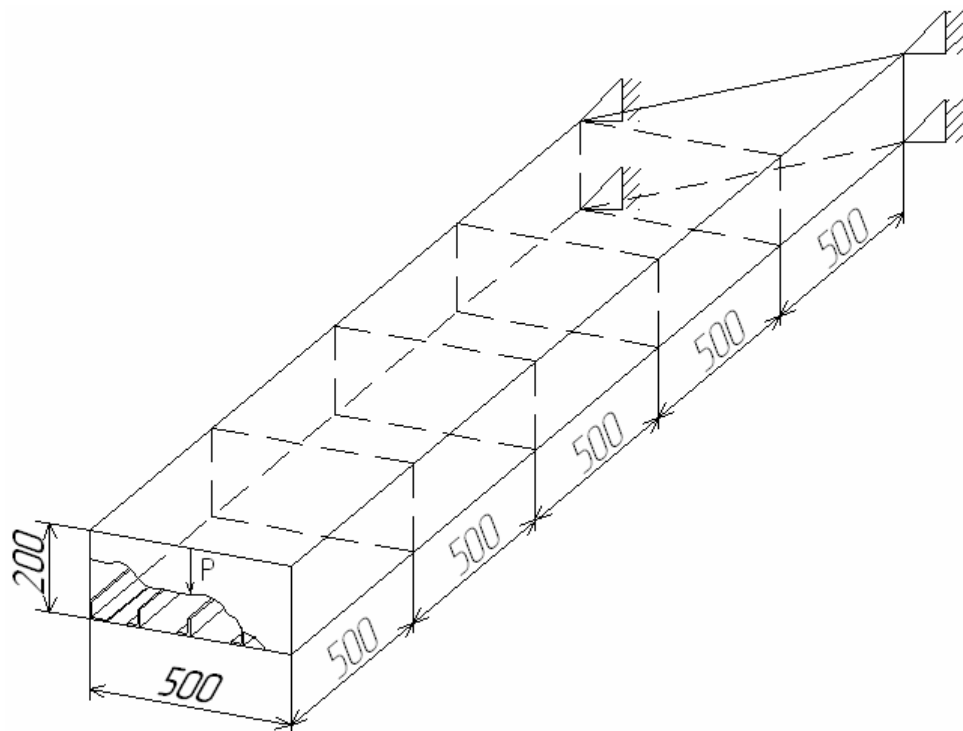


Рисунок 1 – Геометрия кессона

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab8.
2. Установить типы используемых в расчете элементов – 4-узловой оболочечный элемент SHELL63 и 2-узловой одноосный стержневой элемент LINK180: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*.

Нажимаем *Add*, сначала выбираем *Structural Shell>Elastic 4node 63, Apply*, а затем – *Structural Link>3D finite stn 180, OK* и *Close*.

3. Определить реальные постоянные для выбранных типов элементов: *M_M>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete*.

– Для панелей обшивки и нервюр нажимаем *Add* и указываем тип элементов «Type 1 Shell63», *OK*.

В соответствующие поля вводим:

«Real Constant Set No»: 1 (номер набора реальных постоянных)

«Shell thickness at node I» ТК(I): 1 (толщина оболочки, мм)

OK.

– Для поясов нажимаем *Add* и указываем тип «Type 2 Link180», *OK*.

Вводим:

«Real Constant Set No»: 2

«Cross-sectional area» AREA: 240 (площадь сечения пояса, мм²)

OK.

– Для стрингеров: нажимаем *Add* и указываем тип «Type 2 Link180», *OK*.

Вводим:

«Real Constant Set No»: 3

«Cross-sectional area» AREA: 40 (площадь сечения стрингера, мм²)

OK.

Закрываем диалоговую панель кнопкой *Close*.

4. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

– Для дюралюминия определяем первую модель материала (Material Model Number 1). В правом окне «Material Models Available» последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

Вводим:

EX: 7.1e4 (модуля упругости дюралюминия, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициента Пуассона дюралюминия)

OK.

– Для стали определяем вторую модель материала (Material Model Number 2). В меню диалоговой панели указываем *Material>New model, ОК*. Последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

Вводим:

EX: 2.1e5 (модуля упругости стали, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициента Пуассона стали)

ОК.

Закрываем панель.

5. Построить прямоугольный параллелепипед с размерами 500x200x2500: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Block>By 2 Corners & Z*. Вводим следующие параметры: координаты одного из углов на рабочей плоскости WP X = 0 и WP Y = 0; ширина Width = 500; высота Height = 200; глубина Depth = 2500.

ОК.

Для лучшего обзора конструкции установим с помощью кнопки *Isometric View* панели управления видом изометрическую проекцию.

6. Разрезать параллелепипед по плоскостям рядовых нервюр, расположенных через 500 мм перпендикулярно оси кессона.

- 6.1. Сместить рабочую плоскость на 500 мм в положительном направлении оси WZ системы координат рабочей плоскости: *U_M>WorkPlane>Offset WP by increments*.

В появившейся диалоговой панели «Offset WP» в поле «X,Y,Z offsets» (смещения в направления осей системы координат рабочей плоскости) вводим три разделенные запятыми значения: 0,0,500.

Apply.

- 6.2. Разрезать все объемы рабочей плоскостью: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Volu by WrkPlane*.

Нажимаем *Pick All*.

- 6.3. Повторить операции 6.1...6.2 еще три раза.

7. Разрезать параллелепипед, наиболее удаленный от начала координат, по плоскости корневой нервюры, проходящей под углом 45° к оси кессона. Сначала смещаем рабочую плоскость на 500 мм в положительном направлении оси WZ и поворачиваем ее на 45° вокруг оси WY: *U_M>WorkPlane>Offset WP by increments*.

В соответствующие поля вводим:

«X,Y,Z offsets»: 0,0,500 (смещения, мм)

«XY,YZ,ZX Angles»: 0,0,45 (углы поворота, град)

OK.

Затем разрезаем все объемы рабочей плоскостью: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Volu by WrkPlane.*

Нажимаем *Pick All.*

В заключение установим рабочую плоскость в исходное положение (в начало глобальной декартовой системы координат): *U_M>WorkPlane>Align WP with>Global Cartesian.*

8. Удалить объем в виде треугольной призмы, наиболее удаленный от начала координат: *M_M>Preprocessor>Modeling>Delete>Volume and Below.*

Указываем объем V3 и нажимаем *OK.*

9. Удалить только объемы, оставив принадлежащие им объекты более низкого порядка: *M_M>Preprocessor>Modeling>Delete>Volumes Only.*

Нажимаем *Pick All.*

После выполнения данной операции следует отобразить все оставшиеся объекты: *U_M>Plot>Multi-Plots.*

10. Разрезать поверхности для получения линий, представляющих оси стрингеров.

- 10.1. Повернуть рабочую плоскость на 90° вокруг оси *WY* в положительном направлении: *U_M>WorkPlane>Offset WP by increments.*

Вводим:

«XY,YZ,ZX Angles»: 0,0,90

Apply.

- 10.2. Сместить рабочую плоскость на 125 мм ($500/4=125$ мм) в положительном направлении оси *WZ*.

В диалоговой панели «Offset WP» вводим:

«X,Y,Z offsets»: 0,0,125

Apply.

- 10.3. Разрезать все поверхности рабочей плоскостью: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Area by WrkPlane.*

Нажимаем *Pick All.*

- 10.4. Повторить операции 10.2...10.3 еще два раза.

- 10.5. Установить рабочую плоскость в исходное положение: *U_M>WorkPlane>Align WP with>Global Cartesian.*

11. Объединить линии поясов в компонент *Poyasa.*

Сначала установим с помощью кнопок *Front View* и *Fit View* панели управления видом фронтальную проекцию (т.е. вид на плоскость XY) и подходящий масштаб.

Поместим в активный набор только линии поясов: *U_M>Select>Entities*.

При этом появляется диалоговая панель «Select Entities», где вводим:

Тип объектов: *Lines* (линии)

Критерий выбора: *By Num/Pick* (путем указания на экране)

Функция выбора: *From Full* (из полной системы)

OK.

Для выбора соответствующих линий здесь удобно в панели указания активизировать селекторную кнопку *Box* (прямоугольник) и, удерживая нажатой левую кнопку мыши, растянуть прямоугольник выбора так, чтобы в него попали только линии одного пояса. Повторить данную операцию выделения объектов для остальных поясов, как показано на рисунке 2 (счетчик *Count* в панели указания должен принимать значение, равное 18). *OK*.

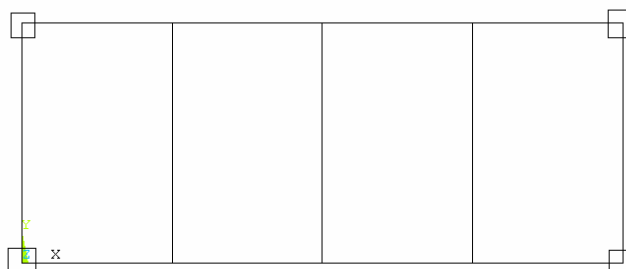


Рисунок 2 – Выбор линий поясов стреловидного кессона

Для проверки правильности выбора необходимо командой *U_M>Plot>Lines* отобразить только линии и с помощью кнопок *Isometric View* и *Fit View* панели управления видом установить изометрическую проекцию и подходящий масштаб.

Если выбраны лишние линии, их можно удалить из активного набора, указав *Unselect* в качестве функции выбора.

Далее создаем компонент с именем *Poyasa*, включающий все выбранные нами линии: *U_M>Select>Comp/Assembly>Create component*.

В поле «Component name» (имя компонента) вводим метку *Poyasa*, а в списке «Component is made of» (компонент создается из) выбираем *Lines* (линии). *OK*.

12. Проверить направление линий поясов, что требуется для правильного построения эпюр напряжений: *U_M>PlotCtrls>Symbols...*

Включаем флаг «Line direction» и командой *U_M>Plot>Lines* вычерчиваем линии (стрелки показывают их ориентацию).

Линии должны быть направлены в одну сторону. Если это условие не выполняется, то необходимо с помощью команды *M_M>Preprocessor>Modeling>Move/Modify>Reverse Normals>of Lines* изменить ориентацию отдельных линий.

Затем можно скрыть направления линий, отключив флаг «Line direction» (команда *U_M>PlotCtrls>Symbols...*).

В заключение выбираем все объекты: *U_M>Select>Everything*.

13. Объединить линии стрингеров в компонент Stringers.

Сначала установим с помощью кнопок *Front View* и *Fit View* панели управления видом фронтальную проекцию и подходящий масштаб.

Помещаем в активный набор только линии стрингеров: *U_M>Select>Entities*.

В диалоговой панели «Select Entities» вводим:

Тип объектов: *Lines* (линии)

Критерий выбора: *By Num/Pick* (путем указания на экране)

Функция выбора: *From Full* (из полной системы)

OK.

Для выбора соответствующих линий здесь также удобно в панели указания воспользоваться селекторной кнопкой *Box*. При этом общее число выбранных линий должно быть равно 30 (по пять на каждый стрингер).

Для проверки правильности выполнения данной операции необходимо командой *U_M>Plot>Lines* отобразить только линии и с помощью кнопок *Isometric View* и *Fit View* панели управления видом установить изометрическую проекцию и подходящий масштаб.

Далее создаем компонент с именем Stringers, включающий все выбранные нами линии: *U_M>Select>Comp/Assembly>Create component*.

В поле «Component name» (имя компонента) вводим метку Stringers, а в списке «Component is made of» (компонент создается из) выбираем Lines (линии). *OK*.

14. Задать атрибуты элементов: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

Сначала в разделе «Element Attributes» диалоговой панели «MeshTool» в выпадающем списке выбираем Areas и нажимаем распложенную правее кнопку *Set*.

Указываем все поверхности (*Pick All*) и вводим атрибуты панелей обшивки и нервюр:

«Material number»: 1 (номер материала)

«Real constant set number»: 1 (номер набора реальных постоянных)

«Element type number»: 1 SHELL63 (номер типа элементов)

ОК.

Для задания атрибутов поясов активизируем компонент Roayasa. Это удобно сделать с помощью менеджера компонентов, запускаемого командой *U_M>Select>Component Manager* (рисунок 3).

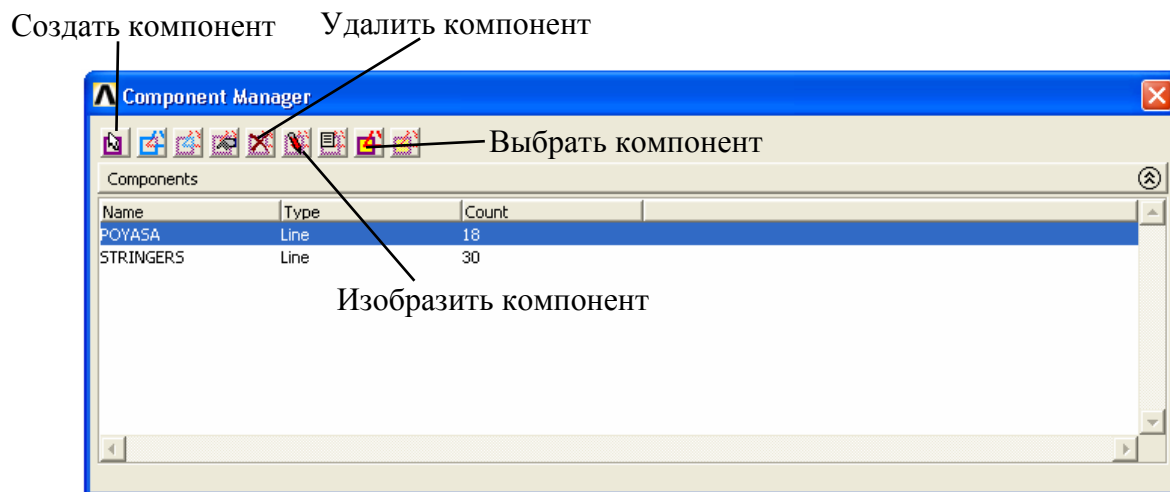


Рисунок 3 – Работа с менеджером компонентов

В списке созданных ранее компонентов выбираем соответствующую строку и нажимаем кнопку *Select Component* (выбрать компонент).

Для проверки правильности выбора здесь можно отобразить на экране только линии: *U_M>Plot>Lines*.

Затем в диалоговой панели «Mesh Tool» в верхнем списке «Element Attributes» выбираем Lines и нажимаем распложенную правее кнопку *Set*.

Далее указываем все активные линии (*Pick All*) и вводим атрибуты поясов:

«Material number»: 2

«Real constant set number»: 2

«Element type number»: 2 LINK180

ОК.

Для задания атрибутов стрингеров активизируем компонент *Stingers* также с помощью менеджера компонентов.

Далее после нажатия кнопки *Set* раздела «Element Attributes» и указания всех активных линий (*Pick All*) вводим атрибуты стрингеров:

«Material number»: 1

«Real constant set number»: 3

«Element type number»: 2 LINK180

OK.

15. Разбить все поверхности на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool.*

Глобальный размер длины стороны элементов задаем равным 50 мм. Для этого нажимаем кнопку *Set* строки «Global» и в поле «Element edge length» (длина стороны элемента) вводим соответствующее значение. *OK.*

В списке «Mesh» в качестве объектов для разбиения выбираем Areas (поверхности).

Несмотря на то, что все поверхности являются «правильными», устанавливаем режим Free (свободная сетка), поскольку в этом случае получается более качественная сетка в областях треугольной формы.

Для генерации сетки далее следует нажать кнопку *Mesh* и указать все поверхности (*Pick All*).

16. Разбить линии, представляющие пояса и стрингеры, на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool.*

Сначала с помощью менеджера компонентов (команда *U_M>Select>Component Manager*) выбираем сразу два компонента Poaysa и Stringers.

В списке «Mesh» панели «MeshTool» указываем Lines (линии).

Для генерации сетки далее следует нажать кнопку *Mesh* и указать все активные в данный момент линии (*Pick All*).

17. Задать граничные условия: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints.*

Указываем четыре угловые точки сечения у заделки (см. рисунок 1) и после нажатия кнопки *OK* в поле «DOFs to be constrained» (степени свободы, которые должны быть ограничены) выбираем значение All DOF (все степени свободы). *OK.*

18. Приложить нагрузку: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints.*

На свободном торце кессона указываем две нижние угловые точки и нажимаем *OK*.

Затем в списке «Direction of force/moment» (направление силы/момента) выбираем направление FY и в поле «Force/moment value» вводим отрицательное число -5000 ($P/2$, т.к. мы указываем две точки). *OK*.

19. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar > SAVE_DB*.

База данных записывается в файл Lab8.db.

20. Запустить задачу на счет: *M_M > Solution > Solve > Current LS*.

21. Отобразить на экране дисплея поле напряжений по Мизесу: *M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu.*

Из списка доступных результатов выбираем *Nodal Solution > Stress > von Mises stress* (напряжение по Мизесу), *OK*.

22. Построить эпюры осевых напряжений в поясах.

Сначала помещаем в активный набор только элементы, моделирующие пояса: *U_M > Select > Entities*.

В диалоговой панели «Select Entities» вводим:

Тип объектов: *Elements* (элементы)

Критерий выбора: *By attributes* (по атрибутам)

Тип атрибутов: *Real set num* (номер набора реальных постоянных)

«Min, Max, Inc»: 2 (диапазон номеров)

Функция выбора: *From Full* (из полной системы)

Apply.

Для проверки правильности выбора можно в этой же диалоговой панели нажать кнопку *Plot* (на экране должны появиться только элементы, моделирующие пояса).

Далее составляем таблицу элементов, помещая в нее осевые напряжения (см. описание по элементу LINK180): *M_M > General Postproc > Element Table > Define Table*.

Нажимаем кнопку *Add* и в соответствующие поля вводим:

Lab «User lab for item»: *Sigma* (метка пользователя)

Item, Comp «Result data item»: *By sequence num > LS,1* (идентификатор группы и порядковый номер осевого напряжения)

Apply.

OK. Close.

И, наконец, строим эпюру осевых напряжений непосредственно на модели: *M_M > General Postproc > Plot Results > Contour plot > Line Elem Res*.

В соответствующие поля вводим:

LabI «Elem table item at node I»: Sigma

LabJ «Elem table item at node J»: Sigma

OK.

Эпюры осевых напряжений в поясах показаны на рисунке 4. Они имеют ступенчатый вид, поскольку в пределах ферменного элемента напряжения постоянны.

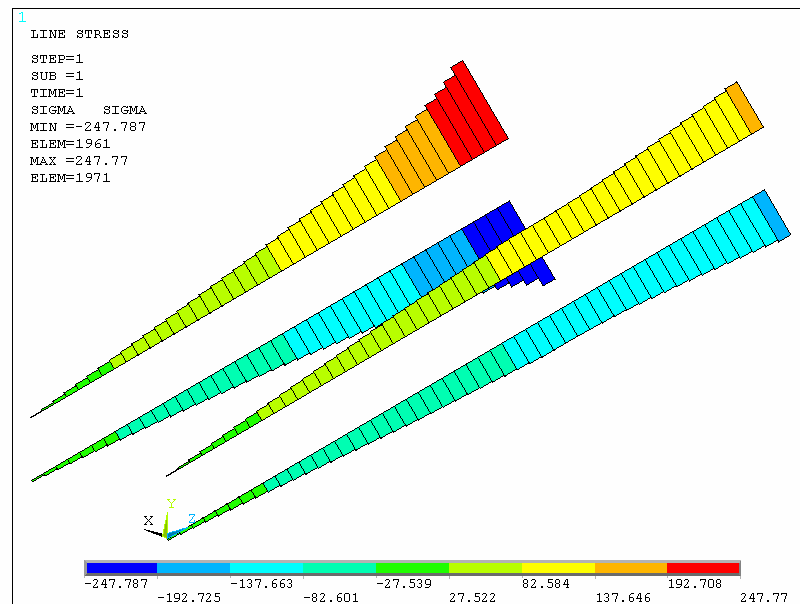


Рисунок 4 – Эпюры осевых напряжений в поясах (в МПа)

23.Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя Lab8.lgw.

24.Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

«Исследование напряженно-деформированного состояния круглой (на развертке) цилиндрической панели»

Исходные данные: круглая цилиндрическая панель (рисунок 1) жестко защемлена по контуру и нагружена через жесткий центр силой $P = 10$ кН. Радиус цилиндра $R = 1$ м; радиус панели $r_1 = 550,1$ мм; радиус жесткого центра $r_0 = 66,1$ мм; толщина панели $h = 5$ мм; модуль упругости $E = 1,96 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Допущение: отношения диаметра панели $2r_1$ и радиуса кривизны оболочки R к толщине h больше 10, что позволяет использовать для ее моделирования оболочечные элементы.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние круглой цилиндрической панели; построить графики изменения мембранных и изгибных окружных напряжений в сечении $y = 0$.

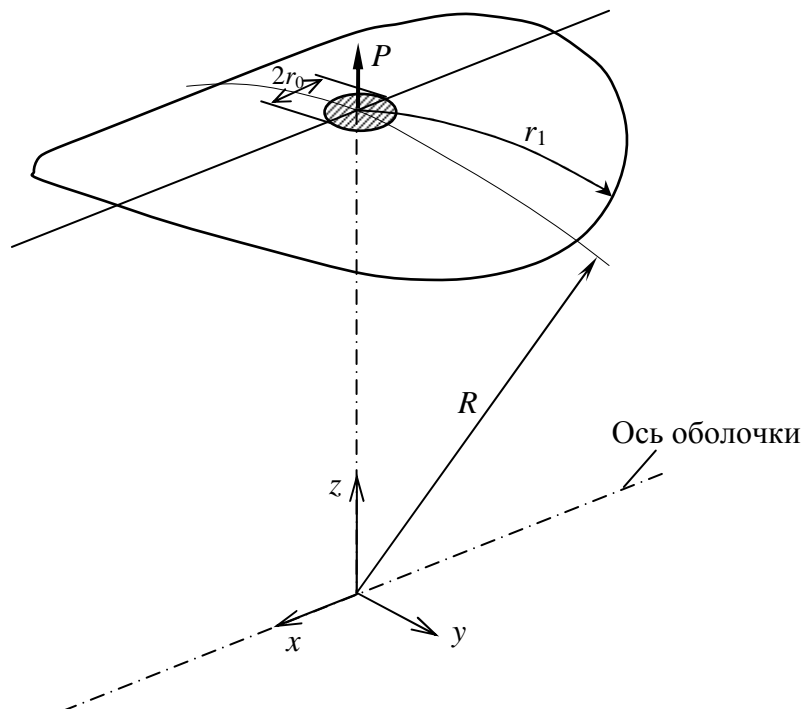


Рисунок 1 – Геометрия оболочки

Конструкция имеет двойную симметрию (относительно плоскостей xz и yz), что позволяет ограничиться рассмотрением лишь четверти панели. При этом вместо силы P нужно будет прикладывать силу $P/4$.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab7.
2. Установить тип используемых в расчете элементов – 4-узловой оболочечный элемент SHELL63: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*¹.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Shell>Elastic 4node 63*, *OK* и *Close*.

3. Определить реальные постоянные для выбранного типа элементов: *M_M>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete*².

Нажимаем *Add* и указываем тип элементов «Type 1 Shell63», *OK*.

В соответствующие поля вводим:

«Real Constant Set No»: 1 (номер набора реальных постоянных)

«Shell thickness at node I» ТК(I): 5 (толщина оболочки в узле I, мм)

OK.

Так как толщина оболочки является постоянной, то здесь достаточно ввести лишь одно значение для узла I.

Закрываем диалоговую панель кнопкой *Close*.

4. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

В правом окне последовательно (двойным щелчком мыши) выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

Вводим:

EX: 1.96e5 (модуль упругости, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

Закрываем панель.

5. Для удобства ввода исходных данных определить скалярные параметры: *U_M>Parameters>Scalar Parameters*.

В поле «Selection» последовательно вводим: $R=1000$; $r1=550.1$; $r0=66.1$; $theta=r1/R*180/3.14$. После каждого ввода здесь необходимо нажать кнопку *Accept* (принять).

Закрываем панель кнопкой *Close*.

¹ Для версии Release 13 и более поздних вместо шага 2 следует в командную строку ввести ET,1,SHELL63 и нажать клавишу *Enter*.

² Аналогично для новых версий вместо шага 3 следует в командную строку ввести R,1,5 и нажать *Enter*.

6. Построить точки: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS.*

Вводим координаты точек (используя буквенные обозначения скалярных параметров) согласно следующей таблице:

Номер точки	x, мм	y, мм	z, мм
1	0	0	0
2	<i>r1</i>	0	0
3	0	<i>r1</i>	0
4	<i>r0</i>	0	0
5	0	<i>r0</i>	0
6	0	0	<i>R</i>

Включаем нумерацию геометрических объектов: *U_M>PlotCtrls>Numbering*, отмечаем флаги «Keypoint numbers», «Line numbers» и «Area numbers».

Для лучшего обзора точек установим с помощью кнопки *Isometric View* панели управления видом изометрическую проекцию и отобразим все введенные объекты: *U_M>Plot>Multi-Plots.*

Можно в этой же панели активизировать динамический режим *Dynamic Model Mode*, что позволит перемещать изображение модели непосредственно мышью, удерживая нажатой левую кнопку, а вращать – с помощью правой кнопки. При вращении колеса мыши вперед или назад данное изображение будет приближаться или отодвигаться.

7. Построить две дуги окружности (по двум конечным точкам и радиусу): *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Arcs>By End KPs & Rad.*

Сначала для первой дуги указываем конечные точки 2 и 3, далее нажимаем кнопку *OK* и в начале системы координат указываем точку 1 (эта точка совместно с конечными определяет плоскость дуги и сторону, где располагается центр кривизны).

После нажатия кнопки *OK* появляется диалоговая панель, в поле «Radius of the arc» которой вводим радиус окружности *r1*, *Apply*.

Аналогично строится вторая дуга. Для нее конечными являются точки 4 и 5, точкой приближения к центру кривизны – также точка 1, а радиус окружности составляет *r0*.

В конце нажимаем *OK*.

8. Выполнить масштабирование первой дуги по оси y : $M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Scale > Lines$.

Эта операция требуется для получения круглой на развертке панели. При этом коэффициент масштабирования вычисляется в соответствии с рисунком 2 по следующей формуле:

$$k_y = \frac{R}{r_1} \sin \frac{r_1}{R} = 0,95032.$$

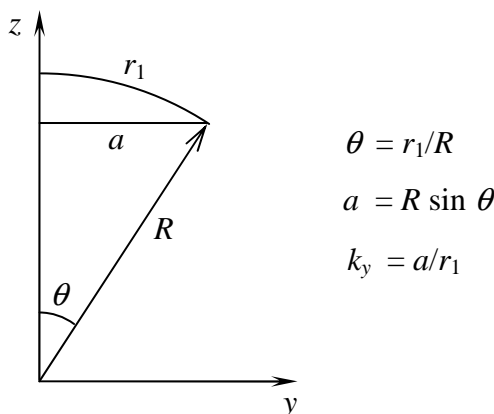


Рисунок 2 – К определению коэффициента масштабирования

При выполнении данной команды указываем линию L1 и подтверждаем выбор нажатием кнопки *OK*.

При этом появляется диалоговая панель, где для коэффициентов масштабирования по осям координат «Scale factors» вводим следующие значения: 1; 0.95032; 1. Для поля «Existing Lines will be» выбираем значение Moved, означающее, что существующие линии будут перемещаться, а не копироваться. *OK*.

9. Построить дугу окружности путем вращения точки 6 относительно оси, заданной точками 1 и 2, на угол θ : $M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Keypoints > About Axis$.

Сначала курсором мыши указываем точку 6, а затем после нажатия кнопки *OK* точки 1 и 2.

Далее в поле «Arc length in degrees» (длина дуги в градусах) вводим отрицательное значение $-theta$ (направление вращения здесь определяется правилом правого винта). *OK*.

10. Определить траекторию вытягивания путем построения прямой линии по точкам 1 и 2: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line*.

Указываем точки 1 и 2, *OK*.

11. Построить цилиндрическую поверхность, вытягивая линию L3 вдоль траектории, заданной линией L4: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Lines>Along Lines*.

Здесь необходимо сначала указать линию L3, а затем после нажатия кнопки *OK* – линию L4. *OK*.

12. Определить новую траекторию вытягивания путем построения прямой линии по точкам 2 и 8: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line*.

Указываем точки 2 и 8, *OK*.

13. Дополнительно построить еще две цилиндрические поверхности, вытягивая линии L1 и L2 вдоль траектории, заданной линией L8: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Lines>Along Lines*.

Здесь удобно сначала указать линию L2 и после нажатия кнопки *OK* – линию L8. Затем нажать кнопку *Apply*, выбрать линию L1, нажать *OK* и указать линию L8, *OK*.

14. Разрезать поверхность A1 с помощью поверхностей A2 и A3: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Area by Area*.

Указываем сначала поверхность A1, затем после нажатия *OK* – поверхности A2 и A3. *OK*.

15. Удалить ненужные геометрические объекты.

Для удаления поверхностей (а также принадлежащих им линий и точек) выбираем следующий пункт меню: *M_M>Preprocessor>Modeling>Delete>Area and Below*.

Указываем поверхности A4 и A5, *OK*.

После выполнения этой операции следует отобразить на экране все объекты: *U_M>Plot>Multi-Plots*.

Далее удаляем лишние линии (вместе с их концевыми точками): *M_M>Preprocessor>Modeling>Delete>Line and Below*.

Указываем линии L4 и L8, *OK*.

Если затем отобразить на экране только поверхности (*U_M>Plot>Areas*), а затем с помощью кнопки *Fit View* панели управления видом установить

подходящий масштаб, то должно получиться изображение, аналогичное рисунку 3.

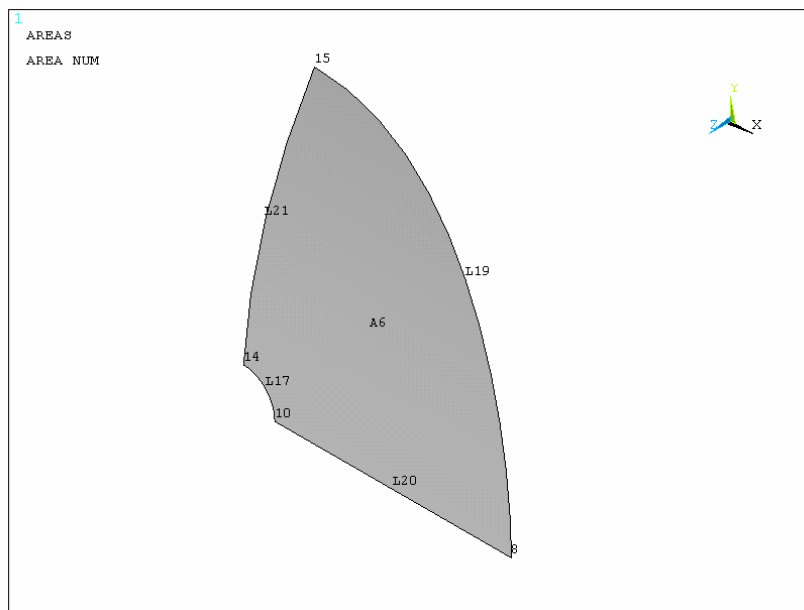


Рисунок 3 – Геометрическая модель четверти панели

16. Проверить ориентацию нормали к поверхности: *U_M>PlotCtrls>Symbols....*

Для отображения нормалей включаем флаг «Area direction», *OK*.

Нормаль к построенной нами поверхности должна быть направлена наружу. В противном случае необходимо изменить ее направление с помощью команды *M_M>Preprocessor>Modeling>Move/Modify>Reverse Normals>of Areas*.

17. Отобразить направления линий: *U_M>PlotCtrls>Symbols....*

Включаем флаг «Line direction» (флаг «Area direction» можно снять), *OK*.

Затем командой *U_M>Plot>Lines* вычерчиваем линии.

18. Разбить поверхность на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

Следует отметить, что более эффективной здесь является неравномерная сетка со сгущением к жесткому центру.

Нажимаем кнопку *Set* строки «Lines» и указываем внешний контур панели (т.е. линию L19), а также кромку, примыкающую к жесткому центру (т.е. линию L17). После нажатия *OK* в поле «No. of element divisions» (число делений линий на элементы) вводим значение 30, *Apply*.

Аналогично задаем параметры управления сеткой и на линиях, расположенных в плоскостях симметрии. Однако для получения неравномерной сетки в поле «Spacing ratio» (отношение длины стороны элемента в конце линии к длине стороны элемента в начале линии) вводим значение 10 (если линия направлена в сторону от центра панели) или 0.1 (если линия направлена к центру панели).

Поскольку построенная поверхность является «правильной», то можно установить режим *Mapped* (регулярная сетка). Для генерации сетки далее следует нажать кнопку *Mesh* и указать нашу поверхность, *OK*.

Полученная таким образом конечно-элементная идеализация оболочки показана на рисунке 4.

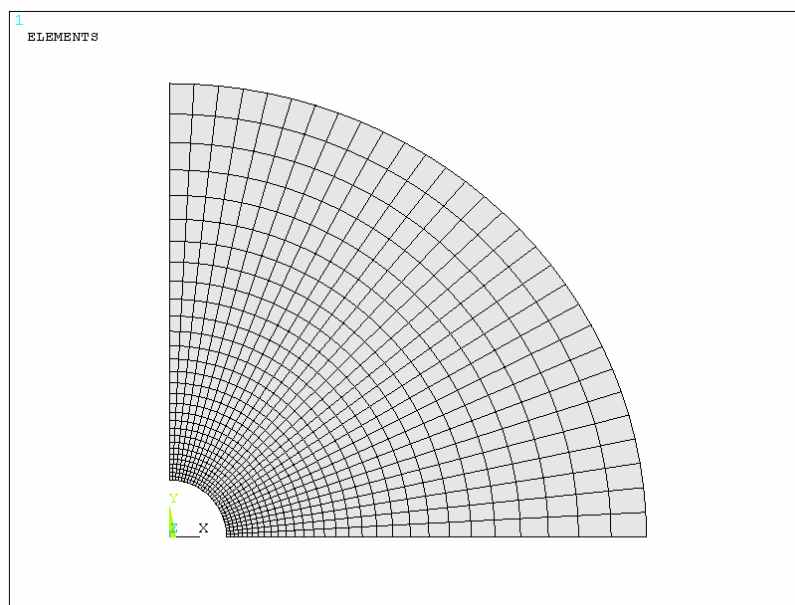


Рисунок 4 – Конечно-элементная модель четверти панели

19. Для моделирования жесткого центра связать перемещения по оси z всех узлов, расположенных на примыкающей к нему линии: *M_M>Preprocessor>Coupling/Cegn>Couple DOFs*.

Предварительно кнопкой *Font View* панели управления видом установим фронтальную проекцию, а затем с помощью кнопки *Zoom Model* приблизим центральный фрагмент оболочки.

Для выбора соответствующих узлов здесь удобно в панели указания активизировать селекторную кнопку *Circle* (окружность), переместить курсор в центр оболочки и, удерживая нажатой левую кнопку мыши, растянуть

окружность выбора так, чтобы в нее попали только нужные узлы (рисунок 5).

После нажатия *OK* появляется диалоговая панель, где необходимо в поле «Set reference number» (номер набора связанных степеней свободы) ввести Next (следующий), а в поле «Degree_of_freedom label» (метка степени свободы) выбрать значение UZ. *OK*.

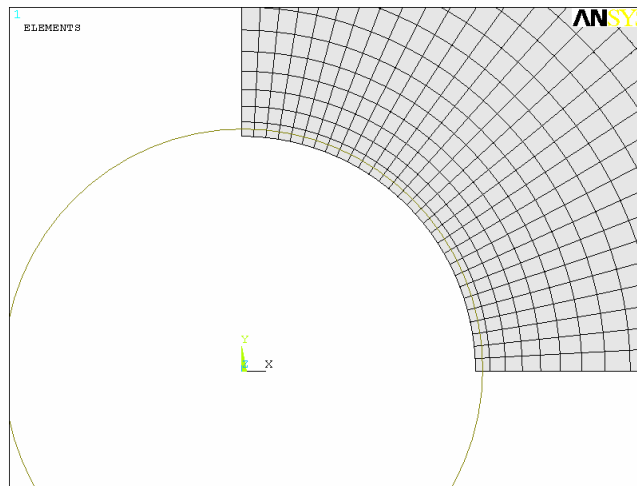


Рисунок 5 – Выбор узлов на линии, примыкающей к жесткому центру

При этом на модель будут наложены связи, обеспечивающие равенство перемещений по оси z всех указанных в данной команде узлов.

С помощью кнопки *Fit View* панели управления видом устанавливаем подходящий масштаб.

20. Задать граничные условия симметрии: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>Symmetry B.C.>...with Area*.

В плоскостях симметрии расположены две линии: L20 и L21.

Здесь сначала следует указать одну из этих линий и зафиксировать выбор кнопкой *OK*, затем указать прилегающую к линии поверхность A6 и нажать кнопку *Apply* для продолжения работы с данной командой.

Условия симметрии на другой линии задаются аналогично.

21. Задать граничные условия защемления по контуру панели: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

При этом указываем линию на внешнем контуре (т.е. линию L19) и после нажатия кнопки *OK* в поле «DOFs to be constrained» (степени свободы, которые должны быть ограничены) выбираем значение All DOF (все степени свободы). *OK*.

22. На кромке, примыкающей к жесткому центру, запретить все перемещения кроме смещений вдоль оси z .

Здесь удобно сначала с помощью команды *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines* на соответствующей линии (т.е. линии L17) ограничить все перемещения, выбирая All DOF.

Затем с использованием команды *M_M>Solution>Define Loads>Delete>Structural>Displacement>On Lines* на той же линии следует удалить ограничение на смещение по оси z , указывая в поле «Constraints to be deleted» направление UZ.

23. Приложить сосредоточенную силу: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints*.

Ранее для узлов на кромке, примыкающей к жесткому центру, мы связали перемещения по оси z . Поэтому нагрузку здесь можно приложить в любом узле данной линии, поскольку за счет наложенных связей она соответствующим образом перераспределится на остальные узлы рассматриваемой кромки.

При выполнении настоящей команды сначала указываем одну из концевых точек данной кромки и нажимаем *OK*.

Затем в списке «Direction of force/moment» (направление силы/момента) выбираем направление FZ и в поле «Force/moment value» вводим число 2500.

Необходимо напомнить, что здесь мы задаем не полную силу, а $P/4$.

24. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar>SAVE_DB*.

База данных записывается в файл Lab7.db.

25. Запустить задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

26. Отобразить на экране дисплея поле напряжений по Мизесу: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu*.

При выполнении данной команды появляется диалоговая панель, где в иерархической древовидной структуре «Item to be contoured» (величина, которая должна отображаться) выбираем *Nodal Solution>Stress>von Mises stress* – напряжение по Мизесу (или эквивалентное напряжение по теории прочности энергии формоизменения). *OK*.

Поскольку в интерактивном режиме по умолчанию установлен способ графического изображения PowerGraphics, вращая изображение модели, можно увидеть распределение данных напряжений на наружной и внутренней поверхностях оболочки.

Для представления результатов на полной модели следует воспользоваться командой *U_M>PlotCtrls>Style>Symmetry Expansion>Periodic/Cyclic Symmetry* и активизировать опцию «1/4 Dihedral Sym» (рисунок 6).

Для возвращения к исходному изображению расчетной модели необходимо выполнить эту же команду и выбрать значение «No Expansion».

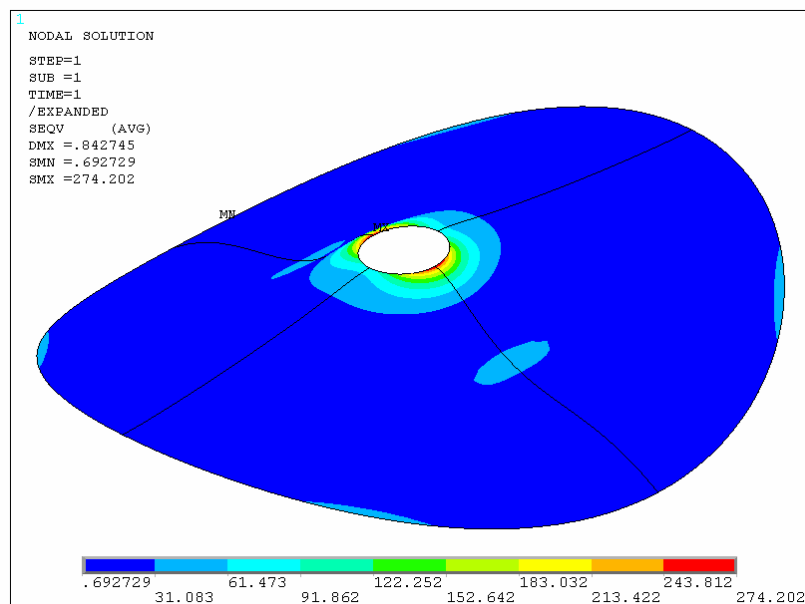


Рисунок 6 – Поле напряжений по Мизесу (в МПа)

27. Построить графики изменения мембранных и изгибных окружных напряжений в сечение $y = 0$.

Для удобства выполнения данной операции отобразим на экране только элементы (*U_M>Plot>Elements*) и установим фронтальную проекцию (кнопка *Front View* панели управления видом).

Следует отметить, что вдоль сечения $y = 0$ окружные напряжения совпадают с компонентой S_Y в глобальной декартовой системе координат.

Мембранные напряжения – это напряжения в срединной поверхности оболочки, а изгибные – определяются как полуразность напряжений на верхней и нижней поверхностях оболочки.

В первую очередь определим траекторию, вдоль которой будем строить графики: *M_M>General Postproc>Path Operations>Define Path>By Nodes*.

Указываем два крайних узла на концах линии, расположенной в плоскости симметрии xz , и нажимаем *OK*.

Для создаваемой траектории в поле «Define Path Name» задаем имя, например Mu_path , и увеличиваем значение параметра «Number of divisions»

(число сегментов, создаваемых на траектории между каждой парой узлов) до 100 для получения более гладких графиков.

После нажатия кнопки *OK* появляется информационное окно, которое следует закрыть.

На построенную траекторию необходимо нанести результаты.

Сначала с помощью команды *M_M>General Postproc>Options for Outp* меняем опции вывода.

В поле «Results coord system» (система координат результатов) выбираем глобальную декартову систему (Global Cartesian), а для параметра «Shell results are from» (результаты для оболочек берутся из) определяем среднюю поверхность (Middle layer).

Далее используем команду *M_M>General Postproc>Path Operations>Map onto Path*.

В поле «User label for item» вводим пользовательскую метку *S_mem* для обозначения мембранных напряжений, а в списке с двумя столбцами выбираем *Stress>Y-direction SY*. *OK*.

Описанные выше действия повторяем еще дважды для нанесения на траекторию напряжений на верхней и нижней поверхностях оболочки. Следует отметить, что положение этих поверхностей определяется направлением вектора нормали к поверхности геометрической модели.

Для выбора верхней (или нижней) поверхности необходимо снова с помощью команды *M_M>General Postproc>Options for Outp* отобразить диалоговую панель для задания опций вывода и в поле «Shell results are from» выбрать значение Top layer (или Bottom layer).

Для напряжений на верхней и нижней поверхностях оболочки вводим соответственно метки *S_top* и *S_bot*.

Для вычисления изгибных напряжений выполним операцию сложения (вычитания) объектов *S_top* и *S_bot*: *M_M>General Postproc>Path Operations>Add*.

При этом вводим данные, как показано на рисунке 7.

Для построения требуемых графиков воспользуемся командой *M_M>General Postproc>Path Operations>Plot Path Item>On Graph*.

Выбираем метки *S_mem* и *S_bend*, нажимаем *OK*.

Следует отметить, что здесь с помощью команды *U_M>PlotCtrls>Style>Graphs>Modify Axes* для каждой оси можно установить новый диапазон

изменения аргумента (XMIN, XMAX или YMIN, YMAX) и число делений (NDIV).

Полученные таким образом графики представлены на рисунке 8.

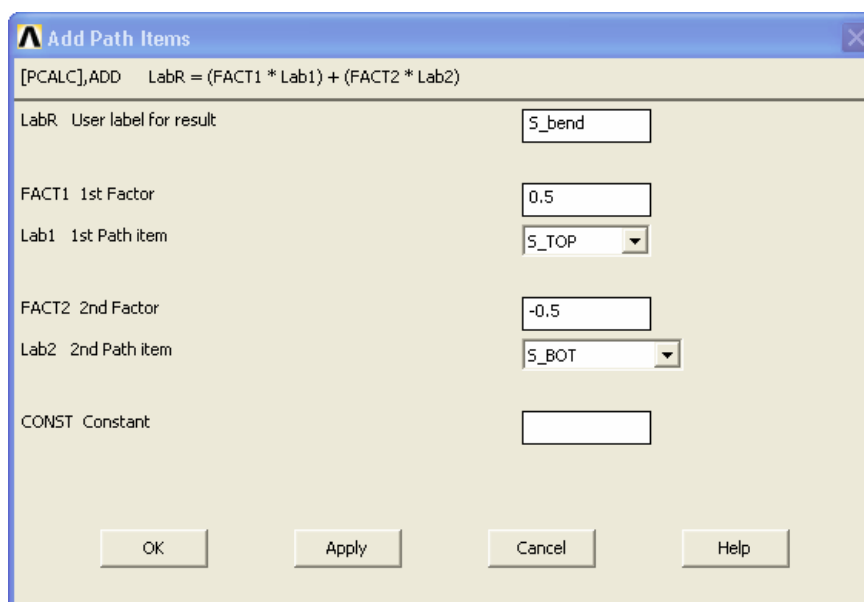


Рисунок 7 – Вычисление изгибных напряжений

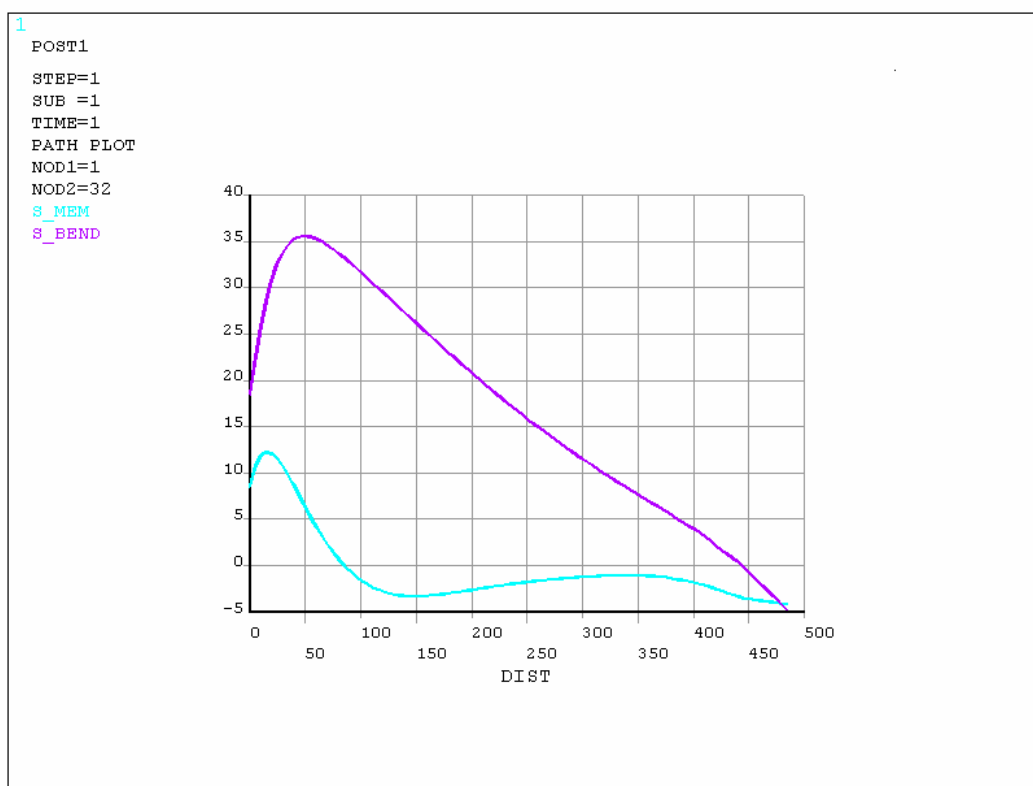


Рисунок 8 – Графики мембранных и изгибных окружных напряжений

28. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя Lab7.lgw.

29. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

Замечание: Начиная с версии ANSYS Release 13, в качестве основного типа оболочечных элементов вместо SHELL63 рекомендуется использовать SHELL181. При этом для задания свойств элементов (например, толщины оболочки) следует использовать не реальные постоянные, а средства создания поперечных сечений: *M_M>Preprocessor>Sections>Shell>Lay-up>Add/Edit.* При выполнении данной команды появляется таблица, где в столбце «Thickness» необходимо ввести значение толщины, а в столбце «Material ID» – выбрать материал (свойства материала должны быть заданы заранее). *OK.*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

«Расчет пространственной рамы»

Исходные данные: геометрия рамы показана на рисунке 1; стержни имеют двутавровый профиль (высота профиля 100 мм; ширина полков 55 мм; толщина стенки 4,1 мм; толщина полков 5,7 мм); материал стержней – сталь Ст6сп (модуль упругости $2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 325 МПа). На каждом участке стенка двутаврового профиля располагается в вертикальной плоскости.

Допущение: жесткое соединение узлов рамы предполагает работу стержней на растяжение-сжатие, изгиб и кручение.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние рамы; построить эпюры сил и моментов в стержнях рамы; найти максимальное перемещение.

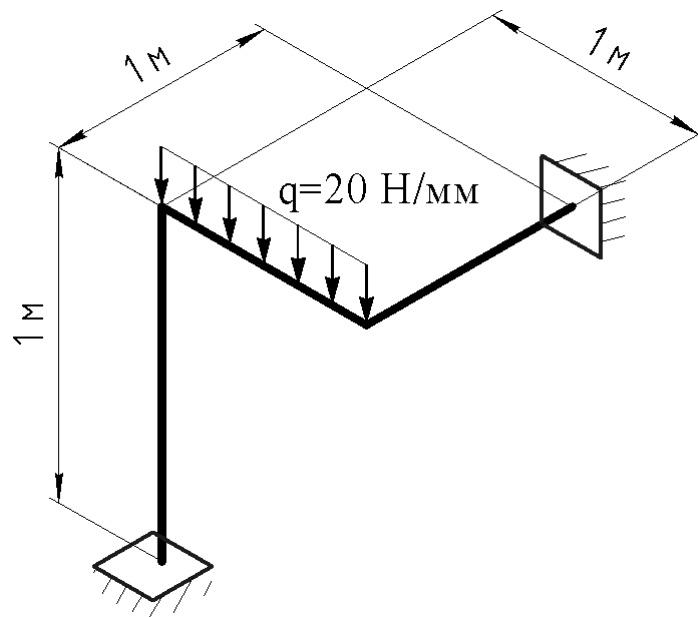


Рисунок 1 – Схема конструкции

Начало системы координат поместим в левую нижнюю точку; пронумеруем все точки рамы, как показано на рисунке 2.

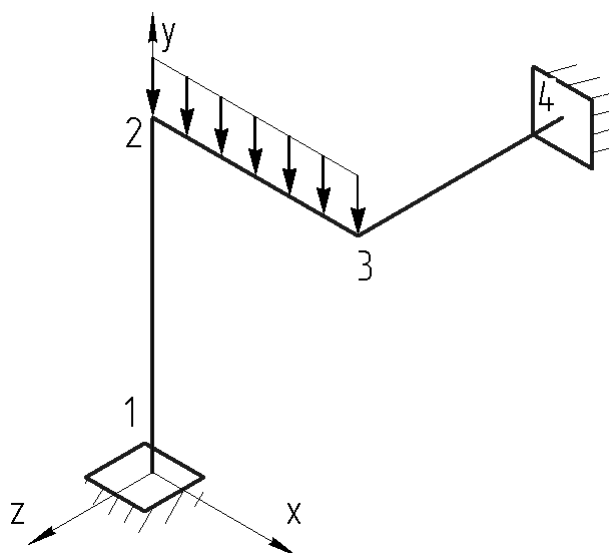


Рисунок 2 – Рама с номерами точек

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab6.
2. Установить тип используемых в расчете элементов – 2-узловой балочный элемент BEAM188: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Beam>2 node 188*, *OK*.

Чтобы изменить формулировку элемента, нажимаем кнопку *Options*.

Для опции *K3* выбираем значение «Quadratic form» (квадратичная функция формы), *OK*.

При этом в каждом балочном элементе будет вводиться дополнительный промежуточный узел (не доступный пользователю), что повышает точность расчета. При такой формулировке изгибающие моменты в пределах элемента будут изменяться по линейному закону.

Close.

3. Определить поперечное сечение для балочных элементов: *M_M>Preprocessor>Sections>Beam>Common Section*.

В соответствующие поля вводим:

ID: 1 (идентификационный номер сечения, задается по умолчанию)

Name: Dvutavr (определяемое пользователем имя сечения)

SubType: I (выбираемый из списка стандартный тип сечения)

Offset To: Centroid (узлы располагаются в центре тяжести сечения)

W1: 55 (ширина нижней полки, мм)

W2: 55 (ширина верхней полки, мм)

W3: 100 (высота профиля, мм)

- t1: 5.7 (толщина нижней полки, мм)
- t2: 5.7 (толщина верхней полки, мм)
- t3: 4.1 (толщина стенки, мм).

Для предварительного просмотра введенного сечения воспользуемся кнопкой *Preview*. При этом справа будут отображаться рассчитанные программой геометрические характеристики сечения.

Завершаем ввод сечения кнопкой *OK*.

4. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

В правом окне последовательно (двойным щелчком мыши) выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

Вводим:

EX: 2e5 (модуль упругости, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

Закрываем панель.

5. Построить геометрическую модель рамы.

Сначала с помощью команды *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS* строим точки согласно следующей таблице:

Номер точки	x, мм	y, мм	z, мм
1	0	0	0
2	0	1000	0
3	1000	1000	0
4	1000	1000	-1000

С помощью кнопки *Isometric View* панели управления видом (при подводе к кнопкам данной панели курсора мыши автоматически появляется всплывающая подсказка) устанавливаем изометрическую проекцию.

Включаем отображение нумерации геометрических объектов: *U_M>PlotCtrls>Numbering*, отмечаем флаги «Keypoint numbers» и «Line numbers».

Для моделирования стержневой рамы соединим точки прямыми линиями: *M_M>Preprocessor>Modeling>Lines>Lines>Straight Line*.

Указываем мышью в рабочем окне попарно точки в начале и в конце каждой линии, представляющей стержень рамы (см. рисунок 2): 1-2, 2-3, 3-4, ОК.

6. Назначить линиям атрибуты элементов.

Для трехмерных балочных элементов важна ориентация сечения, задание которой осуществляется либо по умолчанию, либо с помощью так называемой ориентационной точки.

По умолчанию ось u_e (горизонтальная ось на предварительном просмотре сечения) ориентируется параллельно плоскости XU глобальной системы координат.

Альтернативный способ задания ориентации сечения состоит в использовании дополнительной (ориентационной) точки, которая в совокупности с концевыми точками линии определяет плоскость $x_e z_e$ систем координат балочных элементов.

Отметим, что ориентация балочных элементов задается при назначении атрибутов элементов на линиях модели.

Для этого воспользуемся инструментальной панелью «MeshTool»: *M_M > Preprocessor > Meshing > MeshTool*.

В разделе «Element attributes» (атрибуты элементов) в выпадающем списке в качестве объектов для назначения атрибутов выбираем Lines (линии) и рядом нажимаем кнопку *Set* (установить).

Сначала указываем вертикальную линию 1-2 (см. рисунок 2), ОК.

В появившемся окне по умолчанию установлены следующие значения:

MAT «Material number»: 1 (номер материала)

TYPE «Element type number»: 1 BEAM188 (номер типа элементов)

SECT «Element section»: 1 Dvutavr (номер и имя сечения).

Активизируем флаг «Pick Orientation Keypoint(s)» (указывать ориентационную точку), ОК.

В качестве ориентационной указываем точку 3.

Нажимаем *Apply* для продолжения данной операции.

Далее указываем линию 2-3, ОК.

Убеждаемся, что активна опция указания ориентационной точки, ОК.

В качестве ориентационной выбираем точку 1, ОК.

Для оставшегося участка рамы ни одна из имеющихся точек не может использоваться в качестве ориентационной.

Определим новую точку путем копирования точки 4 со смещением на некоторое расстояние в отрицательном направлении глобальной оси Y :
M_M>Preprocessor>Modeling>Copy>Keypoints.

Указываем точку 4, *OK.*

В соответствующие поля вводим:

«Number of copies»: 2 (число копий, включая исходную точку).

DY «Y-offset in active CS»: -500 (смещение против оси Y , мм)

OK.

Снова в разделе «Element attributes» инструментальной панели нажимаем кнопку *Set.*

Указываем линию 3-4, *OK.*

Убеждаемся, что активна опция указания ориентационной точки, *OK.*

В качестве ориентационной выбираем вновь созданную в результате операции копирования точку 5, *OK.*

После выполнения этих операций системы координат генерируемых в дальнейшем балочных элементов будут ориентированы так, как показано на рисунке 3.

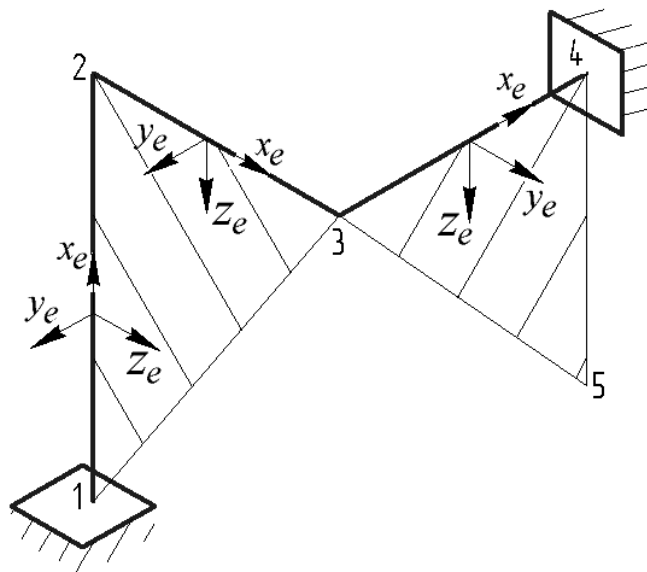


Рисунок 3 – Ориентация систем координат элементов

7. Разбить линии на балочные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool.*

В разделе «SizeControl» нажимаем кнопку *Set* строки «Lines».

Используем *Pick All* для выбора всех линий и в поле «No. of element divisions» (число делений на элементы) вводим число 10, *OK.*

При этом линии будут изображаться штрихами, показывающими заданное число делений на элементы.

Затем в списке «Mesh» в качестве объекта для разбиения выбираем Lines (линии).

После нажатия кнопки *Mesh* указываем все линии – *Pick All*.

Каждая линия здесь разбивается на десять конечных элементов.

8. Проверить правильность ориентации сечений балочных элементов.

Для отображения балочных элементов в виде трехмерного тела (т.е. с поперечными сечениями) выберем в меню *U_M>PlotCtrls>Style>Size and shape*.

Отмечаем флаг «Display of elements shapes on real constant descriptions» (изображение элементов создается на основе реальных постоянных), *OK*.

В рабочем окне должно появиться изображение, как на рисунке 4.

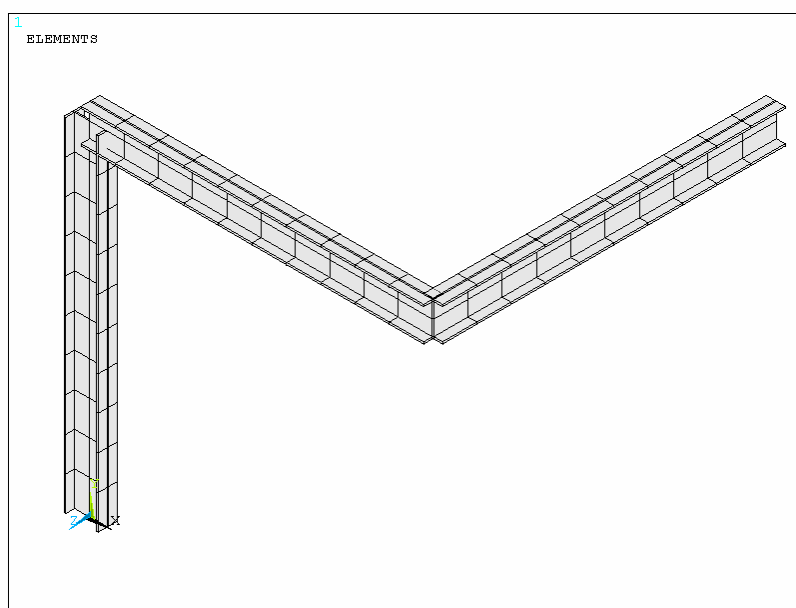


Рисунок 4 – Изображение балочных элементов с сечениями

9. Задать граничные условия: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints*.

Указываем точки 1 и 4, *OK*. В списке «DOFs to be constrained» выбираем All DOF (все степени свободы), *OK*.

10. Приложить нагрузку.

Погонную силу $q = 20$ Н/мм будем задавать в виде давления, приложенного непосредственно к балочным элементам: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Beam*.

Давление следует задавать на элементах линии 2-3 (см. рисунок 2). Эти элементы имеют номера с 11 по 20.

Для выбора этих конечных элементов в панели указания активизируем опцию «Min, Max, Inc», позволяющую указывать объекты путем задания диапазона номеров и шага (если шаг равен единице, его можно не вводить).

Там же в поле ввода панели указания набираем диапазон номеров 11,20. Обязательно фиксируем ввод клавишей *Enter*. На экране должно быть выделено десять элементов линии 2-3 (в случае ошибки для снятия выделения нужно воспользоваться кнопкой *Reset*).

Завершаем операцию указания кнопкой *OK*. При этом появляется новая диалоговая панель.

В поле «Load key» здесь задается параметр *LKEY*, определяющий направление распределенной нагрузки. Для элемента *BEAM188* он может принимать следующие значения: 1 – направление против оси z_e (задается по умолчанию); 2 – направление против оси y_e ; 3 – направление по оси x_e (касательная нагрузка). В нашем случае следует оставить значение по умолчанию.

В поле «Pressure value at node I» (значение давления в узле I) вводим отрицательное значение погонной силы в Н/мм: -20.

Так как нагрузка постоянна, значение в узле J не указываем.

OK.

Предупреждение о том, что нагрузка и граничные условия одновременно прикладываются к геометрическим и конечно-элементным объектам, можно проигнорировать.

11. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar>SAVE_DB*.

База данных записывается в файл *Lab6.db*.

12. Запустить задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

Закрываем окно «/STATUS command». В диалоговой панели «Solve Current Load Step» нажимаем *OK*.

Возможное сообщение о наличии предупреждений следует проигнорировать, нажав кнопку *Yes*.

Дожидаемся сообщения «Solution is done!» (расчет окончен). Закрываем его кнопкой *Close*.

13. Изобразить деформированное состояние рамы: *M_M>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape*.

14. Построить эпюру осевых сил.

Сначала составляем таблицу осевых сил в балочных элементах: *M_M>General Postproc>Element Table>Define Table.*

Нажимаем кнопку *Add.*

Для узла I в соответствующие поля вводим:

Lab «User lab for item»: Ni (метка пользователя)

Item, Comp «Result data item»: By sequence num>SMISC,1 (идентификатор группы и порядковый номер осевой силы в узле I)

Apply.

Для узла J:

Lab «User lab for item»: Nj

Item, Comp «Result data item»: By sequence num>SMISC,14 (идентификатор группы и порядковый номер осевой силы в узле J)

OK.

Close.

Отображаем эпюру осевых сил на модели: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour plot>Line Elem Res.*

В соответствующие поля вводим:

LabI «Elem table item at node I»: Ni (объект таблицы элементов в узле I)

LabJ «Elem table item at node J»: Nj (объект таблицы элементов в узле J)

Fact «Optional scale factor»: 1 (коэффициент масштабирования)

OK.

15. Построить эпюру перерезывающих сил.

При определении перерезывающих сил (а также изгибающих моментов) необходимо знать ориентацию систем координат элементов. Для нашего случая она показана на рисунке 3.

Составляем таблицу перерезывающих сил, действующих в направлении оси z_e : *M_M>General Postproc>Element Table>Define Table, Add.*

Для узла I вводим:

Lab «User lab for item»: Qzi

Item, Comp «Result data item»: By sequence num>SMISC,5 (идентификатор группы и порядковый номер перерезывающей силы в направлении оси z_e в узле I)

Apply.

Для узла J:

Lab «User lab for item»: Qzj

Item, Comp «Result data item»: By sequence num> SMISC,18 (идентификатор группы и порядковый номер перерезывающей силы в направлении оси z_e в узле J).

OK.

Close.

Отображаем эпюру перерезывающих сил на модели: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour plot>Line Elem Res.*

В соответствующие поля вводим:

LabI «Elem table item at node I»: Qzi

LabJ «Elem table item at node J»: Qzj

OK.

Эпюра перерезывающих сил Q_y строится аналогично, изменяются только порядковые номера наборов результатов – для узла I: By sequence num> SMISC,6; для узла J: By sequence num>SMISC,19 (см. описание по данному элементу: *U_M>Help>Help Topics → Elements Reference/Element Library/BEAM188*).

16. Построить эпюры изгибающих моментов.

Составляем таблицу изгибающих моментов M_y в балочных элементах:

M_M>General Postproc>Element Table>Define Table, Add.

Для узла I вводим:

Lab «User lab for item»: Myi

Item, Comp «Result data item»: By sequence num>SMISC,2 (идентификатор группы и порядковый номер изгибающего момента относительно оси y_e в узле I)

Apply.

Для узла J:

Lab «User lab for item»: Myj

Item, Comp «Result data item»: By sequence num> SMISC,15 (идентификатор группы и порядковый номер изгибающего момента относительно оси y_e в узле J).

OK.

Close.

Отображаем эпюру изгибающих моментов на модели: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour plot>Line Elem Res.*

В соответствующие поля вводим:

LabI «Elem table item at node I»: Myi

LabJ «Elem table item at node J»: Myj

OK.

Эпюра изгибающих моментов M_y показана на рисунке 5.

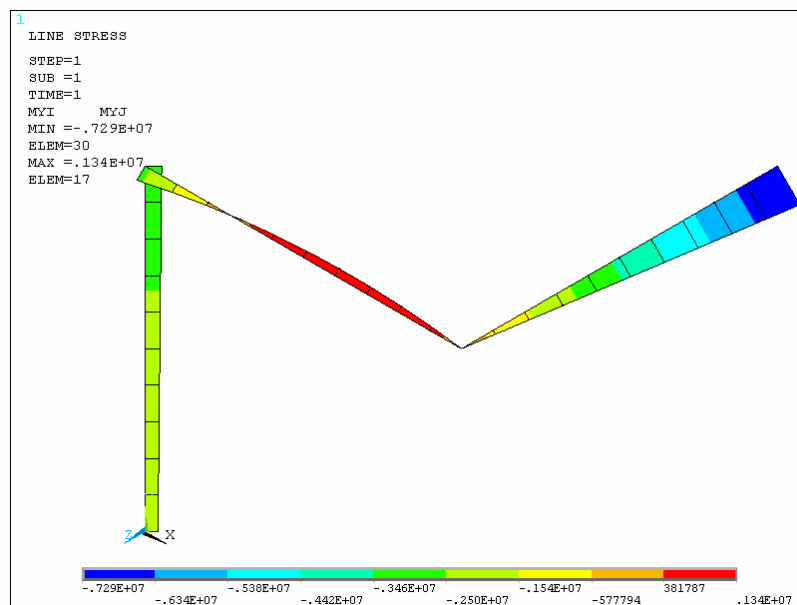


Рисунок 5 – Эпюра изгибающих моментов M_y (в Н·мм)

Эпюра изгибающих моментов M_z строится аналогично, изменяются только порядковые номера наборов результатов – для узла I: By sequence num> SMISC,3; для узла J: By sequence num>SMISC,16.

17. Построить эпюру крутящих моментов.

Составляем таблицу крутящих моментов в балочных элементах:
M_M>General Postproc>Element Table>Define Table, Add.

Для узла I вводим:

Lab «User lab for item»: Mxi

Item, Comp «Result data item»: By sequence num>SMISC,4 (идентификатор группы и порядковый номер крутящего момента в узле I)

Apply.

Для узла J:

Lab «User lab for item»: Mxj

Item, Comp «Result data item»: By sequence num> SMISC,17 (идентификатор группы и порядковый номер крутящего момента в узле J).

OK.

Close.

Отображаем эпюру крутящих моментов на модели: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour plot>Line Elem Res.*

В соответствующие поля вводим:

LabI «Elem table item at node I»: Mxi

LabJ «Elem table item at node J»: Mxj

ОК.

18. Изобразить перемещения в векторном представлении: *M_M>General Postproc>Plot Results>Vector plot>Predefined.*

В первом столбце списка выходных величин «Vector item to be plotted» выбираем категорию «DOF solution», а во втором – объект «Translation U» (поступательные перемещения).

Можно видеть, что максимальное перемещение возникает в точке 3 и составляет 8,45 мм.

19. Изобразить поле напряжений по Мизесу с учетом их распределения по сечениям стержней.

Сначала убедитесь в том, что включено изображение сечений для балочных элементов. В противном случае выберите в меню *U_M>PlotCtrls>Style>Size and shape* и установите флаг «Display of elements shapes on real constant descriptions».

Для построения поля напряжений по Мизесу вызываем следующую последовательность: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu.*

В появившейся диалоговой панели из списка доступных результатов последовательно выбираем *Nodal Solution>Stress>von Mises stress* (напряжение по Мизесу), *ОК.*

Поле напряжений по Мизесу для рассматриваемой пространственной рамы представлено на рисунке 6.

Видно, что максимальное напряжение по Мизесу составляет 296 МПа, что меньше предела текучести.

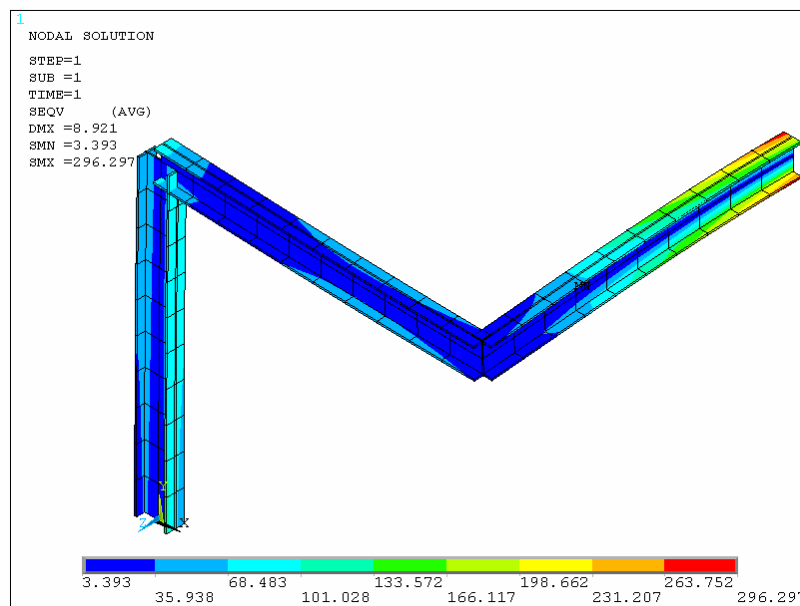


Рисунок 6 – Поле напряжений по Мизесу (в МПа)

20. Определить реакции в опорах: *M_M>General Postproc>Lists Results>Reaction Solu.*

После нажатия кнопки *OK* на экран дисплея в отдельном окне выводится список реакций во всех закрепленных узлах:

NODE	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	596.82	12699.	-176.51	-0.182226E+06	-712.89	0.20981E+07
42	-596.82	7300.6	176.51	-0.72949E+07	-0.41960E+06	4457.1
TOTAL VALUES						
VALUE	0.18205E-06	20000.	0.22956E-07	-0.74771E+07	-0.42031E+06	21026E+07

21. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя Lab6.lgw.

22. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

«Расчет плоской составной рамы с промежуточным шарниром»

Исходные данные: геометрия плоской рамы показана на рисунке 1; площадь поперечного сечения стержней 3750 мм^2 ; момент инерции $38 \cdot 10^6 \text{ мм}^4$; высота профиля 240 мм; материал стержней – сталь 45 (модуль упругости $2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 360 МПа; плотность 7800 кг/м^3). Учесть собственный вес рамы.

Допущение: стержни рамы и нагрузка располагаются в одной плоскости, что позволяет ограничиться решением двумерной задачи.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние рамы; построить эпюры сил, моментов и напряжений в стержнях рамы; найти максимальное перемещение.

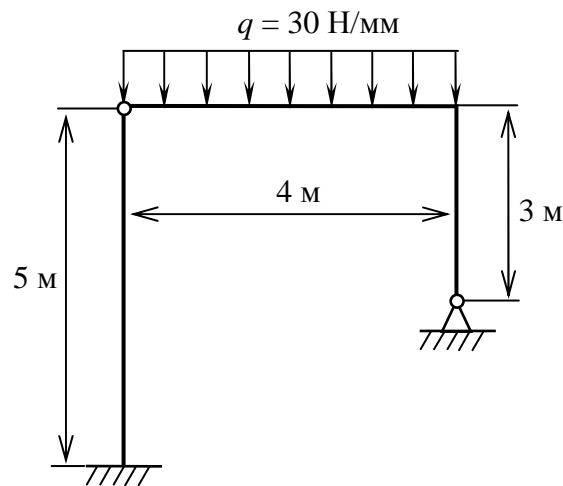


Рисунок 1 – Геометрия плоской рамы

Начало системы координат поместим в левую нижнюю точку; пронумеруем все точки рамы, как показано на рисунке 2.

Следует отметить, что для моделирования шарнирного соединения в месте его расположения здесь введены две совпадающие в пространстве точки 2 и 3.

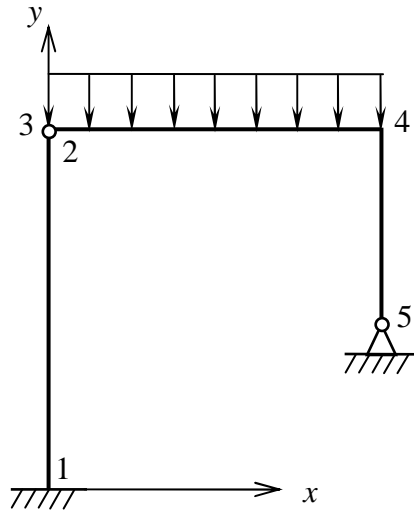


Рисунок 2 – Рама с номерами точек

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab5.
2. Установить тип используемых в расчете элементов – двухмерный элемент упругой балки BEAM3: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete¹*.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Beam>2D elastic 3*, *OK* и *Close*.

3. Определить реальные постоянные для выбранного типа элементов: *M_M>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete²*.

Нажимаем *Add* и указываем тип элементов «Type 1 BEAM3», *OK*.

В соответствующие поля вводим:

«Real Constant Set No»: 1 (номер набора реальных постоянных)

«Cross-sectional area» AREA: 3750 (площадь сечения, мм²)

«Area moment of inertia» IZZ: 38e6 (момент инерции, мм⁴)

«Total beam height» HEIGHT: 240 (полная высота балки, мм)

OK.

Закрываем панель кнопкой *Close*.

4. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

В правом окне последовательно (двойным щелчком мыши) выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

¹ Для версии Release 13 и более поздних вместо шага 2 следует в командную строку ввести ET,1,BEAM3 и нажать клавишу *Enter*.

² Аналогично для новых версий вместо шага 3 следует в командную строку ввести R,1,3750,38e5,240 и нажать *Enter*.

Вводим:

EX: 2e5 (модуль упругости, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

Опять в правом окне выбираем *Structural>Density*.

Вводим:

DENS: 7800e-9 (плотность, кг/мм³)

OK.

Закрываем панель.

5. Построить геометрическую модель рамы.

Сначала с помощью команды *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS* строим точки согласно следующей таблице:

Номер точки	x, мм	y, мм	z, мм
1	0	0	0
2	0	5000	0
3	0	5000	0
4	4000	5000	0
5	4000	2000	0

Следует отметить, что точки 2 и 3 имеют одинаковые координаты. Как отмечалось ранее, это требуется для моделирования шарнира.

Включаем отображение нумерации геометрических объектов: *U_M>PlotCtrls>Numbering*, отмечаем флаги «Keypoint numbers» и «Line numbers».

Для моделирования стержневой рамы соединим точки прямыми линиями: *M_M>Preprocessor>Modeling>Lines>Lines>Straight Line*.

Указываем мышью в рабочем окне попарно точки в начале и в конце каждой линии, представляющей стержень рамы (при указании совпадающих точек 2 и 3 здесь появляется панель «Multiple_Entities», где с помощью кнопки *Prev* или *Next* следует выбрать нужную точку и нажать *OK*): 1-2, 3-4, 4-5, *OK*.

6. Разбить линии на балочные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

В разделе «SizeControl» нажимаем кнопку *Set* строки «Lines».

Используем *Pick All* для выбора всех линий и в поле «No. of element divisions» (число делений на элементы) вводим число 15, *OK*.

При этом линии будут изображаться штрихами, показывающими заданное число делений на элементы.

Затем в списке «Mesh» в качестве объекта для разбиения выбираем Lines (линии).

После нажатия кнопки *Mesh* указываем все линии – *Pick All*.

Каждая линия здесь разбивается на пятнадцать конечных элементов.

7. Связать поступательные степени свободы совпадающих узлов в месте установки шарнира: *M_M>Preprocessor>Coupling/Ceqn>Couple DOFs*.

Щелкаем мышью в место расположения шарнира. Для выбора первого узла (из двух совпадающих) закрываем панель «Multiple_Entities», нажав кнопку *OK*. Для выбора второго узла опять указываем тоже место, *OK*.

В соответствующие поля вновь появившейся панели вводим:

«Set reference number»: 1 (номер набора связанных степеней свободы)

«Degree-of-freedom label»: UX (метка степени свободы)

Apply.

Снова указываем два совпадающих узла, как описано выше. *OK*.

Вводим:

«Set reference number»: 2

«Degree-of-freedom label»: UY

OK.

8. Задать граничные условия: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints*.

Для моделирования заделки указываем точку 1, *OK*. В списке «DOFs to be constrained» выбираем All DOF (все степени свободы), *Apply*.

Для моделирования шарнирного опирания указываем точку 5, *OK*. В списке «DOFs to be constrained» выбираем все поступательные перемещения, т.е. UX и UY.

OK.

9. Приложить распределенную погонную нагрузку.

Погонную силу $q = 30 \text{ Н/мм}$ будем задавать в виде давления, приложенного непосредственно к балочным элементам: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Beam*.

Давление следует задавать на элементах линии L2, соединяющей точки 3 и 4 (см. рисунок 2).

Для выбора этих конечных элементов в панели указания активизируем селекторную кнопку *Box*. Курсором мыши (нажав левую кнопку) растягива-

ем прямоугольник так, чтобы в него попали только нужные элементы (рисунок 3).

Счетчик Count в панели указания должен принимать значение, равное 15. В случае ошибки для снятия выделения нужно воспользоваться кнопкой *Reset*.

Завершаем операцию указания кнопкой *OK*.

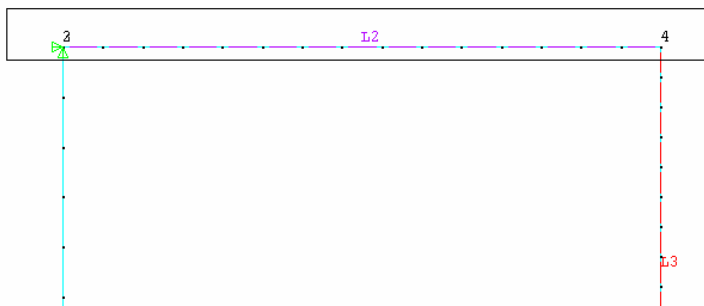


Рисунок 3 – Выбор элементов для приложения нагрузки

В поле «Pressure value at node I» вновь появившейся панели вводим число 30 (значение погонной силы, Н/мм).

OK.

Предупреждение о том, что нагрузка и граничные условия одновременно прикладываются к геометрическим и конечно-элементным объектам, можно проигнорировать. Для закрытия информационного окна нажимаем *Close*.

10. Приложить силу тяжести: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity>Global*.

В поле «Global Cartesian Y-comp» (компонента вдоль оси *Y* глобальной декартовой системы координат) вводим значение 9.81 (ускорение силы тяжести, м/с²).

После нажатия кнопки *OK* на изображении модели появляется красная стрелка, направленная вверх.

Следует отметить, что сила тяжести будет действовать в сторону, противоположную направлению заданного ускорения (т.е. в нашем случае вниз).

Напомним, плотность материала мы вводили в кг/мм³. Однако ускорение задаем в м/с². Дело в том, что для удельной силы тяжести в данном случае получается нужная размерность: кг/мм³·м/с² = Н/мм³.

11. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar>SAVE_DB*.

База данных записывается в файл Lab5.db.

12. Запустить задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

Закрываем окно «/STATUS command». В диалоговой панели «Solve Current Load Step» нажимаем *OK*.

Дожидаемся сообщения «Solution is done!» (расчет окончен). Закрываем его кнопкой *Close*.

13. Изобразить деформированное состояние рамы: *M_M>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape*.

14. Построить эпюру осевых сил.

В описании по используемому в данной задаче элементу (*U_M>Help>Help Topics → Elements Reference/Element Library/BEAM3*) находим, что осевая сила содержится в группе SMISC, причем в узле I имеет номер 1, в узле J – 7.

Составляем таблицу осевых сил в балочных элементах: *M_M>General Postproc>Element Table>Define Table*.

Нажимаем кнопку *Add*.

Для узла I в соответствующие поля вводим:

Lab «User lab for item»: Ni (метка пользователя)

Item, Comp «Result data item»: By sequence num>SMISC,1 (идентификатор группы и порядковый номер осевой силы в узле I)

Apply.

Для узла J:

Lab «User lab for item»: Nj

Item, Comp «Result data item»: By sequence num>SMISC,7 (идентификатор группы и порядковый номер осевой силы в узле J)

OK.

Close.

Отображаем эпюру осевых сил на модели: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour plot>Line Elem Res*.

В соответствующие поля вводим:

LabI «Elem table item at node I»: Ni (объект таблицы элементов в узле I)

LabJ «Elem table item at node J»: Nj (объект таблицы элементов в узле J)

Fact «Optional scale factor»: 1 (коэффициент масштабирования)

OK.

Следует отметить, что в отличие от стержня фермы в пределах балочного элемента осевая сила может изменяться. Поэтому здесь, как правило, необходимо определять значения как для узла I, так и для узла J. В противном случае вместо гладкой эпюры может получиться ступенчатая (постоянная в пределах каждого элемента).

15. Построить эпюру перерезывающих сил.

Составляем таблицу перерезывающих сил в балочных элементах: *M_M>General Postproc>Element Table>Define Table, Add.*

Для узла I вводим:

Lab «User lab for item»: Qi

Item, Comp «Result data item»: By sequence num>SMISC,2 (идентификатор группы и порядковый номер перерезывающей силы в узле I)

Apply.

Для узла J:

Lab «User lab for item»: Qj

Item, Comp «Result data item»: By sequence num> SMISC,8 (идентификатор группы и порядковый номер перерезывающей силы в узле J).

OK.

Close.

Отображаем эпюру перерезывающих сил на модели: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour plot>Line Elem Res.*

В соответствующие поля вводим:

LabI «Elem table item at node I»: Qi

LabJ «Elem table item at node J»: Qj

OK.

16. Построить эпюру изгибающих моментов.

Составляем таблицу изгибающих моментов в балочных элементах: *M_M>General Postproc>Element Table>Define Table, Add.*

Для узла I вводим:

Lab «User lab for item»: Mi

Item, Comp «Result data item»: By sequence num>SMISC,6 (идентификатор группы и порядковый номер изгибающего момента в узле I)

Apply.

Для узла J:

Lab «User lab for item»: Mj

Item, Comp «Result data item»: By sequence num> SMISC,12 (идентификатор группы и порядковый номер изгибающего момента в узле J).

OK.

Close.

Отображаем эпюру изгибающих моментов на модели: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour plot>Line Elem Res.*

В соответствующие поля вводим:

LabI «Elem table item at node I»: Mi

LabJ «Elem table item at node J»: Mj

OK.

Эпюра изгибающих моментов показана на рисунке 4.

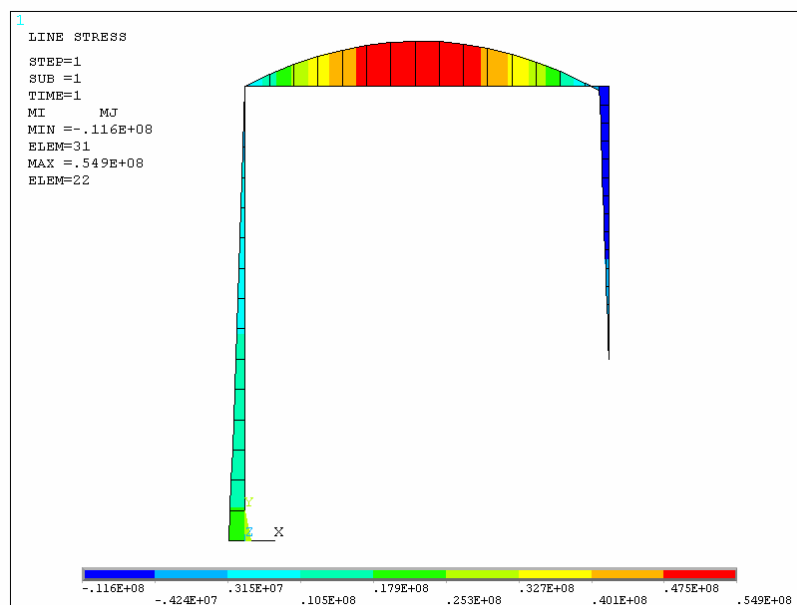


Рисунок 5 – Эпюра изгибающих моментов (в Н·мм)

17. Построить эпюры максимальных и минимальных напряжений.

Максимальное напряжение (осевое + изгибное) помещено уже в группу NMISC, где в узле I имеет номер 1, а в узле J – 3.

Минимальное напряжение (осевое – изгибное) содержится в той же группе, причем в узле I имеет номер 2, а в узле J – 4.

Данные эпюры строятся аналогично предыдущим.

Эпюра максимальных напряжений представлена на рисунке 6.

18. Изобразить перемещения в векторном представлении: *M_M>General Postproc>Plot Results>Vector plot>Predefined.*

В первом столбце списка выходных величин «Vector item to be plotted» выбираем категорию «DOF solution», а во втором – объект «Translation U» (поступательные перемещения).

Можно видеть, что максимальное перемещение составляет 24,4 мм.

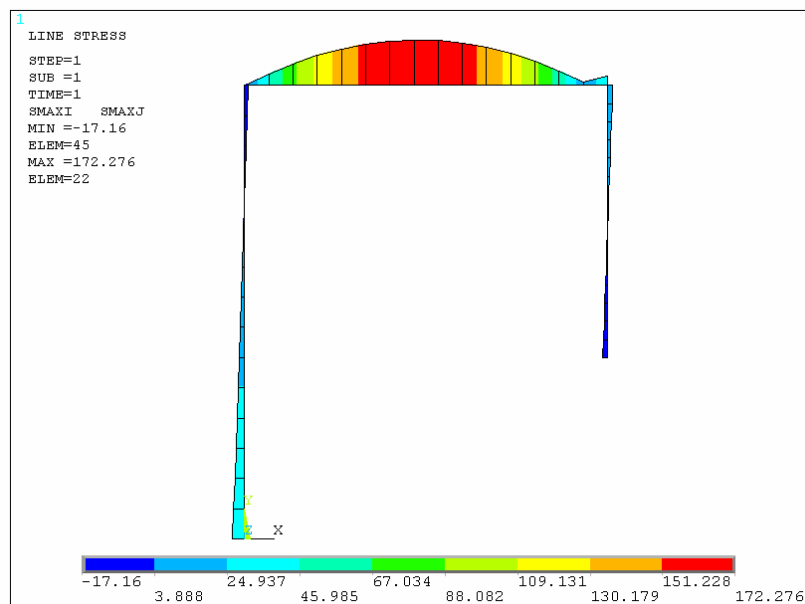


Рисунок 6 – Эпюра максимальных напряжений (в МПа)

19. Определить реакции в опорах: *M_M>General Postproc>Lists Results>Reaction Solu.*

После нажатия кнопки *OK* на экран дисплея в отдельном окне выводится список реакций во всех закрепленных узлах:

NODE	FX	FY	MZ
1	3876.3	59114.	-0.19381E+08
33	-3876.3	64351.	

TOTAL VALUES
 VALUE 0.32887E-07 0.12347E+06 -0.19381E+08

20. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя Lab5.lgw.

21. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

«Решение плоской фермы»

Исходные данные: геометрия ферменной конструкции показана на рисунке 1; стержни круглого сечения 22x4 соединены сваркой в узлах; материал стержней – сталь 45 (модуль упругости $2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 360 МПа).

Допущение: поскольку конструкция состоит из длинных тонких стержней, работающих в основном на растяжение-сжатие, для нее можно использовать расчетную схему в виде фермы, предполагающую шарнирное соединение стержней в узлах.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние фермы; построить эпюру осевых сил в стержнях; найти перемещение точки приложения нагрузки.

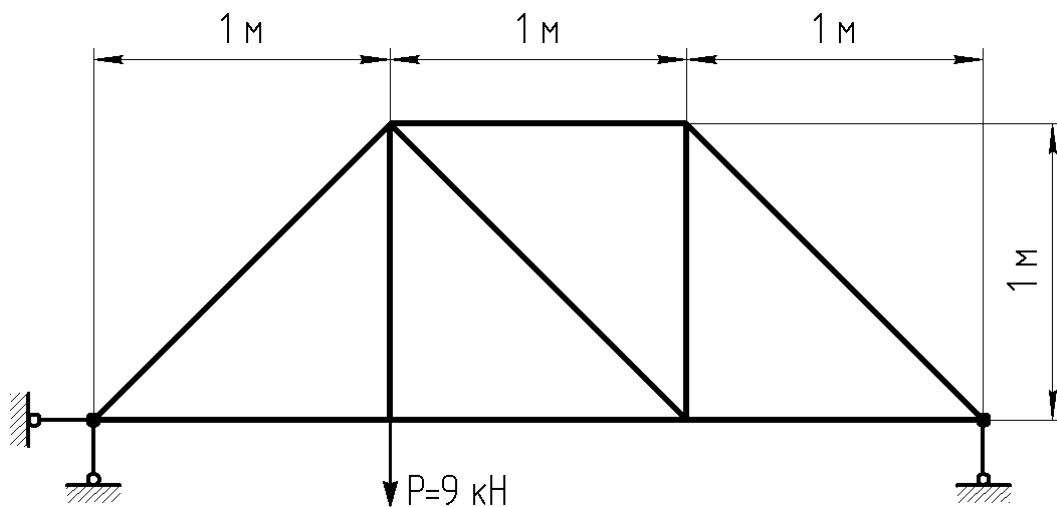


Рисунок 1 – Схема стержневой конструкции

Начало системы координат поместим в левую нижнюю точку. Пронумеруем узлы фермы, как показано на рисунке 2.

Следует отметить, что рассматриваемая ферма является статически определимой, она легко решается методом вырезания узлов. При определении осевых сил здесь несущественно, из какого материала изготовлены стержни и какова их площадь поперечного сечения. Эти параметры важны только для статически неопределимых систем, а также для нахождения перемещений.

Однако МКЭ в любых случаях требует их задания. Поскольку по условию задачи необходимо определить кроме осевых сил еще и перемещения, вычислим действительную площадь поперечного сечения стержней:

$$F = \frac{\pi D^2}{4} (1 - \alpha^2) = \frac{\pi \cdot 22^2}{4} (1 - 0,636^2) = 226,2 \text{ мм}^2,$$

где

$$\alpha = \frac{D - 2t}{D} = \frac{22 - 2 \cdot 4}{22} = 0,636.$$

Здесь $D = 22$ мм – наружный диаметр стержня; $t = 4$ мм – толщина стенки.

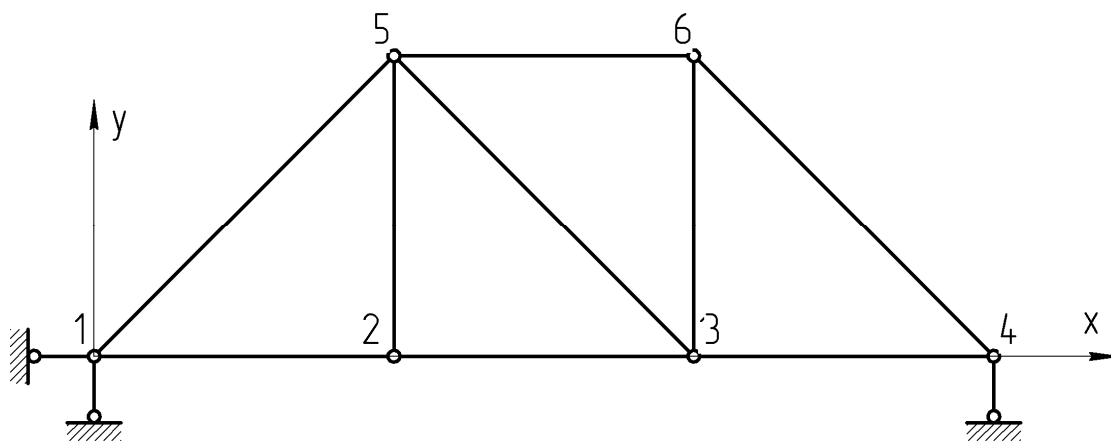


Рисунок 2 – Ферма с номерами узлов

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab4.
2. Установить тип используемых в расчете конечных элементов – 2-узловой двухмерный ферменный элемент LINK1: *M_M > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete*¹.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Link > 2D spar 1*, *OK* и *Close*.

3. Определить реальные постоянные для выбранного типа элементов: *M_M > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete*².

Нажимаем *Add* и указываем тип элементов «Type 1 LINK1», *OK*.

В соответствующие поля вводим:

«Real Constant Set No»: 1 (номер набора реальных постоянных)

«Cross-sectional area» AREA: 226.2 (площадь сечения, мм²)

¹ Для версии Release 13 и более поздних вместо шага 2 следует в командную строку ввести ET,1,LINK1 и нажать клавишу *Enter*.

² Аналогично для новых версий вместо шага 3 следует в командную строку ввести R,1,226.2 и нажать *Enter*.

ОК.

Закрываем панель кнопкой *Close*.

4. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

В правом окне диалоговой панели последовательно (двойным щелчком мыши) выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

В соответствующие поля вводим:

EX: 2e5 (модуль упругости, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)

ОК.

Закрываем панель.

5. Построить геометрическую модель фермы.

Сначала с помощью команды *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS* строим точки согласно следующей таблице:

Номер точки	x, мм	y, мм
1	0	0
2	1000	0
3	2000	0
4	3000	0
5	1000	1000
6	2000	1000

При выполнении данной команды появляется диалоговая панель (рисунок 3). Номер точки в поле «Keypoint number» здесь можно не задавать, поскольку он назначается программой автоматически. При этом создаваемая точка получит минимально возможный номер. Поскольку точек еще нет, первая получит номер 1, вторая – 2 и т.д. В полях «Location in Active CS» (координаты точки X, Y, Z в активной системе координат) нулевые значения координат можно также не вводить.

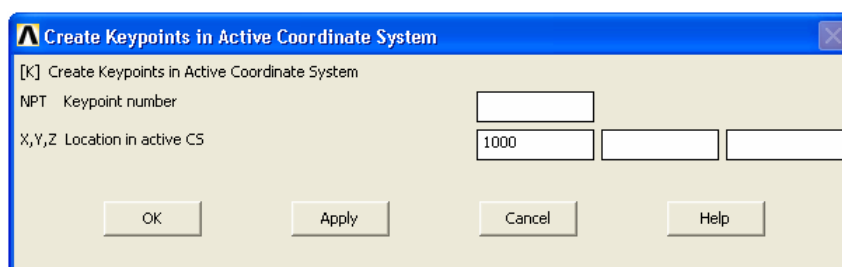


Рисунок 3 – Ввод точек

Отметим, что при построении сразу нескольких точек для завершения ввода координат удобно пользоваться кнопкой *Apply* (применить), которая не приводит к закрытию диалоговой панели. После задания координат последней точки следует нажать уже кнопку *OK* для прекращения этой операции.

Для проверки правильности ввода точек рекомендуется вывести на экран их список: *U_M>List>Keypoints>Coordinates Only*.

Включаем отображение нумерации геометрических объектов: *U_M>PlotCtrls>Numbering*, отмечаем флаги «Keypoint numbers» и «Line numbers».

Затем соединяем точки прямыми линиями: *M_M>Preprocessor>Modeling>Lines>Lines>Straight Line*.

Указываем мышью в рабочем окне попарно точки в начале и в конце каждой линии, представляющей стержень фермы (см. рисунок 2): 1-2, 2-3, 3-4, 4-6, 6-5, 5-1, 2-5, 3-6, 3-5.

Нажимаем *OK* в панели указания.

6. На геометрическую модель нанести сетку конечных элементов: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

Здесь на каждой линии обязательно должно быть по одному элементу. В противном случае данная система превратится в механизм, поскольку в местах соединения ферменных элементов автоматически задаются шарниры. При этом узел, содержащий только два стержня, лежащих на одной прямой, нарушает геометрическую неизменяемость системы, так как он может получить бесконечно малое перемещение в направлении, перпендикулярном этим стержням, без деформации конструкции.

В разделе «Size Controls» инструментальной панели нажимаем кнопку *Set* строки «Lines». С помощью кнопки *Pick All* панели указания выбираем все линии. В появившемся окне во втором поле «No. of element divisions» (число делений на элементы) вводим значение 1, *OK*.

Затем в списке «Mesh» в качестве объекта для разбиения выбираем Lines (линии).

После нажатия кнопки *Mesh* указываем все линии – *Pick All*.

Для просмотра узлов и элементов можно включить их нумерацию (*U_M>PlotCtrls>Numbering*) либо вывести на экран их списки (*U_M>List>Nodes*; *U_M>List>Elements>Nodes + Attributes*).

Для отображения в рабочем окне всех ранее введенных объектов в выпадающем меню вызываем следующую последовательность: *U_M>Plot>Multi-Plots*.

7. Задать граничные условия.

Воспользуемся командой задания перемещений в точках *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints*.

Указываем точку 1 (см. рисунок 2), *OK*. В списке «DOFs to be constrained» выбираем All DOF (все степени свободы), *Apply*.

Затем указываем точку 4, *OK*. В списке «DOFs to be constrained» выбираем только компоненту UY (перемещение в направлении оси Y), *OK*.

8. Приложить нагрузку.

Задаем силу в точке: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints*.

Указываем точку 2, *OK*. В списке «Direction of force/moment» (направление силы или момента) выбираем компоненту FY (сила в направлении оси Y) и в поле «Force/moment value» вводим значение силы в Н: -9000 (знак минус говорит о том, что сила действует против оси Y), *OK*.

Таким образом, расчетная модель фермы создана. Целесообразно сохранить ее в файле.

9. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar>SAVE_DB*.

При этом база данных записывается в файл Lab4.db.

10. Запустить задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

Закрываем информационное окно «/STATUS command». В диалоговой панели «Solve Current Load Step» нажимаем *OK*.

Дожидаемся сообщения «Solution is done!» (расчет окончен). Закрываем его кнопкой *Close*.

11. Изобразить деформированное состояние фермы: *M_M>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape*.

Отмечаем опцию «Def+undef edge» для наложения исходного состояния фермы на деформированную модель.

12. Построить эпюру осевых сил.

Сначала составляем так называемую таблицу элементов: *M_M>General Postproc>Element Table>Define Table*.

Следует напомнить, что для доступа к выходным величинам линейных элементов здесь используется метод сквозной нумерации (By sequence number). Эти данные разбиты на группы, причем каждая величина в пре-

делах группы имеет свой порядковый номер. Так, в нашем случае осевая сила помещена в группу SMISC под номером 1 (см. описание по элементу: *U_M>Help>Help Topics → Elements Reference/Element Library/LINK1*).

Нажимаем кнопку *Add* в диалоговой панели «Element Table Data»; появляется дополнительное окно.

В поле «User lab for item» (пользовательская метка выходной величины) вводим, например, имя N.

В первом столбце списка доступных выходных величин «Result data item» выбираем категорию «By sequence num», а во втором – объект SMISC.

Внизу в поле после запятой вводим число 1, как показано на рисунке 4.

OK. Close.

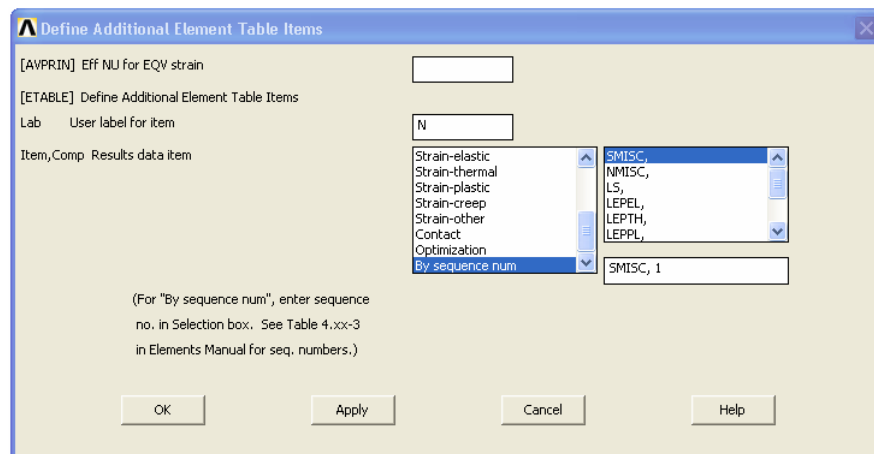


Рисунок 4 – Построение таблицы элементов

Для просмотра таблицы элементов выбираем в меню *M_M>General Postproc>Element Table>List Elem Table*.

В списке величин, определенных в таблице элементов, «Items to be listed» указываем метку N, *OK*:

```
PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT
***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT      CURRENT
ELEM      N
  1      6000.0
  2      6000.0
  3      3000.0
  4     -4242.6
  5     -3000.0
  6     -8485.3
  7      9000.0
  8      3000.0
  9     -4242.6
```

```

MINIMUM VALUES
ELEM      6
VALUE    -8485.3

MAXIMUM VALUES
ELEM      7
VALUE     9000.0

```

После построения таблицы элементов можно отобразить эпюру осевых сил непосредственно на модели: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Line Elem Res.*

В полях «Elem table item at node I» и «Elem table item at node J» (значения величины из таблицы элементов в узлах I и J соответственно) вводим одно и тоже имя N, поскольку осевая сила в пределах ферменного элемента постоянна. *OK.*

Полученная таким образом эпюра представлена на рисунке 5.

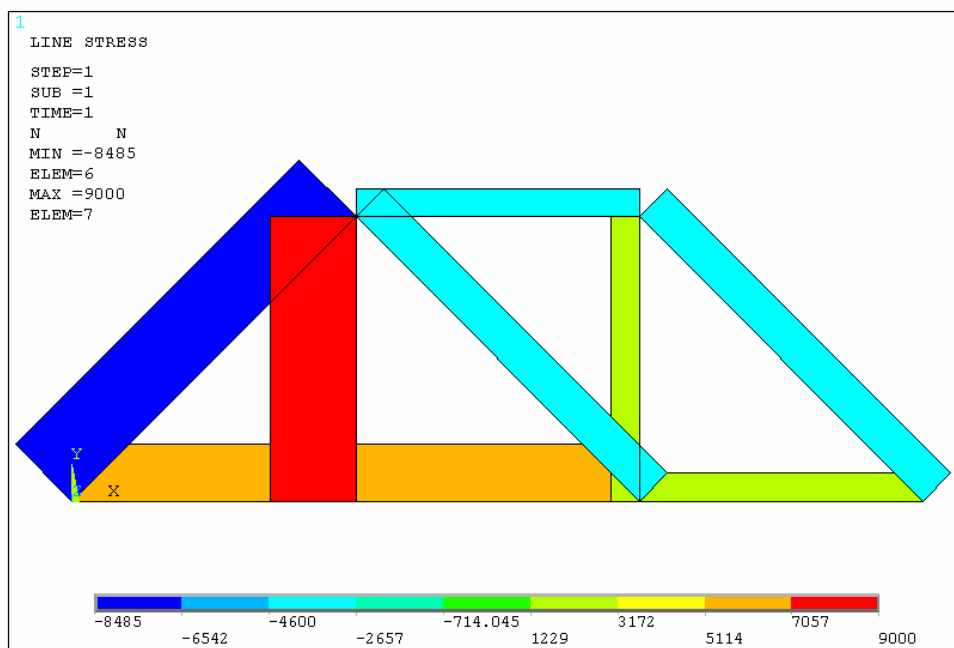


Рисунок 5 – Эпюра осевых сил (в Н)

13. Изобразить перемещения в векторном представлении: *M_M>General Postproc>Plot Results>Vector plot>Predefined.*

В первом столбце списка выходных величин «Vector item to be plotted» выбираем категорию «DOF solution», а во втором – объект «Translation U» (поступательные перемещения).

Видно, что максимальное перемещение возникает в точке приложения нагрузки и составляет 0,828 мм.

14. Определить реакции в опорах: *M_M>General Postproc>Lists Results>Reaction Solu.*

После нажатия кнопки *OK* на экран дисплея в отдельном окне выводится список реакций во всех закрепленных узлах:

```
PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP=      1  SUBSTEP=      1
TIME=      1.0000      LOAD CASE=    0

THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

      NODE          FX          FY
      1  -0.90949E-12  6000.0
      4                   3000.0

TOTAL VALUES
VALUE  -0.90949E-12  9000.0
```

15. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя Lab4.lgw.

16. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

Замечание: Для фермы предварительное построение геометрической модели, вообще говоря, не облегчает процесс создания конечно-элементной модели, поскольку ее узлы совпадают с узлами фермы, а каждый стержень является отдельным конечным элементом. Здесь более предпочтительным представляется метод прямого генерирования конечно-элементных объектов. При этом сначала вместо точек сразу определяются узлы:

M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS.

Затем вместо линий по заданным узлам сразу строятся элементы:

M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Thru Nodes.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

«Исследование напряженно-деформированного состояния круглой биметаллической пластины терморегулятора»

Исходные данные: круглая биметаллическая пластина терморегулятора, геометрические размеры которой представлены на рисунке 1, изготовлена путем точечной сварки штампованной латунной основы и пластины из инвара. Латунь имеет следующие физико-механические свойства: модуль упругости $1,05 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; коэффициент линейного расширения $18 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$; предел текучести 420 МПа. Физико-механические свойства инвара: модуль упругости $1,35 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; коэффициент линейного расширения $1,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$; предел текучести 400 МПа.

Биметаллическая пластина по наружному контуру вставляется в жесткий патрон, препятствующий ее смещению в осевом и радиальном направлениях. Данная составная конструкция собирается при температуре 20°C . Во время эксплуатации она подвергается равномерному нагреву до температуры 100°C . При этом за счёт значительной разности между коэффициентами линейного расширения двух сплавов происходит изгиб пластины.

Допущения: поскольку конструкция пластины и нагрузка симметричны относительно одной оси, можно рассматривать лишь одно сечение и свести трехмерную задачу к двумерной осесимметричной; соединение латунной основы и пластины из инвара считается жестким по всей поверхности их соприкосновения.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние составной конструкции терморегулятора; найти прогиб в центре пластины.

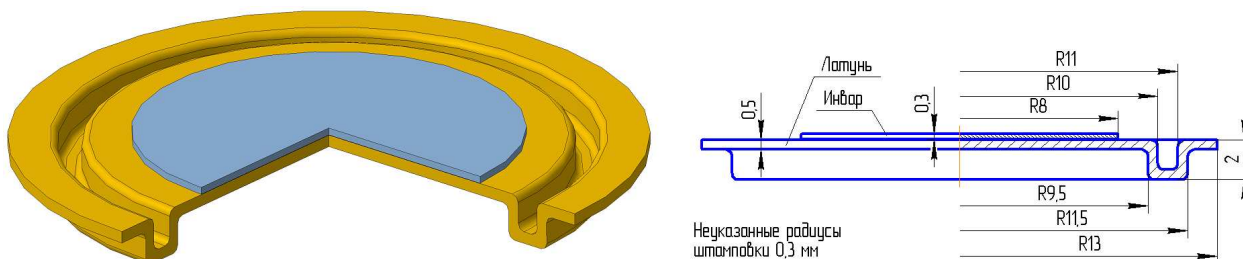


Рисунок 1 – Биметаллическая пластина терморегулятора и ее размеры

Следует напомнить, что при решении осесимметричных задач в программе ANSYS глобальная ось Y должна являться осью симметрии, а X – радиальной осью. Начало системы координат рассматриваемого сечения поместим в точку сопряжения латунной основы с пластиной из инвара, ось X направим вправо, а ось Y – вверх (рисунок 2).

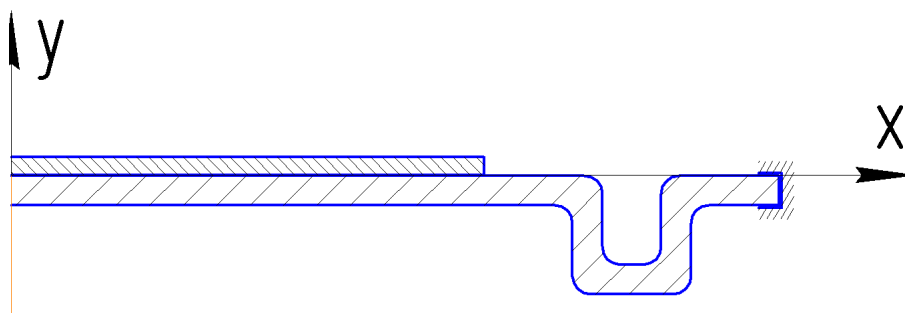


Рисунок 2 – Расчетная схема

Для решения задачи предлагается выполнить следующие шаги.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab3.
2. Установить тип используемых в расчете конечных элементов – 8-узловой плоский элемент PLANE82 (или PLANE183 для версии Release 13 и более поздних) с формулировкой «осесимметричное поведение»: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Quad 8node 82, OK*.

В окне «Element types» нажимаем *Options* и для опции К3 устанавливаем значение «Axisymmetric». Далее *OK* и *Close*.

3. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

Сначала определяем первую модель материала (Material Model Number 1), содержащую физико-механические свойства латуни.

В правом окне «Material Models Available» последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

В появившейся диалоговой панели в соответствующие поля вводим:

EX: 1.05e5 (модуля упругости латуни, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициента Пуассона латуни)

Подтверждаем ввод кнопкой *OK*.

Снова в правом окне «Material Models Available» последовательно выбираем *Structural>Thermal Expansion>Secant Coefficient>Isotropic*.

Вводим:

«Reference temperature»: 20 (исходная температура, °C)

ALPX: 18e-6 (коэффициент линейного расширения латуни, 1/°C)

ОК.

Добавляем вторую модель материала со свойства инвара.

В меню «Material» панели «Define Material Model Behavior» выбираем пункт «New model». В появившемся окне «Define material ID» в поле «Define material ID» вводим номер 2 и нажимаем кнопку ОК.

При этом в левом окне «Material Models Defined», где содержится список имеющихся моделей материалов, появляется новая запись: Material Model Number 2.

Далее в правом окне «Material Models Available» последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

В соответствующие поля вводим:

EX: 1.35e5 (модуля упругости инвара, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициента Пуассона инвара)

ОК.

Снова в правом окне «Material Models Available» последовательно выбираем *Structural>Thermal Expansion>Secant Coefficient>Isotropic*.

Вводим:

«Reference temperature»: 20 (исходная температура, °C)

ALPX: 1.5e-6 (коэффициент линейного расширения инвара, 1/°C)

ОК.

Закрываем панель «Define Material Model Behavior».

4. Построить геометрическую модель сечения пластины.

Как видно из рисунка 2, данная модель может быть получена при помощи комбинирования нескольких прямоугольников с последующим скруглением прямых углов.

4.1. Построить прямоугольники: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners*.

Для первого прямоугольника вводим следующие параметры: координаты левого нижнего угла WP X = 0 и WP Y = -0.5; ширина Width = 10; высота Height = 0.5. Нажимаем кнопку *Apply* (применить) для продолжения данной операции.

Для второго прямоугольника задаем: WP X = 11; WP Y = -0.5; Width = 2; Height = 0.5, *Apply*.

Для третьего прямоугольника: WP X = 9.5; WP Y = -2; Width = 0.5; Height = 1.5, *Apply*.

Для четвертого прямоугольника: WP X = 10; WP Y = -2; Width = 1; Height = 0.5, *Apply*.

Для пятого прямоугольника: WP X = 11; WP Y = -2; Width = 0.5; Height = 1.5, *Apply*.

Для шестого прямоугольника: WP X = 0; WP Y = 0; Width = 8; Height = 0.3. Теперь нажимаем *OK* для завершения этой операции.

Включим нумерацию поверхностей: *U_M>PlotCtrls>Numbering*. Отмечаем флаг «Area numbers».

При этом в рабочем окне должно появиться изображение, как показано на рисунке 3.

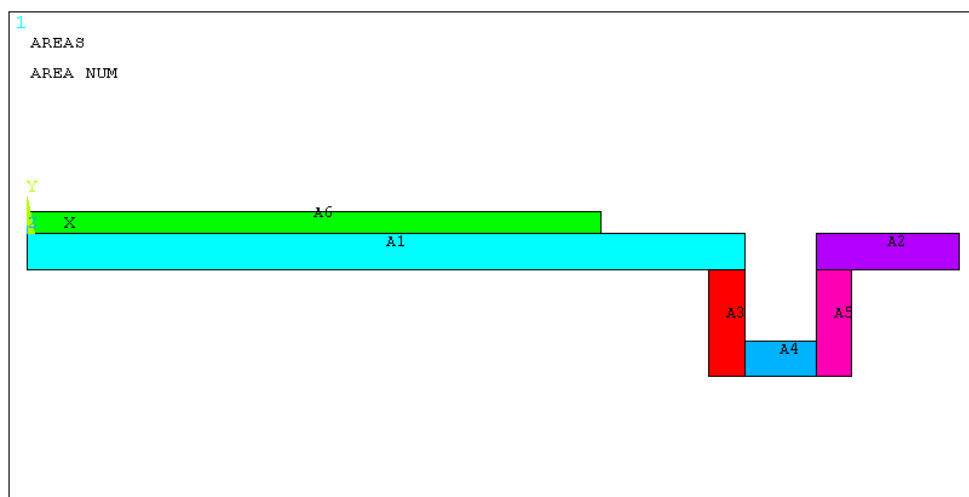


Рисунок 3 – Прямоугольные поверхности

4.2. С помощью булевой операции сложения объединить прямоугольники, образующие латунную основу, в одну поверхность: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add>Areas*.

Последовательно указываем курсором мыши прямоугольники с первого по пятый, *OK*.

4.3. Склеить две оставшиеся поверхности: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Glue>Areas*.

Для указания всех поверхностей нажимаем кнопку *Pick All*.

Для удобства выполнения следующей операции отобразим на экране только линии: *U_M>Plot>Lines*.

Включим их нумерацию: *U_M>PlotCtrls>Numbering*. Отмечаем флаг «Line numbers».

Должно появиться изображение, аналогичное рисунку 4.

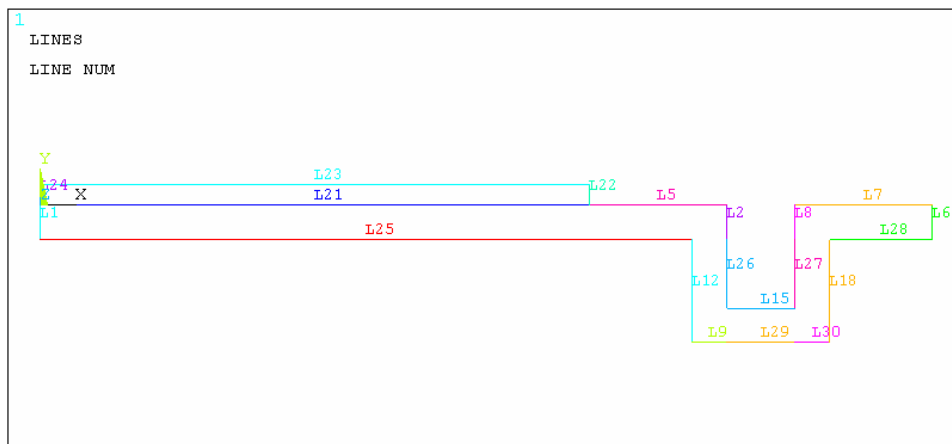


Рисунок 4 – Линии с нумерацией

4.4. Выполнить скругление прямых углов U-образной области сечения:
M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Line Fillet.

Указываем мышью в рабочем окне две линии L5 и L2, нажимаем *OK*.

В поле «Fillet radius» вводим число 0.3 (радиус скругления в мм). Нажимаем кнопку *Apply* для продолжения данной операции.

Аналогичным образом строим скругления радиусом 0.3 между линиями L26 и L15, L15 и L27, L8 и L7, L25 и L12, L12 и L9, L30 и L18, L18 и L28.

В конце нажимаем кнопку *OK* для завершения текущей операции.

4.5. Построить поверхности под кривыми скругления внутренних углов.

Для удобства построения сначала увеличим рассматриваемую область, например, при помощи кнопки *Zoom Model* панели управления видом. Здесь нужно переместить курсор мыши примерно в центр U-образной области сечения, очертить вокруг нее рамку, удерживая нажатой левую кнопку, и в заключение щелкнуть опять левой кнопкой.

В результате выполнения этих действий в рабочем окне должно получиться изображение, аналогичное рисунку 5.

Для образования произвольной поверхности по линиям воспользуемся командой *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>by Lines*.

Указываем мышью три линии L11, L13 и L14, составляющие криволинейный треугольник. Нажимаем *Apply*.

Аналогичным образом строим криволинейные треугольники по линиям L16, L17 и L19; L33, L34 и L35; L42, L43 и L44. В конце нажимаем *OK* для завершения этой операции.

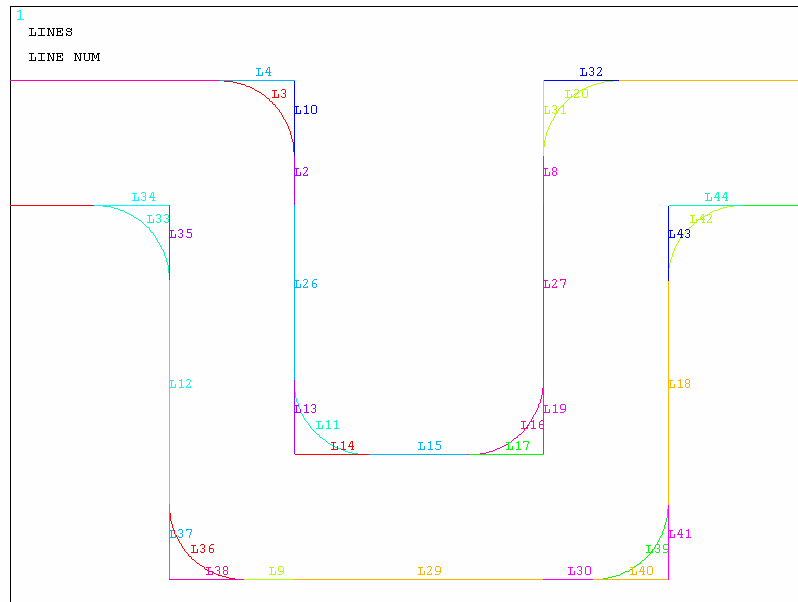


Рисунок 5 – Увеличенная U-образная область модели

4.6. Разрезать сложную поверхность с помощью линий скругления внешних углов: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Areas by Line*.

Поскольку только линии скругления внешних углов лежат внутри поверхности, в данную операцию можно включить все объекты, что облегчит ввод аргументов команды.

Для указания всех поверхностей нажимаем кнопку *Pick All*.

Для указания всех линий также используем *Pick All*.

Отобразим только поверхности: *U_M>Plot>Areas*.

Для автоматического масштабирования модели, так чтобы она целиком помещалась в рабочем окне, следует воспользоваться кнопкой *Fit View* панели управления видом.

Отключим нумерацию линий: *U_M>PlotCtrls>Numbering*. Снимаем флаг «Line numbers» (флаг «Area numbers» должен находиться в положение *On*).

Получаемое при этом изображение представлено на рисунке 6.

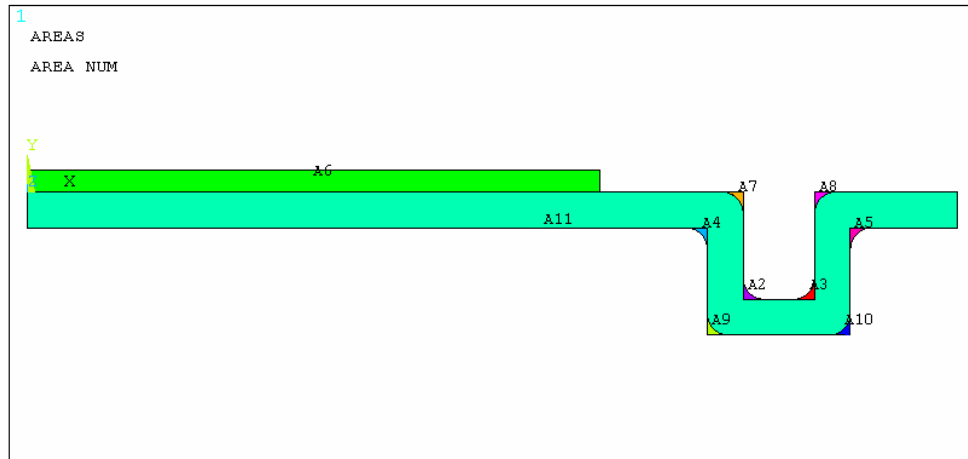


Рисунок 6 – Поверхности с нумерацией

4.7. Удалить лишние поверхности в местах скругления внешних углов:
M_M>Preprocessor>Modeling>Delete>Area and Below.

С помощью курсора последовательно указываем поверхности A7, A8, A9 и A10. Завершаем операцию удаления поверхностей и принадлежащих им линий и точек нажатием кнопки *OK*.

4.8. Объединить все поверхности, описывающие геометрию латунной основы, в одну: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add>Areas.*

С помощью курсора последовательно указываем поверхности A2, A3, A4, A5, A11 (т.е. все кроме A6). Нажимаем *OK*.

5. Разбить геометрическую модель на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool.*

Здесь сначала следует назначить атрибуты поверхностям, так как в рассматриваемой задаче используются два материала.

Для этого в разделе «Element Attributes» диалоговой панели «MeshTool» в выпадающем списке выбираем Areas (поверхности), рядом нажимаем кнопку *Set*.

Указываем нижнюю поверхность A1, представляющую латунную основу, *OK*. Появляется диалоговая панель «Area Attributes», где по умолчанию установлены следующие значения:

MAT «Material number»: 1 (номер материала)

TYPE «Element type number»: 1 PLANE82 (номер типа элементов).

Поскольку они нас устраивают, нажимаем *Apply*.

Теперь указываем верхнюю поверхность А6, описывающую пластину из инвара, *OK*.

В поле «Material number» выбираем номер 2 (модель материала для инвара). *OK*.

В разделе «Size Controls» устанавливаем глобальный размер элементов с помощью кнопки *Set* строки «Global»; в поле «Element edge length» (длина стороны элемента) вводим значение 0.1 (в мм), *OK*.

Далее в списке «Mesh» в качестве объектов для разбиения выбираем Areas (поверхности), в поле «Shape» (форма элементов) указываем Quad (четырёхугольная). И, наконец, выбираем режим построения свободной сетки Free.

После нажатия кнопки *Mesh* указываем все поверхности (*Pick All*).

Получаемая здесь разбивка изображена на рисунке 7.

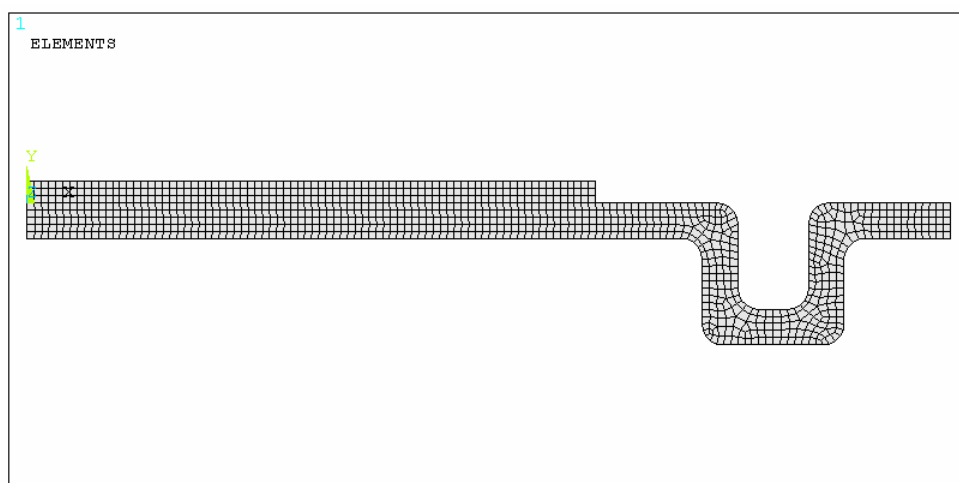


Рисунок 7 – Сетка конечных элементов

6. Задать граничные условия.

Напомним, что при решении осесимметричной задачи в программе ANSYS все узлы, расположенные на оси симметрии *Y*, должны быть закреплены от перемещения в радиальном направлении.

Кроме того, на рассматриваемую пластину по наружному контуру наложены связи, препятствующую ее смещению в осевом и радиальном направлениях.

Сначала воспользуемся командой задания перемещений на линиях: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

Указываем две вертикальные линии слева (лежащие на оси симметрии) и одну вертикальную линию справа (представляющую наружный контур), *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем UX (запрет поступательных перемещений по оси X), *OK*.

Затем используем команду задания перемещений в точках: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints*.

Указываем верхнюю точку вертикальной линии, наиболее удалённой от оси вращения, *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем UY (запрет поступательных перемещений по оси Y) и нажимаем *OK*.

7. Приложить температурную нагрузку.

В нашем случае нагружение осуществляется за счет равномерного нагрева неоднородной конструкции до температуры 100°C.

Используем команду задания постоянной по модели температуры: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Temperature>Uniform Temp*.

В поле «Uniform temperature» вводим число 100 (температура равномерного нагрева, °C), *OK*.

8. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar>SAVE_DB*.

При этом база данных записывается в файл Lab3.db.

9. Запустить задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

Закрываем окно «/STATUS command». В диалоговой панели «Solve Current Load Step» нажимаем *OK*.

Дожидаемся сообщения «Solution is done!» (расчет окончен). Закрываем его кнопкой *Close*.

10. Изобразить поле напряжений по Мизесу.

Воспользуемся командой изображения узлового решения: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu*.

В появившейся диалоговой панели из списка доступных результатов последовательно выбираем *Nodal Solution>Stress>von Mises stress* (напряжение по Мизесу), *OK*.

Поле напряжений по Мизесу для рассматриваемой круглой пластины представлено на рисунке 8.

Видно, что максимальное напряжение по Мизесу возникает на наружном контуре пластины из инвара в месте крепления к латунной основе и со-

ставляет 374 МПа, что меньше предела текучести для каждого из материалов.

Можно ли доверять такому решению?

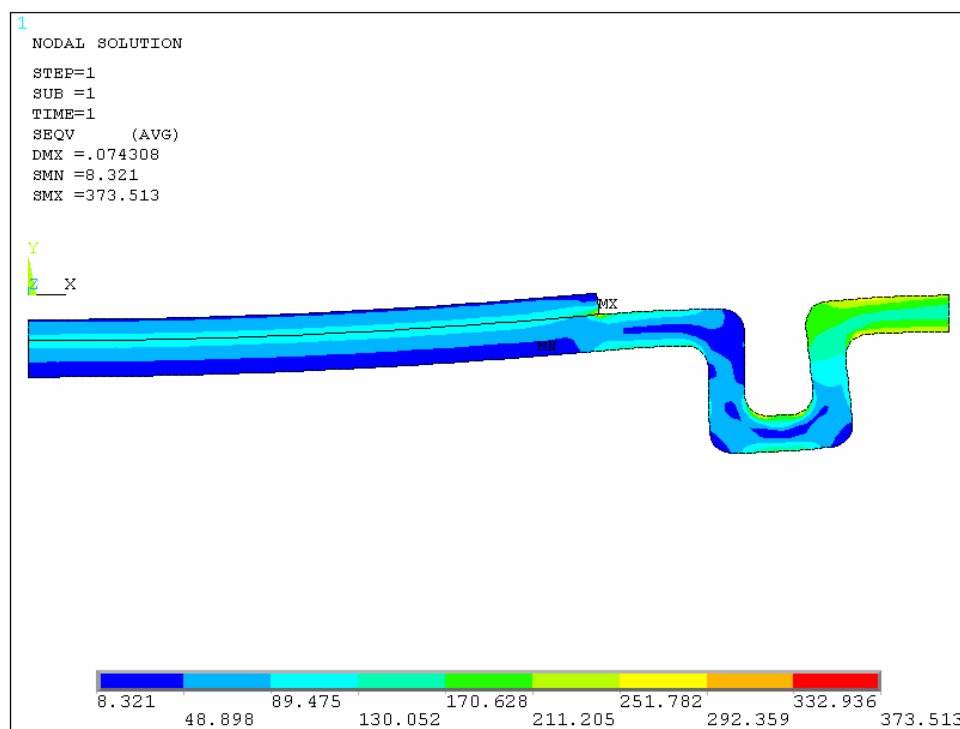


Рисунок 8 – Поле напряжений по Мизесу (МПа)

Дополнительный анализ показывает, что при сгущении сетки в данном месте напряжения будут увеличиваться до бесконечности, что говорит о наличии сингулярности в этой точке.

Если нас интересует только общее напряженно-деформированное состояние, то при отображении результатов можно исключить из активного набора элементы, расположенные в окрестности сингулярности: *U_M> Select>Entities*.

При выполнении данной команды появляется диалоговая панель «Select Entities», где в верхнем списке нужно выбрать Elements (элементы) и установить режим Unselect (удаление части объектов из текущего активного набора). *Apply*.

Соответствующие элементы следует указать курсором мыши, *OK*.

Для перерисовки изображения можно воспользоваться кнопкой *Replot* диалоговой панели «Select Entities».

В результате таких действий поле напряжений примет вид, как показано на рисунке 9.

В случае, когда интерес представляет локальная прочность в месте крепления пластины из инвара к латунной основе, требуется построить более точную модель (возможно неосесимметричную), учитывающую особенности их соединения при помощи точечной сварки.

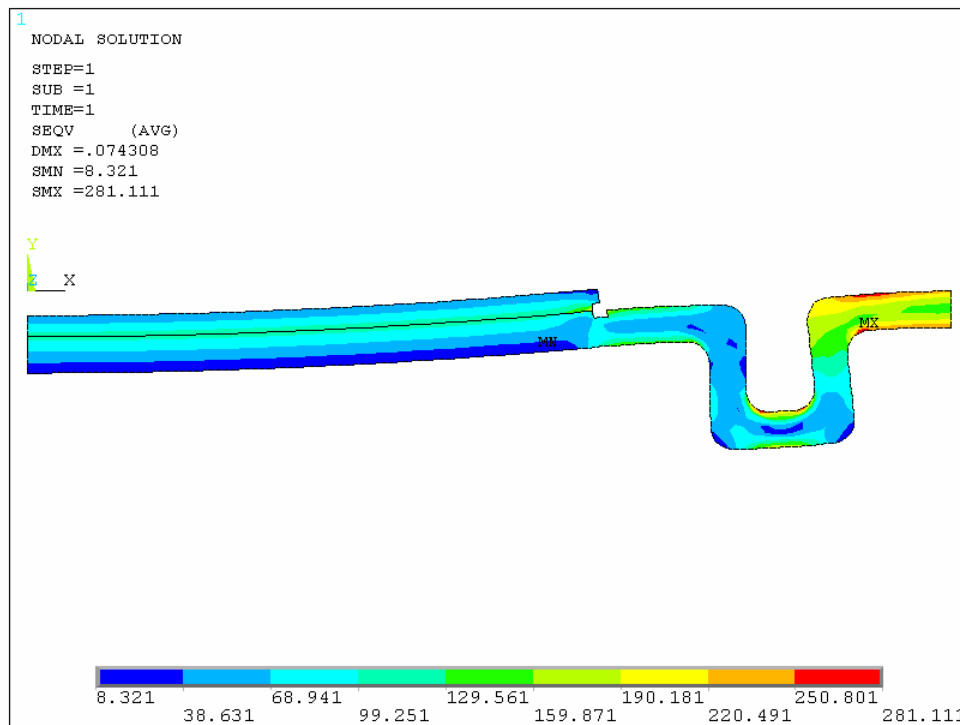


Рисунок 9 – Поле напряжений при исключении области сингулярности

11.Изобразить поле перемещений: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu.*

Из списка доступных результатов последовательно выбираем *Nodal Solution>DOF Solution>Displacement vector sum* (полное перемещение), *OK*.

Расширим изображение до 3/4 полной модели: *U_M>PlotCtrls>Style>Symmetry Expansion>2D Axi-Symmetric.*

Включаем опция «3/4 expansion», *OK*.

Если при этом с помощью кнопки *Isometric View* панели управления видом установить изометрическую проекцию, то получится изображение, представленное на рисунке 10.

Видно, что прогиб в центре пластины составляет 0,074 мм.

12.Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя Lab3.lgw.

13.Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

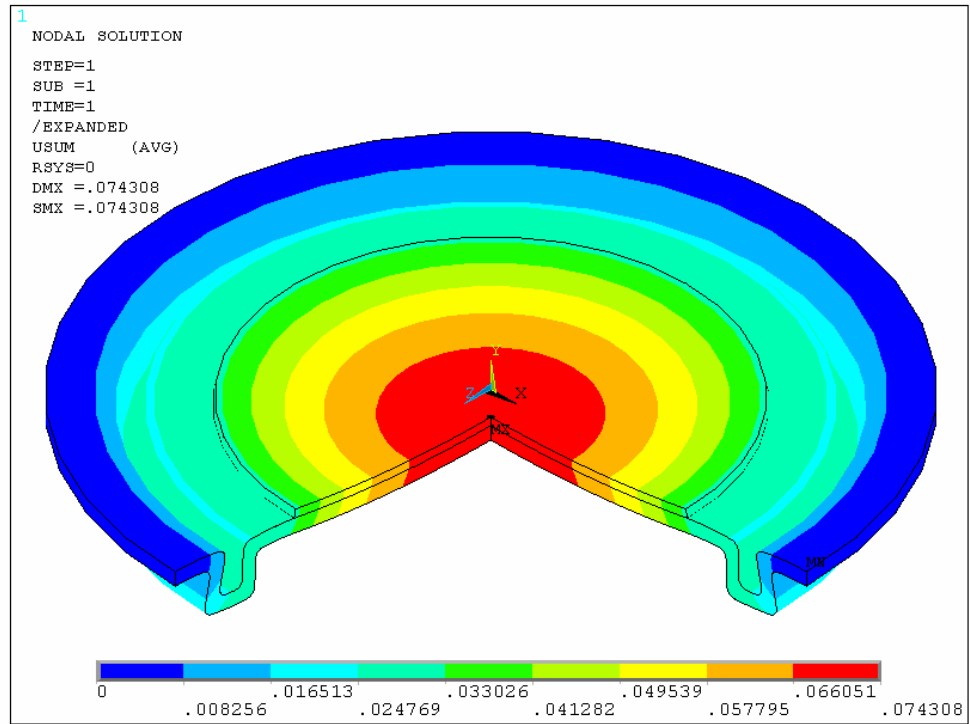


Рисунок 10 – Поле полных перемещений (в мм)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

«Исследование напряженно-деформированного состояния плоского уголкового кронштейна»

Исходные данные: геометрия кронштейна показана на рисунке 1; толщина уголка 10 мм; материал – сталь 35 (модуль упругости $2,06 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 600 МПа); верхнее левое отверстие жёстко закреплено по всей окружности; нижнее правое отверстие через жесткую вставку нагружено давлением, распределенным линейно по контуру нижней половины отверстия; равнодействующая давления составляет 10 кН.

Допущение: поскольку уголок достаточно тонкий, рассматривается случай обобщенного плоского напряженного состояния плоской задачи теории упругости.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние уголкового кронштейна.

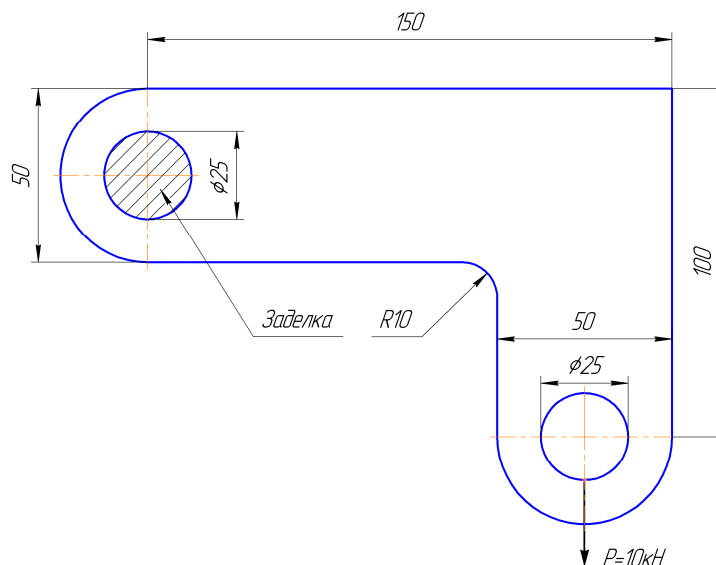


Рисунок 1 – Геометрия кронштейна

Начало декартовой системы координат поместим в центр левого верхнего отверстия, ось X направим вправо, а ось Y – вверх (в плоскости рисунка).

Для решения задачи предлагается выполнить следующие шаги.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab2.
2. Установить тип используемых в расчете конечных элементов – 8-узловой плоский элемент PLANE82 (или PLANE183 для версии Release 13 и более

поздних) с формулировкой «обобщенное плоское напряженное состояние с указанием толщины»: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*. Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Quad 8node 82*, *OK*.

В окне «Element types» нажимаем *Options* и для опции КЗ устанавливаем значение «Plane strs w/thk». Далее *OK* и *Close*.

3. Определить реальные постоянные для выбранного типа элементов: *M_M>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete*.

В окне «Real Constants» нажимаем кнопку *Add* и указываем тип элементов «Type 1 PLANE82», *OK*. В поле «Thickness» вводим значение толщины кронштейна (в мм): 10. Завершаем создание набора геометрических характеристик нажатием кнопки *OK*.

4. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

В правом окне «Material Models Available» последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

В появившейся диалоговой панели в поле «EX» вводим значение модуля упругости (в МПа): $2.06e5$, а в поле «PRXY» – коэффициента Пуассона: 0.3. Подтверждаем ввод кнопкой *OK*. Закрываем панель «Define Material Model Behavior».

5. Построить геометрическую модель кронштейна.

Как видно из рисунка 1, данная модель может быть получена при помощи комбинирования двух прямоугольников и двух полукругов с последующим вырезанием двух круглых отверстий.

- 5.1. Построить два прямоугольника: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners*.

Для первого прямоугольника вводим следующие параметры: координаты левого нижнего угла $WP X = 0$ и $WP Y = -25$; ширина $Width = 150$; высота $Height = 50$. Нажимаем кнопку *Apply* (применить), которая в отличие от *OK* не прерывает выполнение текущей операции.

Для второго прямоугольника задаем: $WP X = 100$; $WP Y = -75$; $Width = 50$; $Height = 50$. Теперь нажимаем *OK* для завершения этой операции.

- 5.2. Построить два полукруга радиусом 25 мм на концах прямоугольников: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Partial Annulus*.

Для первого полукруга вводим следующие параметры: координаты центра $WP X = WP Y = 0$; внешний радиус $Rad-1 = 25$; начальный угол сектора $Theta-1 = 90$; внутренний радиус $Rad-2 = 0$; конечный угол сектора $Theta-2 = 270$. Нажимаем *Apply*.

Для второго полукруга задаем: $WP X = 125$; $WP Y = -75$; $Rad-1 = 25$; $Theta-1 = 180$; $Rad-2 = 0$; $Theta-2 = 360$. Нажимаем *OK*.

В результате будет построено четыре поверхности. Если при этом включить их нумерацию, то они будут изображаться разным цветом (рисунок 2).

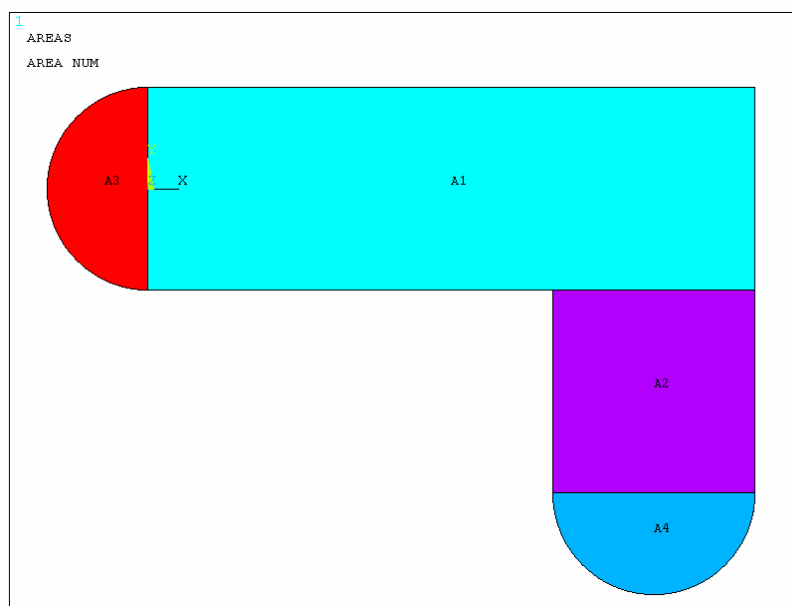


Рисунок 2 – Поверхности с нумерацией

5.3. Объединить созданные поверхности в одну при помощи булевой операции сложения: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add>Areas*.

Для указания всех поверхностей нажимаем кнопку *Pick All*.

5.4. Отобразить на экране только линии: *U_M>Plot>Lines*.

Включим нумерацию линий: *U_M>PlotCtrls>Numbering*. Отмечаем флаг «Line numbers».

При этом в рабочем окне должно появиться изображение, как показано на рисунке 3.

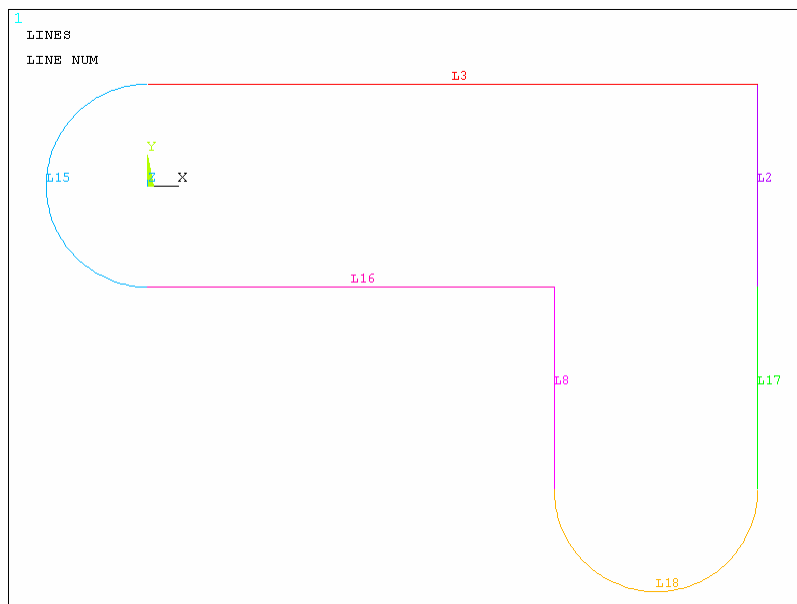


Рисунок 3 – Линии с нумерацией

5.5. Построить галтель (скругление) между линиями, образующие внутренний угол кронштейна: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Line Fillet*.

Указываем мышью в рабочем окне две линии L8 и L16, *OK*; в поле «Fillet radius» вводим число 10 (радиус скругления в мм).

5.6. Построить поверхность под кривой скругления.

Для удобства построения сначала увеличим рассматриваемую область, например, при помощи кнопки *Zoom Model* панели управления видом. Здесь нужно переместить курсор мыши примерно в центр области галтели, очертить вокруг нее рамку, удерживая нажатой левую кнопку, и в заключение щелкнуть опять левой кнопкой.

В результате выполнения этих действий в рабочем окне должно получиться изображение, аналогичное рисунку 4.

Для образования произвольной поверхности по линиям воспользуемся командой *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>by Lines*.

Указываем мышью три линии L1, L4 и L5, составляющие криволинейный треугольник. Нажимаем *OK*.

Отообразим поверхности: *U_M>Plot>Areas*.

Для автоматического масштабирования модели, так чтобы она целиком помещалась в рабочем окне, следует воспользоваться кнопкой *Fit View* панели управления видом.

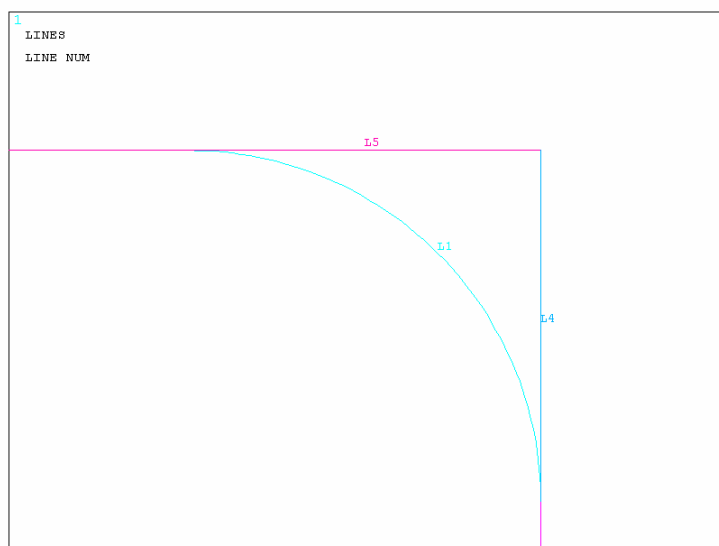


Рисунок 4 – Увеличенная область галтели

5.7. Объединить все поверхности геометрической модели в одну:
M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add>Areas.

Для указания всех поверхностей используем кнопку *Pick All*.

5.8. Построить круги радиусом 12,5 мм, соответствующие отверстиям:
M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Solid Circle.

Для первого круга вводим следующие параметры: координаты центра
 WP X = WP Y = 0; радиус Radius = 12.5. Нажимаем *Apply*.

Для второго круга задаем: WP X = 125; WP Y = -75; Radius = 12.5.
 Нажимаем *OK*.

5.9. Создать отверстия в кронштейне с помощью булевой операции вычитания:
M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Subtract>Areas.

Сначала указываем объект, из которого мы будем вычитать, т.е. в нашем случае поверхность, образующую кронштейн. Обязательно фиксируем данный выбор путем нажатия кнопки *OK*.

Далее указываем вычитаемые объекты, т.е. оба круг, соответствующие отверстиям, *OK*.

В результате выполнения этих действий в рабочем окне должно получиться изображение, аналогичное рисунку 5 (если при этом включена нумерация всех объектов).

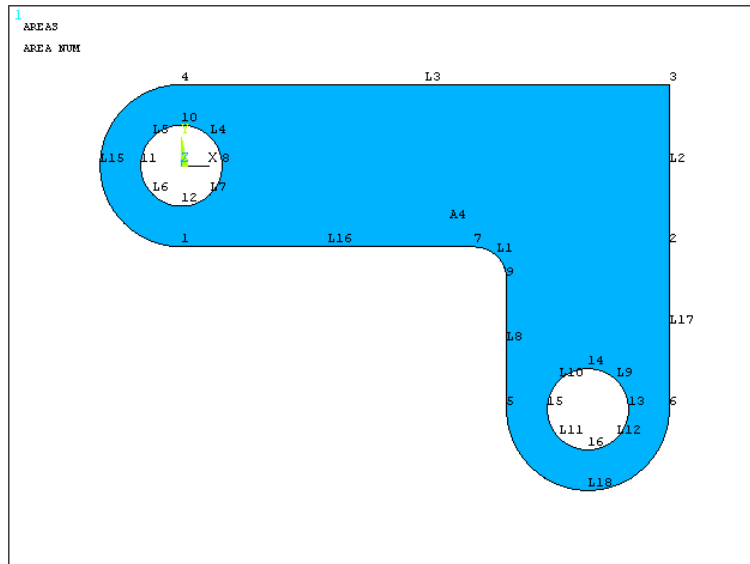


Рисунок 5 – Геометрическая модель кронштейна

6. Разбить геометрическую модель на конечные элементы: *M_M> Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

В разделе «Size Controls» устанавливаем глобальный размер элементов с помощью кнопки *Set* строки «Global»; в поле «Element edge length» (длина стороны элемента) вводим значение 3 (в мм), *OK*.

Далее в списке «Mesh» в качестве объектов для разбиения выбираем Areas (поверхности), в поле «Shape» (форма элементов) указываем Quad (четырёхугольная). И, наконец, выбираем режим построения свободной сетки Free. После нажатия кнопки *Mesh* указываем единственную поверхность A4, *OK*. Получаемая при этом разбивка показана на рисунке 6.

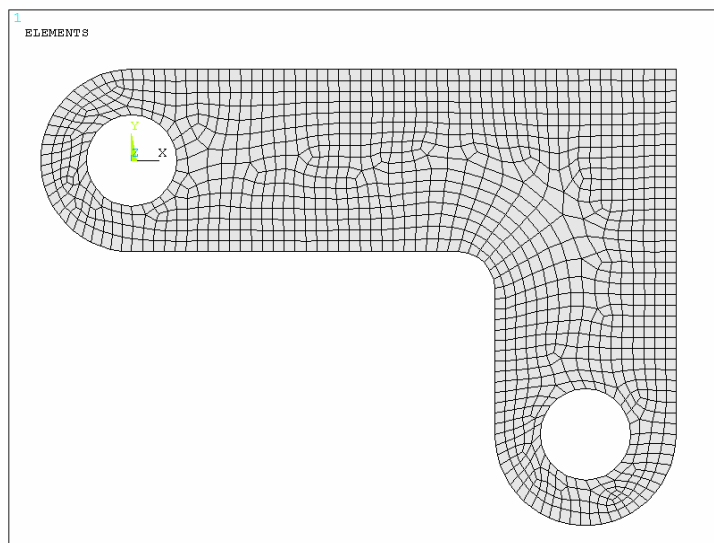


Рисунок 6 – Сетка конечных элементов

7. Задать граничные условия.

Для рассматриваемой задачи граничные условия представляют собой запрет всех перемещений по контуру левого верхнего отверстия.

Здесь удобно воспользоваться командой задания перемещений на линиях *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

Указываем все четыре линии, образующие контур левого верхнего отверстия, ОК. В списке «DOFs to be constrained» выбираем ALL DOF (запрет всех перемещений) и нажимаем ОК.

8. Приложить нагрузку.

В нашем случае нагружение кронштейна осуществляется давлением, линейно изменяющимся по нижнему краю правого отверстия. Вычислим его максимальное значение p_m из условия равенства равнодействующей давления силе $P = 10$ кН (рисунок 7).

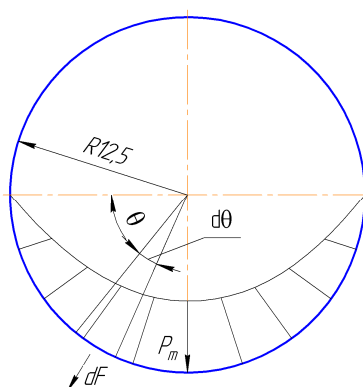


Рисунок 7 – Определение максимального давления

Для $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ давление изменяется по следующему закону:

$$p(\theta) = 2p_m \frac{\theta}{\pi}.$$

Тогда

$$P = 2 \int_0^{\pi/2} p_m \frac{2\theta}{\pi} t r \sin \theta d\theta \quad \Rightarrow \quad p_m = \frac{P\pi}{4tr} = 62,83 \text{ МПа},$$

где $t = 10$ мм – толщина кронштейна; $r = 12,5$ мм – радиус отверстия.

Давление необходимо приложить к линиям: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On lines*.

Указываем мышью в рабочем окне линию L11, представляющую левую нижнюю четверть контура отверстия, где задана нагрузка, ОК.

Вводим следующие значения: $VALI = 0$, $VALJ = 62.83$ (рисунок 8), *Apply*. Отметим, что если давление меняется вдоль линии по линейному закону, здесь следует определить два значения. При этом в поле «Load PRES value» вводится давление в начале линии $VALI$, а в поле «Optional PRES values at end J of line» – давление в конце линии $VALJ$ (если второе значение не определено, давление считается постоянным). Начало I и конец J линии зависят от порядка перечисления принадлежащих ей точек. Для проверки ориентации линий можно, например, вывести их список: *U_M>List>Lines*.

Затем указываем линию L12, представляющую правую нижнюю четверть контура отверстия, *OK*.

Задаем: $VALI = 62.83$, $VALJ = 0$, *OK*. На рисунке 9 показаны приложенные к модели граничные условия и нагрузка.

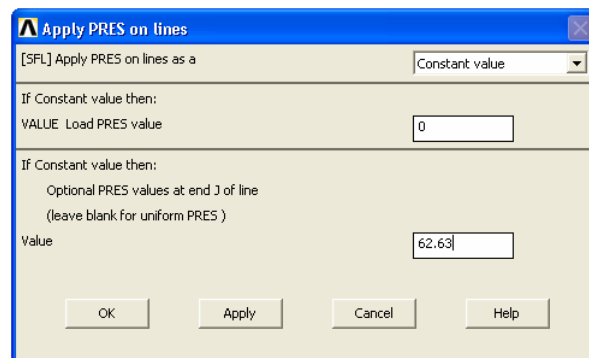


Рисунок 8 – Ввод линейно изменяющегося давления

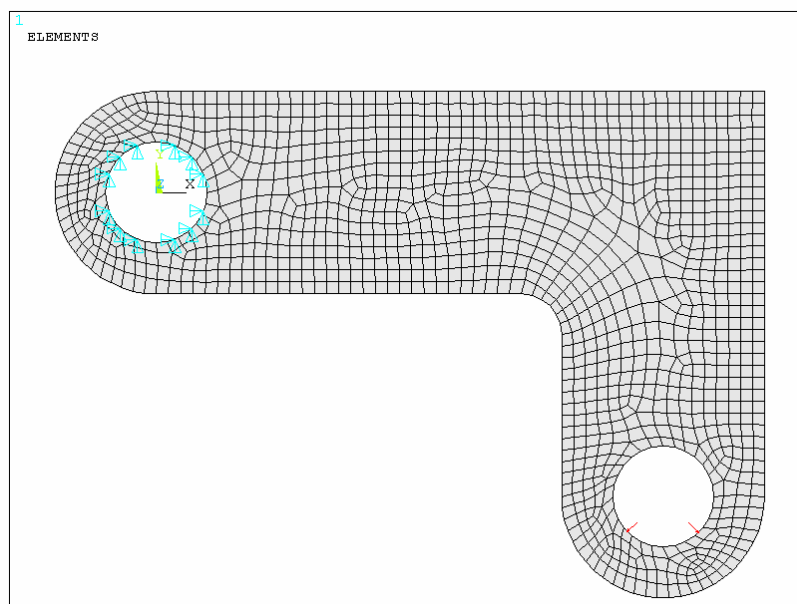


Рисунок 9 – Изображение граничных условий и нагрузки

9. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar>SAVE_DB*.

При этом база данных записывается в файл *Lab2.db*.

10. Запустить задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

Закрываем окно «/STATUS command». В диалоговой панели «Solve Current Load Step» нажимаем *OK*.

Дожидаемся сообщения «Solution is done!» (расчет окончен). Закрываем его кнопкой *Close*.

11. Проверить правильность приложения нагрузки.

В данной задаче сумма реакций в узлах закрепления в направлении оси *Y* должна равняться приложенной силе *P*, а в направлении оси *X* – нулю.

Для вывода списка реакций используем команду: *M_M>General Postproc>List Results>Reaction Solu*.

Указываем компоненту *FY*, *OK*. При этом появляется текстовое окно со списком реакций в направлении оси *Y* во всех закрепленных узлах. В конце списка находим суммарную вертикальную реакцию:

TOTAL VALUES	
VALUE	9999.7

Таким образом, погрешность приложения нагрузки составляет 0,003%.

Аналогично можно вывести список горизонтальных реакций.

12. Изобразить поле напряжений по Мизесу.

При плоском или объемном напряженном состоянии часто считают, что текучесть пластичных материалов наступает тогда, когда напряжения по Мизесу (или эквивалентные напряжения по теории прочности энергии формоизменения) достигают предела текучести.

Воспользуемся командой изображения узлового решения: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu*.

В появившейся диалоговой панели из списка доступных результатов последовательно выбираем *Nodal Solution>Stress>von Mises stress* (напряжение по Мизесу), *OK*.

Поле напряжений по Мизесу для рассматриваемого кронштейна представлено на рисунке 8. Помимо многоцветного изображения поля и легенды здесь приводятся максимальное (*SMX*) и минимальное (*SMN*) значения выбранных напряжений, а также максимальное значение перемещений (*DMX*). Метка *SEQV* означает, что отображаются эквивалентные напряжения по Мизесу, а *AVG* – осредненное в узлах решение. Кроме того, на

деформированном изображении модели маркерами MX и MN показываются места, где возникают максимальное и минимальное напряжения.

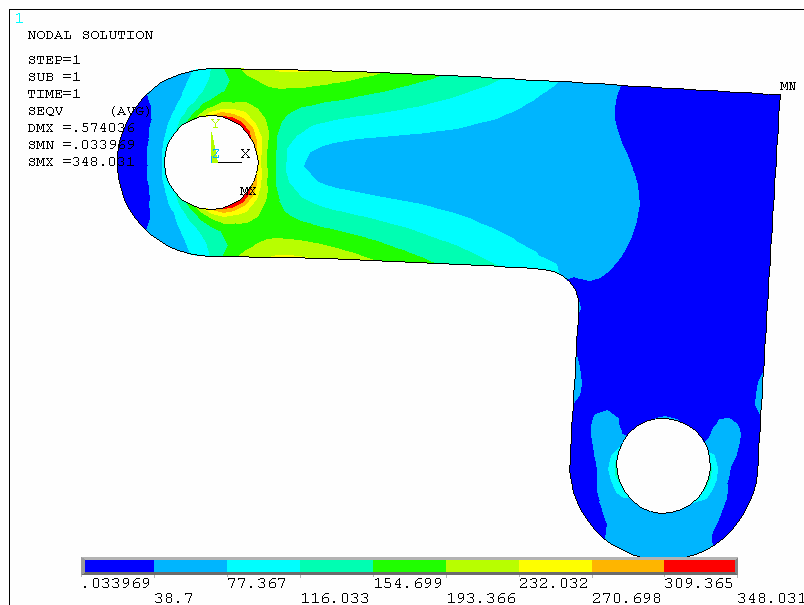


Рисунок 8 – Поле напряжений по Мизесу (МПа)

Как видно из рисунка 8, максимальное напряжение по Мизесу составляет 348 МПа, что меньше предела текучести.

13. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя Lab2.lgw.

14. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

«Исследование напряженно-деформированного состояния прямоугольной пластины с отверстием при одноосном растяжении»

Исходные данные: геометрия пластины показана на рисунке 1; толщина пластины 2 мм; материал – сталь 20кп (модуль упругости $2,12 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 295 МПа); погонная нагрузка 160 Н/мм.

Допущение: ввиду малости толщины пластины можно считать, что здесь имеет место обобщенное плоское напряженное состояние, т.е. можно ограничиться решением плоской задачи теории упругости.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние пластины и исследовать концентрацию напряжений, обусловленную отверстием.

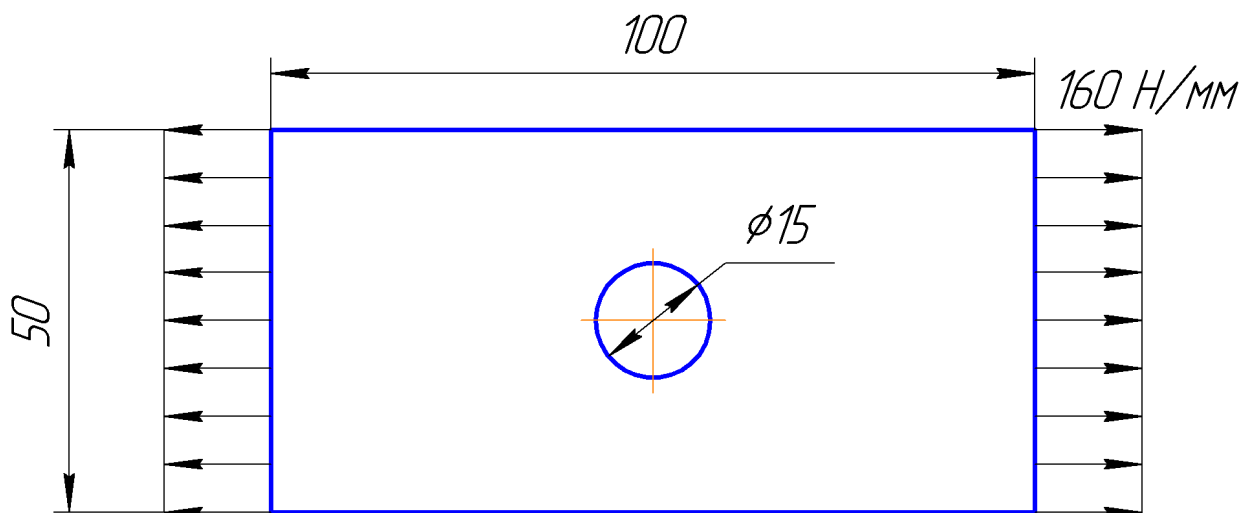


Рисунок 1 – Геометрия пластины

Благодаря двойной симметрии конструкции и нагрузки можно ограничиться рассмотрением четверти пластины. Начало системы координат поместим в центр отверстия и будем исследовать часть пластины, лежащую в первом квадранте (рисунок 2).

Следует отметить, что, начиная с версии ANSYS Release 13, графическим интерфейсом пользователя GUI не поддерживаются многие ранее популярные типы элементов (применяемые в настоящем курсе). Имеются два пути решения этой проблемы:

1) Что изучает механика разрушения?

1. Модели трещин.
2. Параметры НДС в окрестности вершины трещины.
3. Критерии разрушения.
4. Микромоделли материалов.
5. Физико-механические свойства материалов.

2) Что используется в механике разрушения в качестве характеристики материала?

1. Вязкость разрушения.
2. Пластичность разрушения.
3. Упругость разрушения.
4. Предел прочности.
5. Предел текучести.

3) Какие критерии начала распространения трещины получили наибольшее применение?

1. Энергетический.
2. Силовой.
3. Кинематический.
4. Статический.
5. Динамический.
6. Геометрический.

4) Что в энергетическом критерии характеризует склонность трещины к росту?

1. Интенсивность освобождения энергии.
2. Интенсивность полей напряжений и деформаций.
3. Коэффициент концентрации напряжений.
4. Плотность энергии деформации.
5. Сингулярность напряжений и деформаций.
6. Полная потенциальная энергия.
7. Раскрытие трещины.

5) Что в силовом критерии характеризует склонность трещины к росту?

1. Интенсивность освобождения энергии.
2. Интенсивность полей напряжений и деформаций.
3. Коэффициент концентрации напряжений.
4. Плотность энергии деформации.
5. Сингулярность напряжений и деформаций.
6. Полная потенциальная энергия.
7. Раскрытие трещины.

- 6) Каковы основные типы деформации при растрескивании?
1. Отрыв.
 2. Поперечный сдвиг.
 3. Продольный сдвиг.
 4. Изгиб.
 5. Продольно-поперечный изгиб.
 6. Свободное кручение.
 7. Стесненное кручение.
 8. Деформация.
- 7) Какие величины являются параметрами механики разрушения?
1. Коэффициент интенсивности напряжений.
 2. Интенсивность освобождения энергии.
 3. J-интеграл.
 4. Q-интеграл.
 5. Коэффициент концентрации напряжений.
 6. Коэффициент сингулярности напряжений.
- 8) От чего не зависит J-интеграл?
1. От выбора контура интегрирования.
 2. От размеров трещины.
 3. От действующей нагрузки.
 4. От геометрии детали.
- 9) Что представляет собой J-интеграл в линейно-упругом материале?
1. Коэффициент интенсивности напряжений.
 2. Интенсивность освобождения энергии.
 3. Интенсивность полей напряжений и деформаций.
 4. Раскрытие трещины.
 5. Вязкость разрушения.
 6. Трещиностойкость.
- 10) Что характеризует J-интеграл в нелинейно-упругом материале?
1. Интенсивность освобождения энергии.
 2. Интенсивность полей напряжений и деформаций.
 3. Раскрытие трещины.
 4. Вязкость разрушения.
 5. Трещиностойкость.
- 11) Что включает в себя решение задач механики разрушения в программе ANSYS?
1. Линейно-упругий или нелинейный упругопластический анализ.

2. Вычисление параметров механики разрушения.
3. Расчет параметров трещиностойкости.
4. Определение вязкости разрушения.
5. Вычисление значений критериев разрушения.

12) Как изменяются перемещения в окрестности вершины трещины в зависимости от расстояния r от нее в линейно-упругом материале?

1. Пропорционально r .
2. Обрато пропорционально r .
3. Пропорционально корню квадратному из r .
4. Обрато пропорционально корню квадратному из r .
5. Пропорционально корню кубическому из r .
6. Обрато пропорционально корню кубическому из r .

13) Как изменяются деформации в окрестности вершины трещины в зависимости от расстояния r от нее в линейно-упругом материале?

1. Пропорционально r .
2. Обрато пропорционально r .
3. Пропорционально корню квадратному из r .
4. Обрато пропорционально корню квадратному из r .
5. Пропорционально корню кубическому из r .
6. Обрато пропорционально корню кубическому из r .

14) Как изменяются напряжения в окрестности вершины трещины в зависимости от расстояния r от нее в линейно-упругом материале?

1. Пропорционально r .
2. Обрато пропорционально r .
3. Пропорционально корню квадратному из r .
4. Обрато пропорционально корню квадратному из r .
5. Пропорционально корню кубическому из r .
6. Обрато пропорционально корню кубическому из r .

15) Какими характеристиками должна обладать сетка в области вершины трещины?

1. Поверхности трещины должны совпадать.
2. Поверхности трещины не должны совпадать.
3. Элементы вокруг вершины трещины должны быть сингулярными со смещенными средними узлами.
4. Элементы вокруг вершины трещины не должны быть квадратичными.

5. Элементы вокруг вершины трещины должны быть несовместными.

16) Какой тип элементов рекомендуется использовать для двухмерной модели разрушения?

1. PLANE42.
2. PLANE82.
3. PLANE83.
4. PLANE145.
5. PLANE146.
6. PLANE182.
7. PLANE183.

17) Какой тип элементов рекомендуется использовать для трехмерной модели разрушения?

1. SOLID95.
2. SOLID147.
3. SOLID148.
4. SOLID185.
5. SOLID186.
6. SOLID187.
7. SOLID191.

18) Какая команда позволяет задавать точку концентрации напряжений?

1. KSCON.
2. CINT.
3. PRCINT.
4. KGEN.
5. KMESH.
6. LINP.
7. KCALC.

19) Какую часть длины трещины должен составлять радиус первого ряда элементов, окружающих вершину трещины, для получения достоверных результатов?

1. 1/2 или менее.
2. 1/4 или менее.
3. 1/8 или менее.
4. 1/10 или менее.
5. 1/16 или менее.

6. 1/20 или менее.

20) Какая команда используется для реализации процесса вычисления J-интеграла?

1. KSCON.
2. CINT.
3. PRCINT.
4. KGEN.
5. KMESH.
6. LINP.
7. KCALC.

21) На чем основано вычисление J-интеграла в программе ANSYS?

1. На методе интегрировании по области.
2. На методе интегрирования по контуру.
3. На методе виртуального интегрирования.
4. На методе интегрирования в направлении роста трещины.

22) Какая команда используется для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений?

1. KSCON.
2. CINT.
3. PRCINT.
4. KGEN.
5. KMESH.
6. LINP.
7. KCALC.

23) Как должна быть направлена ось x системы координат трещины?

1. Параллельно поверхности трещины и перпендикулярно ее фронту.
2. По касательной к фронту трещины.
3. Перпендикулярно поверхности трещины.
4. Под углом 45 градусов к поверхности трещины.
5. Произвольно.

24) Как должна быть направлена ось y системы координат трещины?

1. Параллельно поверхности трещины и перпендикулярно ее фронту.
2. По касательной к фронту трещины.
3. Перпендикулярно поверхности трещины.

4. Под углом 45 градусов к поверхности трещины.
5. Произвольно.

25) Сколько узлов требуется для задания траектории в модели половины трещины при вычислении коэффициентов интенсивности напряжений?

1. Два.
2. Три.
3. Четыре.
4. Пять.
5. Шесть.
6. Семь.

26) Сколько узлов требуется для задания траектории в модели полной трещины при вычислении коэффициентов интенсивности напряжений?

1. Два.
2. Три.
3. Четыре.
4. Пять.
5. Шесть.
6. Семь.

- 1) Что называется композитом (в широком смысле)?
 1. Гетерогенный материал, состоящий из двух или нескольких взаимно нерастворимых компонентов.
 2. Гомогенный материал, состоящий из растворимых компонентов.
 3. Многослойный материал.
 4. Материал, армированный волокнами.

- 2) Как обычно классифицируются композиционные материалы?
 1. По форме включений.
 2. По типу матрицы.
 3. По форме связующего.
 4. По структуре укладки слоев.
 5. По объемному содержанию компонентов.

- 3) Какие армирующие элементы получили широкое распространение при изготовлении композитов?
 1. Гранулы.
 2. Короткие волокна.
 3. Непрерывные длинные волокна.
 4. Слои.
 5. Спирали.
 6. Соты.

- 4) Какие композиты получили наибольшее распространение в современных силовых конструкциях?
 1. Волокнистые.
 2. Гранулированные.
 3. Плоскотекстурированные.
 4. Дисперсионно-упрочненные.
 5. Слоистые.

- 5) Какие волокна применяются для армирования полимерных матриц?
 1. Стекланные.
 2. Органические.
 3. Углеродные.
 4. Борные.
 5. Неорганические.
 6. Дюралевые.

- 6) Какие уровни неоднородностей обычно учитываются при расчете и проектировании композитных конструкций?
 1. Микroneоднородность, связанная с наличием двух фаз (волокон и матрицы).

2. Макронеоднородность, связанная с наличием разноориентированных слоев.
3. Нанонеоднородность, связанная с наличием молекул и кристаллов.
4. Уровень атомистической структуры вещества.

7) Что характеризует коэффициент Пуассона μ_{12} однонаправленного монослоя?

1. Деформацию поперек волокон при растяжении вдоль волокон.
2. Деформацию вдоль волокон при растяжении поперек волокон.
3. Сдвиговую деформацию в плоскости слоя.
4. Деформацию поперечного сдвига.

8) Что характеризует коэффициент Пуассона μ_{21} однонаправленного монослоя?

1. Деформацию поперек волокон при растяжении вдоль волокон.
2. Деформацию вдоль волокон при растяжении поперек волокон.
3. Сдвиговую деформацию в плоскости слоя.
4. Деформацию поперечного сдвига.

9) Каковы основные достоинства композитов?

1. Высокая удельная прочность.
2. Высокая удельная жесткость.
3. Возможность управления физико-механическими параметрами.
4. Высокая прочность связи между слоями.
5. Высокая термостойкость.
6. Высокая сопротивляемость ударным нагрузкам.

10) Какие соотношения учитывают специфические особенности армированных материалов?

1. Уравнения равновесия.
2. Геометрические соотношения.
3. Условия совместности деформаций.
4. Физические соотношения.
5. Статические граничные условия.
6. Кинематические граничные условия.

11) В каком случае появляется эффект взаимодействия между растяжением и изгибом композита?

1. Когда структура пакета слоев несимметрична относительно срединной поверхности.
2. Когда структура пакета слоев несимметрична относительно осей x , y общей системы координат.

3. Если пакет слоев состоит из разных материалов.
4. Когда мембранная жесткость больше изгибной.
5. Когда мембранная жесткость меньше изгибной.

12) Что представляет собой поверхность прочности критерия максимальных напряжений при плоском напряженном состоянии?

1. Параллелепипед.
2. Эллипсоид.
3. Параболоид.
4. Гиперболоид.
5. Сферу.
6. Цилиндр.
7. Конус.

13) Что представляет собой поверхность прочности критерия Цая-Ву при плоском напряженном состоянии?

1. Параллелепипед.
2. Эллипсоид.
3. Параболоид.
4. Гиперболоид.
5. Сферу.
6. Цилиндр.
7. Конус.

14) Какая формулировка критерия разрушения является наиболее общей?

1. Тензорно-полиномиальная.
2. Матрично-степенная.
3. Неканоническая.
4. Трансцендентная.
5. Векторно-логарифмическая.

15) Для какого материала постулируется критерий разрушения Цая-Ву?

1. Для изотропного.
2. Для ортотропного.
3. Для анизотропного.
4. Для трансверсально изотропного.
5. Для гомогенного.
6. Для гетерогенного.

16) Каков основной недостаток критерия разрушения Цзя-Ву?

1. Необходимость определения смешанного коэффициента из экспериментов при двухосном нагружении.
2. Ограниченность области применения.
3. Невозможность учета взаимного влияния напряжений на прочность.
4. Сложность в использовании.

17) Какие из перечисленных ниже слоистых элементов имеют четыре узла?

1. SHELL99.
2. SHELL91.
3. SHELL181.
4. SHELL281.
5. SOLSH190.
6. SOLID46.
7. SOLID191.
8. SOLID185.
9. SOLID186.

18) Какие из перечисленных ниже слоистых элементов имеют восемь узлов?

1. SHELL99.
2. SHELL91.
3. SHELL181.
4. SHELL281.
5. SOLSH190.
6. SOLID46.
7. SOLID191.
8. SOLID185.
9. SOLID186.

19) Какие из перечисленных ниже слоистых элементов имеют двадцать узлов?

1. SHELL99.
2. SHELL91.
3. SHELL181.
4. SHELL281.
5. SOLSH190.
6. SOLID46.
7. SOLID191.
8. SOLID185.

9. SOLID186.

20) Какие из перечисленных ниже слоистых элементов имеют второй порядок?

1. SHELL99.
2. SHELL91.
3. SHELL181.
4. SHELL281.
5. SOLSH190.
6. SOLID46.
7. SOLID191.
8. SOLID185.
9. SOLID186.

21) Какие из перечисленных ниже слоистых элементов имеют форму гексаэдра с 8 узлами?

1. SHELL99.
2. SHELL91.
3. SHELL181.
4. SHELL281.
5. SOLSH190.
6. SOLID46.
7. SOLID191.
8. SOLID185.
9. SOLID186.

22) Какие из перечисленных ниже слоистых элементов поддерживаются программой ANSYS, начиная с версии Release 13?

1. SHELL99.
2. SHELL91.
3. SHELL181.
4. SHELL281.
5. SOLSH190.
6. SOLID46.
7. SOLID191.
8. SOLID185.
9. SOLID186.

23) Какие из перечисленных ниже элементов получают свою слоистую конфигурацию через атрибут REAL?

1. SHELL99.

2. SHELL91.
3. SHELL181.
4. SHELL281.
5. SOLSH190.
6. SOLID46.
7. SOLID191.
8. SOLID185.
9. SOLID186.

24) Какие из перечисленных ниже элементов получают свою слоистую конфигурацию через атрибут SECNUM?

1. SHELL99.
2. SHELL91.
3. SHELL181.
4. SHELL281.
5. SOLSH190.
6. SOLID46.
7. SOLID191.
8. SOLID185.
9. SOLID186.

25) Какими способами можно задавать слоистую конфигурацию в программе ANSYS?

1. С помощью описания свойств отдельных слоев.
2. Путем определения матриц жесткостных характеристик пакета.
3. Путем наложения элементов друг на друга.
4. Путем смещения узловой поверхности.
5. С помощью таблицы, содержащей значения толщины в зависимости от координат.

26) Какие свойства определяются для каждого слоя в таблице реальных постоянных?

1. Номер материала.
2. Угол ориентации слоя.
3. Толщина слоя.
4. Число точек интегрирования по толщине слоя.
5. Разрушающие напряжения или деформации.
6. Номер критерия разрушения.

27) Какие свойства определяются для каждого слоя с помощью средств создания поперечных сечений?

1. Номер материала.
2. Угол ориентации слоя.
3. Толщина слоя.
4. Число точек интегрирования по толщине слоя.
5. Разрушающие напряжения или деформации.
6. Номер критерия разрушения.

28) Какие predetermined критерии разрушения имеются в программе ANSYS?

1. Максимальных деформаций.
2. Максимальных напряжений.
3. Цзя-Ву.
4. Чамиса-Хоффмана.
5. Хилла-Мизеса.
6. Тензорно-полиномиальный.

29) Что является основным недостатком варианта «strength index» критерия разрушения Цзя-Ву?

1. Сложность суждения о том, насколько действующая нагрузка близка к разрушающей.
2. Высокая трудоемкость.
3. Низкая точность.
4. Ограниченность области применения.

1) Какова основная проблема, возникающая при решении контактных задач?

1. Истинное пятно контакта заранее, как правило, неизвестно.
2. Необходимость учета трения.
3. Нелинейность исходных соотношений.
4. Необходимость учета пластичности.
5. Необходимость учета скольжения.

2) На какие классы делятся контактные задачи в программе ANSYS?

1. Взаимодействие жесткого и деформируемого тел.
2. Взаимодействие двух деформируемых тел.
3. Взаимодействие двух жестких тел.
4. Взаимодействие двух твердых тел.

3) Какие модели контакта являются в программе ANSYS основными?

1. Узел – узел.
2. Узел – поверхность.
3. Поверхность – поверхность.
4. Линия – линия.
5. Линия – поверхность.
6. Элемент – поверхность.
7. Узел – линия.

4) Какие модели контакта являются в программе ANSYS дополнительными?

1. Узел – узел.
2. Узел – поверхность.
3. Поверхность – поверхность.
4. Линия – линия.
5. Линия – поверхность.
6. Элемент – поверхность.
7. Узел – линия.

5) Что следует предпринять, если трение учитывать не требуется и зона взаимодействия тел является фиксированной?

1. Вместо решения контактной задачи связать соответствующие степени свободы.
2. Использовать модель контакта «узел – узел».
3. Использовать модель контакта «узел – поверхность».
4. Использовать модель контакта «поверхность – поверхность».
5. Задать симметричный контакт.

6) Какие элементы используются для моделирования двухмерного контакта типа «узел – узел»?

1. CONTAC12.
2. CONTAC52.
3. CONTA171.
4. CONTA172.
5. CONTA173.
6. CONTA174.
7. CONTA175.
8. CONTA178.

7) Какие элементы используются для моделирования трехмерного контакта типа «узел – узел»?

1. CONTAC12.
2. CONTAC52.
3. CONTA171.
4. CONTA172.
5. CONTA173.
6. CONTA174.
7. CONTA175.
8. CONTA178.

8) Какие элементы используются для моделирования двухмерного контакта типа «узел – поверхность»?

1. TARGE169.
2. TARGE170.
3. CONTA171.
4. CONTA172.
5. CONTA173.
6. CONTA174.
7. CONTA175.
8. CONTA178.

9) Какие элементы используются для моделирования трехмерного контакта типа «узел – поверхность»?

1. TARGE169.
2. TARGE170.
3. CONTA171.
4. CONTA172.
5. CONTA173.
6. CONTA174.
7. CONTA175.
8. CONTA178.

10) Какие элементы используются для моделирования двухмерного контакта типа «поверхность – поверхность»?

1. TARGE169.
2. TARGE170.
3. CONTA171.
4. CONTA172.
5. CONTA173.
6. CONTA174.
7. CONTA175.
8. CONTA178.

11) Какие элементы используются для моделирования трехмерного контакта типа «поверхность – поверхность»?

1. TARGE169.
2. TARGE170.
3. CONTA171.
4. CONTA172.
5. CONTA173.
6. CONTA174.
7. CONTA175.
8. CONTA178.

12) Сколько узлов имеет элемент CONTA178?

1. Один.
2. Два.
3. Три.
4. Четыре.
5. Шесть.
6. Восемь.

13) Сколько узлов имеет элемент CONTA175?

1. Один.
2. Два.
3. Три.
4. Четыре.
5. Шесть.
6. Восемь.

14) Сколько узлов имеет элемент CONTA171?

1. Один.
2. Два.

3. Три.
4. Четыре.
5. Шесть.
6. Восемь.

15) Сколько узлов имеет элемент CONTA172?

1. Один.
2. Два.
3. Три.
4. Четыре.
5. Шесть.
6. Восемь.

16) Сколько узлов имеет элемент CONTA173?

1. Один.
2. Два.
3. Три.
4. Четыре.
5. Шесть.
6. Восемь.

17) Сколько узлов имеет элемент CONTA174?

1. Один.
2. Два.
3. Три.
4. Четыре.
5. Шесть.
6. Восемь.

18) Какую из двух поверхностей следует выбирать в качестве ответной?

1. Менее выпуклую.
2. Более выпуклую.
3. С более грубой сеткой.
4. С более подробной сеткой.
5. Более жесткую.
6. Более податливую.
7. Более протяженную.
8. Менее протяженную.

19) Какую из двух поверхностей следует выбирать в качестве контактной?

1. Менее выпуклую.
2. Более выпуклую.
3. С более грубой сеткой.
4. С более подробной сеткой.
5. Более жесткую.
6. Более податливую.
7. Более протяженную.
8. Менее протяженную.

20) Что такое «симметричный контакт»?

1. Контактная пара, где одна поверхность является ответной, а вторая – контактной.
2. Две контактные пары, причем во второй – ответная и контактная поверхности меняются местами.
3. Контактная пара, в которой обе поверхности являются контактными.
4. Контактная пара, в которой обе поверхности являются ответными.
5. Две контактные пары, причем в первой – обе поверхности являются ответными, а во второй – контактными.

21) Что такое «асимметричный контакт»?

1. Контактная пара, где одна поверхность является ответной, а вторая – контактной.
2. Две контактные пары, причем во второй – ответная и контактная поверхности меняются местами.
3. Контактная пара, в которой обе поверхности являются контактными.
4. Контактная пара, в которой обе поверхности являются ответными.
5. Две контактные пары, причем в первой – обе поверхности являются ответными, а во второй – контактными.

22) Как связываются друг с другом ответные и контактные элементы, составляющие контактную пару?

1. Посредством общего набора реальных постоянных.
2. Посредством общей модели материала.
3. Посредством общего типа элементов.
4. Путем ориентации нормалей.
5. Путем задания одинаковых параметров контакта.

23) Какие точки контактных элементов используются для определения состояния контакта по умолчанию?

1. Точки интегрирования по Гауссу.
2. Точки интегрирования Ньютона-Котеса.
3. Узлы.
4. Только угловые узлы.
5. Только промежуточные узлы.
6. Геометрический центр тяжести.

24) Что означает $STAT = 0$?

1. Открытый контакт вдали от контактной зоны.
2. Состояние, близкое к контакту.
3. Контакт со скольжением.
4. Контакт с прилипанием.
5. Контакт с проникновением.

25) Что означает $STAT = 1$?

1. Открытый контакт вдали от контактной зоны.
2. Состояние, близкое к контакту.
3. Контакт со скольжением.
4. Контакт с прилипанием.
5. Контакт с проникновением.

26) Что означает $STAT = 2$?

1. Открытый контакт вдали от контактной зоны.
2. Состояние, близкое к контакту.
3. Контакт со скольжением.
4. Контакт с прилипанием.
5. Контакт с проникновением.

27) Что означает $STAT = 3$?

1. Открытый контакт вдали от контактной зоны.
2. Состояние, близкое к контакту.
3. Контакт со скольжением.
4. Контакт с прилипанием.
5. Контакт с проникновением.

28) Что такое pinball?

1. Область, используемая для определения состояния контакта.

2. Абсолютно жесткая ответная поверхность круглой или сферической формы.
3. Область внедрения.
4. Пятно контакта.

29) Что является первым шагом при создании контактной пары с использованием Мастера контактов?

1. Указание ответной поверхности.
2. Указание контактной поверхности.
3. Задание параметров контакта.
4. Ориентация нормалей.
5. Определение набора реальных постоянных.
6. Задание опций контактных элементов.

30) Какую опцию необходимо включить для учета предварительного натяга?

1. Include initial penetration.
2. Create symmetric pair.
3. Initial contact closure.
4. Close gap.

1) Что называется пластичностью?

1. Свойство тела изменять при нагружении форму, не разрушаясь, и сохранять остаточные деформации после снятия нагрузки.
2. Свойство тела изменять при нагружении форму, не разрушаясь, и возвращаться в исходное состояние после снятия нагрузки.
3. Нелинейность связи напряжений с деформациями.
4. Изменение деформаций и/или напряжений во времени.
5. Зависимость пластических деформаций от скорости деформирования.

2) Что называется ползучестью?

1. Свойство тела изменять при нагружении форму, не разрушаясь, и сохранять остаточные деформации после снятия нагрузки.
2. Свойство тела изменять при нагружении форму, не разрушаясь, и возвращаться в исходное состояние после снятия нагрузки.
3. Нелинейность связи напряжений с деформациями.
4. Изменение деформаций и/или напряжений во времени.
5. Зависимость пластических деформаций от скорости деформирования.

3) Что называется вязкопластичностью?

1. Свойство тела изменять при нагружении форму, не разрушаясь, и сохранять остаточные деформации после снятия нагрузки.
2. Свойство тела изменять при нагружении форму, не разрушаясь, и возвращаться в исходное состояние после снятия нагрузки.
3. Нелинейность связи напряжений с деформациями.
4. Изменение деформаций и/или напряжений во времени.
5. Зависимость пластических деформаций от скорости деформирования.

4) Какой вид физической нелинейности является наиболее актуальным для конструкционных материалов?

1. Пластичность.
2. Ползучесть.
3. Вязкопластичность.
4. Вязкоупругость.
5. Гиперупругость.
6. Нелинейная упругость.

5) Какие факторы не учитываются при построении условной диаграммы растяжения?

1. Изменение площади поперечного сечения образца.
2. Неравномерность деформирования по длине образца.

3. Изменение объема.
4. Нелинейность связи напряжение–деформация.
5. Изменение длины образца.

6) Что называется пределом пропорциональности?

1. Напряжение, до которого материал деформируется линейно.
2. Напряжение, до которого материал деформируется упруго.
3. Напряжение, соответствующее площадке текучести.
4. Напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,002.
5. Отношение максимальной силы растяжения образца к первоначальной площади поперечного сечения.
6. Отношение максимальной силы растяжения образца к действительной площади поперечного сечения.

7) Что называется пределом упругости?

1. Напряжение, до которого материал деформируется линейно.
2. Напряжение, до которого материал деформируется упруго.
3. Напряжение, соответствующее площадке текучести.
4. Напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,002.
5. Отношение максимальной силы растяжения образца к первоначальной площади поперечного сечения.
6. Отношение максимальной силы растяжения образца к действительной площади поперечного сечения.

8) Что называется физическим пределом текучести?

1. Напряжение, до которого материал деформируется линейно.
2. Напряжение, до которого материал деформируется упруго.
3. Напряжение, соответствующее площадке текучести.
4. Напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,002.
5. Отношение максимальной силы растяжения образца к первоначальной площади поперечного сечения.
6. Отношение максимальной силы растяжения образца к действительной площади поперечного сечения.

9) Что называется условным пределом текучести?

1. Напряжение, до которого материал деформируется линейно.
2. Напряжение, до которого материал деформируется упруго.
3. Напряжение, соответствующее площадке текучести.
4. Напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,002.
5. Напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,2.
6. Отношение максимальной силы растяжения образца к первоначальной площади поперечного сечения.

10) Что называется временным сопротивлением?

1. Напряжение, до которого материал деформируется линейно.
2. Напряжение, до которого материал деформируется упруго.
3. Напряжение, соответствующее площадке текучести.
4. Напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,002.
5. Отношение максимальной силы растяжения образца к первоначальной площади поперечного сечения.
6. Отношение максимальной силы растяжения образца к действительной площади поперечного сечения.

11) В каких случаях необходимо располагать действительной диаграммой деформирования?

1. При больших деформациях.
2. При конечных деформациях.
3. При больших перемещениях и углах поворота.
4. При возникновении пластических деформаций.

12) Какие величины связывает истинная диаграмма деформирования?

1. Действительное напряжение с логарифмической деформацией.
2. Напряжение с деформацией.
3. Действительное напряжение с экспоненциальной деформацией.
4. Истинную силу с удлинением образца.
5. Логарифмическое напряжение с истинной деформацией.

13) При каких значениях деформации различие между логарифмической и обычной деформациями не превышает 5%?

1. Меньше 0,1.
2. Меньше 0,2.
3. Меньше 1.
4. Меньше 10.
5. Меньше 20.

14) Что лежит в основе теории пластического течения?

1. Условия текучести.
2. Условия упрочнения.
3. Закон течения.
4. Уравнения пластического равновесия.
5. Геометрические соотношения.

15) Какое условие текучести получило наибольшее распространение для изотропных материалов?

1. Мизеса.

2. Треска.
3. Хилла.
4. Сен-Венана.
5. Максвелла.

16) Какую поверхность в пространстве главных напряжений представляет условие текучести Мизеса?

1. Круговой цилиндр.
2. Конус.
3. Эллипсоид.
4. Гиперболоид.
5. Сферу.
6. Плоскость.

17) В какую кривую вырождается поверхность текучести Мизеса в случае двухосного напряженного состояния?

1. В окружность.
2. В эллипс.
3. В параболу.
4. В гиперболу.
5. В прямоугольник.

18) Что такое упрочнение материала?

1. Увеличение предела текучести при пластическом деформировании.
2. Увеличение предела прочности при пластическом деформировании.
3. Увеличение модуля упругости при пластическом деформировании.
4. Увеличение коэффициента Пуассона при пластическом деформировании.
5. Увеличение временного сопротивления разрыву при пластическом деформировании.

19) Какие виды упрочнения рассматриваются в теории пластичности?

1. Изотропное.
2. Кинематическое.
3. Комбинированное.
4. Геометрическое.
5. Статическое.
6. Динамическое.

20) В чем суть эффекта Баушингера?

1. Увеличение предела текучести в направлении деформации и уменьшение его в противоположном направлении.
2. Уменьшение предела текучести в направлении деформации и увеличение его в противоположном направлении.
3. Увеличение предела текучести в направлении деформации и в противоположном направлении.
4. Уменьшение предела текучести в направлении деформации и в противоположном направлении.

21) Что определяет закон течения?

1. Направление развития пластических деформаций.
2. Направление упрочнения.
3. Направление увеличения предела текучести.
4. Направление уменьшения предела текучести.
5. Интенсивность остаточных деформаций.

22) Что устанавливает ассоциированный закон течения?

1. Вектор приращений пластических деформаций направлен по нормали к поверхности текучести.
2. Вектор приращений пластических деформаций направлен по касательной к поверхности текучести.
3. Вектор приращений пластических деформаций направлен по вектору напряжений.
4. Вектор приращений пластических деформаций направлен перпендикулярно вектору напряжений.

23) Что требуется задать до ввода пластических свойств материала в программе ANSYS?

1. Упругие постоянные.
2. Предел текучести.
3. Предел пропорциональности.
4. Предел упругости.
5. Временное сопротивление разрыву.

24) Какие свойства материала полностью определяют билинейную модель деформирования в программе ANSYS?

1. Упругие постоянные.
2. Предел текучести.
3. Касательный модуль.
4. Предел прочности.
5. Относительное удлинение при разрыве.

6. Относительное сужение при разрыве.

25) Что следует предпринять для правильного учета пластичности в случае непропорционального нагружения?

1. Нагрузку следует прикладывать в правильной последовательности, соблюдая реальную историю нагружения.
2. Нагрузку следует прикладывать постепенно, используя большое число подшагов.
3. Следует включить учет больших перемещений.
4. Следует использовать метод длины дуги.

26) В каких случаях рекомендуется использовать кинематическое упрочнение?

1. В случае непропорционального нагружения при малых деформациях.
2. В случае циклического нагружения при малых деформациях.
3. При больших деформациях.
4. При конечных деформациях.

27) В каких случаях рекомендуется использовать изотропное упрочнение?

1. В случае непропорционального нагружения при малых деформациях.
2. В случае циклического нагружения при малых деформациях.
3. При больших деформациях.
4. При конечных деформациях.

- 1) Какие допущения используются в линейном анализе конструкций?
 1. Перемещения малы по сравнению с размерами тела.
 2. Материал является линейно-упругим.
 3. Граничные условия сохраняются неизменными в процессе приложения нагрузки.
 4. Нагрузка не меняется во времени.
 5. Отсутствуют силы инерции.
 6. Демпфирующие силы полагаются равными нулю.

- 2) В каком случае необходимо учитывать геометрическую нелинейность?
 1. Когда перемещения являются большими.
 2. Если связь между напряжениями и деформациями нелинейная.
 3. Если в процессе нагружения меняются граничные условия.
 4. При изменении нагрузки во времени.
 5. Когда возникают силы инерции.
 6. Если имеются демпфирующие силы.

- 3) В каком случае необходимо учитывать физическую нелинейность?
 1. Когда перемещения являются большими.
 2. Если связь между напряжениями и деформациями нелинейная.
 3. Если в процессе нагружения меняются граничные условия.
 4. При изменении нагрузки во времени.
 5. Когда возникают силы инерции.
 6. Если имеются демпфирующие силы.

- 4) В каком случае необходимо решать контактную задачу?
 1. Когда перемещения являются большими.
 2. Если связь между напряжениями и деформациями нелинейная.
 3. Если в процессе нагружения меняются граничные условия.
 4. При изменении нагрузки во времени.
 5. Когда возникают силы инерции.
 6. Если имеются демпфирующие силы.

- 5) При каких прогибах пластин и оболочек справедливо линейное решение?
 1. Меньше двух толщин.
 2. Меньше толщины.
 3. Меньше половины толщины.
 4. Меньше трети толщины.
 5. Меньше четверти толщины.

6) Какой метод необходим для анализа нелинейного поведения неконсервативных систем?

1. Пошаговый метод последовательных нагружений.
2. Итерационный метод.
3. Метод длины дуги.
4. Метод линейного поиска.
5. Метод бисекции.

7) Какой итерационный метод используется в программе ANSYS для уточнения решения на каждом подшаге?

1. Метод Ньютона-Рафсона.
2. Метод Эйлера.
3. Метод Якоби.
4. Метод секущих.
5. Метод половинного деления.

8) Как часто проводится пересчет матрицы тангенциальной жесткости при использовании полного метода Ньютона-Рафсона в программе ANSYS?

1. На каждой итерации.
2. На каждом подшаге (временном шаге).
3. На каждом шаге нагружения.
4. Пересчет не проводится.

9) Как часто проводится пересчет матрицы тангенциальной жесткости при использовании модифицированного метода Ньютона-Рафсона в программе ANSYS?

1. На каждой итерации.
2. На каждом подшаге (временном шаге).
3. На каждом шаге нагружения.
4. Пересчет не проводится.

10) Каково назначение метода Ньютона-Рафсона?

1. Решение системы нелинейных уравнений.
2. Решение системы линейных алгебраических уравнений.
3. Пошаговое решение уравнений равновесия МКЭ.
4. Решение задачи начальной устойчивости.

11) В каком представлении могут быть записаны нелинейные соотношения?

1. Лагранжевом.
2. Эйлеровом.
3. Декартовом.

4. Ньютоновском.

12) В чем суть лагранжевой (материальной) формулировки?

1. Внимание фокусируется на движении фиксированных частиц.
2. Наблюдается протекание во времени процесса в данном месте.
3. В качестве отсчетной выбирается начальная конфигурация тела.
4. В качестве отсчетной выбирается конфигурация тела, найденная на предыдущем шаге.

13) В чем суть эйлеровой (пространственной) формулировки?

1. Внимание фокусируется на движении фиксированных частиц.
2. Наблюдается протекание во времени процесса в данном месте.
3. В качестве отсчетной выбирается начальная конфигурация тела.
4. В качестве отсчетной выбирается конфигурация тела, найденная на предыдущем шаге.

14) Какая формулировка является наиболее эффективной при решении задач механики деформируемого твердого тела?

1. Лагранжа.
2. Эйлера.
3. Декарта.
4. Ньютона.
5. Якоби.

15) Какая формулировка является наиболее эффективной при решении задач механики жидкости и газа?

1. Лагранжа.
2. Эйлера.
3. Декарта.
4. Ньютона.
5. Якоби.

16) Что называется критической нагрузкой по Эйлеру?

1. Нагрузка, при которой исходная форма равновесия перестает быть устойчивой.
2. Нагрузка, вызывающая появление пластического шарнира.
3. Нагрузка, при которой конструкция теряет несущую способность.
4. Нагрузка, приводящая к разрушению конструкции.
5. Нагрузка, при которой исчезают какие-либо формы статического равновесия.

17) Как решается задача начальной устойчивости?

1. С помощью статического критерия Эйлера.
2. Путем линеаризации исходных нелинейных соотношений.
3. С использованием соотношений линейной теории.
4. С помощью динамического критерия.
5. Пошаговым методом последовательных нагружений.

18) В чем заключается задача начальной устойчивости?

1. В отыскании состояния нейтрального равновесия.
2. В отыскании состояния устойчивого равновесия.
3. В отыскании состояния неустойчивого равновесия.
4. В отыскании состояния движения или колебания с монотонно возрастающей или ограниченной амплитудой.

19) К чему сводится задача начальной устойчивости?

1. К решению обобщенной проблемы собственных значений.
2. К решению системы линейных алгебраических уравнений.
3. К решению системы нелинейных уравнений.
4. К решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

20) Что показывает наименьшее собственное значение, найденное при решении задачи начальной устойчивости?

1. Во сколько раз критическая нагрузка больше заданной.
2. Во сколько раз критическая нагрузка меньше заданной.
3. Критическую нагрузку.
4. Форму потери устойчивости.
5. Частоту собственных колебаний.

21) В каком случае задача начальной устойчивости дает физически правильное решение?

1. Когда возможна бифуркация и малы докритические перемещения.
2. Для консервативных систем.
3. Для неконсервативных систем.
4. Если нагрузка не меняет своего направления.
5. При общей форме потери устойчивости.
6. При местной форме потери устойчивости.

22) Что такое бифуркация?

1. Разветвление форм равновесия.

2. Потеря устойчивости с перескоком.
3. Критическая нагрузка.
4. Предельная точка на кривой равновесных состояний.
5. Неоднозначность кривой равновесных состояний.

23) Как определяется верхняя критическая нагрузка?

1. Из геометрически нелинейного анализа.
2. Из физически нелинейного анализа.
3. Путем исследования закритического деформирования.
4. Методом начальной устойчивости.
5. Из анализа переходного процесса.

24) Как определяется нижняя критическая нагрузка?

1. Из геометрически нелинейного анализа.
2. Из физически нелинейного анализа.
3. Путем исследования закритического деформирования.
4. Методом начальной устойчивости.
5. Из анализа переходного процесса.

25) Какие специальные приемы используются для перехода через предельные точки?

1. Смена управляющего параметра.
2. Метод длины дуги.
3. Метод Ньютона-Рафсона.
4. Метод линейного поиска.
5. Пошаговый метод последовательных нагружений.

26) Что такое закритическое деформирование?

1. Поведение системы после потери устойчивости.
2. Форма потери устойчивости.
3. Потеря несущей способности.
4. Движение с монотонно возрастающей амплитудой.
5. Колебания с ограниченной амплитудой.

27) Какой из перечисленных ниже методов является универсальным для исследования закритического деформирования?

1. Смена управляющего параметра.
2. Метод длины дуги.
3. Метод Ньютона-Рафсона.
4. Метод линейного поиска.
5. Пошаговый метод последовательных нагружений.

- 1) В каких случаях можно проводить статический анализ?
 1. При действии постоянных нагрузок.
 2. При действии не изменяющихся во времени инерционных сил.
 3. Когда силы инерции такие, что внутренние усилия успевают «следить» за внешними силами.
 4. В случае установившихся гармонических колебаний.
 5. В случае неустановившихся колебаний.
 6. При ударном воздействии.

- 2) В каких случаях следует проводить динамический анализ?
 1. При действии постоянных нагрузок.
 2. При действии не изменяющихся во времени инерционных сил.
 3. Когда силы инерции такие, что внутренние усилия успевают «следить» за внешними силами.
 4. В случае установившихся гармонических колебаний.
 5. В случае неустановившихся колебаний.
 6. При ударном воздействии.

- 3) В каком случае процесс можно считать квазистатическим?
 1. При действии постоянных нагрузок.
 2. При действии не изменяющихся во времени инерционных сил.
 3. Когда силы инерции такие, что внутренние усилия успевают «следить» за внешними силами.
 4. В случае установившихся гармонических колебаний.
 5. В случае неустановившихся колебаний.
 6. При ударном воздействии.

- 4) Какие силы характеризует матрица $[K]$?
 1. Силы упругости.
 2. Силы инерции.
 3. Демпфирующие силы.
 4. Сосредоточенные силы.
 5. Поверхностные силы.
 6. Объемные силы.

- 5) Какие силы характеризует матрица $[M]$?
 1. Силы упругости.
 2. Силы инерции.
 3. Демпфирующие силы.
 4. Сосредоточенные силы.
 5. Поверхностные силы.
 6. Объемные силы.

- 6) Какие силы характеризует матрица $[C]$?

1. Силы упругости.
2. Силы инерции.
3. Демпфирующие силы.
4. Сосредоточенные силы.
5. Поверхностные силы.
6. Объемные силы.

7) При какой частоте возбуждения процесс можно считать квазистатическим?

1. Меньше $1/3$ низшей собственной частоты.
2. Меньше $1/3$ высшей собственной частоты.
3. Меньше $1/2$ низшей собственной частоты.
4. Меньше $1/2$ высшей собственной частоты.
5. Меньше $3/4$ низшей собственной частоты.
6. Меньше $3/4$ высшей собственной частоты.

8) В чем суть модального (*Modal*) анализа?

1. Расчет свободных колебаний.
2. Расчет вынужденных установившихся колебаний.
3. Исследование неустановившихся процессов.
4. Исследование квазистатических процессов.
5. Исследование статических процессов.

9) В чем суть гармонического (*Harmonic*) анализа?

1. Расчет свободных колебаний.
2. Расчет вынужденных установившихся колебаний.
3. Исследование неустановившихся процессов.
4. Исследование квазистатических процессов.
5. Исследование статических процессов.

10) В чем суть переходного (*Transient*) анализа?

1. Расчет свободных колебаний.
2. Расчет вынужденных установившихся колебаний.
3. Исследование неустановившихся процессов.
4. Исследование квазистатических процессов.
5. Исследование статических процессов.

11) Что такое собственные колебания?

1. Свободные колебания.
2. Вынужденные неустановившиеся колебания.
3. Вынужденные установившиеся колебания.
4. Колебания, совершаемые при отсутствии внешних сил.

12) Чему соответствует собственное значение при выполнении модального анализа?

1. Круговой частоте собственных колебаний.
2. Квадрату круговой частоты собственных колебаний.
3. Корню квадратному от круговой частоты собственных колебаний.
4. Частоте собственных колебаний (в циклах на единицу времени).
5. Квадрату частоты собственных колебаний (в циклах на единицу времени).
6. Корню квадратному от частоты собственных колебаний (в циклах на единицу времени).

13) Что характеризует собственный вектор при выполнении модального анализа?

1. Круговую частоту собственных колебаний.
2. Частоту собственных колебаний (в циклах на единицу времени).
3. Форму собственных колебаний.
4. Бесконечную норму формы собственных колебаний.
5. Эвклидову норму формы собственных колебаний.

14) Как в программе ANSYS по умолчанию выполняется нормирование собственных векторов?

1. По матрице жесткости.
2. По матрице масс.
3. По матрице демпфирования.
4. По единичной матрице.
5. По вектору нагрузки.

15) Какой метод решения проблемы собственных значений выбирается в программе ANSYS по умолчанию?

1. Block Lanczos.
2. Subspace.
3. PCG Lanczos.
4. Reduced.
5. Unsymmetric.
6. Damped.
7. QR Damped.

16) Какие методы решения проблемы собственных значений являются в программе ANSYS основными?

1. Block Lanczos.
2. Subspace.

3. PCG Lanczos.
4. Reduced.
5. Unsymmetric.
6. Damped.
7. QR Damped.

17) Какие имеющиеся в программе ANSYS методы решения проблемы собственных значений предназначены для специальных задач?

1. Block Lanczos.
2. Subspace.
3. PCG Lanczos.
4. Reduced.
5. Unsymmetric.
6. Damped.
7. QR Damped.

18) Что необходимо сделать для расчета частот и форм собственных колебаний предварительно нагруженной конструкции?

1. До данного расчета выполнить статический анализ с созданием начальных напряжений.
2. После данного расчета выполнить статический анализ с созданием начальных напряжений.
3. До данного расчета выполнить модальный анализ с созданием начальных напряжений.
4. После данного расчета выполнить модальный анализ с созданием начальных напряжений.

19) Что необходимо сделать для расчета вынужденных установившихся колебаний предварительно нагруженной конструкции?

1. До данного расчета выполнить статический анализ с созданием начальных напряжений.
2. После данного расчета выполнить статический анализ с созданием начальных напряжений.
3. До данного расчета выполнить модальный анализ с созданием начальных напряжений.
4. После данного расчета выполнить модальный анализ с созданием начальных напряжений.

20) Какие ограничения вводятся в программе ANSYS при расчете вынужденных установившихся колебаний?

1. Все нагрузки считаются зависящими от времени по гармоническому закону.

2. Все нагрузки изменяются с равной частотой.
3. Нелинейности не допускаются.
4. Переходные эффекты не учитываются.
5. Инерционные силы считаются постоянными.
6. Демпфирование не учитывается.

21) В каких случаях результаты гармонического анализа представляются в программе ANSYS в комплексном виде?

1. Если задано демпфирование.
2. Когда к модели прикладываются несколько отличающихся по фазе возбуждения нагрузок.
3. Когда нагрузки изменяются с разной частотой.
4. В случае учета нелинейностей.
5. При учете переходных эффектов.

22) Какие нагрузки в случае гармонического анализа позволяют при вводе задавать действительные и мнимые компоненты?

1. Перемещения.
2. Сосредоточенные силы и моменты.
3. Поверхностные нагрузки.
4. Объемные нагрузки.
5. Инерционные силы.
6. Демпфирующие силы.

23) Что требуется задать для полного определения гармонической нагрузки?

1. Амплитуду.
2. Фазовый угол.
3. Частоту.
4. Направляющие косинусы.
5. Время.

24) Какие методы имеются в программе ANSYS для исследования вынужденных установившихся колебаний?

1. Full.
2. Reduced.
3. Mode Superpose'n.
4. Subspace.
5. Block Lanczos.
6. Powerdynamic.

25) Какие методы имеются в программе ANSYS для исследования переходных динамических процессов?

1. Full.
2. Reduced.
3. Mode Superpose'n.
4. Subspace.
5. Block Lanczos.
6. Powerdynamic.

26) Что такое процесс с историей нагружения?

1. Переходный неустановившийся процесс.
2. Квазистатический процесс.
3. Вынужденные установившиеся колебания.
4. Статический процесс.
5. Свободные колебания.

27) Как задается зависимость «нагрузка-время» при проведении анализа переходных процессов?

1. Путем определения нескольких шагов нагружения.
2. Путем задания нескольких подшагов в пределах шага нагружения.
3. Вводом аналитической формулы.
4. Вводом данных в виде таблицы.
5. Заданием нескольких нагрузок.

28) Как может изменяться нагрузка от шага к шагу при анализе переходных процессов?

1. По линейному закону.
2. Скачком (мгновенно).
3. По квадратичному закону.
4. По синусоидальному закону.
5. По закону косинуса.

29) Какие начальные условия требуются для интегрирования разрешающей системы уравнений при анализе переходных процессов?

1. Начальные перемещения.
2. Начальные скорости.
3. Начальные ускорения.
4. Начальные силы.
5. Начальные напряжения.
6. Начальные деформации.

30) Сколько требуется точек на период колебаний для хорошего отображения формы собственных колебаний?

1. Пять.
2. Десять.
3. Двадцать.
4. Тридцать.
5. Сорок.
6. Пятьдесят.

- 1) Каковы преимущества объемной модели как расчетной схемы?
 1. Высокая точность идеализации геометрии.
 2. Возможность использования импортированной из CAD-систем геометрии при минимальной доработке.
 3. Пониженные требования к ресурсам компьютера.
 4. Простота анализа результатов расчета.
- 2) Каковы недостатки объемной модели как расчетной схемы?
 1. Невысокая точность идеализации геометрии.
 2. Невозможность использования импортированной из CAD-систем геометрии.
 3. Чрезмерно высокие требования к ресурсам компьютера.
 4. Сложность анализа результатов расчета.
- 3) Какие методы используются в программе ANSYS для импорта IGES-файлов?
 1. No defeaturing.
 2. Defeature model.
 3. Repair model.
 4. Improve model.
 5. No repairing.
 6. No reforming.
- 4) Каковы отличительные особенности метода импортирования «No defeaturing»?
 1. Хранение геометрии в стандартной базе данных.
 2. Хранение геометрии в специальной базе данных, позволяющей «лечить» и упрощать модель.
 3. Возможность выполнения любой стандартной операции над геометрическими объектами.
 4. Возможность использования специальных команд для упрощения модели.
 5. Повышенные требования к ресурсам компьютера.
 6. Ограниченные возможности автоматического создания объемов.
- 5) Каковы отличительные особенности метода импортирования «Defeature model»?
 1. Хранение геометрии в стандартной базе данных.
 2. Хранение геометрии в специальной базе данных, позволяющей «лечить» и упрощать модель.
 3. Возможность выполнения любой стандартной операции над геометрическими объектами.
 4. Возможность использования специальных команд для упрощения модели.
 5. Повышенные требования к ресурсам компьютера.
 6. Ограниченные возможности автоматического создания объемов.
- 6) Каково назначение опции MERGE?

1. Слияние совпадающих объектов.
 2. Автоматическое создание объемов.
 3. Удаление мелких поверхностей.
 4. Заполнение малых полостей.
 5. Удаление выступов.
- 7) Каково назначение опции SOLID?
1. Слияние совпадающих объектов.
 2. Автоматическое создание объемов.
 3. Удаление мелких поверхностей.
 4. Заполнение малых полостей.
 5. Удаление выступов.
- 8) Каково назначение опции SMALL?
1. Удаление коротких линий.
 2. Удаление мелких поверхностей.
 3. Заполнение малых углублений.
 4. Заполнение малых отверстий.
 5. Удаление малых выступов.
- 9) В каких случаях следует отключать опцию MERGE?
1. Когда попытка импорта при использовании метода «Defeature model» оказалась неудачной.
 2. Если требуется построить оболочечную или плоскую модель.
 3. Если при импортировании модели появляются зазоры и дыры.
 4. Для построения балочной модели.
 5. Когда в модели имеются фаски или галтели.
- 10) В каких случаях следует отключать опцию SOLID?
1. Когда попытка импорта при использовании метода «Defeature model» оказалась неудачной.
 2. Если требуется построить оболочечную или плоскую модель.
 3. Если при импортировании модели появляются зазоры и дыры.
 4. Для построения балочной модели.
 5. Когда в модели имеются фаски или галтели.
- 11) В каких случаях следует отключать опцию SMALL?
1. Когда попытка импорта при использовании метода «Defeature model» оказалась неудачной.
 2. Если требуется построить оболочечную или плоскую модель.
 3. Если при импортировании модели появляются зазоры и дыры.
 4. Для построения балочной модели.
 5. Когда в модели имеются фаски или галтели.
- 12) Какие способы упрощения модели доступны при импортировании ее методом «No defeaturing»?
1. Объединение коротких линий и мелких поверхностей.
 2. Стягивание линии в точку.
 3. Свертка поверхности в линию.

4. Удаление внутренних границ плоских поверхностей.
5. Заполнение малых полостей.
6. Удаление выступов.

13) Какие способы упрощения модели доступны при импортировании ее методом «Defeature model»?

1. Объединение коротких линий и мелких поверхностей.
2. Стягивание линии в точку.
3. Свертка поверхности в линию.
4. Удаление внутренних границ плоских поверхностей.
5. Заполнение малых полостей.
6. Удаление выступов.

14) Каким способом удаляются фаски при упрощении модели?

1. Путем сворачивания поверхности в линию.
2. Путем удаления соответствующего объема.
3. При помощи удаления выступов.
4. При помощи заполнения полостей.
5. Путем объединения поверхностей.

15) Каким способом удаляются галтели при упрощении модели?

1. Путем сворачивания поверхности в линию.
2. Путем удаления соответствующего объема.
3. При помощи удаления выступов.
4. При помощи заполнения полостей.
5. Путем объединения поверхностей.

16) Как по-другому называется метод импортирования «No defeaturing»?

1. Smooth.
2. Faceted.
3. Collapse.
4. Split.
5. Repair.

17) Как по-другому называется метод импортирования «Defeature model»?

1. Smooth.
2. Faceted.
3. Collapse.
4. Split.
5. Repair.

18) При упрощении импортированной модели для чего используется пункт меню «Fill Loops»?

1. Для удаления внутренних границ.

2. Для заполнения малых полостей.
3. Для удаления выступов.
4. Для объединения мелких поверхностей.
5. Для свертки поверхностей.

19) При упрощении импортированной модели для чего используется пункт меню «Fill Cavity»?

1. Для удаления внутренних границ.
2. Для заполнения малых полостей.
3. Для удаления выступов.
4. Для объединения мелких поверхностей.
5. Для свертки поверхностей.

20) При упрощении импортированной модели для чего используется пункт меню «Remove Boss»?

1. Для удаления внутренних границ.
2. Для заполнения малых полостей.
3. Для удаления выступов.
4. Для объединения мелких поверхностей.
5. Для свертки поверхностей.

21) При упрощении импортированной модели для чего используется пункт меню «Collapse Areas»?

1. Для удаления внутренних границ.
2. Для заполнения малых полостей.
3. Для удаления выступов.
4. Для объединения мелких поверхностей.
5. Для свертки поверхностей.

22) При упрощении импортированной модели для чего используется пункт меню «Merge Areas»?

1. Для удаления внутренних границ.
2. Для заполнения малых полостей.
3. Для удаления выступов.
4. Для объединения мелких поверхностей.
5. Для свертки поверхностей.

23) Какие из перечисленных ниже элементов являются объемными элементами первого порядка?

1. SOLID45.
2. SOLID92.
3. SOLID95.
4. SOLID185.
5. SOLID186.
6. SOLID187.

24) Какие из перечисленных ниже элементов являются объемными элементами второго порядка?

1. SOLID45.
2. SOLID92.
3. SOLID95.
4. SOLID185.
5. SOLID186.
6. SOLID187.

25) Какие из перечисленных ниже элементов имеют форму гексаэдра?

1. SOLID45.
2. SOLID92.
3. SOLID95.
4. SOLID185.
5. SOLID186.
6. SOLID187.

26) Какие из перечисленных ниже элементов имеют форму тетраэдра?

1. SOLID45.
2. SOLID92.
3. SOLID95.
4. SOLID185.
5. SOLID186.
6. SOLID187.

27) Какие из перечисленных ниже элементов позволяют учитывать гиперупругость, вязкоупругость и вязкопластичность?

1. SOLID45.
2. SOLID92.
3. SOLID95.
4. SOLID185.
5. SOLID186.
6. SOLID187.

28) Какие из перечисленных ниже элементов не рекомендуется использовать при построении свободных сеток?

1. SOLID45.
2. SOLID92.
3. SOLID95.
4. SOLID185.
5. SOLID186.
6. SOLID187.

1) Какие расчетные схемы обычно выбираются для тонкостенных конструкций?

1. Ферма.
2. Рама.
3. Оболочка.
4. Пластина.
5. Мембрана.
6. Сдвиговая панель.
7. Тело вращения.

2) Какая расчетная схема тонкостенной конструкции является наиболее общей?

1. Оболочка.
2. Пластина.
3. Мембрана.
4. Сдвиговая панель.

3) Какая расчетная схема тонкостенной конструкции является наиболее простой?

1. Оболочка.
2. Пластина.
3. Мембрана.
4. Сдвиговая панель.

4) Какие физические гипотезы используются в теории пластин и оболочек для сведения трехмерной задачи к двухмерной?

1. Прямых нормалей.
2. О независимом повороте нормали.
3. О недеформируемости срединной поверхности.
4. Плоских сечений.
5. О плоском законе распределения осевых деформаций.

5) Какие гипотезы учитывают деформации поперечного сдвига?

1. Кирхгофа-Лява.
2. Типа Тимошенко.
3. Миндлина-Рейсснера.
4. О недеформируемости срединной плоскости.
5. О ненадавливании слоев друг на друга.

6) Как работает оболочка?

1. На растяжение-сжатие в плоскостях, касательных к срединной поверхности.
2. На сдвиг в плоскостях, касательных к срединной поверхности.
3. На изгиб.
4. На кручение.

7) Как работает пластина, если принимается допущение о недеформируемости срединной плоскости?

1. На растяжение-сжатие в своей плоскости.
 2. На сдвиг в своей плоскости.
 3. На изгиб.
 4. На кручение.
- 8) Как работает мембрана?
1. На растяжение-сжатие в плоскостях, касательных к срединной поверхности.
 2. На сдвиг в плоскостях, касательных к срединной поверхности.
 3. На изгиб.
 4. На кручение.
- 9) Как работает сдвиговая панель?
1. На растяжение-сжатие в плоскостях, касательных к срединной поверхности.
 2. На сдвиг в плоскостях, касательных к срединной поверхности.
 3. На изгиб.
 4. На кручение.
- 10) Во сколько раз характерный размер должен превышать толщину, чтобы пластину (или) оболочку можно было считать тонкой?
1. В три раза.
 2. В пять раз.
 3. В десять раз.
 4. В пятьдесят раз.
 5. В сто раз.
- 11) В чем суть гипотезы Кирхгофа-Лява?
1. Любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной поверхности, остается прямолинейным, нормальным к деформируемой срединной поверхности и сохраняет свою длину.
 2. Любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной поверхности, не искривляется, но в общем случае не остается нормальным к деформируемой срединной поверхности.
 3. Точки, лежащие на срединной поверхности, перемещаются перпендикулярно этой поверхности.
 4. Отсутствует надавливание между слоями.
 5. Напряжения постоянны по толщине.
- 12) В чем суть гипотезы типа Тимошенко?
1. Любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной поверхности, остается прямолинейным, нормальным к деформируемой срединной поверхности и сохраняет свою длину.
 2. Любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной поверхности, не искривляется, но в общем случае не остается нормальным к деформируемой срединной поверхности.
 3. Точки, лежащие на срединной поверхности, перемещаются перпендикулярно этой поверхности.

4. Отсутствует надавливание между слоями.
 5. Напряжения постоянны по толщине.
- 13) В чем суть гипотезы Миндлина-Рейсснера?
1. Любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной поверхности, остается прямолинейным, нормальным к деформируемой срединной поверхности и сохраняет свою длину.
 2. Любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной поверхности, не искривляется, но в общем случае не остается нормальным к деформируемой срединной поверхности.
 3. Точки, лежащие на срединной поверхности, перемещаются перпендикулярно этой поверхности.
 4. Отсутствует надавливание между слоями.
 5. Напряжения считаются постоянными по толщине.
- 14) Как по-другому называется гипотеза прямых нормалей?
1. Кирхгофа-Лява.
 2. Типа Тимошенко.
 3. Миндлина-Рейсснера.
 4. Бернулли-Эйлера.
 5. Ньютона-Рафсона.
- 15) Как по-другому может называться гипотеза о независимом повороте нормали?
1. Кирхгофа-Лява.
 2. Типа Тимошенко.
 3. Миндлина-Рейсснера.
 4. Бернулли-Эйлера.
 5. Ньютона-Рафсона.
- 16) Какие конечные элементы называются совместными?
1. Обеспечивающие непрерывность поля перемещений.
 2. Обеспечивающие непрерывность поля деформаций.
 3. Обеспечивающие непрерывность поля напряжений.
 4. Если аппроксимация перемещений и геометрии осуществляется с помощью одних и тех же соотношений.
 5. Когда углы поворота нормали выражаются через производные от перемещений срединной поверхности.
- 17) Какие конечные элементы называются изопараметрическими?
1. Обеспечивающие непрерывность поля перемещений.
 2. Обеспечивающие непрерывность поля деформаций.
 3. Обеспечивающие непрерывность поля напряжений.
 4. Если аппроксимация перемещений и геометрии осуществляется с помощью одних и тех же соотношений.
 5. Когда углы поворота нормали выражаются через производные от перемещений срединной поверхности.

18) Какой элемент специально предназначен для моделирования сдвиговой панели?

1. SHELL28.
2. SHELL41.
3. SHELL43.
4. SHELL63.
5. SHELL91.
6. SHELL93.
7. SHELL99.
8. SHELL181.

19) Какой элемент специально предназначен для моделирования мембраны?

1. SHELL28.
2. SHELL41.
3. SHELL43.
4. SHELL63.
5. SHELL93.
6. SHELL181.

20) Какие степени свободы определены в узлах элемента SHELL41?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.

21) Какие степени свободы определены в узлах элемента SHELL63?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.

22) Какие из перечисленных ниже оболочечных элементов позволяют учитывать пластичность материала?

1. SHELL28.
2. SHELL41.
3. SHELL43.
4. SHELL63.
5. SHELL93.
6. SHELL181.

23) Какие из перечисленных ниже оболочечных элементов позволяют учитывать конечные деформации?

1. SHELL28.
2. SHELL41.
3. SHELL43.
4. SHELL63.
5. SHELL93.
6. SHELL181.

24) Какие из перечисленных ниже оболочечных элементов позволяют задавать поперечные сечения?

1. SHELL28.
2. SHELL41.
3. SHELL43.
4. SHELL63.
5. SHELL93.
6. SHELL181.

25) Какие из перечисленных ниже оболочечных элементов являются элементами второго порядка?

1. SHELL28.
2. SHELL41.
3. SHELL43.
4. SHELL63.
5. SHELL93.
6. SHELL181.

26) Какие из перечисленных ниже элементов являются элементами упругой оболочки, построенными на базе классической гипотезы без учета деформаций поперечного сдвига?

1. SHELL28.
2. SHELL41.
3. SHELL43.
4. SHELL63.
5. SHELL93.
6. SHELL181.

- 1) Что называется силовой схемой конструкции?
 1. Упрощенное изображение конструкции, которое фигурирует в расчете.
 2. Конструкция после исключения элементов, которые не участвуют в силовой работе.
 3. Конечно-элементная модель.
 4. Геометрическая модель.
- 2) Что называется расчетной схемой?
 1. Упрощенное изображение конструкции, которое фигурирует в расчете.
 2. Конструкция после исключения элементов, которые не участвуют в силовой работе.
 3. Конечно-элементная модель.
 4. Геометрическая модель.
- 3) Какие расчетные схемы обычно выбираются для стержневых конструкций?
 1. Ферма.
 2. Рама.
 3. Пластина.
 4. Оболочка.
 5. Сдвиговая панель.
 6. Тело вращения.
- 4) Какая расчетная схема стержневой конструкции является наиболее простой?
 1. Ферма.
 2. Рама.
 3. Пластина.
 4. Оболочка.
 5. Сдвиговая панель.
 6. Тело вращения.
- 5) Какие силовые факторы возникают в сечениях стержней фермы?
 1. Осевая сила.
 2. Перерезывающие силы.
 3. Изгибающие моменты.
 4. Крутящий момент.
- 6) Какие силовые факторы возникают в сечениях стержней рамы?
 1. Осевая сила.
 2. Перерезывающие силы.
 3. Изгибающие моменты.
 4. Крутящий момент.
- 7) Что называется ферменным элементом?
 1. Прямолинейный стержень, который присоединяется к другим элементам посредством идеальных шарниров.

2. Прямолинейный брус, способный воспринимать все виды нагрузок.
 3. Прямолинейный стержень, работающий только на кручение.
 4. Прямолинейный брус, работающий только на изгиб.
- 8) Что называется балочным элементом?
1. Прямолинейный стержень, который присоединяется к другим элементам посредством идеальных шарниров.
 2. Прямолинейный брус, способный воспринимать все виды нагрузок.
 3. Прямолинейный стержень, работающий только на кручение.
 4. Прямолинейный брус, работающий только на изгиб.
- 9) Какими данными однозначно определяется ферменный элемент?
1. Двумя узлами.
 2. Площадью поперечного сечения.
 3. Моментами инерции сечения относительно двух его главных центральных осей.
 4. Моментом инерции на кручение.
 5. Свойствами материала.
 6. Центробежным моментом инерции сечения.
 7. Полярным моментом инерции сечения.
- 10) Какими данными однозначно определяется балочный элемент?
1. Двумя узлами.
 2. Площадью поперечного сечения.
 3. Моментами инерции сечения относительно двух его главных центральных осей.
 4. Моментом инерции на кручение.
 5. Свойствами материала.
 6. Центробежным моментом инерции сечения.
 7. Полярным моментом инерции сечения.
- 11) Какая категория библиотеки элементов ANSYS включает в себя ферменные элементы?
1. LINK.
 2. BEAM.
 3. BAR.
 4. ROD.
 5. PLANE.
 6. SHELL.
 7. SOLID.
- 12) Какая категория библиотеки элементов ANSYS включает в себя балочные элементы?
1. LINK.
 2. BEAM.

3. BAR.
4. ROD.
5. PLANE.
6. SHELL.
7. SOLID.

13) Какие из перечисленных ниже элементов являются двухмерными ферменными элементами?

1. LINK1.
2. LINK8.
3. LINK10.
4. LINK11.
5. LINK180.

14) Какие из перечисленных ниже элементов являются трехмерными ферменными элементами?

1. LINK1.
2. LINK8.
3. LINK10.
4. LINK11.
5. LINK180.

15) Какие степени свободы определены в узлах элемента LINK1?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.

16) Какие степени свободы определены в узлах элемента LINK8?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.

17) Какие степени свободы определены в узлах элемента LINK180?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.

18) Какие ферменные элементы позволяют задавать начальную деформацию?

1. LINK1.
2. LINK8.
3. LINK10.
4. LINK11.
5. LINK180.

19) Какие ферменные элементы позволяют задавать дополнительную неконструкционную массу?

1. LINK1.
2. LINK8.
3. LINK10.
4. LINK11.
5. LINK180.

20) Какие ферменные элементы позволяют учитывать конечные деформации?

1. LINK1.
2. LINK8.
3. LINK10.
4. LINK11.
5. LINK180.

21) Какие из перечисленных ниже элементов являются двухмерными балочными элементами?

1. BEAM3.
2. BEAM4.
3. BEAM54.
4. BEAM44.
5. BEAM188.
6. BEAM189.

22) Какие из перечисленных ниже элементов являются трехмерными балочными элементами?

1. BEAM3.
2. BEAM4.
3. BEAM54.
4. BEAM44.
5. BEAM188.
6. BEAM189.

23) Какие из перечисленных ниже элементов являются балочными элементами второго порядка?

1. BEAM3.

2. BEAM4.
3. BEAM54.
4. BEAM44.
5. BEAM188.
6. BEAM189.

24) Какие из перечисленных ниже элементов являются балочными элементами переменного сечения?

1. BEAM3.
2. BEAM4.
3. BEAM54.
4. BEAM44.
5. BEAM188.
6. BEAM189.

25) Какие из перечисленных ниже балочных элементов позволяют учитывать пластичность материала?

1. BEAM3.
2. BEAM4.
3. BEAM54.
4. BEAM44.
5. BEAM188.
6. BEAM189.

26) Какие из перечисленных ниже балочных элементов позволяют учитывать конечные деформации?

1. BEAM3.
2. BEAM4.
3. BEAM54.
4. BEAM44.
5. BEAM188.
6. BEAM189.

27) Какие степени свободы определены в узлах элемента BEAM3?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.
7. WARP.

28) Какие степени свободы определены в узлах элемента BEAM4?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.

4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.
7. WARP.

29) Какие степени свободы определены в узлах элемента BEAM54?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.
7. WARP.

30) Какие степени свободы определены в узлах элемента BEAM44?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.
7. WARP.

31) Какие степени свободы определены в узлах элемента BEAM188?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.
7. WARP.

32) Какие степени свободы определены в узлах элемента BEAM189?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.
7. WARP.

33) Как по умолчанию ориентируется ось u системы координат трехмерного балочного элемента?

1. Параллельно плоскости XU глобальной декартовой системы координат.

2. Параллельно плоскости YZ глобальной декартовой системы координат.
3. Параллельно плоскости ZX глобальной декартовой системы координат.
4. В направлении оси X глобальной декартовой системы координат.
5. В направлении оси Y глобальной декартовой системы координат.
6. В направлении оси Z глобальной декартовой системы координат.

34) Как по умолчанию ориентируется ось u системы координат трехмерного балочного элемента в случае, когда он параллелен глобальной оси Z ?

1. Параллельно плоскости XY глобальной декартовой системы координат.
2. Параллельно плоскости YZ глобальной декартовой системы координат.
3. Параллельно плоскости ZX глобальной декартовой системы координат.
4. В направлении оси X глобальной декартовой системы координат.
5. В направлении оси Y глобальной декартовой системы координат.
6. В направлении оси Z глобальной декартовой системы координат.

35) Для чего используется дополнительный узел K в трехмерном балочном элементе?

1. Для альтернативного задания системы координат элемента.
2. Для получения элемента второго порядка.
3. Для альтернативного задания узловой системы координат.
4. Для увеличения степени функции формы.
5. Для задания смещений узла относительно оси балки.

36) Какие элементы не используют реальные постоянные?

1. BEAM3.
2. BEAM4.
3. BEAM54.
4. BEAM44.
5. BEAM188.
6. BEAM189.
7. LINK1.
8. LINK8.
9. LINK180.

37) Какие степени свободы двух совпадающих узлов необходимо связать для моделирования сферического шарнира?

1. UX .
2. UY .
3. UZ .

4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.

38) Какие степени свободы двух совпадающих узлов необходимо связать для моделирования цилиндрического шарнира с осью вращения, параллельной оси z узловой системы координат?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.

39) Где по умолчанию располагаются узлы балочных элементов BEAM188 и BEAM189?

1. В центре тяжести сечения.
2. В центре сдвига сечения.
3. В центре кручения сечения.
4. В центре изгиба сечения.
5. В начале системы координат сечения.

1) Какие виды напряженно-деформированных состояний относятся к плоской задаче теории упругости?

1. Плоская деформация.
2. Обобщенное плоское напряженное состояние.
3. Обобщенное плоское деформированное состояние.
4. Осесимметричное напряженно-деформированное состояние.
5. Антиплоская деформация.
6. Кручение круглых стержней.

2) Какие из перечисленных ниже задач являются примером плоской деформации?

1. Задача о плотине.
2. Задача о тоннеле метрополитена.
3. Длинное призматическое или цилиндрическое тело при действии нагрузки, перпендикулярной оси тела и постоянной вдоль нее.
4. Тело, помещенное между двумя абсолютно жесткими плитами, расстояние между которыми остается неизменным, и сжимаемое силами, параллельными плоскостям плит.
5. Тонкая пластина, нагруженная по контуру силами, параллельными ее плоскости и равномерно распределенными по толщине.
6. Тонкая пластина под действием равномерного поперечного давления.

3) Какие из перечисленных ниже задач являются примером обобщенного плоского напряженного состояния?

1. Задача о плотине.
2. Задача о тоннеле метрополитена.
3. Длинное призматическое или цилиндрическое тело при действии нагрузки, перпендикулярной оси тела и постоянной вдоль нее.
4. Тело, помещенное между двумя абсолютно жесткими плитами, расстояние между которыми остается неизменным, и сжимаемое силами, параллельными плоскостям плит.
5. Тонкая пластина, нагруженная по контуру силами, параллельными ее плоскости и постоянными по толщине.
6. Тонкая пластина под действием постоянного поперечного давления.

4) Какое деформированное состояние называется плоской деформацией?

1. Когда перемещение точек тела происходит параллельно одной плоскости.
2. Когда отличны от нуля лишь перемещения, перпендикулярные одной плоскости.
3. Когда равны нулю деформации в одной плоскости.

4. Когда отличны от нуля лишь деформации, перпендикулярные одной плоскости.
5. Когда все сдвиговые деформации равны нулю.
- 5) Сколько дифференциальных уравнений равновесия в плоской задаче теории упругости?
 1. Одно.
 2. Два.
 3. Три.
 4. Четыре.
 5. Пять.
 6. Шесть.
- 6) Сколько дифференциальных уравнений равновесия в осесимметричной задаче теории упругости?
 1. Одно.
 2. Два.
 3. Три.
 4. Четыре.
 5. Пять.
 6. Шесть.
- 7) Сколько геометрических соотношений Коши в плоской задаче теории упругости?
 1. Одно.
 2. Два.
 3. Три.
 4. Четыре.
 5. Пять.
 6. Шесть.
- 8) Сколько геометрических соотношений Коши в осесимметричной задаче теории упругости?
 1. Одно.
 2. Два.
 3. Три.
 4. Четыре.
 5. Пять.
 6. Шесть.
- 9) Какие компоненты тензора деформации равны нулю в случае плоской деформации?
 1. X-компонент.
 2. Y-компонент.
 3. Z-компонент.
 4. XY-компонент.
 5. YZ-компонент.

6. ZX-компонент.

10) Какие компоненты тензора напряжений равны нулю в случае плоской деформации?

1. X-компонент.
2. Y-компонент.
3. Z-компонент.
4. XY-компонент.
5. YZ-компонент.
6. ZX-компонент.

11) Какие компоненты тензора деформации равны нулю в случае обобщенного плоского напряженного состояния?

1. X-компонент.
2. Y-компонент.
3. Z-компонент.
4. XY-компонент.
5. YZ-компонент.
6. ZX-компонент.

12) Какие компоненты тензора напряжений равны нулю в случае обобщенного плоского напряженного состояния?

1. X-компонент.
2. Y-компонент.
3. Z-компонент.
4. XY-компонент.
5. YZ-компонент.
6. ZX-компонент.

13) Какие компоненты тензора деформации равны нулю в случае осесимметричного напряженно-деформированного состояния?

1. X-компонент.
2. Y-компонент.
3. Z-компонент.
4. XY-компонент.
5. YZ-компонент.
6. ZX-компонент.

14) Какие компоненты тензора напряжений равны нулю в случае осесимметричного напряженно-деформированного состояния?

1. X-компонент.
2. Y-компонент.
3. Z-компонент.
4. XY-компонент.
5. YZ-компонент.

6. ZX-компонент.

15) Какие из перечисленных ниже элементов являются плоскими треугольными элементами?

1. PLANE2.
2. PLANE42.
3. PLANE82.
4. PLANE182.
5. PLANE183.
6. PLANE25.
7. PLANE83.

16) Какие из перечисленных ниже элементов являются плоскими четырехугольными элементами?

1. PLANE2.
2. PLANE42.
3. PLANE82.
4. PLANE182.
5. PLANE183.
6. PLANE25.
7. PLANE83.

17) Какие из перечисленных ниже элементов являются гармоническими элементами?

1. PLANE2.
2. PLANE42.
3. PLANE82.
4. PLANE182.
5. PLANE183.
6. PLANE25.
7. PLANE83.

18) Какие из перечисленных ниже элементов являются элементами первого порядка?

1. PLANE2.
2. PLANE42.
3. PLANE82.
4. PLANE182.
5. PLANE183.
6. PLANE25.
7. PLANE83.

19) Какие из перечисленных ниже элементов являются элементами второго порядка?

1. PLANE2.

2. PLANE42.
3. PLANE82.
4. PLANE182.
5. PLANE183.
6. PLANE25.
7. PLANE83.

20) Какие элементы следует использовать для расчета тел вращения при осесимметричном нагружении?

1. PLANE2.
2. PLANE42.
3. PLANE82.
4. PLANE182.
5. PLANE183.
6. PLANE25.
7. PLANE83.

21) Какие элементы следует использовать для расчета тел вращения при неосесимметричном нагружении?

1. PLANE2.
2. PLANE42.
3. PLANE82.
4. PLANE182.
5. PLANE183.
6. PLANE25.
7. PLANE83.

22) Каким условиям должна удовлетворять осесимметричная модель в программе ANSYS?

1. Ось X должна быть осью вращения.
2. Ось Y должна быть осью вращения.
3. Ось Z должна быть осью вращения.
4. Ось X должна быть радиальной осью.
5. Ось Y должна быть радиальной осью.
6. Ось Z должна быть радиальной осью.

23) Какие степени свободы определены в каждом узле плоского элемента?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.

24) Какие степени свободы определены в каждом узле гармонического элемента?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.

- 1) Что такое «активный набор»?
 1. Совокупность геометрических и конечно-элементных объектов, с которой пользователь может работать в данный момент времени.
 2. Совокупность объектов, хранящихся в базе данных.
 3. Активные атрибуты элементов.
 4. Набор граничных условий и нагрузок, приложенных к модели в данный момент времени.
- 2) Какие объекты можно помещать в «активный набор»?
 1. Точки, линии, поверхности и объемы.
 2. Узлы и конечные элементы.
 3. Граничные условия.
 4. Нагрузку.
 5. Системы координат.
- 3) В чем суть критерия отбора «By Num/Pick»?
 1. Выбор объектов по номеру или путем указания на экране.
 2. Выбор объектов, связанных с ранее выбранными объектами другого типа.
 3. Выбор объектов на внешних границах.
 4. Выбор объектов на основе координат.
 5. Выбор объектов на основе атрибутов.
 6. Выбор объектов на основе результатов расчета.
- 4) В чем суть критерия отбора «Attached to»?
 1. Выбор объектов по номеру или путем указания на экране.
 2. Выбор объектов, связанных с ранее выбранными объектами другого типа.
 3. Выбор объектов на внешних границах.
 4. Выбор объектов на основе координат.
 5. Выбор объектов на основе атрибутов.
 6. Выбор объектов на основе результатов расчета.
- 5) В чем суть критерия отбора «Exterior»?
 1. Выбор объектов по номеру или путем указания на экране.
 2. Выбор объектов, связанных с ранее выбранными объектами другого типа.
 3. Выбор объектов на внешних границах.
 4. Выбор объектов на основе координат.
 5. Выбор объектов на основе атрибутов.
 6. Выбор объектов на основе результатов расчета.
- 6) Какая функция позволяет выбирать объекты в новый активный набор из полной модели?
 1. From Full.
 2. Reselect.
 3. Also Select.
 4. Unselect.

5. Select All.
6. Select None.
7. Invert.
8. Select Below.

7) Какая функция позволяет повторно выбирать объекты из активного набора?

1. From Full.
2. Reselect.
3. Also Select.
4. Unselect.
5. Select All.
6. Select None.
7. Invert.
8. Select Below.

8) Какая функция позволяет добавлять в активный набор объекты, выбираемые из полной модели?

1. From Full.
2. Reselect.
3. Also Select.
4. Unselect.
5. Select All.
6. Select None.
7. Invert.
8. Select Below.

9) Какая функция позволяет удалять часть объектов из активного набора?

1. From Full.
2. Reselect.
3. Also Select.
4. Unselect.
5. Select All.
6. Select None.
7. Invert.
8. Select Below.

10) Какая функция позволяет активизировать все объекты нижних уровней, входящих в состав активных объектов указанного типа?

1. From Full.
2. Reselect.
3. Also Select.
4. Unselect.
5. Select All.

6. Select None.
7. Invert.
8. Select Below.

11) Что позволяет делать активизация «динамического режима» в панели управления видом?

1. Перемещать и вращать изображение модели с помощью мыши.
2. Указывать объекты при помощи курсора мыши.
3. Выбирать объекты в активный набор.
4. Периодически перерисовывать изображение модели в рабочем окне.
5. Периодически сохранять базу данных.

12) Для чего используется кнопка «Fit» панели управления видом?

1. Для установки подходящего масштаба так, чтобы вся модель целиком помещалась в рабочем окне.
2. Для восстановления предыдущего масштаба.
3. Для перерисовки текущего графического изображения модели.
4. Для увеличения фрагмента изображения модели.
5. Для установки вида на рабочую плоскость.

13) Для чего используется кнопка «Zoom» панели управления видом?

1. Для установки подходящего масштаба так, чтобы вся модель целиком помещалась в рабочем окне.
2. Для восстановления предыдущего масштаба.
3. Для перерисовки текущего графического изображения модели.
4. Для увеличения фрагмента изображения модели.
5. Для установки вида на рабочую плоскость.

14) Для чего используется кнопка «Back Up» панели управления видом?

1. Для установки подходящего масштаба так, чтобы вся модель целиком помещалась в рабочем окне.
2. Для восстановления предыдущего масштаба.
3. Для перерисовки текущего графического изображения модели.
4. Для увеличения фрагмента изображения модели.
5. Для установки вида на рабочую плоскость.

15) Для чего используется кнопка «WP» панели управления видом?

1. Для установки подходящего масштаба так, чтобы вся модель целиком помещалась в рабочем окне.
2. Для восстановления предыдущего масштаба.
3. Для перерисовки текущего графического изображения модели.
4. Для увеличения фрагмента изображения модели.
5. Для установки вида на рабочую плоскость.

16) В каких единицах следует задавать массу, если в качестве единицы длины выбираются миллиметры, а силы – ньютоны?

1. В граммах.
2. В килограммах.
3. В центнерах.
4. В тоннах.
5. В фунтах.

17) В каких единицах следует задавать массу, если в качестве единицы длины выбираются метры, а силы – ньютоны?

1. В граммах.
2. В килограммах.
3. В центнерах.
4. В тоннах.
5. В фунтах.

18) В каких единицах следует задавать давление, если в качестве единицы длины выбираются миллиметры, а силы – ньютоны?

1. В паскалях.
2. В мегапаскалях.
3. В гигапаскалях.
4. В атмосферах.
5. В барах.
6. В миллиметрах ртутного столба.
7. В фунтах на квадратный дюйм.

19) В каких единицах следует задавать давление, если в качестве единицы длины выбираются метры, а силы – ньютоны?

1. В паскалях.
2. В мегапаскалях.
3. В гигапаскалях.
4. В атмосферах.
5. В барах.
6. В миллиметрах ртутного столба.
7. В фунтах на квадратный дюйм.

20) В каких единицах следует задавать модуль упругости, если в качестве единицы длины выбираются миллиметры, а силы – ньютоны?

1. В паскалях.
2. В мегапаскалях.
3. В гигапаскалях.
4. В атмосферах.
5. В барах.
6. В миллиметрах ртутного столба.
7. В фунтах на квадратный дюйм.

21) В каких единицах следует задавать модуль упругости, если в качестве единицы длины выбираются метры, а силы – ньютоны?

1. В паскалях.
2. В мегапаскалях.
3. В гигапаскалях.
4. В атмосферах.
5. В барах.
6. В миллиметрах ртутного столба.
7. В фунтах на квадратный дюйм.

22) В каких случаях нельзя использовать булевы операции?

1. После разбивки модели.
2. Если в модели имеются конкатенированные линии или поверхности.
3. При построении модели «снизу-вверх».
4. Если в модели имеются острые углы.
5. При построении модели «сверху-вниз».

23) Как ведут себя напряжения в области сингулярности при сгущении сетки?

1. Увеличиваются неограниченно.
2. Уменьшаются неограниченно.
3. Увеличиваются вплоть до некоторого предела.
4. Уменьшаются вплоть до некоторого предела.
5. Остаются неизменными.

24) В каких случаях возникает сингулярность напряжений?

1. При наличии сосредоточенных сил и/или точечных закреплений в объемной модели.
2. При наличии сосредоточенных сил и/или точечных закреплений в оболочечной модели.
3. При наличии сосредоточенных сил и/или точечных закреплений в стержневой модели.
4. При наличии углов с нулевым радиусом скругления в объемной модели.
5. При наличии углов с нулевым радиусом скругления в оболочечной модели.
6. При наличии углов с нулевым радиусом скругления в стержневой модели.

25) Какими способами можно избавиться от сингулярностей?

1. Заменить сосредоточенную силу эквивалентным давлением.
2. Разнести точечное закрепление на группу узлов.
3. Ввести скругления углов.
4. Сгустить сетку.

5. Добавить в модель фиктивные стержневые элементы с нулевой площадью поперечного сечения.
- 26) В каких случаях можно использовать относительно грубую сетку?
1. Когда интерес представляют лишь перемещения.
 2. Когда интерес представляют лишь номинальные напряжения.
 3. При определении низших форм колебаний.
 4. При определении высших форм колебаний.
 5. При анализе общей устойчивости.
 6. При анализе местной устойчивости.

1) По какому признаку можно выбирать данные из файла результатов для их просмотра в общем постпроцессоре?

1. По номеру шага нагружения.
2. По номеру подшага.
3. По номеру набора результатов.
4. По времени или частоте.
5. По значению нагрузки.
6. По значению напряжений.

2) Какие функции выполняет таблица элементов (Element Table)?

1. Обеспечивает доступ к выходным данным линейных элементов.
2. Является удобным инструментом для выполнения различных арифметических операций над выходными величинами.
3. Позволяет представлять результаты расчета в табличном виде.
4. Используется для хранения геометрических характеристик элементов.

3) Какой метод используется для помещения в таблицу элементов (Element Table) выходных величин линейных элементов?

1. Метод сквозной нумерации.
2. Метод поузловой нумерации.
3. Метод указания переменной и ее компонента.
4. Метод графического указания.

4) Какие способы графического изображения предусмотрены в программе ANSYS?

1. Power Graphics.
2. Full Model.
3. Character Graphics.
4. Power Model.

5) Какой способ графического изображения выбирается программой ANSYS по умолчанию при работе в интерактивном режиме?

1. Power Graphics.
2. Full Model.
3. Character Graphics.
4. Power Model.

6) Какие выходные величины являются основными (первичными) при решении задач механики деформируемого твердого тела?

1. Перемещения.
2. Деформации.
3. Напряжения.
4. Нагрузка.
5. Время.

7) Какие выходные величины являются производными (вторичными) при решении задач механики деформируемого твердого тела?

1. Перемещения.
2. Деформации.
3. Напряжения.
4. Нагрузка.
5. Время.

8) Какой пункт подменю «Contour Plot» используется для вычерчивания непрерывных по модели контурных линий?

1. Nodal Solu.
2. Element Solu.
3. Elem Table.
4. Line Elem res.

9) Какой пункт подменю «Contour Plot» используется для вычерчивания контурных линий, терпящих разрыв на границах элементов?

1. Nodal Solu.
2. Element Solu.
3. Elem Table.
4. Line Elem res.

10) Чему соответствует интенсивность напряжений?

1. Эквивалентному напряжению по теории прочности наибольших нормальных напряжений.
2. Эквивалентному напряжению по теории прочности наибольших положительных линейных деформаций.
3. Эквивалентному напряжению по теории прочности наибольших касательных напряжений.
4. Эквивалентному напряжению по теории прочности предельных напряженных состояний.
5. Эквивалентному напряжению по теории прочности энергии формоизменения.

11) Чему соответствует напряжение по Мизесу?

1. Эквивалентному напряжению по теории прочности наибольших нормальных напряжений.
2. Эквивалентному напряжению по теории прочности наибольших положительных линейных деформаций.
3. Эквивалентному напряжению по теории прочности наибольших касательных напряжений.
4. Эквивалентному напряжению по теории прочности предельных напряженных состояний.
5. Эквивалентному напряжению по теории прочности энергии формоизменения.

12) Для чего используется опция «Query Results»?

1. Для вывода значений выходной величины в указанной курсором мыши точке модели.
2. Для многоцветного представления поля выходной величины.
3. Для построения эпюры выходной величины на линейных элементах.
4. Для построения двухмерного графика выходной величины.
5. Для вывода списка значений выходной величины.

13) Вдоль каких линий можно строить двухмерные графики в программе ANSYS?

1. Вдоль определенной пользователем траектории.
2. Вдоль любой оси глобальной декартовой системы координат.
3. Вдоль любой оси активной системы координат.
4. Вдоль стороны поверхности.
5. Вдоль стороны конечного элемента.

14) Для чего используется опция «Map onto Path» при выполнении операций вдоль траектории?

1. Для связывания выходных величин с траекторией.
2. Для отображения траектории на модели.
3. Для определения траектории.
4. Для выполнения математических операций на выходными величинами.
5. Для построения графика изменения выходной величины вдоль траектории.

15) Что характеризует переменная в постпроцессоре истории нагружения?

1. Зависимость выходной величины в отдельной точке модели от времени (параметра нагружения).
2. Поведение модели в ходе всей истории нагружения.
3. Изменение выходной величины по модели в конкретный момент времени.
4. Процесс нагружения.
5. Изменение выходной величины вдоль траектории.

16) Какую величину можно использовать в качестве оси абсцисс при построении графика в постпроцессоре истории нагружения?

1. Только время.
2. Только частоту.
3. Только параметр нагружения.
4. Только время и частоту.
5. Любую определенную ранее переменную.

17) Каково основное назначение калькулятора диалоговой панели постпроцессора истории нагружения?

1. Создание новых переменных на основе существующих.
2. Выполнение математических операций над существующими переменными.
3. Выполнение арифметических операций над выходными величинами.
4. Расчет значений переменных в конкретный момент времени.

- 1) Что такое Modal-анализ?
 1. Расчет частот и форм собственных колебаний.
 2. Расчет вынужденных колебаний.
 3. Анализ переходных динамических процессов.
 4. Анализ начальной устойчивости.
 5. Анализ случайных колебаний.
- 2) Что такое Harmonic-анализ?
 1. Расчет частот и форм собственных колебаний.
 2. Расчет вынужденных колебаний.
 3. Анализ переходных динамических процессов.
 4. Анализ начальной устойчивости.
 5. Анализ случайных колебаний.
- 3) Что такое Transient-анализ?
 1. Расчет частот и форм собственных колебаний.
 2. Расчет вынужденных колебаний.
 3. Анализ переходных динамических процессов.
 4. Анализ начальной устойчивости.
 5. Анализ случайных колебаний.
- 4) Что такое Eigen Buckling-анализ?
 1. Расчет частот и форм собственных колебаний.
 2. Расчет вынужденных колебаний.
 3. Анализ переходных динамических процессов.
 4. Анализ начальной устойчивости.
 5. Анализ случайных колебаний.
- 5) Что такое Spectrum-анализ?
 1. Расчет частот и форм собственных колебаний.
 2. Расчет вынужденных колебаний.
 3. Анализ переходных динамических процессов.
 4. Анализ начальной устойчивости.
 5. Анализ случайных колебаний.
- 6) От чего в первую очередь зависит выбор типа анализа?
 1. От условий нагружения.
 2. От реакции системы, которую предполагается получить.
 3. От условий закрепления.
 4. От типа используемых элементов.
 5. От материала конструкции.
- 7) Какие из перечисленных ниже методов являются прямыми методами решения системы линейных алгебраических уравнений?
 1. Frontal.
 2. Sparse.
 3. PCG.
 4. ICCG.

5. JCG.

8) Какие из перечисленных ниже методов являются итерационными методами решения системы линейных алгебраических уравнений?

1. Frontal.
2. Sparse.
3. PCG.
4. ICCG.
5. JCG.

9) Какой метод решения системы линейных алгебраических уравнений выбирается программой ANSYS по умолчанию?

1. Frontal.
2. Sparse.
3. PCG.
4. ICCG.
5. JCG.

10) Какой метод решения системы линейных алгебраических уравнений не требует формирования полной матрицы жесткости?

1. Frontal.
2. Sparse.
3. PCG.
4. ICCG.
5. JCG.

11) Какой метод решения системы линейных алгебраических уравнений следует использовать при небольшой памяти ЭВМ?

1. Frontal.
2. Sparse.
3. PCG.
4. ICCG.
5. JCG.

12) Какой метод обеспечивает высокую скорость решения больших систем уравнений при использовании объемных элементов?

1. Frontal.
2. Sparse.
3. PCG.
4. ICCG.
5. JCG.

13) К какой категории нагрузок относятся граничные условия в перемещениях?

1. DOF Constraints.
2. Forces.

3. Surface Loads.
4. Body Loads.
5. Inertial Loads.
6. Coupled-field Loads.

14) К какой категории нагрузок относится давление?

1. DOF Constraints.
2. Forces.
3. Surface Loads.
4. Body Loads.
5. Inertial Loads.
6. Coupled-field Loads.

15) К какой категории нагрузок относится температура?

1. DOF Constraints.
2. Forces.
3. Surface Loads.
4. Body Loads.
5. Inertial Loads.
6. Coupled-field Loads.

16) К какой категории нагрузок относится сила тяжести?

1. DOF Constraints.
2. Forces.
3. Surface Loads.
4. Body Loads.
5. Inertial Loads.
6. Coupled-field Loads.

17) К какой категории нагрузок относятся сосредоточенные моменты?

1. DOF Constraints.
2. Forces.
3. Surface Loads.
4. Body Loads.
5. Inertial Loads.
6. Coupled-field Loads.

18) К какой категории нагрузок относятся гравитационные силы?

1. DOF Constraints.
2. Forces.
3. Surface Loads.
4. Body Loads.
5. Inertial Loads.
6. Coupled-field Loads.

19) В каком случае проявляются недостатки способа приложения нагрузок к геометрическим объектам?

1. Когда узлы имеют разные системы координат.
2. При модификации сетки элементов.
3. Когда используются элементы разных типов.
4. При редактировании модели.

20) Какие степени свободы следует закрепить при задании условий симметрии в плоскости перпендикулярной оси X узловой системы координат?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.

21) Какие степени свободы следует закрепить при задании условий симметрии в плоскости перпендикулярной оси Y узловой системы координат?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.

22) Какие степени свободы следует закрепить при задании условий симметрии в плоскости перпендикулярной оси Z узловой системы координат?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. ROTX.
5. ROTY.
6. ROTZ.

23) Что в программе ANSYS понимается под «шагом нагружения»?

1. Конфигурация нагрузок, для которой находится решение.
2. Подшаг, для которого вычисляется промежуточное решение.
3. Отдельная нагрузка.
4. Полное время решения задачи.
5. Промежуток времени, когда нагрузка сохраняется неизменной.

24) Что в программе ANSYS понимается под «шагом решения»?

1. Конфигурация нагрузок, для которой находится решение.
2. Подшаг, для которого вычисляется промежуточное решение.

3. Отдельная нагрузка.
4. Полное время решения задачи.
5. Промежуток времени, когда нагрузка сохраняется неизменной.

25) Для чего рекомендуется разбивать шаг нагружения на несколько дополнительных подшагов?

1. Для повышения точности нелинейного решения.
2. Для улучшения сходимости нелинейного решения.
3. Для повышения точности переходного динамического анализ.
4. Для улучшения сходимости переходного динамического анализ.
5. Для уменьшения времени счета.
6. Для сокращения требуемой памяти ЭВМ.

26) Что представляет собой величина time в статическом анализе без временных эффектов?

1. Действительное хронологическое время.
2. Переменную для обозначения различных уровней нагружения.
3. Переменную для обозначения различных нелинейных эффектов.
4. В данном анализе не используется.

27) Что представляет собой величина time в динамическом анализе?

1. Действительное хронологическое время.
2. Переменную для обозначения различных уровней нагружения.
3. Переменную для обозначения различных нелинейных эффектов.
4. В данном анализе не используется.

28) Что представляет собой величина time при анализе ползучести?

1. Действительное хронологическое время.
2. Переменную для обозначения различных уровней нагружения.
3. Переменную для обозначения различных нелинейных эффектов.
4. В данном анализе не используется.

29) Что представляет собой величина time при анализе вязкопластичности?

1. Действительное хронологическое время.
2. Переменную для обозначения различных уровней нагружения.
3. Переменную для обозначения различных нелинейных эффектов.
4. В данном анализе не используется.

30) Какая вкладка диалоговой панели «Solution Controls» позволяет задавать количество шагов?

1. Basic.
2. Transient.
3. Sol'n Options.
4. Nonlinear.
5. Advanced NL.

31) Какая вкладка диалоговой панели «Solution Controls» позволяет задавать максимально допустимое число итераций?

1. Basic.
2. Transient.
3. Sol'n Options.
4. Nonlinear.
5. Advanced NL.

32) Какая вкладка диалоговой панели «Solution Controls» позволяет управлять выводом расчетных величин?

1. Basic.
2. Transient.
3. Sol'n Options.
4. Nonlinear.
5. Advanced NL.

33) Какая вкладка диалоговой панели «Solution Controls» позволяет задавать параметры «рестарта»?

1. Basic.
2. Transient.
3. Sol'n Options.
4. Nonlinear.
5. Advanced NL.

34) Какая вкладка диалоговой панели «Solution Controls» позволяет активизировать метод длины дуги?

1. Basic.
2. Transient.
3. Sol'n Options.
4. Nonlinear.
5. Advanced NL.

35) Какая вкладка диалоговой панели «Solution Controls» позволяет выбирать метод решения системы линейных алгебраических уравнений?

1. Basic.
2. Transient.
3. Sol'n Options.
4. Nonlinear.
5. Advanced NL.

36) Какие результаты расчета сохраняются программой по умолчанию?

1. Для последнего подшага каждого шага нагружения.
2. Для последнего подшага последнего шага нагружения.
3. Для всех подшагов последнего шага нагружения.

4. Для всех подшагов.
5. Для каждого пятого подшага.
6. Для каждого десятого подшага.

1) Какие методы доступны в программе ANSYS для построения конечно-элементной модели?

1. Метод, базирующийся на геометрическом моделировании.
2. Прямое генерирование.
3. «Восходящее» моделирование.
4. «Нисходящее» моделирование.

2) В чем суть метода, базирующегося на геометрическом моделировании?

1. Сначала описывается геометрия тела, а затем геометрические объекты автоматически разбиваются на элементы.
2. Положение каждого узла и связи каждого элемента определяются вручную.
3. В качестве расчетной используется геометрическая модель.
4. В качестве расчетной используется конечно-элементная модель.

3) В чем суть метода прямого генерирования?

1. Сначала описывается геометрия тела, а затем геометрические объекты автоматически разбиваются на элементы.
2. Положение каждого узла и связи каждого элемента определяются вручную.
3. В качестве расчетной используется геометрическая модель.
4. В качестве расчетной используется конечно-элементная модель.

4) Что в программе ANSYS относится к атрибутам элементов?

1. Тип элемента.
2. «Реальные» постоянные.
3. Свойства материала.
4. Система координат элемента.
5. Поперечное сечение балки.
6. Узловая система координат.
7. Координаты узлов элемента.

5) Какие элементы входят в категорию LINK?

1. Стержневые.
2. Балочные.
3. Трубные.
4. Плоские и осесимметричные.
5. Оболочечные.
6. Объемные.

6) Какие элементы входят в категорию BEAM?

1. Стержневые.
2. Балочные.
3. Трубные.
4. Плоские и осесимметричные.

5. Оболочечные.
 6. Объемные.
- 7) Какие элементы входят в категорию PIPE?
1. Стержневые.
 2. Балочные.
 3. Трубные.
 4. Плоские и осесимметричные.
 5. Оболочечные.
 6. Объемные.
- 8) Какие элементы входят в категорию PLANE?
1. Стержневые.
 2. Балочные.
 3. Трубные.
 4. Плоские и осесимметричные.
 5. Оболочечные.
 6. Объемные.
- 9) Какие элементы входят в категорию SHELL?
1. Стержневые.
 2. Балочные.
 3. Трубные.
 4. Плоские и осесимметричные.
 5. Оболочечные.
 6. Объемные.
- 10) Какие элементы входят в категорию SOLID?
1. Стержневые.
 2. Балочные.
 3. Трубные.
 4. Плоские и осесимметричные.
 5. Оболочечные.
 6. Объемные.
- 11) Что означает число в имени типа элемента?
1. Порядковый номер элемента в библиотеке.
 2. Порядковый номер элемента в отдельной категории.
 3. Количество узлов в элементе.
 4. Количество степеней свободы в элементе.
 5. Количество перемещений в узле.
- 12) Что такое Real Constants?
1. Геометрические характеристики.
 2. Константы материала.
 3. Физические постоянные.
 4. Математические постоянные.

5. Любые постоянные свойства.

13) Какие свойства материала входят в минимальный набор, необходимый для выполнения простейшего МКЭ-расчета?

1. Модуль упругости.
2. Коэффициент Пуассона.
3. Плотность.
4. Коэффициент линейного расширения.
5. Коэффициент теплопроводности.
6. Предел текучести.
7. Предел прочности.

14) Для каких балочных элементов можно определять геометрические характеристики непосредственно путем задания поперечного сечения?

1. ВЕАМ3.
2. ВЕАМ4.
3. ВЕАМ23.
4. ВЕАМ24.
5. ВЕАМ44
6. ВЕАМ54.
7. ВЕАМ188.
8. ВЕАМ189.

15) Из каких основных шагов состоит процедура построения узлов и элементов?

1. Назначение объектам атрибутов элементов.
2. Установка параметров управления сеткой.
3. Генерация сетки элементов.
4. Построение контактных элементов.
5. Определение связанных степеней свободы и уравнений ограничений.

16) Для чего нужна ориентационная точка?

1. Для ориентации в пространстве поперечных сечений балки.
2. Для ориентации свойств материала.
3. Для ориентации узловых выходных величин.
4. Для ориентации выходных величин элемента.
5. Для определения направлений степеней свободы каждого узла.

17) Каким объектам можно назначать атрибуты элементов?

1. Точкам.
2. Линиям.
3. Поверхностям.
4. Объемам.
5. Узлам.
6. Рабочей плоскости.

- 18) Что позволяют задавать параметры управления сеткой?
1. Положение среднего узла для элементов второго порядка.
 2. Форму элементов.
 3. Размеры элементов.
 4. Тип сетки.
 5. Тип элементов.
 6. «Реальные» постоянные.
- 19) Какие типы сеток ANSYS позволяет строить на поверхностях?
1. Свободные.
 2. Регулярные.
 3. Упорядоченные.
 4. Линейные.
 5. Вытягиваемые из элементов более низкого порядка методом экструзии.
 6. Вытягиваемые из элементов более низкого порядка методом прогонки.
- 20) Какие типы сеток ANSYS позволяет строить в объемах?
1. Свободные.
 2. Регулярные.
 3. Упорядоченные.
 4. Линейные.
 5. Вытягиваемые из элементов более низкого порядка методом экструзии.
 6. Вытягиваемые из элементов более низкого порядка методом прогонки.
- 21) На каких геометрических объектах можно строить регулярные сетки?
1. На прямых линиях.
 2. На произвольных линиях.
 3. На трех- или четырехсторонних поверхностях.
 4. На произвольных поверхностях.
 5. В четырех-, пяти- или шестигранных объемах.
 6. В произвольных объемах.
- 22) На каких геометрических объектах необходимо строить свободные сетки?
1. На прямых линиях.
 2. На произвольных линиях.
 3. На трех- или четырехсторонних поверхностях.
 4. На произвольных поверхностях.
 5. В четырех-, пяти- или шестигранных объемах.
 6. В произвольных объемах.

23) Для чего используется операция конкатенации?

1. Для «фиктивного» объединения линий с целью построения регулярной сетки на поверхности.
2. Для «фиктивного» объединения поверхностей с целью построения регулярной сетки в объеме.
3. Для разбиения сложной поверхности на две или более простых поверхностей.
4. Для разбиения сложного объема на два или более простых объемов.

24) Чем отличается метод прогонки от метода экструзии?

1. Сетка строится в уже существующем объеме.
2. Сетка строится только в объемах.
3. Элементы имеют форму гексаэдра.
4. Элементы имеют призматическую форму.

1) Какие из перечисленных ниже слов используются в терминологии ANSYS для обозначения геометрических объектов?

1. Point.
2. Keypoint.
3. Line.
4. Curve.
5. Surface.
6. Area.
7. Volume.
8. Solid.

2) Из каких объектов в программе ANSYS составляется геометрическая модель?

1. Из точек, линий, поверхностей, объемов и примитивов.
2. Из точек, линий, плоскостей и тел.
3. Из узлов и элементов.
4. Из простейших геометрических фигур.

3) В каких из перечисленных ниже случаев требуются линии?

1. Для генерации одноосных элементов.
2. Для генерации балочных элементов.
3. Для построения по ним поверхностей.
4. Для построения по ним объемов.
5. Для построения по ним примитивов.

4) В каких из перечисленных ниже случаев требуются поверхности?

1. Для генерации плоских элементов.
2. Для генерации оболочечных элементов.
3. Для генерации объемных элементов.
4. Для построения по ним объемов.
5. Для построения по ним примитивов.

5) В каких из перечисленных ниже случаев требуются объемы?

1. Для генерации элементов трубы.
2. Для генерации оболочечных элементов.
3. Для генерации объемных элементов.
4. Для построения по ним поверхностей.
5. Для построения по ним примитивов.

6) Что такое «примитив»?

1. Геометрический объект в виде плоской поверхности или объема, создаваемый одной командой.
2. Геометрический объект низшего порядка.
3. Ключевая точка.
4. Линия, создаваемая одной командой.
5. Простая геометрическая фигура, создаваемая по точкам.

7) Какие из перечисленных ниже способов используются в программе ANSYS для построения геометрической модели?

1. «Восходящее» моделирование.
2. «Нисходящее» моделирование.
3. Импорт модели.
4. Экспорт модели.
5. Прямое генерирование.

8) Что такое «восходящее» моделирование?

1. Сначала строятся точки, а затем связанные с ними линии, поверхности и объемы.
2. «Сначала» строятся примитивы, а затем для создания окончательной модели используются булевы операции.
3. Прямое генерирование узлов и элементов без создания геометрической модели.
4. Построение модели при помощи импорта CAD-файлов.

9) Что такое «нисходящее» моделирование?

1. Сначала строятся точки, а затем связанные с ними линии, поверхности и объемы.
2. «Сначала» строятся примитивы, а затем для создания окончательной модели используются булевы операции.
3. Прямое генерирование узлов и элементов без создания геометрической модели.
4. Построение модели при помощи импорта CAD-файлов.

10) Какой стандарт файлов предназначен для обмена информацией между CAD- и CAE-системами?

1. IGES.
2. SAT.
3. PARA.
4. PRT.
5. MODEL.
6. DLV.

11) Что делает булева операция Common Intersect?

1. Определяет новую систему объектов, которая является общей для каждого исходного объекта.
2. Определяет новую систему объектов, которая является любым перекрытием исходных объектов.
3. Объединяет несколько объектов в один.
4. Удаляет из одного объекта область перекрытия с другим объектом.
5. Разрезает объект на два или более новых объектов.
6. Объединяет несколько объектов, создавая границы вокруг зон перекрытия.

7. Разделяет два или более пересекающихся объектов на множество частей, связанных друг с другом общими границами.
8. Переопределяет исходные объекты так, чтобы они имели на общих границах общие точки, линии и поверхности.

12) Что делает булева операция Pairwise Intersect?

1. Определяет новую систему объектов, которая является общей для каждого исходного объекта.
2. Определяет новую систему объектов, которая является любым перекрытием исходных объектов.
3. Объединяет несколько объектов в один.
4. Удаляет из одного объекта область перекрытия с другим объектом.
5. Разрезает объект на два или более новых объектов.
6. Объединяет несколько объектов, создавая границы вокруг зон перекрытия.
7. Разделяет два или более пересекающихся объектов на множество частей, связанных друг с другом общими границами.
8. Переопределяет исходные объекты так, чтобы они имели на общих границах общие точки, линии и поверхности.

13) Что делает булева операция Add?

1. Определяет новую систему объектов, которая является общей для каждого исходного объекта.
2. Определяет новую систему объектов, которая является любым перекрытием исходных объектов.
3. Объединяет несколько объектов в один.
4. Удаляет из одного объекта область перекрытия с другим объектом.
5. Разрезает объект на два или более новых объектов.
6. Объединяет несколько объектов, создавая границы вокруг зон перекрытия.
7. Разделяет два или более пересекающихся объектов на множество частей, связанных друг с другом общими границами.
8. Переопределяет исходные объекты так, чтобы они имели на общих границах общие точки, линии и поверхности.

14) Что делает булева операция Subtract?

1. Определяет новую систему объектов, которая является общей для каждого исходного объекта.
2. Определяет новую систему объектов, которая является любым перекрытием исходных объектов.
3. Объединяет несколько объектов в один.
4. Удаляет из одного объекта область перекрытия с другим объектом.
5. Разрезает объект на два или более новых объектов.

6. Объединяет несколько объектов, создавая границы вокруг зон перекрытия.
7. Разделяет два или более пересекающихся объектов на множество частей, связанных друг с другом общими границами.
8. Переопределяет исходные объекты так, чтобы они имели на общих границах общие точки, линии и поверхности.

15) Что делает булева операция Divide?

1. Определяет новую систему объектов, которая является общей для каждого исходного объекта.
2. Определяет новую систему объектов, которая является любым перекрытием исходных объектов.
3. Объединяет несколько объектов в один.
4. Удаляет из одного объекта область перекрытия с другим объектом.
5. Разрезает объект на два или более новых объектов.
6. Объединяет несколько объектов, создавая границы вокруг зон перекрытия.
7. Разделяет два или более пересекающихся объектов на множество частей, связанных друг с другом общими границами.
8. Переопределяет исходные объекты так, чтобы они имели на общих границах общие точки, линии и поверхности.

16) Что делает булева операция Overlap?

1. Определяет новую систему объектов, которая является общей для каждого исходного объекта.
2. Определяет новую систему объектов, которая является любым перекрытием исходных объектов.
3. Объединяет несколько объектов в один.
4. Удаляет из одного объекта область перекрытия с другим объектом.
5. Разрезает объект на два или более новых объектов.
6. Объединяет несколько объектов, создавая границы вокруг зон перекрытия.
7. Разделяет два или более пересекающихся объектов на множество частей, связанных друг с другом общими границами.
8. Переопределяет исходные объекты так, чтобы они имели на общих границах общие точки, линии и поверхности.

17) Что делает булева операция Partition?

1. Определяет новую систему объектов, которая является общей для каждого исходного объекта.
2. Определяет новую систему объектов, которая является любым перекрытием исходных объектов.
3. Объединяет несколько объектов в один.

4. Удаляет из одного объекта область перекрытия с другим объектом.
5. Разрезает объект на два или более новых объектов.
6. Объединяет несколько объектов, создавая границы вокруг зон перекрытия.
7. Разделяет два или более пересекающихся объектов на множество частей, связанных друг с другом общими границами.
8. Переопределяет исходные объекты так, чтобы они имели на общих границах общие точки, линии и поверхности.

18) Что делает булева операция Glue?

1. Определяет новую систему объектов, которая является общей для каждого исходного объекта.
2. Определяет новую систему объектов, которая является любым перекрытием исходных объектов.
3. Объединяет несколько объектов в один.
4. Удаляет из одного объекта область перекрытия с другим объектом.
5. Разрезает объект на два или более новых объектов.
6. Объединяет несколько объектов, создавая границы вокруг зон перекрытия.
7. Разделяет два или более пересекающихся объектов на множество частей, связанных друг с другом общими границами.
8. Переопределяет исходные объекты так, чтобы они имели на общих границах общие точки, линии и поверхности.

19) Что можно использовать в качестве «режущего инструмента» при выполнении операции Divide?

1. Точку.
2. Линию.
3. Поверхность.
4. Объем.
5. Рабочую плоскость.
6. Систему координат.

20) Какие системы координат используются в программе ANSYS?

1. Глобальная и локальная системы координат.
2. Системы координат изображения и результатов.
3. Узловая система координат.
4. Система координат элемента.
5. Система координат компонента.
6. Система координат сборки.

21) Для чего применяется глобальная система координат?

1. Для определения местоположения геометрических объектов.

2. Для определения местоположения конечно-элементных объектов.
 3. Для задания направлений степеней свободы.
 4. Для определения ориентации свойств материала.
 5. Для просмотра результатов.
- 22) Для чего применяется локальная система координат?
1. Для определения местоположения геометрических объектов.
 2. Для определения местоположения конечно-элементных объектов.
 3. Для задания направлений степеней свободы.
 4. Для определения ориентации свойств материала.
 5. Для просмотра результатов.
- 23) Для чего применяется узловая система координат?
1. Для задания направлений степеней свободы.
 2. Для определения ориентации узловых выходных величин.
 3. Для определения ориентации свойств материала.
 4. Для определения ориентации выходных величин элемента.
 5. Для определения местоположения узлов.
- 24) Для чего применяется система координат элемента?
1. Для задания направлений степеней свободы.
 2. Для определения ориентации узловых выходных величин.
 3. Для определения ориентации свойств материала.
 4. Для определения ориентации выходных величин элемента.
 5. Для определения местоположения элементов.
- 25) Для чего применяется рабочая плоскость?
1. Для однозначного выбора положения точки в рабочем окне.
 2. Для размещения и ориентации примитивов.
 3. Для выполнения булевых операций в качестве «режущего инструмента».
 4. Для определения местоположения геометрических объектов.
 5. Для определения местоположения конечно-элементных объектов.
- 26) Каково действие операции Extrude?
1. Выдавливание объектов вдоль заданного пути или вращением относительно определенной оси.
 2. Симметричное (зеркальное) отображение.
 3. Построение галтели (скругления) между двумя пересекающимися линиями или поверхностями.
 4. Перенос объектов в новую систему координат.
- 27) Каково действие операции Reflect?

1. Выдавливание объектов вдоль заданного пути или вращением относительно определенной оси.
2. Симметричное (зеркальное) отображение.
3. Построение галтели (скругления) между двумя пересекающимися линиями или поверхностями.
4. Перенос объектов в новую систему координат.

28) Каково действие операции Fillet?

1. Выдавливание объектов вдоль заданного пути или вращением относительно определенной оси.
2. Симметричное (зеркальное) отображение.
3. Построение галтели (скругления) между двумя пересекающимися линиями или поверхностями.
4. Перенос объектов в новую систему координат.

29) Каково действие операции Transfer Coord?

1. Выдавливание объектов вдоль заданного пути или вращением относительно определенной оси.
2. Симметричное (зеркальное) отображение.
3. Построение галтели (скругления) между двумя пересекающимися линиями или поверхностями.
4. Перенос объектов в новую систему координат.

30) Как определяется путь при выполнении операции выдавливания объектов вдоль заданного пути?

1. Линией или непрерывным набором линий.
2. Двумя точками.
3. Двумя узлами.
4. Любой осью глобальной системы координат.
5. Любой осью активной системы координат.

31) Как определяется ось при выполнении операции выдавливания объектов путем вращения относительно заданной оси?

1. Линией.
2. Двумя точками.
3. Двумя узлами.
4. Любой осью глобальной системы координат.
5. Любой осью активной системы координат.

32) Что такое «твердая» точка?

1. Точка, прикрепленная к линии или поверхности, в которой при генерации конечно-элементных сеток обязательно образуется узел.
2. Точка, используемая для идентификации объектов при их графическом выборе.
3. Точка, не меняющая свое положение в пространстве.

4. Точка, являющаяся вершиной тела.

- 1) Каково назначение диалоговой панели «Launcher»?
 1. Запуск программы ANSYS.
 2. Выход из программы ANSYS.
 3. Построение геометрической модели.
 4. Построение конечно-элементной модели.
 5. Задание нагрузки и граничных условий.
- 2) Что такое GUI?
 1. Графический интерфейс пользователя.
 2. Пакетный режим.
 3. Модуль решения.
 4. Модуль просмотра результатов расчета.
 5. Система помощи.
- 3) Какие из перечисленных ниже режимов допускает программа ANSYS?
 1. Пакетный.
 2. Интерактивный.
 3. Текстовый.
 4. Геометрический.
 5. Конечно-элементный.
- 4) Что такое пакетный режим?
 1. Работа ANSYS задается программой пользователя.
 2. Постоянное взаимодействие с ANSYS через графический интерфейс пользователя.
 3. Ручной ввод команд с помощью клавиатуры.
 4. Использование меню утилит.
- 5) Что такое интерактивный режим?
 1. Работа ANSYS задается программой пользователя.
 2. Постоянное взаимодействие с ANSYS через графический интерфейс пользователя.
 3. Ручной ввод команд с помощью клавиатуры.
 4. Использование меню утилит.
- 6) Какая часть GUI наиболее часто используется пользователем?
 1. Главное меню.
 2. Меню утилит.
 3. Пиктографическое меню.
 4. Панель инструментов.
 5. Строка ввода команд.
- 7) Какова конечная задача препроцессора программы ANSYS?
 1. Построение конечно-элементной модели.
 2. Построение геометрической модели.
 3. Построение твердотельной модели.

4. Задание нагрузок и граничных условий.
- 8) Для чего используется блок решения программы ANSYS?
 1. Для построения расчетной модели.
 2. Для генерации конечно-элементных сеток.
 3. Для задания нагрузок и граничных условий.
 4. Для определения типа анализа.
 5. Для запуска задачи на счет.
- 9) Каково назначение общего постпроцессора программы ANSYS?
 1. Просмотр результатов на всей модели в указанный момент времени.
 2. Просмотр изменения результатов во времени в определенных точках модели.
 3. Просмотр результатов в определенных точках модели в указанный момент времени.
 4. Просмотр изменения результатов во времени на всей модели.
- 10) Каково назначение постпроцессора истории нагружения программы ANSYS?
 1. Просмотр результатов на всей модели в указанный момент времени.
 2. Просмотр изменения результатов во времени в определенных точках модели.
 3. Просмотр результатов в определенных точках модели в указанный момент времени.
 4. Просмотр изменения результатов во времени на всей модели.
- 11) Какой модуль используется для задания свойств материалов?
 1. Препроцессор.
 2. Блок решения.
 3. Общий постпроцессор.
 4. Постпроцессор истории нагружения.
- 12) Какой модуль используется для генерации конечно-элементных сеток?
 1. Препроцессор.
 2. Блок решения.
 3. Общий постпроцессор.
 4. Постпроцессор истории нагружения.
- 13) Какие команды содержит меню утилит?
 1. Сервисные команды, доступные в любой момент времени в течение сеанса работы.
 2. Модульные команды, доступные только в среде препроцессора.
 3. Модульные команды, доступные лишь в среде блока решения.
 4. Сервисные команды, не доступные на уровне модуля.

14) В каком подменю содержатся команды для управления изображением модели в рабочем окне?

1. «File».
2. «Select».
3. «List».
4. «Plot».
5. «PlotCtrls».
6. «WorkPlane».
7. «MenuCtrls».

15) В каком подменю содержатся команды для работы с системами координат?

1. «File».
2. «Select».
3. «List».
4. «Plot».
5. «PlotCtrls».
6. «WorkPlane».
7. «MenuCtrls».

16) Какой элемент GUI используется для перевода скрытых окон на первый план?

1. Пиктографическое меню.
2. Панель инструментов.
3. Панель управления видом.
4. Меню утилит.
5. Главное меню.

17) Какая кнопка панели инструментов используется в начале сеанса при повторной работе с задачей для чтения введенных ранее данных?

1. SAVE_DB.
2. RESUM_DB.
3. POWRGRPH.
4. READ_DB.
5. OPEN_DB.

18) Каково назначение панели указания?

1. Выбор объектов, используемых в качестве аргументов команд.
2. Указание используемых типов элементов.
3. Выбор объектов по определенному пользователем критерию и помещение их в активный набор.
4. Указание используемых материалов.
5. Указание наборов геометрических свойств.

19) Что такое «горячая» точка?

1. Точка, используемая для идентификации объектов при их графическом выборе.
2. Точка, где обязательно образуется узел при генерации конечно-элементных сеток.
3. Точка, в которой задаются граничные условия.
4. Точка, в которой прикладывается сосредоточенная сила.
5. Точка, в которой вычисляются результаты расчета.

20) Какие из перечисленных ниже файлов используются для воссоздания модели при утрате ее базы данных?

1. Jobname.dbb.
2. Jobname.rst.
3. Jobname.err.
4. Jobname.log.
5. Jobname.lgw.

21) Какие из перечисленных ниже файлов используются при написании программ-макросов?

1. Jobname.dbb.
2. Jobname.rst.
3. Jobname.err.
4. Jobname.log.
5. Jobname.lgw.

1) Какие этапы МКЭ-расчета плохо поддаются автоматизации и требуют больших затрат ручного труда?

1. Подготовка и ввод исходных данных.
2. Вычисление матриц жесткости конечных элементов.
3. Формирование матрицы жесткости конструкции.
4. Решение системы уравнений равновесия и определение узловых перемещений.
5. Вычисление напряжений в конечных элементах.
6. Обработка и анализ результатов расчета.

2) К какому классу программных продуктов относятся МКЭ-пакеты?

1. К системам инженерного анализа.
2. К системам автоматизированного проектирования.
3. К системам автоматизированного производства.
4. К CAE-системам.
5. К CAD-системам.
6. К CAM-системам.

3) Что такое CAE-система?

1. Система инженерного анализа.
2. Система автоматизированного проектирования.
3. Система автоматизированного производства.
4. Автоматизированная система управления производством.

4) Что такое CAD-система?

1. Система инженерного анализа.
2. Система автоматизированного проектирования.
3. Система автоматизированного производства.
4. Автоматизированная система управления производством.

5) Каково назначение препроцессора?

1. Ввод исходных данных в интерактивном режиме.
2. Формирование разрешающей системы уравнений МКЭ.
3. Решение системы уравнений равновесия МКЭ и определение узловых перемещений.
4. Вычисление напряжений в элементах по найденным узловым перемещениям.
5. Представление результатов расчета в удобной для практического использования форме.

6) Каково назначение постпроцессора?

1. Ввод исходных данных в интерактивном режиме.
2. Формирование разрешающей системы уравнений МКЭ.
3. Решение системы уравнений равновесия МКЭ и определение узловых перемещений.

4. Вычисление напряжений в элементах по найденным узловым перемещениям.
 5. Представление результатов расчета в удобной для практического использования форме.
- 7) Что является базовой отраслью МКЭ-пакета NASTRAN?
1. Аэрокосмическая промышленность.
 2. Атомная энергетика.
 3. Ядерная промышленность.
 4. Машиностроение.
 5. Автомобилестроение.
 6. Радиоэлектроника.
- 8) Что является базовой отраслью МКЭ-пакета ANSYS?
1. Аэрокосмическая промышленность.
 2. Атомная энергетика.
 3. Ядерная промышленность.
 4. Машиностроение.
 5. Автомобилестроение.
 6. Радиоэлектроника.
- 9) Что является базовой отраслью МКЭ-пакета ABAQUS?
1. Аэрокосмическая промышленность.
 2. Атомная энергетика.
 3. Ядерная промышленность.
 4. Машиностроение.
 5. Автомобилестроение.
 6. Радиоэлектроника.
- 10) Какие из перечисленных ниже программ реализуют МКЭ?
1. MSC.Patran.
 2. MSC.Nastran.
 3. ANSYS.
 4. ABAQUS.
 5. MSC.Marc.
 6. MSC.Fatigue.
 7. MSC.Adams.
- 11) Какие из перечисленных ниже программ являются универсальными тяжелыми МКЭ-пакетами?
1. MSC.Nastran.
 2. ANSYS.
 3. MSC.Marc.
 4. MSC.Dytran.
 5. MSC.Super Form.
 6. LS-DYNA.

12) Какие из перечисленных ниже программ предназначены для анализа высоконелинейных и быстропротекающих процессов ударного характера?

1. MSC.Nastran.
2. ANSYS.
3. ABAQUS/Explicit.
4. LS-DYNA.
5. MSC.Marc.
6. MSC.Dytran.

13) Какие из перечисленных ниже программ специально предназначены для моделирования процессов обработки металлов давлением?

1. MSC.Super Forge.
2. MSC.Super Form.
3. ANSYS.
4. ABAQUS/Standard.
5. MSC.Fatigue.
6. MSC.Adams.

14) Какие из перечисленных ниже программ наиболее эффективны для решения сложных контактных задач?

1. MSC.Nastran.
2. ANSYS.
3. ABAQUS.
4. LS-DYNA.
5. MSC.Marc.
6. MSC.Dytran.

15) Какие из перечисленных ниже программ выполняют функции пре- и постпроцессора для систем инженерного анализа?

1. MSC.Patran.
2. MSC.Nastran.
3. MSC.Marc.
4. MSC.Dytran.
5. MSC.Actran.
6. Femap.

16) Какие из перечисленных ниже программ имеют встроенный пре- и постпроцессор?

1. MSC.Nastran.
2. ANSYS.
3. ABAQUS.
4. MSC.visual Nastran for Windows.

17) Какие из перечисленных ниже программ позволяют решать линейные и нелинейные статические и динамические задачи анализа прочности конструкций?

1. MSC.Nastran.
2. ANSYS/Mechanical.
3. ANSYS/Thermal.
4. ABAQUS/Standard.
5. MSC.Adams.

18) Чем пакет ANSYS выгодно отличается от программы MSC.Nastran?

1. Наличием встроенного пре- и постпроцессора.
2. Возможностью решения связанных многодисциплинарных задач.
3. Возможностью решения сложных контактных задач.
4. Возможностью решения геометрически и физически нелинейных задач.
5. Возможностью анализа переходных динамических процессов.

19) Что такое VPD-технологии?

1. Компьютерные технологии виртуальной разработки изделий.
2. Компьютерные технологии автоматизированного производства.
3. Компьютерные технологии оптимизации конструкций.
4. Компьютерные технологии управления производством.
5. Компьютерные технологии математического моделирования.

20) Каково назначение VPD-технологий?

1. Создание высокоточных компьютерных моделей изделий.
2. Обеспечение высокоточного процесса изготовления изделий.
3. Эффективное управление производством.
4. Научная организация труда.
5. Управление качеством.

1) МКЭ является аналитическим или численным, точным или приближенным методом?

1. Численным приближенным.
2. Численным точным.
3. Аналитическим приближенным.
4. Аналитическим точным.

2) Откуда происходит название «конечный элемент»?

1. Элемент имеет конечные размеры.
2. Элемент содержит конечное число степеней свободы.
3. В элементе имеется конечное число узлов.
4. Модель состоит из конечного числа элементов.

3) Какие величины в МКЭ выбираются в качестве основных неизвестных?

1. Перемещения узлов.
2. Деформации элементов.
3. Напряжения в узлах.
4. Узловые силы.

4) Как определяются перемещения внутри конечного элемента по известным перемещениям принадлежащих ему узлов?

1. Приближенно путем выбора аппроксимирующих функций.
2. С использованием кинематических гипотез.
3. С помощью вариационных принципов.
4. На основе методов строительной механики и теории упругости.

5) Какой этап в МКЭ является одним из наиболее важных и ответственных?

1. Выбор аппроксимирующих функций.
2. Определение узловых перемещений.
3. Вычисление напряжений.
4. Построение матрицы жесткости элемента.
5. Формирование матрицы жесткости конструкции.

6) Как называется матрица $[\alpha]$?

1. Матрица аппроксимирующих функций.
2. Матрица экстраполирующих функций.
3. Матрица весовых коэффициентов.
4. Матрица дифференциальных операторов.

7) Какие величины связывает матрица $[\alpha]$?

1. Перемещения произвольной точки элемента с его узловыми перемещениями.
2. Деформации с перемещениями узлов элемента.
3. Напряжения с деформациями.

4. Узловые силы с узловыми перемещениями.
- 8) Какие величины связывает матрица $[\beta]$?
1. Перемещения произвольной точки элемента с его узловыми перемещениями.
 2. Деформации с перемещениями узлов элемента.
 3. Напряжения с деформациями.
 4. Узловые силы с узловыми перемещениями.
- 9) Какие соотношения используются при вычислении матрицы $[\beta]$?
1. Геометрические соотношения Коши.
 2. Дифференциальные уравнения равновесия.
 3. Физические соотношения (закон Гука).
 4. Статические граничные условия.
 5. Кинематические граничные условия
- 10) Что следует понимать под конечным элементом?
1. Малую область тела в совокупности с заданными в ней аппроксимирующими функциями.
 2. Малую область тела, имеющую треугольную или четырехугольную форму.
 3. Малую область тела, имеющую форму гексаэдра или тетраэдра.
 4. Бесконечно малую область тела.
- 11) Чем при объединении конечных элементов в единую систему заменяются распределенные силы, возникающие на границах элементов?
1. Эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми силами.
 2. Эквивалентными им в статическом смысле узловыми силами.
 3. Эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми перемещениями.
 4. Эквивалентными им в статическом смысле узловыми перемещениями.
- 12) Чем в МКЭ заменяются внешние поверхностные нагрузки?
1. Эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми силами.
 2. Эквивалентными им в статическом смысле узловыми силами.
 3. Эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми перемещениями.
 4. Эквивалентными им в статическом смысле узловыми перемещениями.
- 13) Чем в МКЭ заменяются внешние объемные нагрузки?
1. Эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми силами.
 2. Эквивалентными им в статическом смысле узловыми силами.
 3. Эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми перемещениями.

4. Эквивалентными им в статическом смысле узловыми перемещениями.

14) Какой вариационный принцип используется при выводе выражения для матрицы жесткости конечного элемента?

1. Принцип возможных перемещений.
2. Принцип стационарности кинетической энергии.
3. Принцип стационарности дополнительной работы.
4. Принцип возможных сил.

15) Какие величины связывает матрица жесткости?

1. Узловые силы с узловыми перемещениями.
2. Напряжения с узловыми перемещениями.
3. Напряжения с узловыми силами.
4. Поверхностные и объемные нагрузки с узловыми силами.

16) Какие физические условия используются при выводе правила формирования матрицы жесткости конструкции из матриц жесткости отдельных элементов?

1. Уравнения равновесия узлов.
2. Уравнения равновесия элементов.
3. Уравнения равновесия тела.
4. Дифференциальные уравнения равновесия.

17) Как выполняется суммирование при формировании подматрицы $[K_{ij}] = \sum_e [K_{ij}^e]$?

1. По элементам, которые одновременно содержат узлы i и j .
2. По элементам, которые содержат узел i или j .
3. По элементам, которые не содержат узлы i и j .
4. По всем конечным элементам.

18) Как в МКЭ производится расчет свободных (незакрепленных) плоских систем?

1. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее одну связь.
2. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее две связи.
3. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее три связи.
4. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее четыре связи.

19) Как в МКЭ производится расчет свободных (незакрепленных) пространственных систем?

1. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее одну связь.
2. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее три связи.
3. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее шесть связей.
4. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее девять связей.

20) Как называется матрица $[K_{\alpha\alpha}]$?

1. Сокращенная матрица жесткости конструкции.
2. Полная матрица жесткости конструкции.
3. Обобщенная матрица жесткости конструкции.
4. Приведенная матрица жесткости конструкции.

21) Как работает одноосный стержневой элемент?

1. На растяжение-сжатие или кручение.
2. На растяжение-сжатие, изгиб в двух плоскостях и кручение.
3. На изгиб в двух плоскостях.
4. На растяжение-сжатие и кручение.

22) Как работает балочный элемент?

1. На растяжение-сжатие или кручение.
2. На растяжение-сжатие, изгиб в двух плоскостях и кручение.
3. На изгиб в двух плоскостях.
4. На растяжение-сжатие и кручение.

23) Для моделирования каких конструкций (или конструктивных элементов) используются одноосные стержневые элементы?

1. Ферменных конструкций, стрингеров, поясов лонжеронов.
2. Балок, рам, лонжеронов, шпангоутов.
3. Плоских и осесимметричных тел.
4. Тонких пластин, тонкостенных оболочек.
5. Массивных тел.

24) Для моделирования каких конструкций (или конструктивных элементов) используются балочные элементы?

1. Ферменных конструкций, стрингеров, поясов лонжеронов.
2. Балок, рам, лонжеронов, шпангоутов.
3. Плоских и осесимметричных тел.
4. Тонких пластин, тонкостенных оболочек.
5. Массивных тел.

25) Для моделирования каких конструкций (или конструктивных элементов) используются двухмерные поверхностные элементы?

1. Ферменных конструкций, стрингеров, поясов лонжеронов.

2. Балок, рам, лонжеронов, шпангоутов.
3. Плоских и осесимметричных тел.
4. Тонких пластин, тонкостенных оболочек.
5. Массивных тел.

26) Для моделирования каких конструкций (или конструктивных элементов) используются трехмерные поверхностные элементы?

1. Ферменных конструкций, стрингеров, поясов лонжеронов.
2. Балок, рам, лонжеронов, шпангоутов.
3. Плоских и осесимметричных тел.
4. Тонких пластин, тонкостенных оболочек.
5. Массивных тел.

27) Для моделирования каких конструкций (или конструктивных элементов) используются объемные элементы?

1. Ферменных конструкций, стрингеров, поясов лонжеронов.
2. Балок, рам, лонжеронов, шпангоутов.
3. Плоских и осесимметричных тел.
4. Тонких пластин, тонкостенных оболочек.
5. Массивных тел.

28) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного стержневого элемента первого порядка?

1. 2x2.
2. 3x3.
3. 4x4.
4. 5x5.
5. 6x6.

29) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного стержневого элемента второго порядка?

1. 4x4.
2. 6x6.
3. 8x8.
4. 10x10.
5. 12x12.

30) Какой размер имеет матрица жесткости трехмерного стержневого элемента первого порядка?

1. 4x4.
2. 6x6.
3. 8x8.
4. 10x10.
5. 12x12.

31) Какой размер имеет матрица жесткости трехмерного стержневого элемента второго порядка?

1. 6x6.
2. 8x8.
3. 9x9.
4. 10x10.
5. 12x12.

32) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного балочного элемента первого порядка?

1. 4x4.
2. 6x6.
3. 8x8.
4. 10x10.
5. 12x12.

33) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного балочного элемента второго порядка?

1. 6x6.
2. 8x8.
3. 9x9.
4. 10x10.
5. 12x12.

34) Какой размер имеет матрица жесткости трехмерного балочного элемента первого порядка?

1. 8x8.
2. 10x10.
3. 12x12.
4. 14x14.
5. 16x16.

35) Какой размер имеет матрица жесткости трехмерного балочного элемента второго порядка?

1. 12x12.
2. 14x14.
3. 16x16.
4. 18x18.
5. 20x20.

36) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного поверхностного треугольного элемента первого порядка?

1. 6x6.
2. 7x7.
3. 8x8.

4. 9x9.
5. 10x10.

37) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного поверхностного треугольного элемента второго порядка?

1. 10x10.
2. 12x12.
3. 14x14.
4. 16x16.
5. 18x18.

38) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного поверхностного четырехугольного элемента первого порядка?

1. 6x6.
2. 7x7.
3. 8x8.
4. 9x9.
5. 10x10.

39) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного поверхностного четырехугольного элемента второго порядка?

1. 10x10.
2. 12x12.
3. 14x14.
4. 16x16.
5. 18x18.

40) Какой размер имеет матрица жесткости треугольного оболочечного элемента первого порядка?

1. 12x12.
2. 15x15.
3. 18x18.
4. 20x20.
5. 24x24.

41) Какой размер имеет матрица жесткости треугольного оболочечного элемента второго порядка?

1. 24x24.
2. 36x36.
3. 40x40.
4. 48x48.
5. 52x52.

42) Какой размер имеет матрица жесткости четырехугольного оболочечного элемента первого порядка?

1. 14x14.

2. 18x18.
3. 24x24.
4. 28x28.
5. 32x32.

43) Какой размер имеет матрица жесткости четырехугольного оболочечного элемента второго порядка?

1. 30x30.
2. 36x36.
3. 42x42.
4. 48x48.
5. 54x54.

44) Какой размер имеет матрица жесткости четырехгранного объемного элемента первого порядка?

1. 12x12.
2. 18x18.
3. 24x24.
4. 28x28.
5. 32x32.

45) Какой размер имеет матрица жесткости четырехгранного объемного элемента второго порядка?

1. 28x28.
2. 30x30.
3. 42x42.
4. 48x48.
5. 54x54.

46) Какой размер имеет матрица жесткости шестигранного объемного элемента первого порядка?

1. 12x12.
2. 18x18.
3. 24x24.
4. 28x28.
5. 32x32.

47) Какой размер имеет матрица жесткости шестигранного объемного элемента второго порядка?

1. 28x28.
2. 30x30.
3. 42x42.
4. 54x54.
5. 60x60.

48) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости плоской фермы, содержащей 10 узлов, если число наложенных связей равно 4?

1. 10x10.
2. 16x16.
3. 20x20.
4. 26x26.
5. 34x34.

49) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости пространственной фермы, содержащей 20 узлов, если число наложенных связей равно 10?

1. 20x20.
2. 30x30.
3. 42x42.
4. 50x50.
5. 64x64.

50) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости плоской рамы, содержащей 6 узлов, если число наложенных связей равно 3?

1. 15x15.
2. 18x18.
3. 21x21.
4. 26x26.
5. 34x34.

51) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости пространственной рамы, содержащей 12 узлов, если число наложенных связей равно 6?

1. 42x42.
2. 48x48.
3. 54x54.
4. 66x66.
5. 72x72.

52) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости оболочечной модели, содержащей 30 узлов, если число наложенных связей равно 10?

1. 80x80.
2. 125x125.
3. 144x144.
4. 150x150.
5. 170x170.

53) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости плоского тела, содержащего 40 узлов, если число наложенных связей равно 15?

1. 25x25.
2. 65x65.
3. 85x85.
4. 100x100.
5. 115x115.

54) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости трехмерного тела, содержащего 60 узлов, если число наложенных связей равно 20?

1. 60x60.
2. 90x90.
3. 130x130.
4. 160x160.
5. 180x180.

- определение типа элементов и набора реальных постоянных при помощи прямого ввода команд;
- использование других аналогичных типов элементов (например, вместо PLANE42 можно выбрать PLANE182).

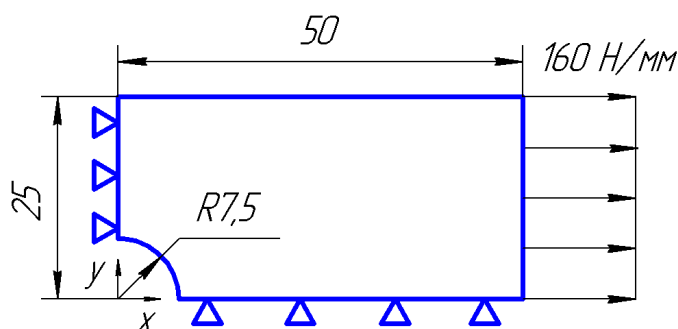


Рисунок 2 – Расчетная схема задачи

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab1.
2. Установить тип используемых в расчете элементов – 4-узловой плоский элемент PLANE42 (или PLANE182 для версии Release 13 и более поздних) с формулировкой «обобщенное плоское напряженное состояние с указанием толщины».

Выбираем следующий пункт главного меню (*Main Menu*, далее используется сокращение *M_M*): *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*.

При этом появляется панель «Element Types», содержащая список (первоначально пустой) определенных пользователем типов элементов. Здесь необходимо нажать кнопку *Add* (добавить), что приведет к появлению второй панели «Library of Element Types», обеспечивающей доступ к библиотеке типов элементов программы ANSYS (рисунок 3).

Выбираем в левом списке категорию «Structural Solid» (несмотря на то, что нам нужен плоский элемент), а в правом – тип элементов «Quad 4node 42».

Зафиксировать выбор поможет кнопка *OK*. Данному типу элементов автоматически присваивается ссылочный номер (reference number), равный 1.

Для изменения формулировки элемента следует воспользоваться кнопкой *Options* (рисунок 4). При этом появляется дополнительная панель для задания опций элемента PLANE42. Здесь для третьей опции *K3* «Element

behavior» выбираем значение «Plane strs w/thk», устанавливающее формулировку «обобщенное плоское напряженное состояние с указанием толщины», после чего нажимаем *OK*.

Для закрытия окна «Element Types» следует нажать кнопку *Close*.

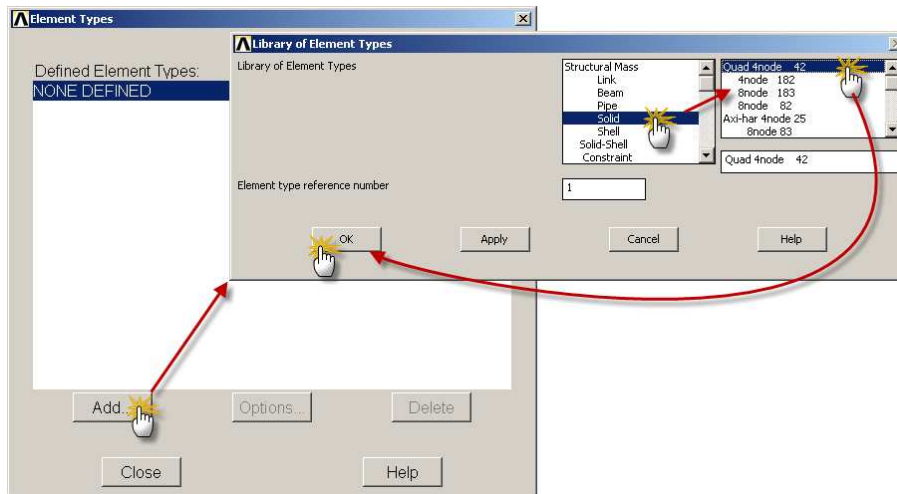


Рисунок 3 – Выбор типа конечных элементов

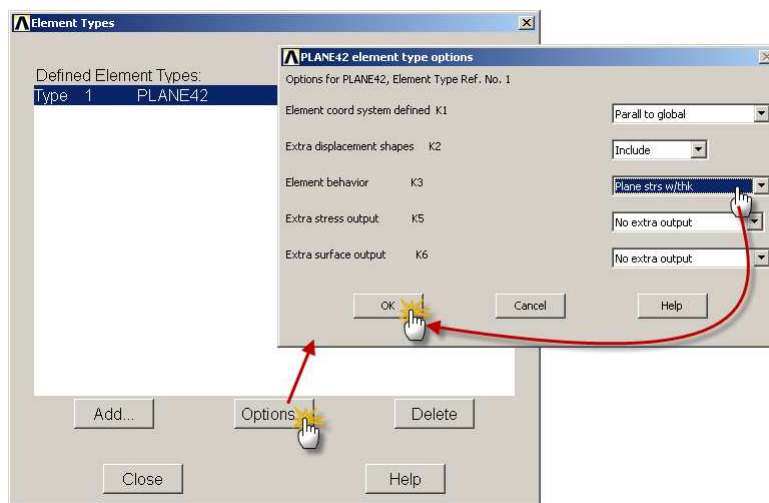


Рисунок 4 – Изменение формулировки элемента

3. Определить реальные постоянные (геометрические характеристики) для выбранного типа элементов: *M_M > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete*.

В появившемся окне «Real Constants» для определения нового набора геометрических характеристик нажимаем кнопку *Add* (добавить) и указываем единственный доступный тип элементов «Type 1 PLANE42». Выбор фиксируем нажатием кнопки *OK*.

В открывшейся диалоговой панели в поле «Thickness» вводим число 2 (толщина пластины в мм). Завершаем создание набора реальных постоянных нажатием кнопки *OK*.

Для закрытия окна «Real Constants» здесь также следует воспользоваться кнопкой *Close*.

Кратко вся процедура определения набора геометрических характеристик для элементов рассматриваемой пластины представлена на рисунке 5.

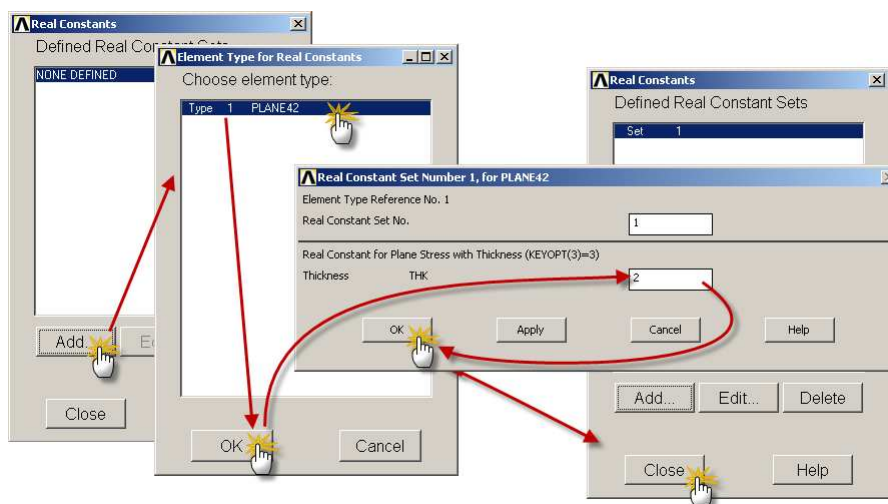


Рисунок 5 – Создание набора реальных постоянных

4. Задать свойства материала.

Это удобно делать с помощью универсальной панели «Define Material Model Behavior» (определение модели поведения материала), вызываемой командой *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

В левом окне данной панели содержится нумерованный список определенных пользователем моделей материалов, а в правом – группированный набор доступных моделей и свойств материалов.

Для рассматриваемой задачи необходима одна самая простая модель линейно-упругого изотропного материала с постоянными свойствами, включающими модуль упругости и коэффициент Пуассона.

В правом окне «Materials Models Available» двойным щелчком мыши входим в категорию «Structural» (механика деформируемого твердого тела), а далее открываем подкатегории «Linear» (линейный), «Elastic» (упругий) и «Isotropic» (изотропный).

В появившейся диалоговой панели в поле «EX» вводим значение 212000, или можно 2.12e5 (модуль упругости в МПа), а в поле «PRXY» – число 0.3

(коэффициент Пуассона). Следует отметить, что в качестве разделителя целой и дробной частей здесь необходимо использовать точку, а не запятую. Подтверждаем ввод кнопкой *OK*.

Для закрытия панели «Define Material Model Behavior» можно воспользоваться либо ее меню (*Material>Exit*), либо нажать крестик в ее правом верхнем углу.

Последовательность действий для ввода свойств материала показана на рисунке 6.

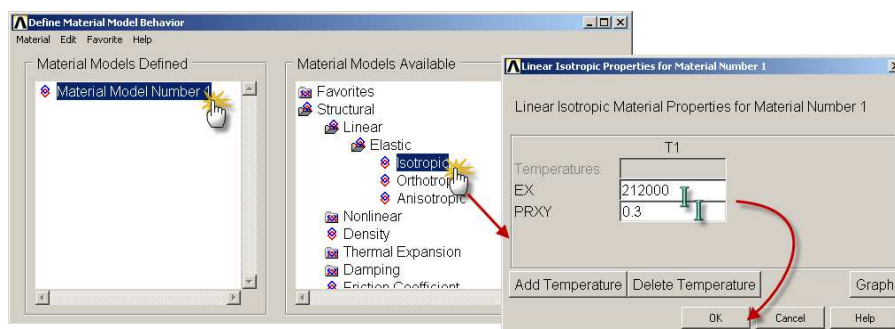


Рисунок 6 – Задание свойств материала

5. Построить геометрическую модель четверти пластины.

Следует отметить, что все команды генерации геометрических объектов сосредоточены в разделе «Modeling» препроцессора.

Как видно из расчетной схемы (см. рисунок 2), геометрическая модель рассматриваемой части пластины может быть получена путем вычитания из прямоугольника 50x25 мм круга радиусом 7,5 мм, центр которого совпадает с левым нижним углом прямоугольника.

Здесь удобно воспользоваться так называемым «нисходящим» моделированием, при котором процесс создания модели начинается с определения примитивов.

5.1. Построить примитив в виде прямоугольника: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners*.

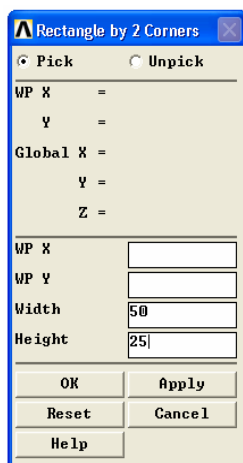
Следует отметить, что в программе ANSYS построение геометрических примитивов всегда осуществляется относительно рабочей плоскости, которая по умолчанию совпадает с плоскостью *XU* глобальной декартовой системы координат.

Прямоугольник здесь определяется координатами левого нижнего угла (*WP X* и *WP Y*) в системе координат рабочей плоскости, а также

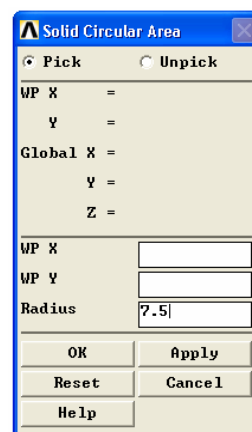
шириной (Width) и высотой (Height). В нашем случае левый нижний угол прямоугольника имеет нулевые координаты, поскольку располагается в начале системы координат, ширина равна 50 мм, а высота составляет 25 мм. Введите значения в мм, как показано на рисунке 7, а (нули можно не вводить). После нажатия кнопки *OK* в рабочей области программы формируется изображение прямоугольника.

5.2. Построить примитив в виде полного круга: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Solid Circle*.

Центр круга располагается в начале координат, поэтому параметры «WP X» и «WP Y» можно не задавать, а в поле «Radius» вводим 7.5, как показано на рисунке 7, б.



а)



б)

Рисунок 7 – Построение примитивов в виде прямоугольника и круга

5.3. Для удобства графического указания включить отображение ссылочных номеров геометрических объектов.

Выбираем следующий пункт меню утилит (*Utility Menu*, далее используется сокращение *U_M*): *U_M>PlotCtrls>Numbering*.

В появившейся диалоговой панели отмечаем флаги «Keypoint numbers», «Line numbers» и «Area numbers» для включения номеров точек, линий и поверхностей.

В результате выполнения этих действий в рабочем окне должно получиться изображение, аналогичное рисунку 8.

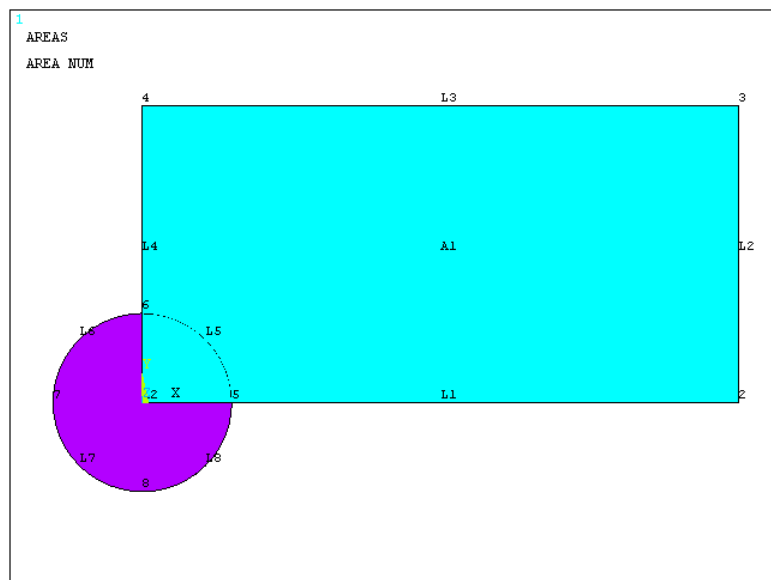


Рисунок 8 – Прямоугольник и круг

5.4. Для создания отверстия выполнить булеву операцию вычитания круга из прямоугольника: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Boolean>Subtract>Areas*.

На первый запрос указываем с помощью мыши поверхность A1 (прямоугольник) и (**обязательно!!!**) подтверждаем выбор нажатием кнопки *OK*. На второй запрос указываем с помощью мыши поверхность A2 (круг) и также подтверждаем выбор. В результате геометрическая модель будет представлена поверхностью A3 сложной формы, полностью соответствующей расчетной схеме (см. рисунок 2).

6. Нанести на геометрическую модель сетку конечных элементов.

Для достижения этой цели удобно воспользоваться универсальной диалоговой панелью, вызываемой командой *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

Так как в базе данных модели содержится только один тип конечных элементов, единственный набор реальных постоянных и лишь одна модель материала, то явное указание атрибутов элементов здесь не требуется.

В разделе «Size Controls» панели «MeshTool» с помощью кнопки *Set* строки «Global» определим глобальный размер элементов (который будет использоваться при отсутствии каких-либо других явных установок на геометрических объектах). В появившемся окне в поле «Element edge length» (длина стороны элемента) вводим значение 3 (в мм). Нажимаем *OK*.

Для сгущения сетки в области концентрации напряжений с помощью кнопки *Set* строки «Lines» дополнительно установим меньший размер эле-

ментов на контуре отверстия. При этом указываем линию L5, нажимаем *OK* и в поле «Element edge length» вводим значение 1 (в мм), *OK*. Кроме того, с помощью кнопки *Set* строки «Keypoints» зададим самый маленький размер в верхней точке контура отверстия, где ожидаются наибольшие напряжения. Здесь указываем точку 6 и в единственном поле вводим число 0.5 (в мм), *OK*.

Далее в списке «Mesh» панели «MeshTool» в качестве объектов для разбиения выбираем Areas (поверхности), в поле «Shape» (форма элементов) указываем Quad (четырёхугольная). И, наконец, выбираем режим построения свободной сетки Free (т.к. наша поверхность имеет более четырёх кромок). После нажатия кнопки *Mesh* указываем единственную поверхность A3, *OK*.

Если в сетке присутствуют элементы PLANE42 треугольной формы, то появится информационное сообщение о наличии таких элементов. Дело в том, что четырёхугольные элементы первого порядка, вырожденные в треугольные, могут обладать излишней жесткостью. В такой ситуации рекомендуется использовать элементы второго порядка (например, PLANE82). В нашем случае можно проигнорировать это сообщение нажатием кнопки *Close*.

Построенная таким образом свободная сетка конечных элементов показана на рисунке 9.

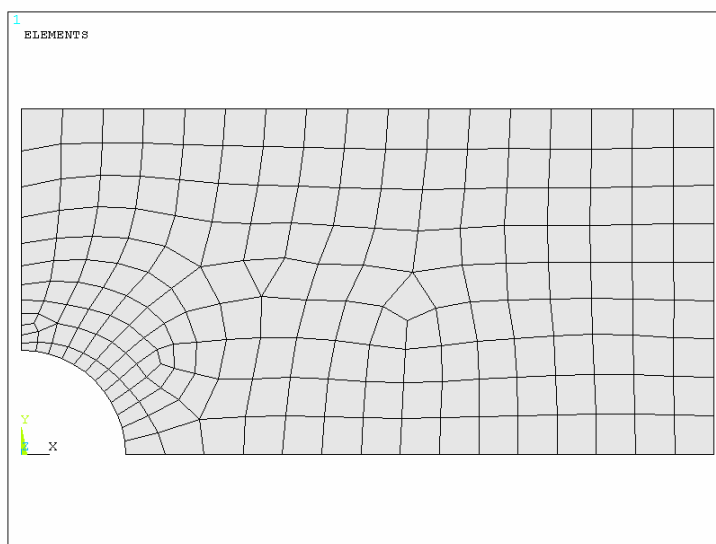


Рисунок 9 – Свободная сетка элементов

7. Задать граничные условия.

Как видно из рисунка 2, граничные условия для рассматриваемой задачи представляют собой условия симметрии на линиях отсечения моделируемой части пластины. Для плоской задачи условия симметрии на линии задаются в виде запрета поступательных перемещений в направлении, перпендикулярном этой линии.

Граничные условия будем прикладывать к геометрическим объектам (в нашем случае к линиям). Для удобства графического указания отобразим в рабочем окне только линии: *U_M>Plot>Lines*. Вид получаемого при этом изображения представлен на рисунке 10.

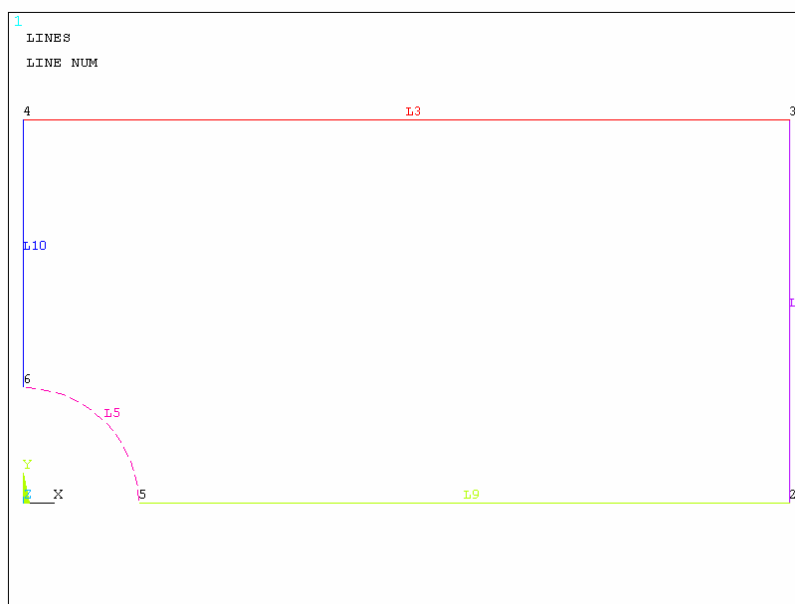


Рисунок 10 – Линии с нумерацией

В нашем случае следует для линии L9 запретить перемещения в направлении оси Y, а для линии L10 – в направлении оси X.

Вызываем команду для задания перемещений на линиях: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

Указываем сначала линию L9 и фиксируем выбор кнопкой *OK*. В открывшемся окне в списке «DOFs to be constrained» (степени свободы, которые должны быть ограничены) выбираем UY и нажимаем *OK*. Нулевое значение перемещения в поле «Displacement value» можно не вводить.

Аналогичные операции выполняем для линии L10, указывая в списке «DOFs to be constrained» значение UX. Результат наложения запретов на поступательные перемещения показан на рисунке 11.

8. Приложить нагрузку.

В рассматриваемой задаче нагружение пластины осуществляется погонными силами интенсивностью 160 Н/мм, распределенными по коротким сторонам (см. рисунок 1).

В пакете ANSYS распределенную нагрузку для плоской задачи следует задавать в виде давления, приложенного к соответствующей линии. При этом величина давления определяется отношением интенсивности погонной нагрузки к толщине пластины:

$$p = \frac{160}{2} = 80 \text{ МПа.}$$

Для задания давления на линии воспользуемся следующей командой: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Lines.*

На запрос указываем линию L2 и нажимаем *OK*. В поле «Load PRES value» вводим значение -80 (положительное давление направлено к поверхности и вызывает сжатие, а в нашем случае необходимо приложить растягивающую нагрузку, поэтому мы вводим отрицательное число). Завершаем задание нагрузки кнопкой *OK*.

Отметим, что давление, распределенное вдоль линии, условно изображается лишь одной стрелкой, приложенной в середине линии (рисунок 11).

На этом завершается процесс создания расчетной модели.

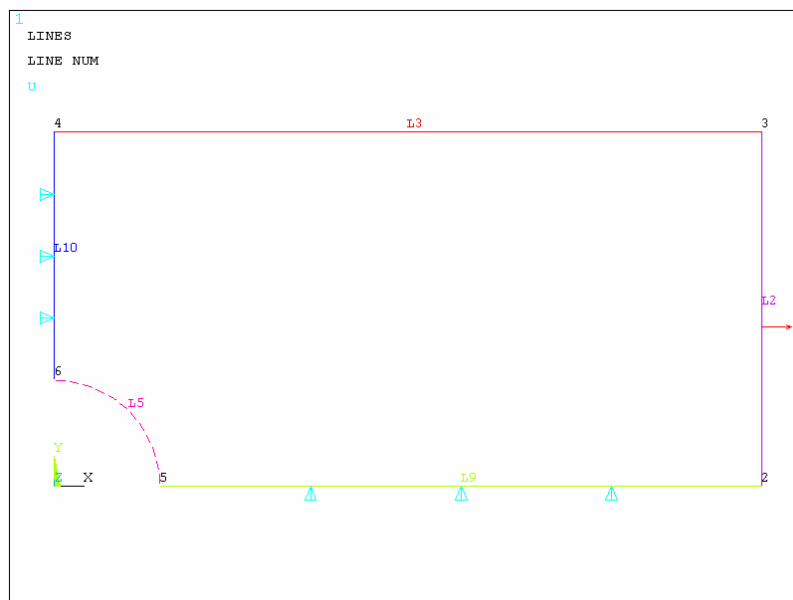


Рисунок 11 – Изображение граничных условий и нагрузки

9. Сохранить базу данных при помощи панели инструментов: *ANSYS Toolbar>SAVE_DB.*

В результате выполнения этой команды введенные данные по модели записываются в файл Lab1.db.

10. Запустить задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS.*

В появляющемся при этом окне «/STATUS command» представлена сводная информация о задаче; это окно можно закрыть.

Для запуска непосредственно решения в диалоговой панели «Solve Current Load Step» нажимаем *OK*. Возможное сообщение о наличии предупреждений следует проигнорировать, нажав кнопку *Yes*.

Дожидаемся информационного сообщения с текстом «Solution is done!», сигнализирующим об успешном завершении счета. Закрываем это сообщение кнопкой *Close*.

11. Изобразить деформированное состояние пластины.

Для анализа результатов расчета обычно используется общий постпроцессор (*General Postprocessor*). Здесь доступны различные средства визуализации выходных величин.

Для изображения деформированного состояния модели следует выбрать пункт меню *M_M>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape.*

В появившемся окне отмечаем опцию «Def+undef edge» для наложения исходных границ тела на деформированную модель, *OK*. Деформированное состояние рассматриваемой модели показано на рисунке 12 (где штриховой линией представлен исходный контур пластины).

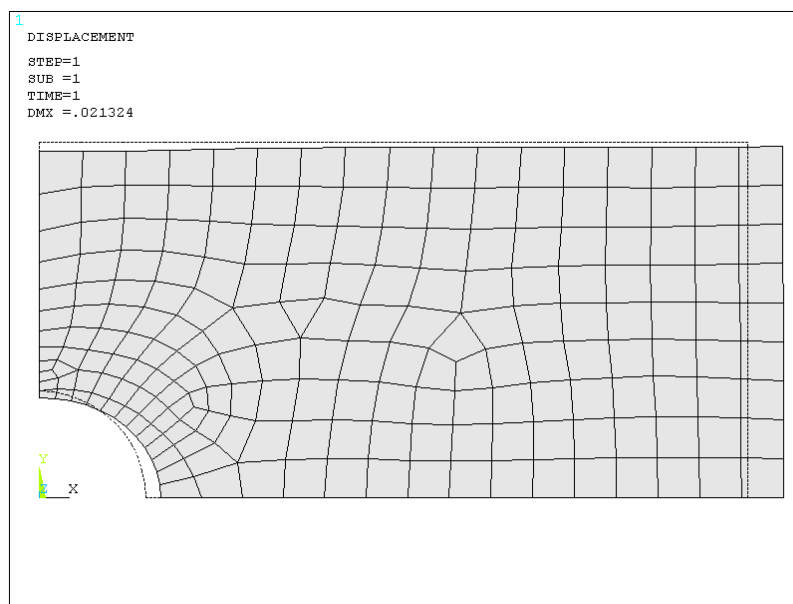


Рисунок 12 – Деформированное состояние пластины

12. Изобразить поле напряжений σ_{xx} .

Для рассматриваемой задачи интерес представляет распределение нормальных напряжений, действующих на площадках, перпендикулярных оси X.

Для многоцветного представления поля напряжений воспользуемся командой изображения узлового решения: *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu.*

При выполнении данной команды появляется группированный список доступных результатов, где последовательно выбираем *Nodal Solution>Stress>X-component of stress*, затем нажимаем *OK*. Результат выполнения этих действий показан на рисунке 13. Видно, что внизу экрана располагается легенда, где каждый цвет соответствует определенному уровню напряжений.

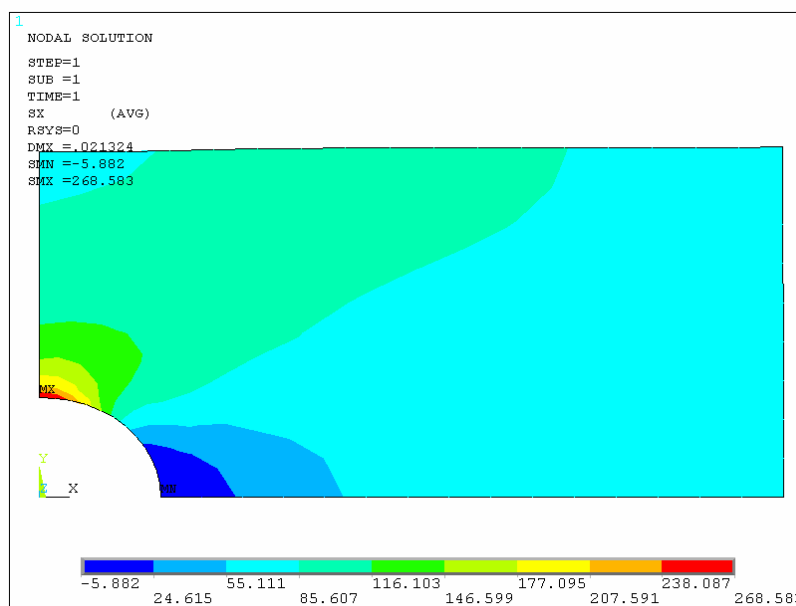


Рисунок 13 – Изображение поля напряжений (МПа)

Следует отметить, что элементные выходные величины (такие как напряжения) вычисляются в результате МКЭ-анализа в точках интегрирования внутри конечных элементов. При изображении узлового решения выполняется экстраполяция этих данных на узлы с последующим осреднением.

Осредненное значение напряжения в интересующем узле можно вывести на экран с помощью команды: *M_M>General Postproc>Query Results>Subgrid Solu.*

Здесь сначала необходимо выбрать выходную величину (например, для напряжения σ_{xx} следует указать *Stress>X-direction SX*, зафиксировав выбор кнопкой *OK*). После этого курсор мыши перейдет в режим выделения узлов. Щелкая левой кнопкой мыши в разных местах модели, можно выводить значения данной выходной величины в интересующих узлах. Кнопка *Reset* используется для удаления выведенных на экран дисплея значений. Отключить режим поузлового запроса результатов можно кнопкой *Cancel*.

13. Построить эпюру напряжений σ_{xx} в среднем сечении.

Важным средством анализа результатов является инструмент построения двумерных графиков изменения исследуемых величин вдоль определенных пользователем траекторий.

В первую очередь определим траекторию при помощи узлов: *M_M>General Postproc>Path Operations>Define Path>By Nodes*.

Указываем последовательно два крайних узла левой кромки модели с координатами (0; 7,5; 0) и (0; 25; 0), после чего нажимаем *OK*.

В появившейся диалоговой панели в поле «Define Path Name» задаем имя траектории, например *Left*, и увеличиваем значение параметра «Number of division» до 100 (для более гладкой интерполяции результатов). Завершаем создание траектории кнопкой *OK*. Закрываем окно сводной информации о существующих траекториях.

На полученную таким образом траекторию необходимо нанести результаты, для этого используем команду *M_M>General Postproc>Path Operations>Map onto Path*.

В поле «User label for item» вводим пользовательскую метку, например *SX*, для обозначения выходной величины. В списках ниже выбираем *Stress>X-direction SX*, т.е. напряжение σ_{xx} . Закрываем окно кнопкой *OK*.

Для построения собственно графика используем команду *M_M>General Postproc>Path Operations>Plot Path Item>On Graph*.

Выбираем метку *SX*, нажимаем *OK*. Пример получаемого при этом графика показан на рисунке 14. Ось абсцисс здесь представляет собой расстояние, отсчитываемое вдоль созданной траектории.

Для изображения данной зависимости в табличной форме следует воспользоваться командой *Main Menu>General Postproc>Path Operations>Plot Path Item>List Path Items*.

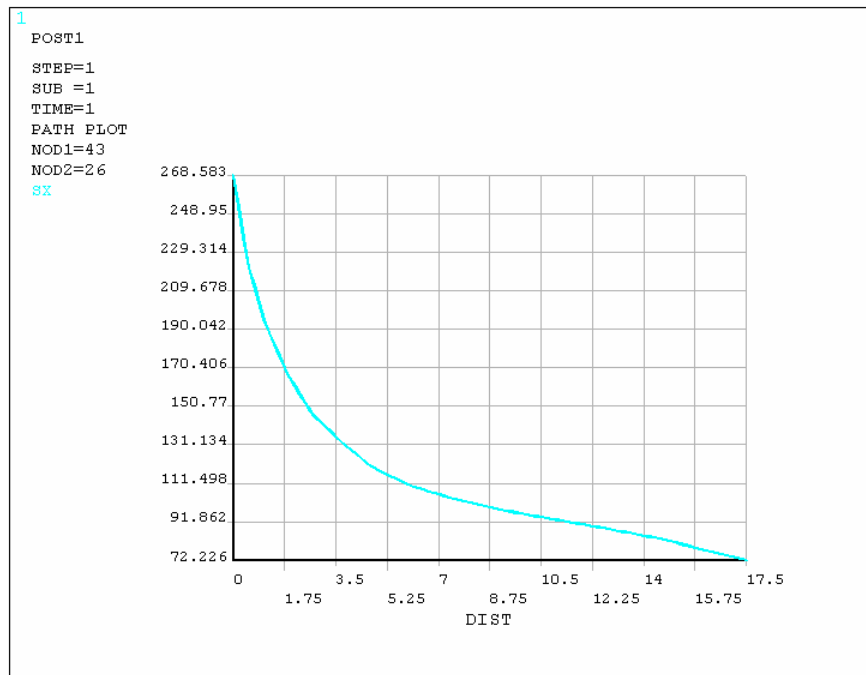


Рисунок 14 – Эпюра напряжений SX вдоль левой кромки

Вычислим коэффициент концентрации напряжений как отношение максимального напряжения σ_{\max} к номинальным напряжениям, равным приложенному давлению p :

$$k = \frac{\sigma_{\max}}{p} = \frac{268,6}{80} = 3,36.$$

Известно, что коэффициент концентрации для бесконечно широкой пластины равен 3, а для пластины конечной ширины (как в нашем случае) может быть больше.

Проверить точность полученного МКЭ-решения можно путем исследования его сходимости. Для этого необходимо выполнить расчет с более мелкой сеткой и сравнить полученный результат (например, по максимальному напряжению) с предыдущим.

14. Нанести на рассматриваемую модель регулярную сетку.

Прежде всего, здесь необходимо удалить имеющуюся свободную разбивку: *M_M > Preprocessor > Meshing > MeshTool*.

В инструментальной панели нажимаем кнопку *Clear* (расположенную внизу рядом с кнопкой *Mesh*) и указываем поверхность A3. Нажимаем *OK*. Параметры управления сеткой (т.е. заданные размеры элементов) оставляем без изменения.

Единственная поверхность, представляющая геометрическую модель пластины, не является «правильной» с точки зрения построения регулярных (mapped) сеток, поскольку имеет более пяти кромок.

Один из способов получения регулярной конечно-элементной сетки на сложной поверхности состоит в использовании конкатенации (объединения) нескольких линий. При этом генератор сеток будет рассматривать данный набор как одну «виртуальную» линию.

Для удобства графического указания отобразим на экране лишь линии: *U_M>Plot>Lines*.

Чтобы получить четырехстороннюю поверхность, выполним конкатенацию двух линий: *M_M>Meshing>Concatenate>Lines*.

В качестве входных данных здесь указываем линии L2 и L3, *OK*.

Снова возвращаемся к инструментальной панели «MeshTool», активизируем режим построения регулярной сетки Mapped и нажимаем кнопку *Mesh* для разбиения поверхности A3. Полученная таким образом регулярная сетка показана на рисунке 15.

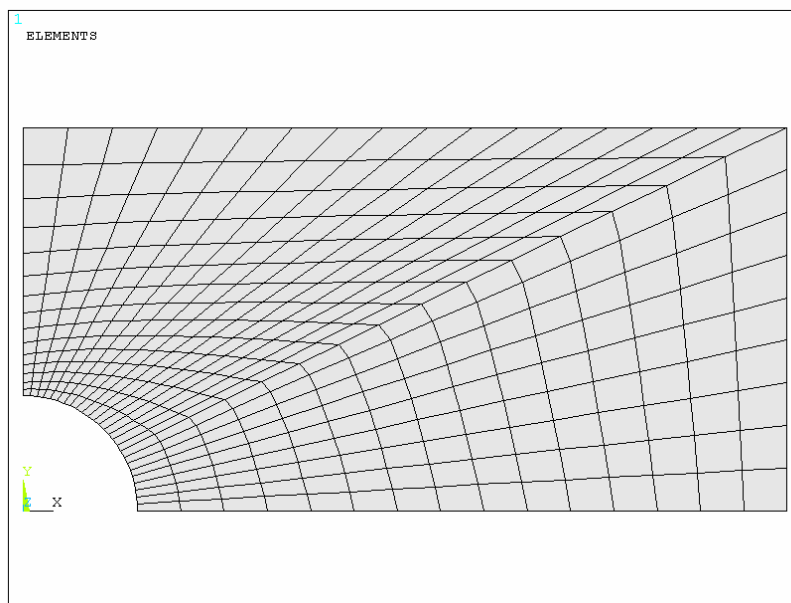


Рисунок 15 – Регулярная конечно-элементная сетка

15. Повторить шаги с 10 по 13 для получения решения с новой сеткой и сравнить найденные результаты с предыдущими.

16. Изучить дополнительные средства визуализации.

С помощью кнопок панели управления видом (расположенной правее рабочего окна) можно устанавливать различные проекции, вращать, а также

перемещать изображение модели. При активизации динамического режима данные операции можно выполнять при помощи мыши.

Для отображения реальной толщины пластины следует выбрать пункт *U_M>PlotCtrls>Style>Size and Shape* и активизировать флажок «Display of Elements».

Для задач, учитывающих симметрию конструкции, есть возможность расширить результаты так, как если бы в расчете фигурировала полная модель: *U_M>PlotCtrls>Style>Symmetry Expansion>Periodic/Cyclic Symmetry*. В нашем случае здесь следует выбрать опцию «1/4 Dihedral Sym», поскольку благодаря двойной симметрии моделировалась только четверть пластины.

Для возвращения к отображению расчетной модели необходимо воспользоваться следующей командой: *U_M>PlotCtrls>Style>Symmetry Expansion>No Expansion*.

17. Для отчета по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File*.

Вводим имя Lab1.lgw.

18. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT*.

Данные здесь можно сохранить в различном объеме (по умолчанию сохраняется вся информация по расчетной модели).