

Министерство образования Республики Беларусь
Белорусский государственный университет

А. С. Кравчук, А. И. Кравчук

**Электронная библиотека механики и физики.
Лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST
с примерами решения задач
в трех частях**

Часть 1.

**ANSYS/LS-DYNA.
Общая характеристика интерфейса и средств создания твердотельной
модели детали. Использование моделей материалов и типов конечных
элементов LS-DYNA**

Минск
2013

УДК 531/534:004.4(075.8)(076.1) + 539.3:004.4(075.8)(076.1)

Решение о депонировании документа вынес
совет механико-математического факультета (протокол № 7 от 18.06.2013 г.)

Авторы:

А. С. Кравчук, А. И. Кравчук

Рецензенты:

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

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

Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST с примерами решения задач [Электронный ресурс] : курс лекций для студ. мех.-мат. фак. обучающихся по специальности 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 3 ч. Ч. 1. ANSYS/LS-DYNA. Общая характеристика интерфейса и средств создания твердотельной модели детали. Использование моделей материалов и типов конечных элементов LS-DYNA / **А. С. Кравчук, А. И. Кравчук**. – Электрон. текстовые дан. – Минск : БГУ, 2013. – 161 с. : ил. – Библиогр.: с. 158–159. – Загл. с тит. экрана. – № 001918062013. Деп. в БГУ 18.06.2013.

Рассмотрен программный комплекс ANSYS/LS-DYNA, который объединяет в себе расчетный модуль LS-DYNA со средствами подготовки исходных данных и обработки результатов в ANSYS. Целью курса лекций является обучение пользователя основам использования ANSYS/LS-DYNA для решения задач механики твердого тела.

Данный раздел курса лекций посвящен описанию отличий графического интерфейса ANSYS/LS-DYNA от ANSYS. В книге дано описание типов элементов раздела LS-DYNA Explicit и типов материалов, используемых для решения задач механики твердого тела. Для иллюстрации материала используется ряд примеров. Они сопровождаются подробными пояснениями использования пунктов меню.

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

Введение

Книга посвящена многоцелевой многопроцессорной программной системе конечно-элементного анализа LS-DYNA, разработанной корпорацией LSTC. Рассмотрено использование системы ANSYS/LS-DYNA, которая объединяет в себе расчетный модуль LS-DYNA со средствами подготовки исходных данных и обработки результатов в ANSYS.

Сфера применения LS-DYNA (ANSYS/LS-DYNA) очень широка. Одной из основных областей использования является изучение разрушения конструкций. В частности, виртуальное моделирование аварий автомобилей (краш-тесты), для чего специально разработаны математические модели человеческого тела и конечные элементы для подушек безопасности. Кроме того, с помощью LS-DYNA можно выполнить моделирование средств индивидуальной бронезащиты, а также провести анализ разнообразных производственных процессов (глубокая штамповка, сверхпластическое формование, прокатка, выдувка, штамповка, механообработка, а также иные процессы формообразования). LS-DYNA позволяет выполнять сейсмические расчеты и моделировать физическое поведение трехмерных структур: нелинейная динамика, тепловые задачи, разрушение, развитие трещин, контактное взаимодействие, теплофизика, акустика, поведение конструкций с учетом их взаимодействия с жидкостью и др.

Книга ориентирована на читателя, имеющего представление об использовании графического интерфейса ANSYS. Целью книги является обучение пользователя основам использования ANSYS/LS-DYNA для решения различных инженерных задач. Основное внимание уделено описанию отличий ANSYS/LS-DYNA от ANSYS. В книге дано описание типов элементов раздела LS-DYNA Explicit, средств задания динамических нагрузок, решения задач с помощью LS-DYNA Solver и визуализации результатов как средствами ANSYS/LS-DYNA так и препостпроцессора LS-DYNA (LS-PREPOST). Это, по мнению авторов должно существенно облегчить обучение студентов, инженеров и научных работников использованию LS-DYNA. Для иллюстрации материала используется ряд примеров. Они сопровождаются подробными пояснениями использования пунктов меню. Подробно рассмотрены все важные этапы подготовки задачи, ее решения и отображения результатов как с помощью ANSYS/LS-DYNA так и с помощью LS-PREPOST.

Книга может быть использована в качестве справочного пособия студентами старших курсов вузов и магистрами при проведении научно-исследовательских работ.

ANSYS/LS-DYNA. Общая характеристика интерфейса и средств создания твердотельной модели детали

Общая характеристика графического интерфейса

Основные элементы графического интерфейса ANSYS/LS-DYNA не отличаются от соответствующих элементов ANSYS. Поэтому графическому интерфейсу ANSYS/LS-DYNA в данной книге не уделялось большого внимания, поскольку предполагается, что пользователь знаком с ними. Способы определения рабочего имени файла, сохранения файла модели, открытия существующего файла с моделью, создания новой модели, выхода из ANSYS/LS-DYNA и изменения положения модели на экране полностью соответствуют ANSYS. Однако есть ряд особенностей, которые будут рассмотрены в каждой главе в отдельности.

Отметим что, использование графического интерфейса пользователя является наиболее простым способом взаимодействия с ANSYS/LS-DYNA.

Общая характеристика средств моделирования

Следует подчеркнуть, что создание твердотельной модели необходимо осуществлять без включенных опций ANSYS/LS-DYNA, т.е. непосредственно в ANSYS. Это объясняется тем, что если на этапе корректировки твердотельной модели включена опция **LS-DYNA Explicit**, то пользователь обнаружит, что, например, команды отображения компонент модели не будут обрабатываться в принятом в ANSYS режиме.

З а м е ч а н и е! Если пользователь выберет опцию **LS-DYNA Explicit**, но не выберет соответствующие конечные элементы, то среда ANSYS/LS-DYNA будет автоматически переключаться в ANSYS (*h-Method*).

Предполагается, что читатель знаком со средствами создания геометрической модели в ANSYS, логикой построения твердотельной модели и иерархией компонент модели.

Создание «составной части» модели

«Составная часть» (*component*) – это множество некоторых геометрических или конечно-элементных компонент модели с уникальным именем. Множество может состоять только из компонент одного типа, т.е. поверхностей, линий, конечных элементов. Создание «составной части» (*component*) можно осуществить с помощью *Component Manager*:

Utility Menu > Select > Component Manager...

При использовании данного пункта меню появится окно *Component Manager* (Рисунок 1). Далее:

- Нажимаем первую кнопку *Create Component*  (Рисунок 1).
- В появившемся окне *Create Component* (Рисунок 2) указываем тип компонент, объединяемых во множество. Можно выбрать следующие геометрические компоненты:
 1. *Volumes* - компонентами создаваемой «составной части» будут объемы;
 2. *Areas* - компонентами создаваемой «составной части» будут поверхности;
 3. *Lines* - компонентами создаваемой «составной части» будут линии;
 4. *Keypoints* - компонентами создаваемой «составной части» будут ключевые точки;
 5. *Elements* - компонентами создаваемой «составной части» будут элементы;
 6. *Nodes* – («по умолчанию») компонентами создаваемого множества будут узловые точки.
- Указываем, что выбор будет осуществляться с помощью «мыши» (необходимо поставить флаг в разделе *Pick Entities*).

З а м е ч а н и е! В поле ввода необходимо указать имя «составной части» (*component*).

- Нажимаем кнопку *OK*.
- Далее с помощью окна выбора *Reselect ...* выбираем компоненты, составляющие «составную часть» (*component*).
- Нажимаем кнопку *OK*.
- Закрываем окно *Component Manager*.

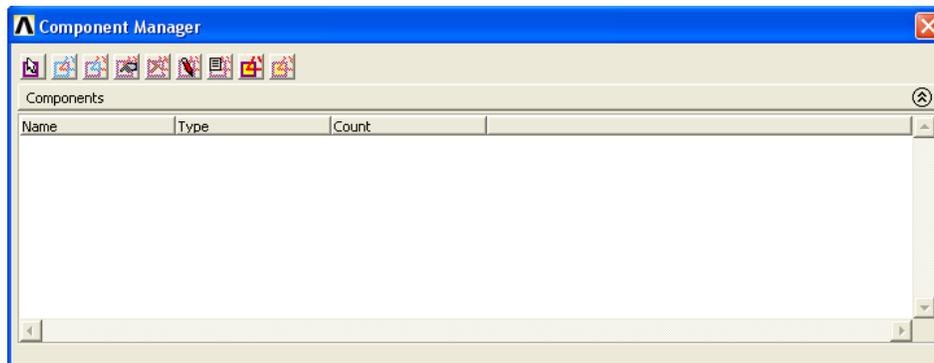


Рисунок 1. Окно *Component Manager*

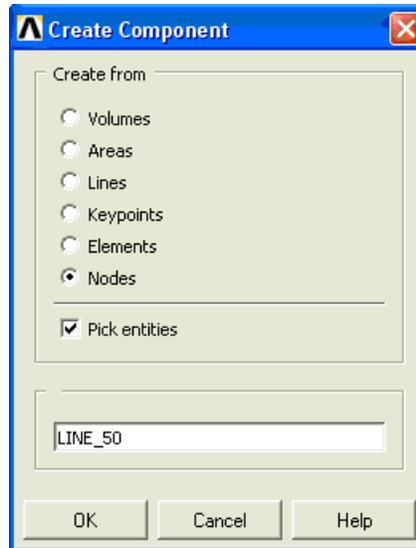


Рисунок 2. Окно *Create Component*

З а м е ч а н и е! Создание «составной части» (*component*) модели в ANSYS и в ANSYS/LS-DYNA совершенно аналогично. Однако создание группы («part») и сборки («assembly») имеет существенные различия и будет рассмотрено позже. Однако необходимо отметить, что для этих целей нельзя использовать средства *Component Manager*.

Примеры создания твердотельных моделей для LS-DYNA средствами ANSYS

Практически все создаваемые в этом разделе геометрические модели будут создаваться «снизу-вверх» и соответственно сначала создаются геометрические компоненты более низкого уровня, в данном случае – ключевые точки, по которым в дальнейшем будет создана остальная геометрия модели.

В н и м а н и е! Каждый раз после сохранения результатов построения предыдущей модели при переходе к работе с новой моделью из нового примера пользователь должен очистить от старой модели память с помощью пункта меню утилит:

Utility Menu > File > Clear & Start New

При выборе этого пункта меню появляется диалоговое окно *Clear Database and Start New*, в котором пользователь должен нажать кнопку **OK**. И еще раз подтвердить свой выбор нажатием кнопки **Yes** в окне *Verify* (Рисунок 3).

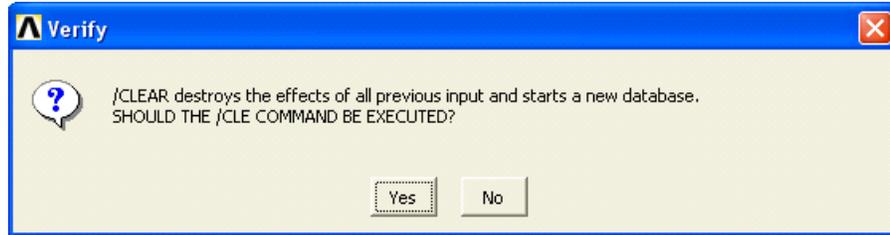


Рисунок 3. Вид окна *Verify*

Предварительные действия. Выбор системы физических единиц

Напомним, что система физических единиц устанавливается только с помощью командной строки. Команда, устанавливающая систему единиц, имеет вид:

/UNITS, Label

З а м е ч а н и е! «По умолчанию» в ANSYS используется международная система физических единиц СИ. Во всех примерах будет использоваться именно система единиц по умолчанию. Поэтому при рассмотрении любых примеров в дальнейшем не будут даваться комментарии относительно размерности используемых величин.

Пример 1. Построение радиального сечения цилиндрического образца с концентратором

Пример демонстрирует, что при решении осесимметричной задачи можно ограничиться созданием плоской модели осевого сечения образца. Это сократит количество элементов модели, время решения задачи, позволит без привлечения дополнительных средств изучить изменение напряженно-деформированного состояния образца по глубине.

Шаг 1. Создание ключевых точек, определяющих половину профиля образца

Создаем семь ключевых точек на рабочей плоскости, определяющие профиль образца. Для этого вводим их номера и координаты.

Пункт главного меню

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

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

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

- 1-я ключевая точка имеет координаты $(0;-0.05)$ (Рисунок 4).

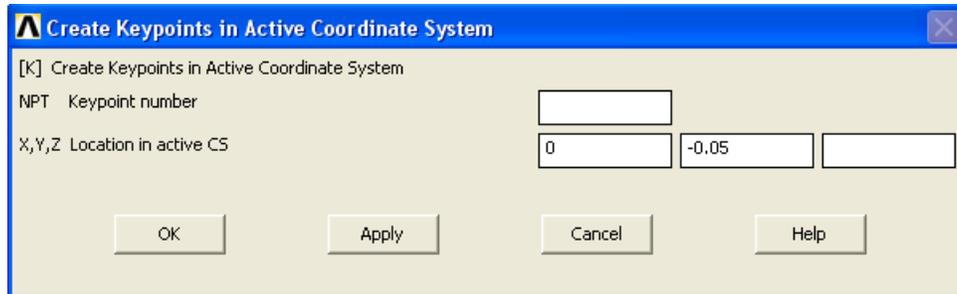


Рисунок 4. Создание 1-ой ключевой точки

- Нажимаем кнопку *Apply*, т.к. точки будут продолжать создаваться
- 2-я ключевая точка имеет координаты $(0.01;-0.05)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*, т.к. точки будут продолжать создаваться
- 3-я ключевая точка имеет координаты $(0.01;-0.04)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 4-я ключевая точка имеет координаты $(0.01;-0.035)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 5-я ключевая точка имеет координаты $(0.005;-0.035)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 6-я ключевая точка имеет координаты $(0.005;-0.005)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 7-я ключевая точка имеет координаты $(0.0025;0)$.
- Нажимаем кнопку *OK*, т.к. создание ключевых точек на данном этапе закончено (Рисунок 5).

Список команд

/PREP7

K,1,0,-0.05

K,2,0.01,-0.05

K,3,0.01,-0.04

K,4,0.01,-0.035

K,5,0.005,-0.035

K,6,0.005,-0.005

K,7,0.0025,0

З а м е ч а н и е! Поле для ввода координаты по оси **Z** пусто, т.к. «по умолчанию» она равна нулю (рисунок плоский).

Результаты выполнения шага 1.

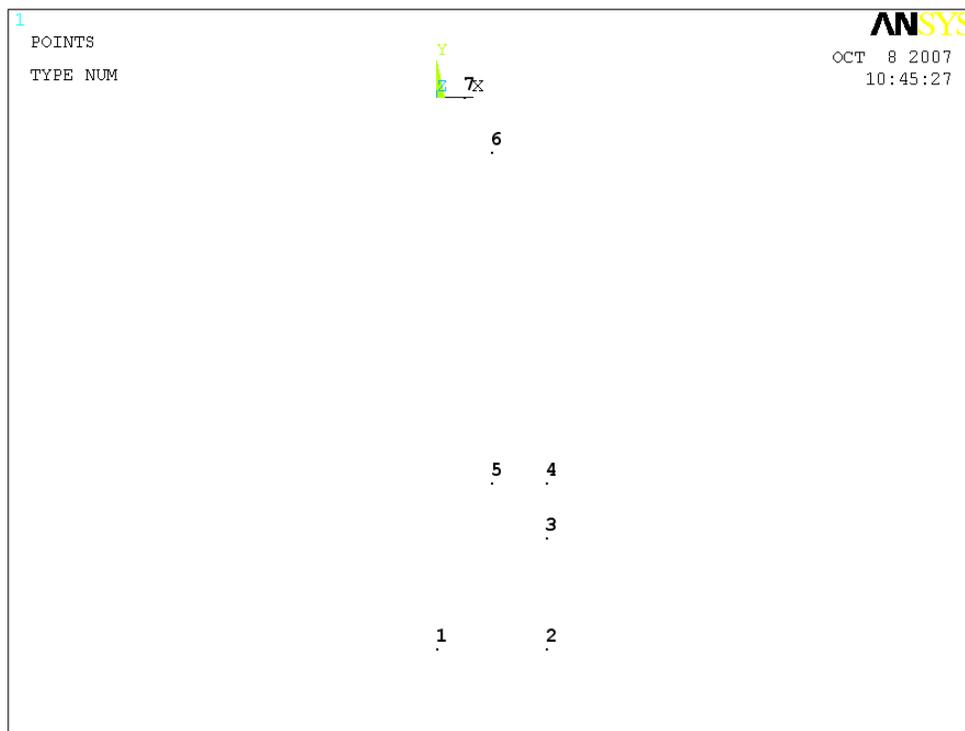


Рисунок 5. Результат создания ключевых точек

Шаг 2. Зеркальное отображение ключевых точек

В результате первого шага были точки, определяющие геометрию половины создаваемой области. Для того чтобы создать остальные точки, следует воспользоваться операцией зеркального отражения, что и будет выполнено на втором шаге.

Отображаем созданные ключевые точки **1–6** симметрично относительно горизонтальной оси, при этом сохраняя исходные точки.

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Keypoints

При использовании указанного пункта меню появится окно выбора **Reflect Keypoints**. С помощью «мыши» или командной строки следует:

- Указать ключевые точки (**1-6**), которые необходимо копировать (Рисунок 6).



Рисунок 6. Выбор ключевых точек для копирования

- Нажимаем кнопку **OK** или **Apply** для подтверждения окончания выбора.
- Появится диалоговое окно **Reflect Keypoints** (Рисунок 7), в котором указываем плоскость, относительно которой выполняется отображение (метка **X-Z**), и в раскрывающемся списке **MOVE** указываем, что точки копируются (выбираем пункт **Copied**).

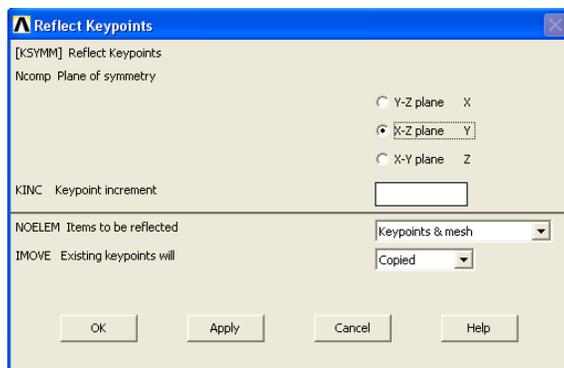


Рисунок 7. Вид окна *Reflect Keypoints*

- Нажимаем кнопку **OK** или **Apply** (Рисунок 8).

Команда

KSYMM,Y,1,6,1,0,1,0

З а м е ч а н и е! Созданные ключевые точки могут не попасть в отображаемое поле. Для того чтобы их увидеть следует воспользоваться пунктом меню утилит: *Utility Menu > PlotCtrl > Pan Zoom Rotate* либо кнопкой  справа на панели инструментов.

Результаты выполнения шага 2

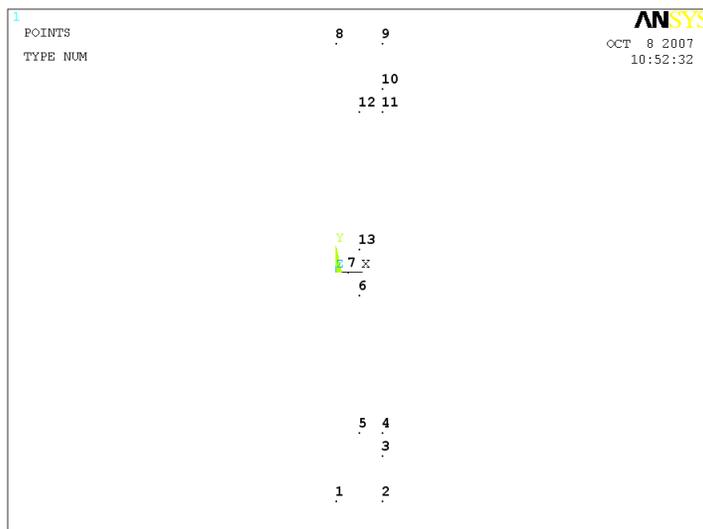


Рисунок 8. Результат построения ключевых точек, определяющих профиль модели

Шаг 3. Соединение ключевых точек линиями

Согласно способу создания модели снизу-вверх, после создания ключевых точек, по ним следует создавать геометрические компоненты более высокого уровня – линии, которые будут соединять эти точки. Создаем прямые линии.

Пункт главного меню

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

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

- Последовательно указываем ключевые точки ***1*** и ***2***. Эти точки автоматически соединятся прямой линией.
- Указываем ключевые точки ***2*** и ***3***.
- Затем указываем пары ключевых точек ***5*** и ***6***, ***13*** и ***12***, ***10*** и ***9***, ***9*** и ***8***, ***8*** и ***1***. Эти пары точек будут соединены прямыми линиями.
- Нажимаем кнопку ***OK*** (Рисунок 9).

Список команд

LSTR,1,2

LSTR,2,3

LSTR,5,6

LSTR,13,12

LSTR,10,9

LSTR,9,8

LSTR,8,1

Результаты выполнения шага 3.

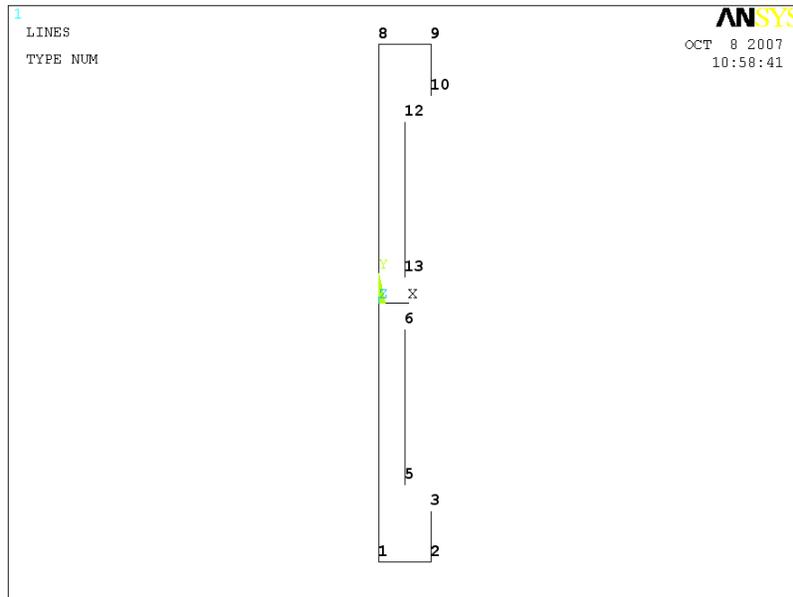


Рисунок 9. Результат построения всех прямых линий границы модели

Шаг 4. Создание дуг по ключевым точкам концов и радиусу

Рисуем дуги окружностей между ключевыми точками **3** и **5** с центром в ключевой точке **4**, а так же между ключевыми точками **12** и **10** с центром в ключевой точке **11**. Радиус дуг равен **0.005**.

Пункт главного меню

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

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

- Последовательно указываем ключевую точку **3** (начала дуги) и **5** (конца дуги).
- Нажимаем кнопку **OK**.
- Указываем ключевую точку **4** (центр окружности).
- Нажимаем кнопку **OK**.
- Появляется диалоговое окно **Arc by End KPs & Radius**, в котором необходимо ввести радиус дуги (поле **RAD**), который равен **0.005** (Рисунок 10).

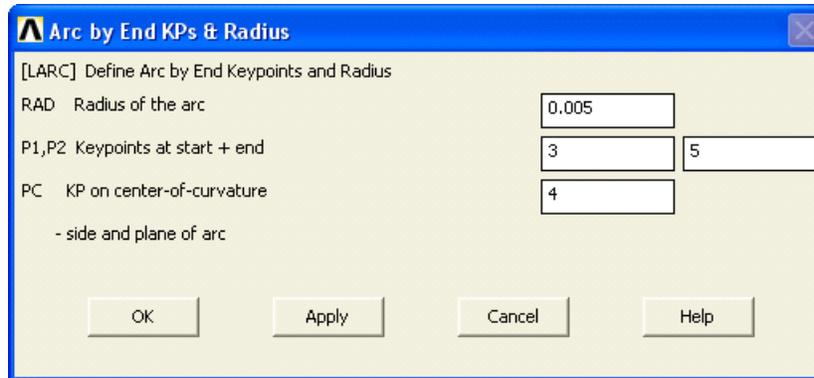


Рисунок 10. Вид окна *Arc by KPs & Radius*

- Нажимаем кнопку *Apply*, т.к. необходимо построить еще одну дугу.
- Повторяем указанную последовательность действий для построения дуги, соединяющей ключевые точки **12** и **10** (центр дуги ключевая точка **11**) и имеющей радиус **0.005** (Рисунок 11).

Список команд

LARC,3,5,4,0.005

LARC,12,10,11,0.005

Результаты выполнения шага 4

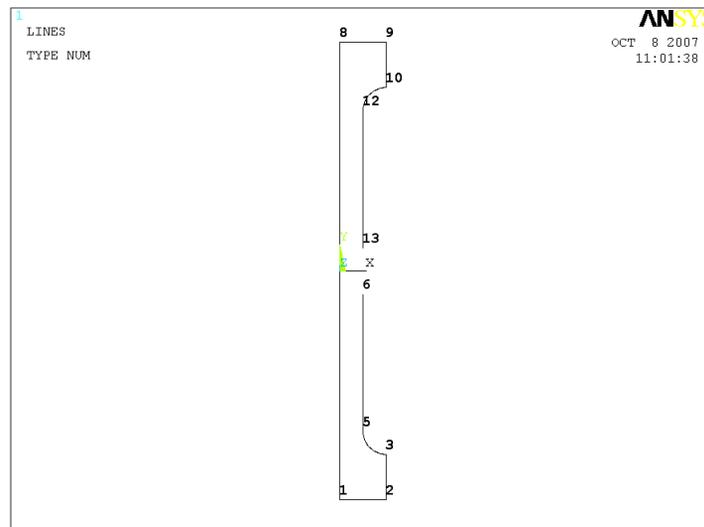


Рисунок 11. Промежуточные результаты построения границы модели

Шаг 5. Создание дуги по трем ключевым точкам

Рисуем дуги окружностей между ключевыми точками **6**, **13** через **7**.

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Arcs > Through 3 KPs

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора **Arcs Thru 3 KPs**. В этом случае:

- Последовательно указываем ключевую точку **6** (начала дуги), **13** (конца дуги) и ключевую точку **7** (через которую проходит дуга).
- Нажимаем кнопку **OK** (Рисунок 12).

Команда

LARC,6,13,7

Результаты выполнения шага 5

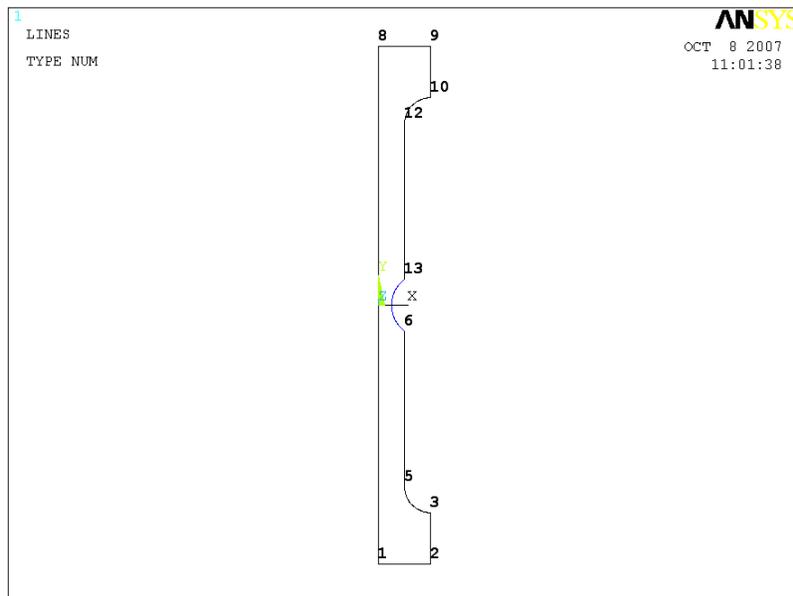


Рисунок 12. Результаты построения границы модели

Шаг 6. Удаление вспомогательных ключевых точек

После того, как контур модели создан, некоторые ключевые точки становятся не нужными (в частности точки задававшие центры дуг). На

данном шаге будет выполнено удаление ставших ненужными ключевых точек **4**, **7** и **11**.

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Keypoints

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

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

Список команд

KDELE,4

KDELE,7

KDELE,11

З а м е ч а н и е! Список команд может быть заменен командой **KDELE,ALL**.

Шаг 7. Создание поверхности по линиям

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

Пункт главного меню

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

- При использовании указанного пункта меню появится окно выбора **Create Area By Lines**, с помощью которого следует указать линии, являющиеся границами поверхности.
- Нажать кнопку **ОК** или **Apply** для подтверждения окончания выбора.

Команда*AL,All**Шаг 8. Перенос созданной поверхности вдоль оси Y*

Поскольку задача деформирования образца является осесимметричной, то построенное сечение образца должно занимать первый квадрант ($X > 0$, $Y > 0$).

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move / Modify > Areas > Areas

- При использовании указанного пункта меню появится окно выбора *Move Areas*, с помощью которого следует указать поверхность, которую необходимо перенести.
- Во втором окне *Move Areas* необходимо указать направление (вдоль Y) и расстояние (0.05), на которое необходимо перенести модель (Рисунок 13).
- Нажать кнопку **OK** или *Apply* для подтверждения окончания выбора.

З а м е ч а н и е! После выполнения команд иногда необходимо перерисовать отображаемую фигуру с помощью пункта меню утилит *Utility Menu > Plot > Replot ...* либо воспользоваться командой */REPLOTT*

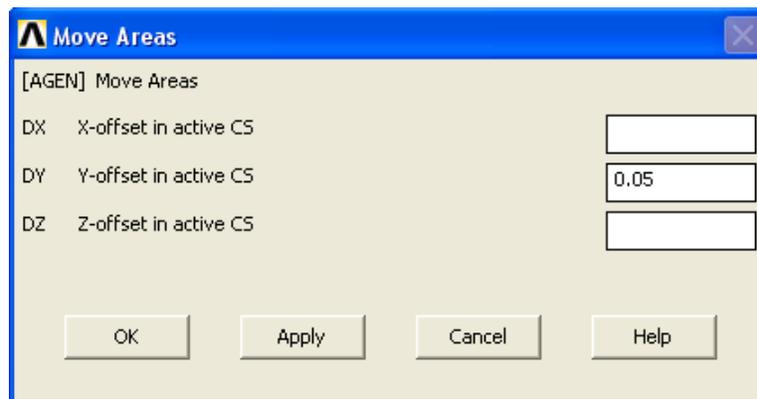


Рисунок 13. Второе окно *Move Areas*

Команда

AGEN,,All,,,0.05,,,1,1

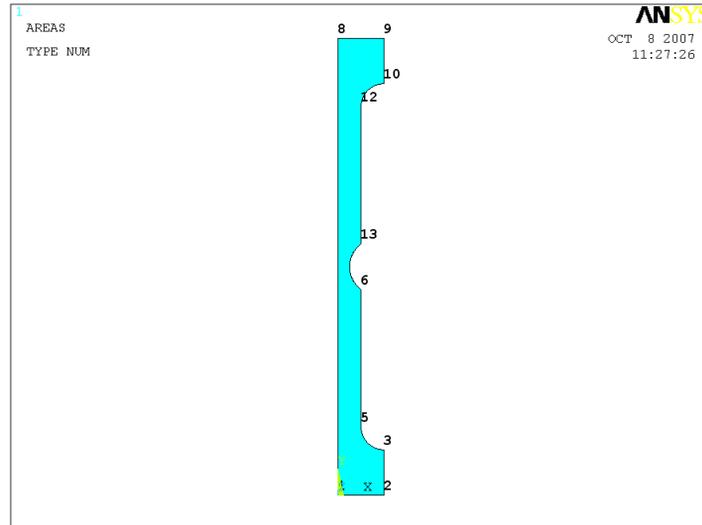
Результаты выполнения шага 8

Рисунок 14. Модель с включенной нумерацией ключевых точек

Шаг 9. Построение вспомогательной линии, нормальной к оси симметрии модели

З а м е ч а н и е! Для качественной визуализации процесса разрушения необходимо построить в области распространения трещины локально более плотную сетку. Поэтому следующие шаги посвящены дополнительным построениям

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Normal to Line

При его использовании появляется первое окно выбора ***Line Normal to Line***, с помощью которого:

- Выбираем линию ***L7*** (линию, являющуюся осью симметрии образца).
- Выбираем ключевую точку с номером ***5*** (Рисунок 14).
- Нажимаем ***ОК***.

Список команд

LANG,7,5,90

Шаг 10. Отображение линий

Пункт меню утилит

Для отображения линий необходимо воспользоваться пунктом меню (Рисунок 15):

Utility Menu > Plot > Lines

Список команд

LPLOT

З а м е ч а н и е! Данная команда «по умолчанию» соответствует команде **LPLOT,All**.

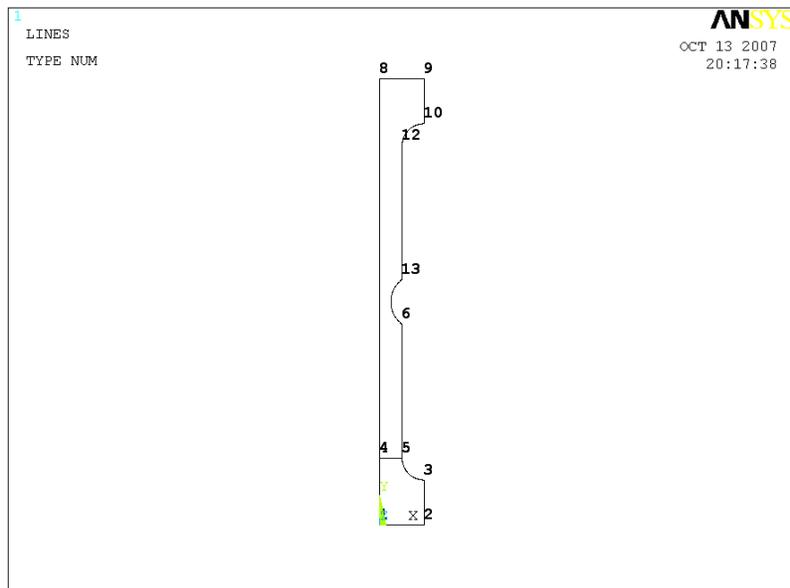
Результаты выполнения шага 10

Рисунок 15. Построение вспомогательной линии, нормальной к линии, являющейся осью симметрии образца

Шаг 11. Построение вспомогательных линий вытягиванием

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Keypoints > Along Lines

При использовании данного пункта меню:

- с помощью первого окна выбора **Sweep KPs along Lines** выбираем ключевые точки **6, 13, 12**;
- нажимаем **OK**;
- с помощью второго окна выбора выбираем построенную на шаге 9 линию между ключевыми точками **4** и **5** (Рисунок 15);
- нажимаем **OK** (Рисунок 16).

Список команд

LDRAG,6,13,12,,,12

Результаты выполнения шага 11

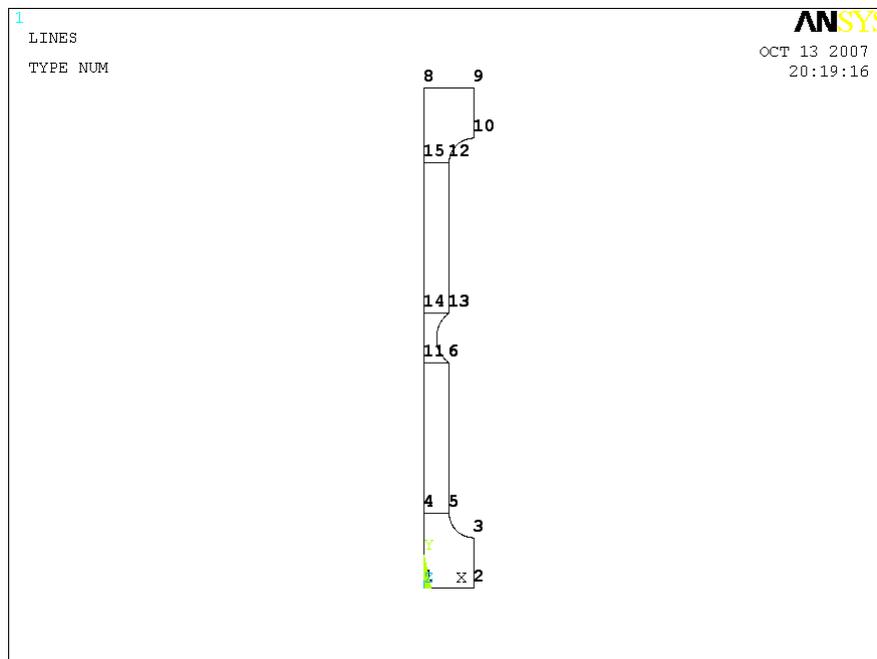


Рисунок 16. Результат построения вспомогательных линий вытягиванием

Шаг 12. Деление модели вспомогательными линиями

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Operate > Booleans > Divide > Area by Line

При использовании пункта главного меню:

- с помощью первого окна выбора **Divide Area by Line** выбираем модель;
- нажимаем **OK**;
- с помощью второго окна выбора выбираем построенные на предыдущих шагах вспомогательные линии (Рисунок 16);
- нажимаем **OK**.

Список команд

ASBL,1,12,,DELETE,KEEP

ASBL,3,13,,DELETE,KEEP

ASBL,4,15,,DELETE,KEEP

ASBL,3,14,,DELETE,KEEP

Шаг 13. Сохранение созданной модели в отдельном db-файле

Utality Menu > File > Save as...

При использовании пункта главного меню появляется окно выбора **Save DataBase**.

В этом случае:

- Выбираем с помощью «мыши» в раскрывающемся списке **Drivers**: диск, на котором должен храниться файл;
- Выбираем в окне **Directories**: папку, в которой должен храниться файл (например, **C:\example1**). Выбор папки осуществляется двойным нажатием на правую кнопку «мыши»
- Набираем любое имя (например, **example1.db**) в окне **Save DataBase to**, под которым должен храниться файл.
- Нажимаем кнопку **OK** (Рисунок 17).

Результат построения твердотельной модели для примера 1

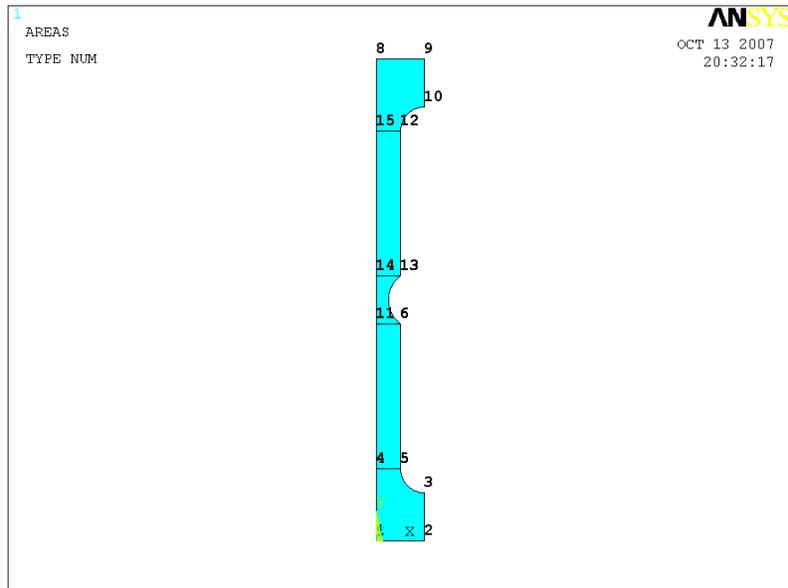


Рисунок 17. Результаты построения плоской модели примера 1

Пример 2. Построение модели криволинейного листа рессоры

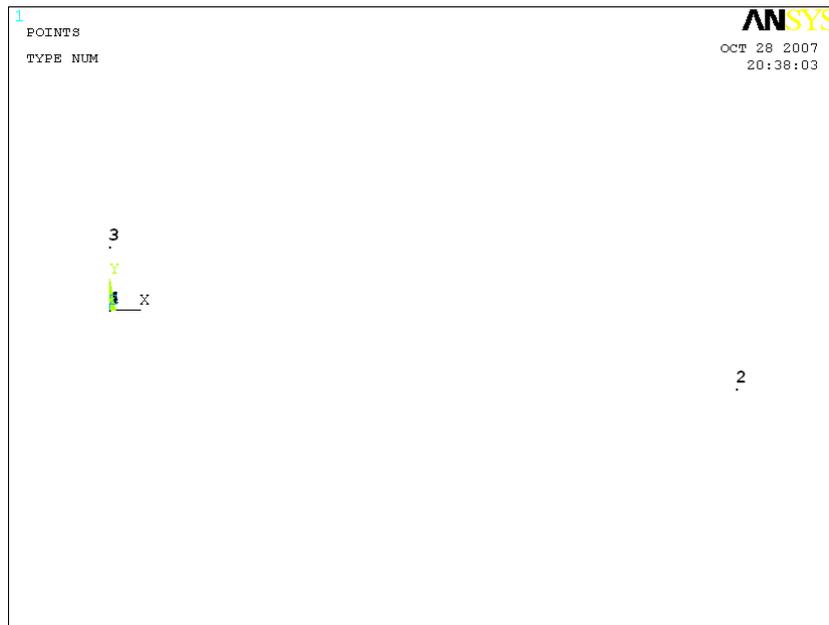
Шаг 1. Создание ключевых точек

Пункт главного меню

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

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

- 1-я ключевая точка имеет координаты $(0;0;0)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*, т.к. точки будут продолжать создаваться
- 2-я ключевая точка имеет координаты $(0.4;-0.05;0)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*, т.к. точки будут продолжать создаваться
- 3-я ключевая точка имеет координаты $(0;0.04;0)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 4-я ключевая точка имеет координаты $(0;0;0.08)$ (Рисунок 18).

Список команд***/PREP7******K,1,0,0,0******K,2,0.4,-0.05,0******K,3,0,0.04,0******K,4,0,0,0.08*****Рисунок 18. Результат создания ключевых точек**

Шаг 2. Зеркальное отображение ключевой точки

Пункт главного меню***Main Menu > Preprocessor > Modeling > Reflect > Keypoints***

При использовании указанного пункта меню появится окно выбора ***Reflect Keypoints***. С помощью «мыши» или командной строки:

- Указываем ключевую точку (2), которую необходимо копировать (Рисунок 19).

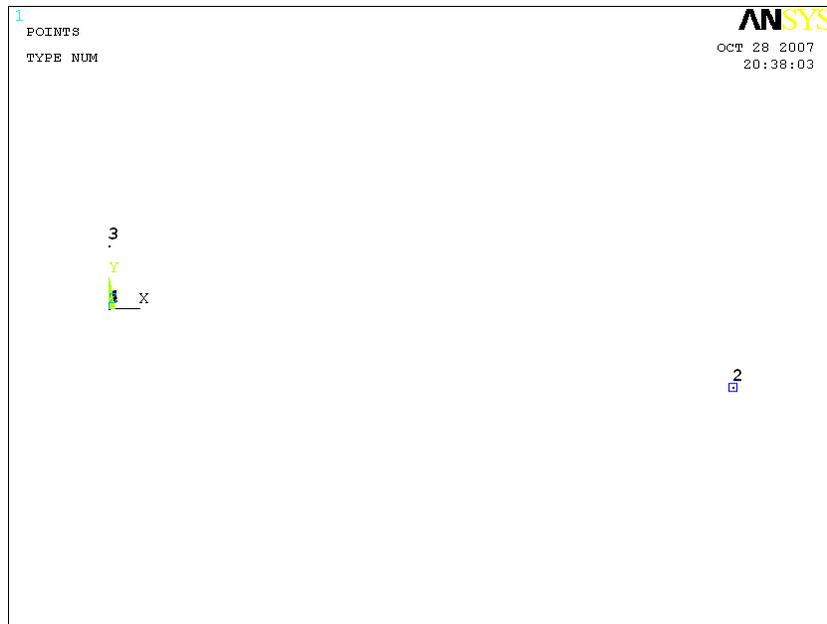


Рисунок 19. Выбор ключевой точки для копирования

- Нажимаем кнопку **OK** для подтверждения окончания выбора.
- Появится диалоговое окно **Reflect Keypoints** (Рисунок 20), в котором указываем плоскость, относительно которой выполняется отображение (метка **Y-Z**) и в раскрывающемся списке **MOVE** указываем, что точки копируются (выбираем пункт **Copied**).
- Нажимаем кнопку **OK** или **Apply** (Рисунок 21).

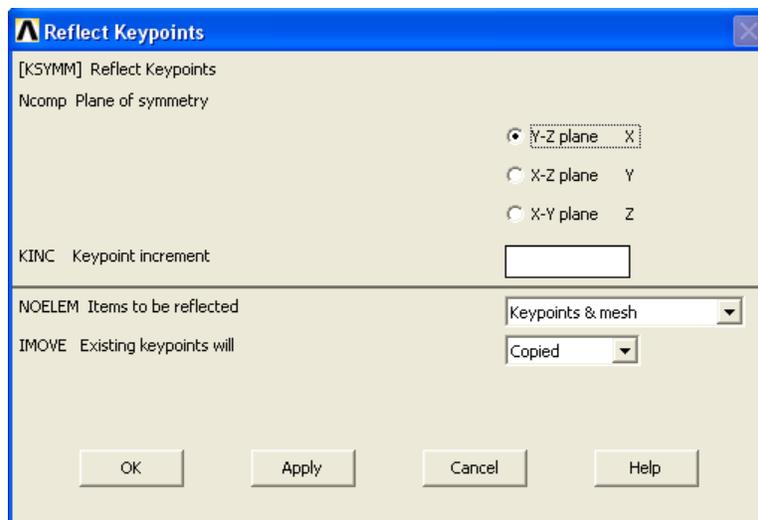


Рисунок 20. Вид окна *Reflect Keypoints*

Команда***KSYMM,X,2,,0,1,0***

З а м е ч а н и е! Созданная ключевая точка 5 может не попасть в отображаемое поле. Для того чтобы их увидеть следует воспользоваться пунктом меню утилит: *Utility Menu > PlotCtrl > Pan Zoom Rotate* либо кнопкой *Fit View*  справа на панели инструментов.

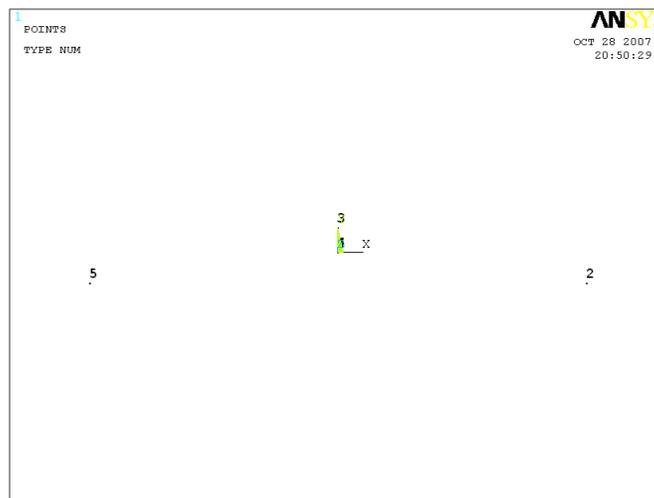
Результаты выполнения шага 2

Рисунок 21. Результат построения вспомогательной ключевой точки

Шаг 3. Соединение ключевых точек прямыми линиями

Пункт главного меню

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

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

- Последовательно указываем ключевые точки **1** и **3**. Эти точки автоматически соединятся прямой линией.
- Указываем ключевые точки **1** и **4**. Эти точки автоматически соединятся прямой линией.
- Нажимаем кнопку **ОК**.

Список команд

LSTR,1,3

LSTR,1,4

Шаг 4. Создание дуги по трем ключевым точкам

Рисуем дугу окружности между ключевыми точками **2** и **5** через точку **1**.

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Arcs > Through 3 KPs

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора **Through 3 KPs**. В этом случае:

- Последовательно указываем ключевую точку **5** (начала дуги) и **2** (конца дуги) и промежуточную точку **1** (Рисунок 22).

Список команд

LARC,5,2,1,

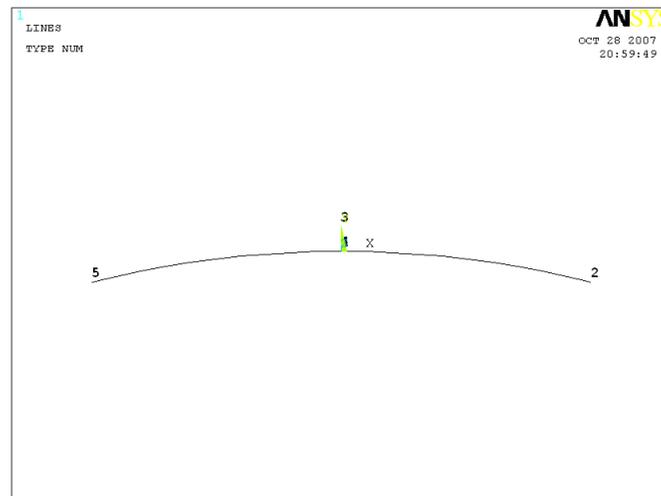
Результаты выполнения шага 4

Рисунок 22. Промежуточные результаты построения границы модели

Шаг 5. Деление дуги на две равные части

Пункт главного меню

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

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора **Div Line into N Lines**. В этом случае:

- Указываем построенную на предыдущем шаге дугу.
- Нажимаем кнопку **OK**.
- Во втором окне **Div Line into N Lines** необходимо нажать **OK**, т.к. «по умолчанию» поле **NDIV** имеет значение **2** (Рисунок 23).

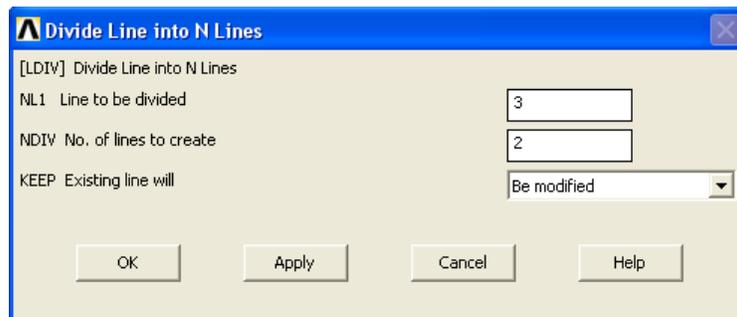


Рисунок 23. Второе окно *Div Line into N Lines*

Команда

LDIV,3,,2,0

Шаг 6. Включение нумерации линий и выключение нумерации точек

Пункт меню утилит

Utility Menu > PlotCtrl > Numbering...

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

- устанавливаем флаг On в окне с меткой **LINE**;
- устанавливаем флаг Off в окне с меткой **KP**;
- нажимаем кнопку **OK** для подтверждения окончания выбора.

Команда

/PNUM,KP,0

/PNUM,LINE,1

Шаг 7. Отображение линийПункт меню утилит

Для отображения линий необходимо воспользоваться пунктом меню (Рисунок 24):

Utility Menu > Plot > Lines

Список команд

L PLOT

З а м е ч а н и е! Данная команда «по умолчанию» соответствует команде ***L PLOT, All***

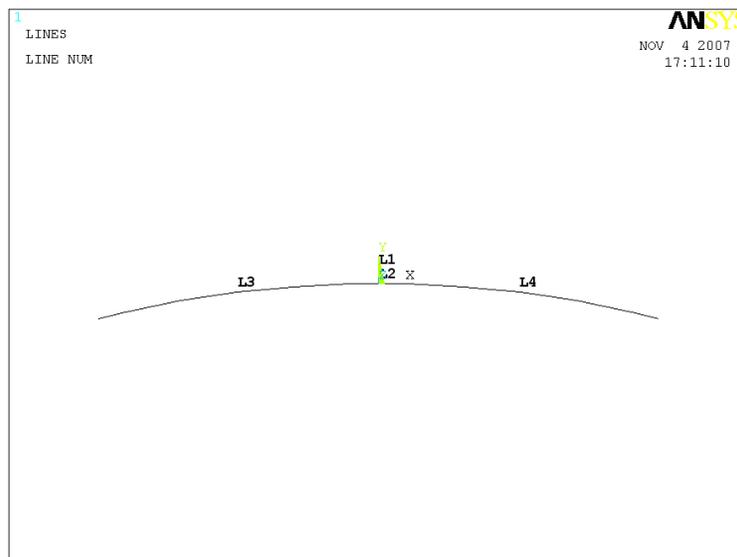
Результаты выполнения шага 7

Рисунок 24. Модель примера 2 с включенной нумерацией линий

Шаг 8. Удаление вспомогательной линии

После того, как контур модели создан, некоторые элементы модели становятся не нужными (в частности, левая полудуга **L3**).

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Lines and Below

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

- Указываем линию **L3**, которые необходимо удалить.
- Нажимаем кнопку **OK** (Рисунок 25).

Список команд

LDELETE,3

З а м е ч а н и е! После выполнения команды модель необходимо отобразить в другом масштабе, воспользовавшись кнопкой **Fit View**  на дополнительной панели инструментов

Результаты выполнения шага 8

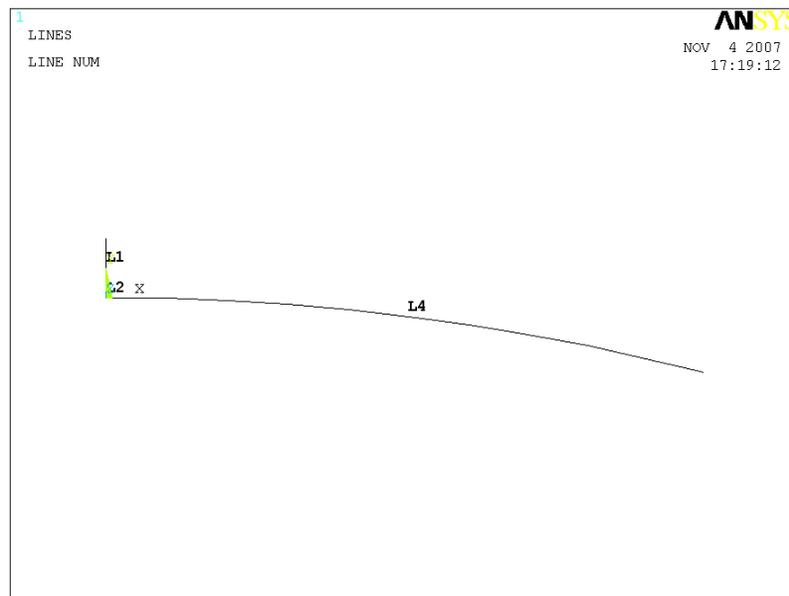


Рисунок 25. Результат удаления линии

Шаг 9. Деление дуги **L4** на пять равных частей

Объем, соответствующий половине листа рессоры, необходимо разбить на несколько (например, на **5**) объемов, для того чтобы конечно-элементное разбиение лучше соответствовало твердотельной геометрии.

Пункт главного меню

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

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора **Div Line into N Lines**. В этом случае:

- Указываем дугу **L4** (Рисунок 26).
- Нажимаем кнопку **OK**.
- Во втором окне **Div Line into N Lines** необходимо в поле **NDIV** ввести значение **5** и нажать **OK**.

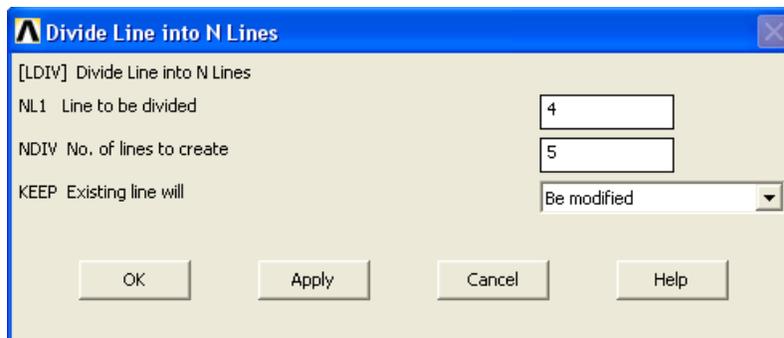


Рисунок 26. Окно *Divide Line into N Lines*

Команда

LDIV,4,,,5,0

Шаг 10. Просмотр модели в изометрии

Для отображения модели в изометрии следует воспользоваться кнопкой **Isometric View**  на дополнительной панели инструментов. Либо воспользоваться пунктом меню утилит **Utility Menu > PlotCtrl > Pan Zoom Rotate...**. В появившемся окне **Pan-Zoom-Rotate** во второй секции следует воспользоваться кнопкой **Iso** (Рисунок 27).

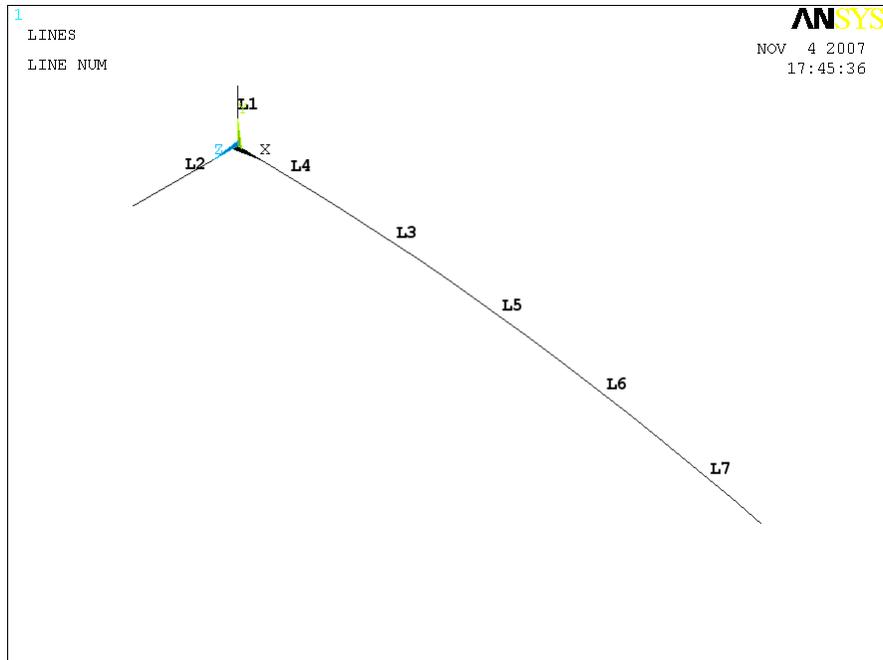


Рисунок 27. Изометрия модели

Шаг 11. Создание поверхности вытягиванием линии вдоль линии

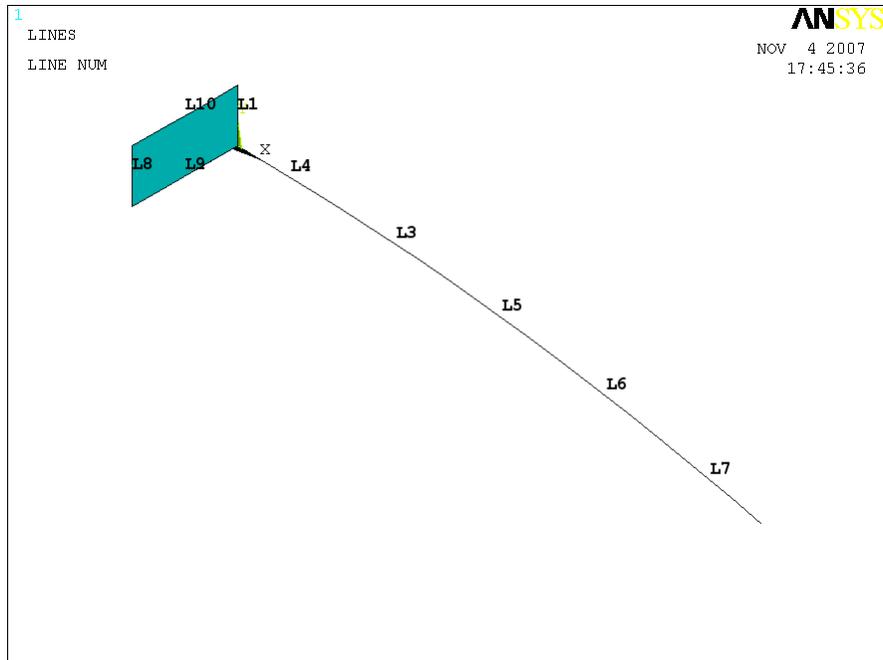
Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Lines > Along Lines

- При использовании указанного пункта меню появится окно выбора ***Sweep Lines along Lines***, с помощью которого следует указать линию ***L1***, которая будет вытягиваться.
- Нажать кнопку ***OK*** или ***Apply*** для подтверждения окончания выбора.
- С помощью второго окна выбора ***Sweep Lines along Lines*** следует указать линию ***L2***, вдоль которой будет осуществляться вытягивание.
- Нажать кнопку ***OK*** (Рисунок 28).

Команда

ADRAG,1,,,,,2



**Рисунок 28. Результат построения поверхности вытягиванием линии
вдоль линии**

Шаг 12. Создание объема вытягиванием поверхности вдоль дуг

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along Lines

- При использовании указанного пункта меню появится окно выбора ***Sweep Areas along Lines***, с помощью которого следует указать поверхность ***A1***, построенную на предыдущем шаге. Она и будет вытягиваться.
- Нажать кнопку ***OK*** или ***Apply*** для подтверждения окончания выбора.
- С помощью второго окна выбора ***Sweep Areas along Lines*** следует указать последовательно линии ***L4, L3, L5, L6, L7***, вдоль которых будет осуществляться вытягивание поверхности.
- Нажать кнопку ***OK*** (Рисунок 29).

Команда

VDRAG,1,,,,,4,3,5,6,7

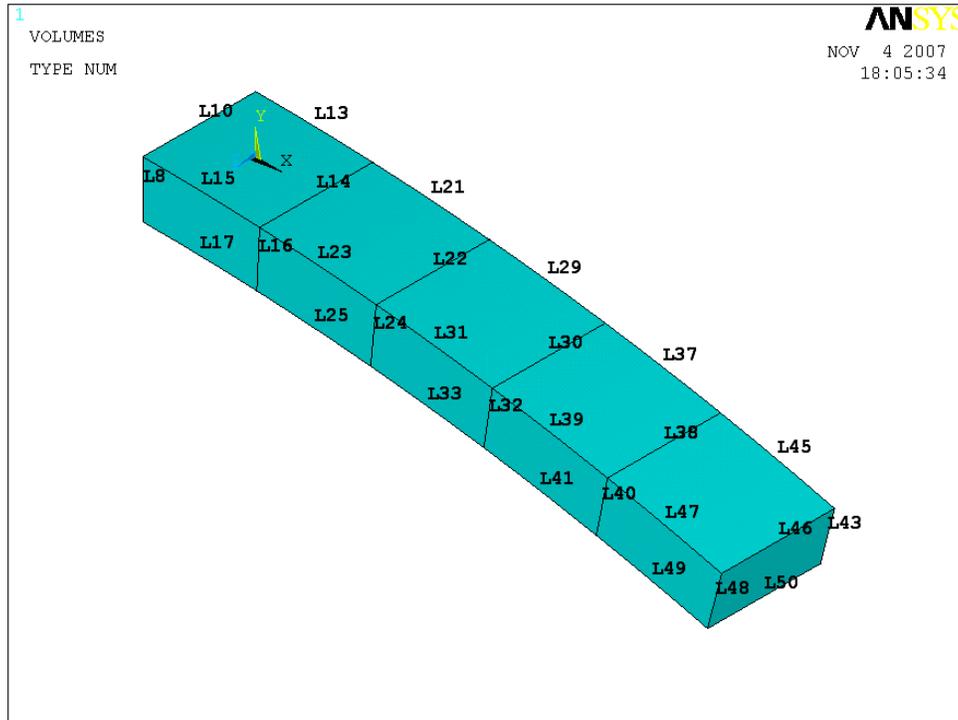


Рисунок 29. Результат построения объема модели вытягиванием поверхности вдоль набора линий

Шаг 13. Создание «составной части» (component) из линии L50

Utility Menu > Select > Component Manager...

При использовании данного пункта меню появится окно **Component Manager** (Рисунок 1). Далее необходимо:

- Нажать первую кнопку **Create Component**  (Рисунок 1).
- В появившемся окне **Create Component** (Рисунок 2) выбираем раздел **Lines**, указываем, что выбор будет осуществляться с помощью «мыши» (необходимо поставить флаг в разделе **Pick Entities**), в поле ввода указываем имя «составной части» (**component**) (в данном случае **LINE_50**).
- Нажимаем кнопку **OK**.

- Далее необходимо с помощью «мыши» выбрать линию *L50* (Рисунок 29) и нажать кнопку **OK** в окне выбора *Reselect lines*.
- Закрываем окно *Component Manager*.

З а м е ч а н и е! Необходимо отметить, что если не воспользоваться *Component Manager* сейчас, то позже после создания разбиения у пользователя возникнут существенные сложности с отображением нумерации компонент.

Шаг 14. Включение нумерации объемов и выключение нумерации линий

Пункт меню утилит

Utility Menu > PlotCtrl > Numbering...

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

- устанавливаем флаг On в окне с меткой *VOLU*;
- устанавливаем флаг Off в окне с меткой *LINE*;
- нажимаем кнопку **OK** для подтверждения окончания выбора.

Команда

/PNUM,LINE,0

/PNUM,VOLUME,1

Шаг 15. Отображение объемов

Пункт меню утилит

Для отображения объемов необходимо воспользоваться пунктом меню (Рисунок 30):

Utility Menu > Plot > Volume

Список команд

V PLOT

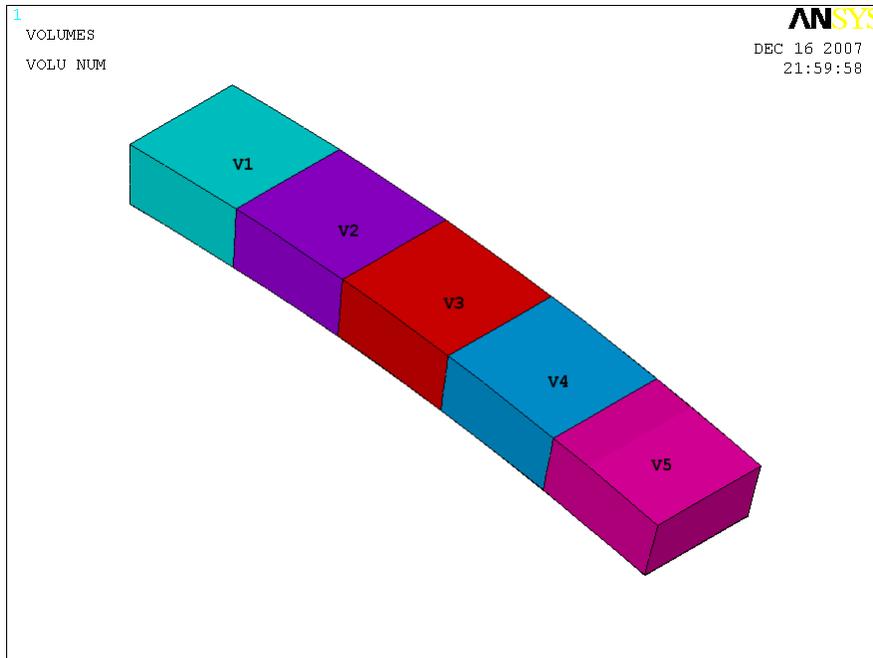


Рисунок 30. Объемы модели с номерами

Шаг 16. Создание «составной части» (component) из одного объема модели

Utility Menu > Select > Component Manager...

При использовании данного пункта меню появится окно **Component Manager**. Далее необходимо:

- Нажать первую кнопку **Create Component** .
- В появившемся окне **Create Component** выбираем раздел **Volumes**, указываем, что выбор будет осуществляться с помощью «мыши» (необходимо поставить флаг в разделе **Pick Entities**), в поле ввода указываем имя «составной части» (**component**) (в данном случае **VOLUME_4**).
- Нажимаем кнопку **OK**.
- Далее необходимо с помощью «мыши» выбрать объем **V4** (Рисунок 30) и нажать кнопку **OK** в окне выбора **Reselect volumes**.
- Закрываем окно **Component Manager**.

Шаг 17. Включение нумерации поверхностей и выключение нумерации объемов

Пункт меню утилит

Utility Menu> PlotCtrl> Numbering...

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

- устанавливаем флаг  **On** в окне с меткой **AREA**;
- устанавливаем флаг  **Off** в окне с меткой **VOLU**;
- нажимаем кнопку **OK** для подтверждения окончания выбора.

Команда

/PNUM,VOLUME,0

/PNUM,AREA,1

Шаг 18. Отображение поверхностей

Пункт главного меню

Для отображения поверхностей необходимо воспользоваться пунктом меню:

Utility Menu> Plot> Areas

Список команд

APLOT

Шаг 19. Отображение вида слева

Для отображении вида слева модели (Рисунок 31) следует воспользоваться кнопкой **Left View**  на дополнительной панели инструментов. Либо воспользоваться пунктом меню утилит **Utility Menu> PlotCtrl> Pan Zoom Rotate...**. В появившемся окне **Pan-Zoom-Rotate** во второй секции следует воспользоваться кнопкой **Left**.

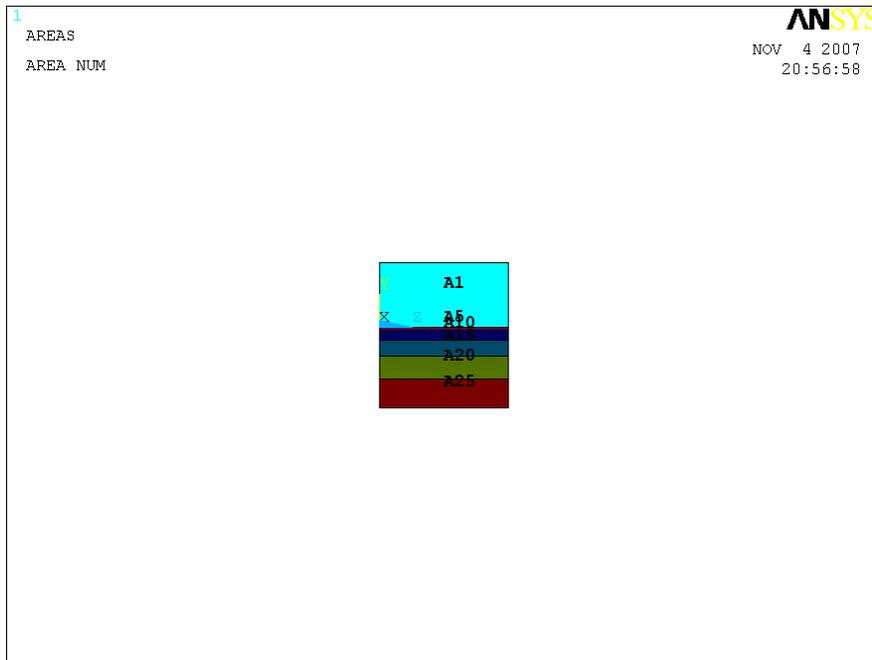


Рисунок 31. Вид слева модели рессоры

Шаг 20. Создание «составной части» (component) из поверхности A1

Utility Menu > Select > Component Manager...

При использовании данного пункта меню появится окно **Component Manager**. Далее необходимо:

- Нажать первую кнопку **Create Component** .
- В появившемся окне **Create Component** выбираем раздел **Areas**, указываем, что выбор будет осуществляться с помощью «мыши» (необходимо поставить флаг в разделе **Pick Entities**), в поле ввода указываем имя «составной части» (**component**) (в данном случае **AREA_1**).
- Нажимаем кнопку **OK**.
- Далее необходимо с помощью «мыши» выбрать поверхность **A1** и нажать кнопку **OK** в окне выбора **Reselect areas**.
- Закрываем окно **Component Manager**.

Шаг 21. Сохранение созданной модели в отдельном db-файле

Utility Menu > File > Save as...

При использовании пункта главного меню появляется окно выбора ***Save DataBase***. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, ***C:\example2***), в которой будет храниться файл, полностью соответствует примеру 1 этого раздела, однако в данном случае, необходимо определить другое имя файла (например, ***example2.db***) в окне ***Save DataBase to***.

Пример 3. Модель радиального сечения двуслойной брони и пули с твердосплавным сердечником

Пример демонстрирует, что при решении осесимметричной задачи можно ограничиться созданием плоской модели осевого сечения пули и брони. Это сократит количество элементов модели, время решения задачи, позволит без привлечения дополнительных средств изучить изменение напряженно-деформированного состояния двуслойной брони и пули.

Пример демонстрирует то, что средства просмотра результатов решения ANSYS/LS-DYNA не всегда адекватно интерпретируют численные данные. Показано также, что LS-PREPOST обладает большей надежностью в визуализации решения.

Шаг 1. Создание ключевых точек, определяющих половину профиля листа двуслойной брони и пули с сердечником

Создаем одиннадцать ключевых точек на рабочей плоскости, определяющие профиль пули и композиционной брони. Для этого вводим их номера и координаты.

Пункт главного меню

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

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

- 1-я ключевая точка имеет координаты ***(0;0)***, поэтому поля ввода можно оставить пустыми.

- Нажимаем кнопку *Apply*, т.к. точки будут продолжать создаваться
- 2-я ключевая точка имеет координаты $(0.05;0)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 3-я ключевая точка имеет координаты $(0;0.002)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 4-я ключевая точка имеет координаты $(0;0.005)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 5-я ключевая точка имеет координаты $(0;0.015)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 6-я ключевая точка имеет координаты $(0;0.04)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 7-я ключевая точка имеет координаты $(0.0015;0.04)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 8-я ключевая точка имеет координаты $(0.0025;0.04)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 9-я ключевая точка имеет координаты $(0.002;0.035)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 10-я ключевая точка имеет координаты $(0.003;0.035)$.
- Нажимаем кнопку *Apply*.
- 11-я ключевая точка имеет координаты $(0;0.016)$.
- Нажимаем кнопку *OK*, т.к. создание ключевых точек на данном этапе закончено (Рисунок 32).

Список команд

/PREP7

K,1

K,2,0.05

K,3,,0.002

K,4,,0.005

K,5,,0.015

K,6,,0.04

K,7,0.0015,0.04

K,8,0.0025,0.04

K,9,0.002,0.035

K,10,0.003,0.035

K,11,,0.016

Результаты выполнения шага 1.

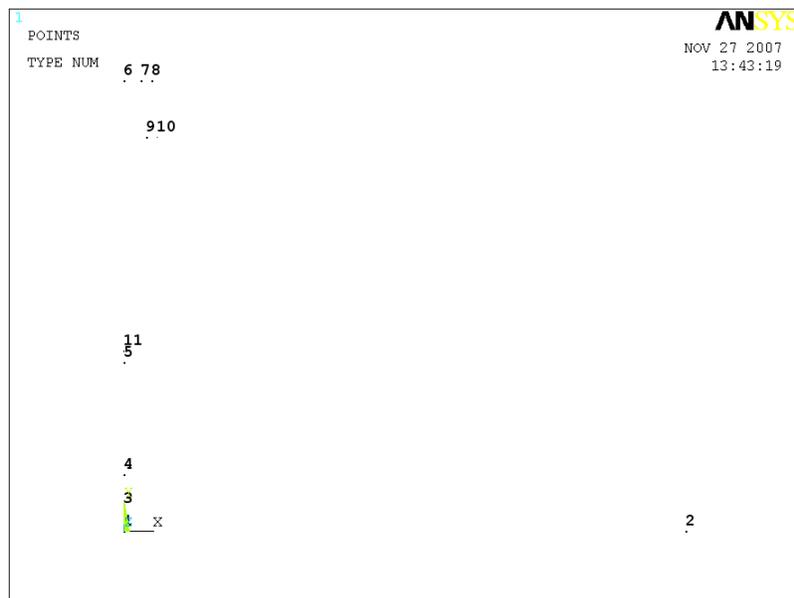


Рисунок 32. Результат создания ключевых точек

Шаг 2. Соединение некоторых ключевых точек прямыми линиями

Пункт главного меню

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

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

- Последовательно указываем ключевые точки **1** и **2**. Эти точки автоматически соединятся прямой линией.

З а м е ч а н и е! Последовательность указания точек важна, т.к. в дальнейшем будет проводиться операция вытягивания.

- Затем указываем пары ключевых точек, *1* и *3*, *3* и *4*, *5* и *11*, *11* и *6*, *6* и *7*, *7* и *8*. Эти пары точек будут соединены прямыми линиями.
- Нажимаем кнопку **OK** (Рисунок 33).

Список команд

LSTR,1,2

LSTR,1,3

LSTR,3,4

LSTR,5,11

LSTR,11,6

LSTR,6,7

LSTR,7,8

Результаты выполнения шага 2

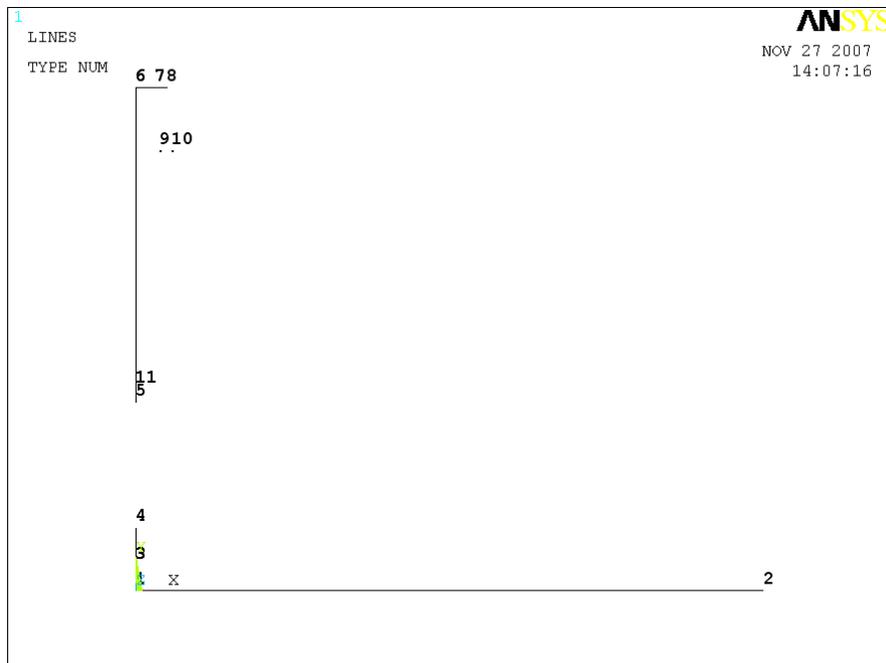


Рисунок 33. Результат построения всех прямых линий границы модели

Шаг 3. Создание сплайна по ключевым точкам

Рисуем контур сердечника и его оболочки по ключевым точкам **5**, **10**, **8** и **11**, **9**, **7**.

Пункт главного меню

Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Lines> Splines> Spline thru KPs

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора **B-Spline**. В этом случае:

- Последовательно указываем ключевую точку **5** (начало сплайна), **10** и **8** (конец сплайна).
- Нажимаем кнопку **Apply**, т.к. необходимо построить еще один сплайн.
- Последовательно указываем ключевую точку **11** (начало сплайна), **9** и **7** (конец сплайна).
- Нажимаем кнопку **OK** (Рисунок 34).

Список команд

BSPLIN,5,10,8

BSPLIN,11,9,7

Результаты выполнения шага 3

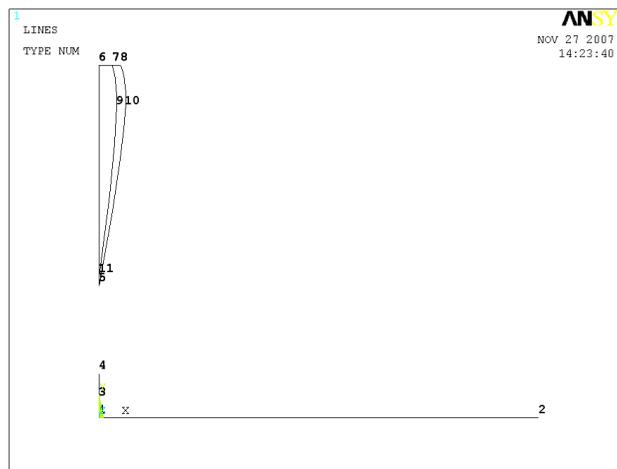


Рисунок 34. Промежуточные результаты построения границы модели

*Шаг 4. Включение нумерации линий*Пункт меню утилит**Utility Menu > PlotCtrls > Numbering...**

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора **Plot Numbering Controls**. В этом случае:

- Устанавливаем флаг On в пункте **LINE Line numbers**.
- Нажимаем кнопку **OK**.

Команда**/PNUM,LINE,1***Шаг 5. Отображение линий*Пункт меню утилит**Utility Menu > Plot > Lines**

После выполнения данного шага появятся нумерованные линии модели (Рисунок 35).

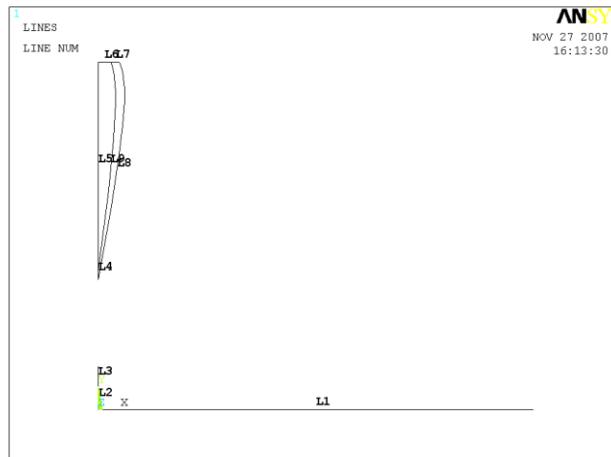
Команда**LPLLOT,ALL**

Рисунок 35. Результаты включения нумерации линий

Шаг 6. Деление линии основания

Пункт главного меню

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

При использовании данного пункта меню:

- С помощью окна выбора **Div Line into N Lines** указываем линию **L1** (Рисунок 36).
- Нажимаем кнопку **OK**.
- В поле **NDIV** появившегося окна **Div Line into N Lines** указываем, что линия делится на **4** части.
- Нажимаем кнопку **OK** (Рисунок 37).

Команда

LDIV,1,,4,0

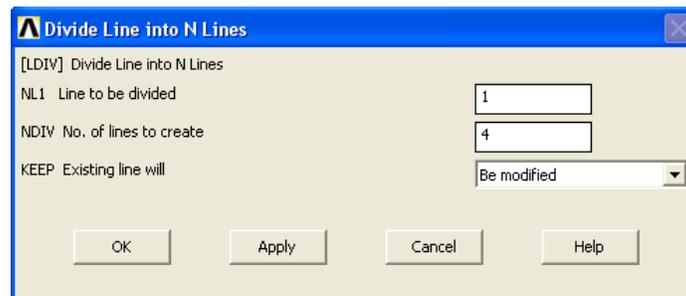


Рисунок 36. Окно *Divide Line into N Lines*

Результаты выполнения шага 6

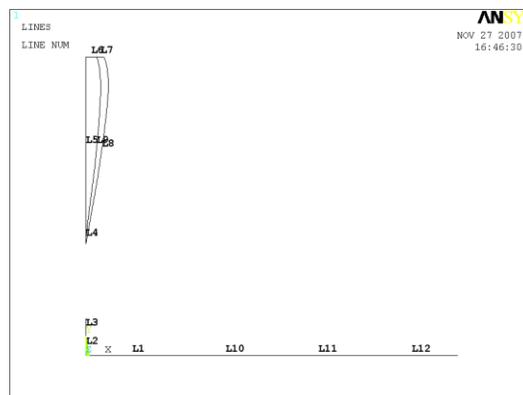


Рисунок 37. Результаты разбиения нижней границы модели

Шаг 7. Объединение некоторых линий

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Add > Lines

При использовании данного пункта меню необходимо:

- С помощью появившегося окна выбора **Add Lines** указать линии **L10, L11, L12**, которые необходимо объединить.
- Нажать кнопку **OK**.
- В появившемся окне **Add Lines** (Рисунок 38) необходимо подтвердить, что старые линии будут удалены, т.е. выбрать пункт **Deleted** раскрывающегося списка **KEEP Existing lines will be**.
- Нажать кнопку **OK** (Рисунок 39).

Список команд

LSEL,S,LINE,,10,12,1,0

LCOMB,ALL,,0

LSEL,ALL

/REPLOT

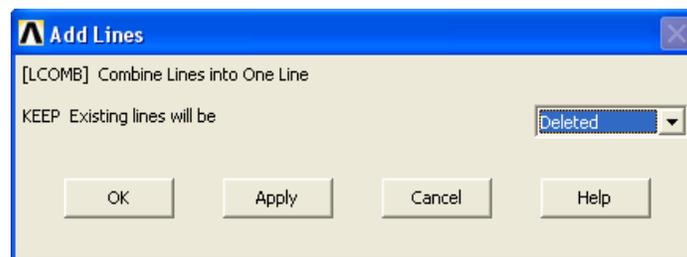


Рисунок 38. Окно Add Lines

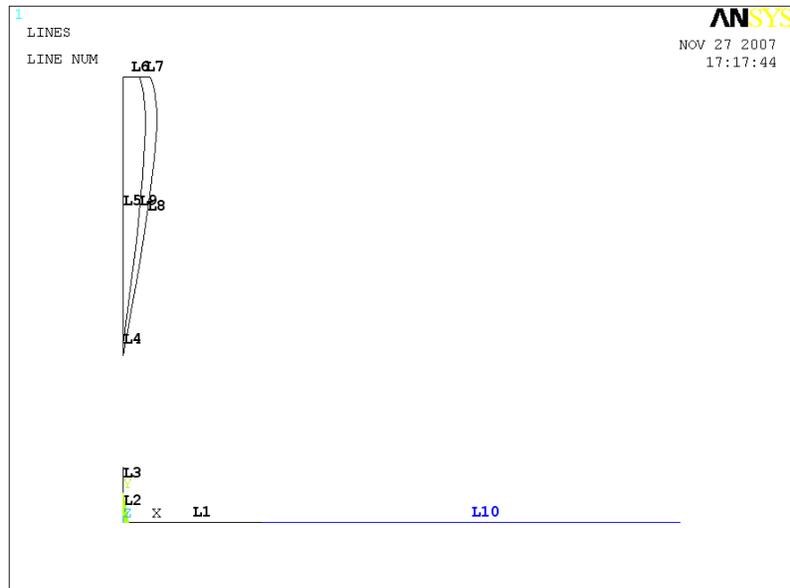


Рисунок 39. Результат выполнения шага 6

Шаг 8. Создание поверхностей по линиям, имитирующим сечение пули

Пункт главного меню

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

- При использовании указанного пункта меню появится окно выбора ***Create Area By Lines***, с помощью которого следует указать линии ***L5, L6, L9***, являющиеся границами поверхности, имитирующих сечение сердечника.
- Нажать кнопку ***Apply*** для подтверждения окончания выбора.
- Далее следует указать линии ***L4, L7, L8, L9***, являющиеся границами поверхности, имитирующих покрытие пули мягким металлом.
- Нажать кнопку ***OK*** для подтверждения окончания выбора (Рисунок 40).

Команда

AL,5,6,9

AL,4,7,8,9

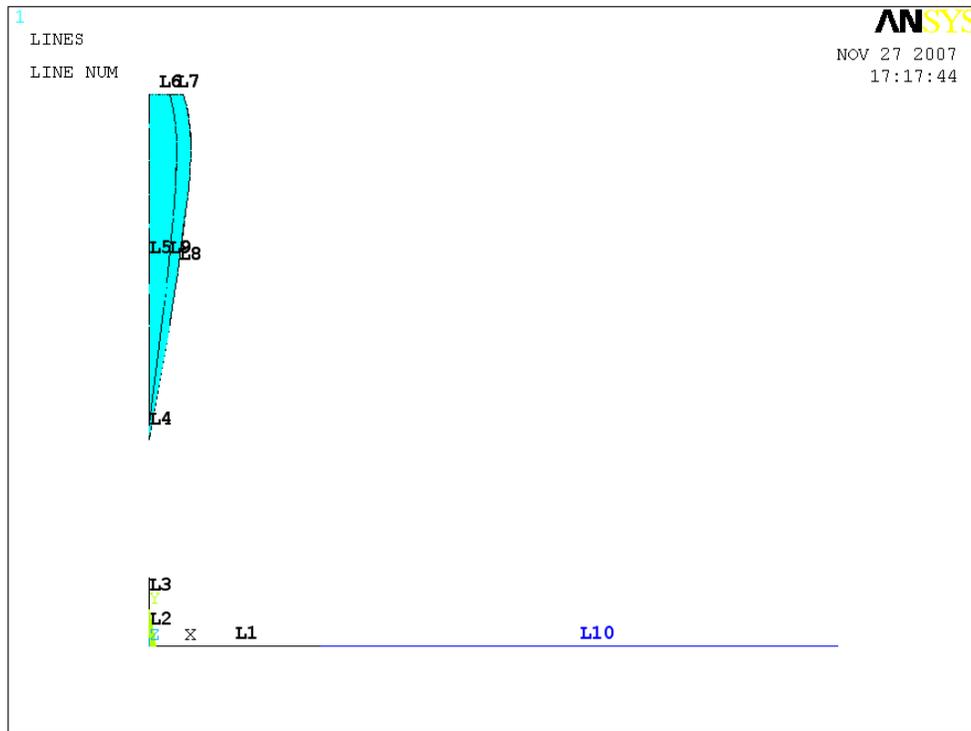


Рисунок 40. Результат выполнения шага 7

Шаг 9. Создание вытягиванием поверхностей, имитирующих бронелисты

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modelling > Operate > Extrude > Lines > Along Lines

При использовании данного пункта меню необходимо:

- С помощью первого окна выбора ***Sweep Lines along Lines*** выбрать линии ***L2*** и ***L3***, которые будут участвовать в вытягивании.
- Нажать кнопку ***OK***.
- С помощью второго окна выбора ***Sweep Lines along Lines*** необходимо выбрать линии ***L1*** и ***L10***, вдоль которых будет осуществляться вытягивание.
- Нажать кнопку ***OK***.

З а м е ч а н и е! После выполнения команд иногда необходимо перерисовать отображаемую фигуру с помощью пункта меню утилит ***Utility Menu > Plot > Replot***.

Команда*ADRAG,2,3,,,,,1,10**Шаг 10. Удаление вспомогательных линий*Пункт главного меню*Main Menu> Preprocessor> Modelling> Delete> Line and Below*

При использовании пункта главного меню в окне выбора *Delete Line and Below* нажимаем кнопку *Pick All*.

З а м е ч а н и е! Появится несколько последовательных сообщений об ошибке, заключающейся в том, что большинство линий присоединены к существующим поверхностям. В этом случае необходимо последовательно несколько раз нажать кнопку *Proceed* (Рисунок 41).

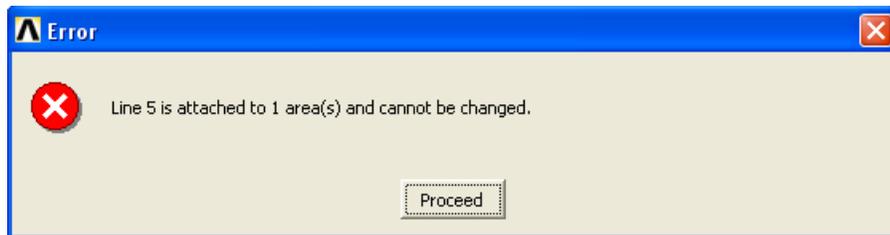


Рисунок 41. Вспомогательное сообщение об ошибке

Список команд*LDELETE,ALL**Шаг 11. Отображение созданных поверхностей*Пункт меню утилит*Utility Menu> Plot> Areas*

После выполнения данного шага появятся поверхности модели (Рисунок 42).

Команда**APLOT**

Шаг 12. Сохранение созданной модели в отдельном db-файле

Utility Menu > File > Save as...

При использовании пункта главного меню появляется окно выбора **Save DataBase**. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, *C:\example3*), в которой будет храниться файл (Рисунок 42), полностью соответствует примеру 1 этого раздела, однако в данном случае, необходимо определить другое имя файла (например, *example3.db*) в окне **Save DataBase to**.

Результат построения твердотельной модели для примера 3

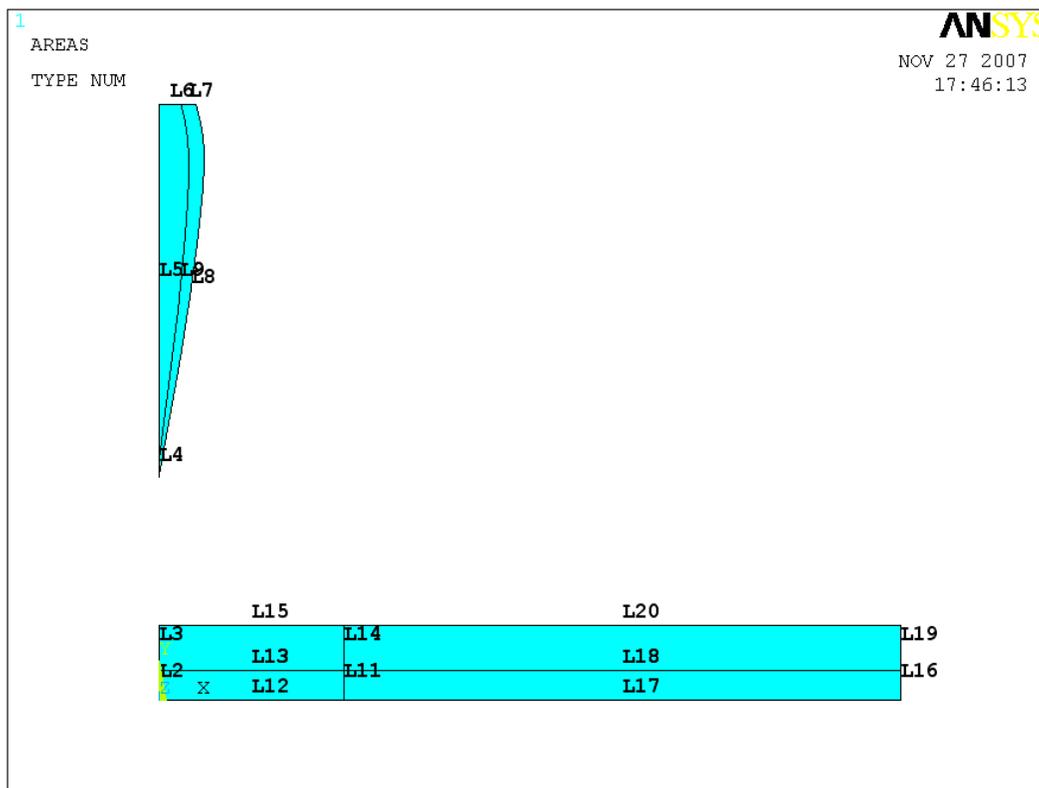


Рисунок 42. Результат построения сечения пули и бронелистов

Пример 4. Модель конической оболочки

Пример демонстрирует, каким образом деформируется коническая оболочка. Отличительной чертой созданной модели является то, что рассматривается четверть оболочки, а остальная часть заменяется соответствующими закреплениями. Кроме того, установлено, что *Result Viewer* ANSYS/LS-DYNA неадекватно отображает формоизменение оболочки по сравнению с LS-PREPOST.

В примере использована технология создания твердотельного объекта «сверху вниз».

Шаг 1. Создание четверти усеченного конуса

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cone > By Dimentions

В полях ввода появившегося диалогового окна *Create Cone by Dimentions* (Рисунок 43):

- В поле **RBOT** вводим значение **1** (м).
- В поле **RTOP** вводим значение **0.3** (м).
- В первом поле раздела **Z1, Z2 Z-coordinates** оставляем значение **0** («по умолчанию»), а во втором поле вводим значение **1** (м).
- Поле **THETA1** оставляем без изменений.
- В поле **THETA2** вводим значение **90** (градусов).
- Нажимаем кнопку **OK** (Рисунок 44).

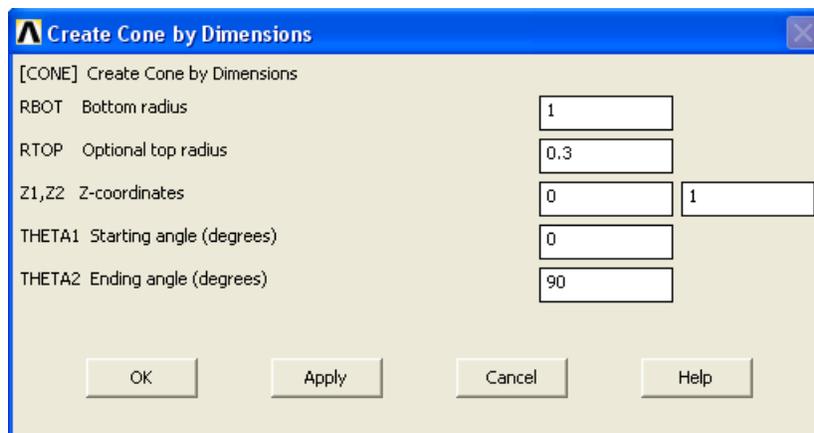


Рисунок 43. Окно *Create Cone by Dimentions*

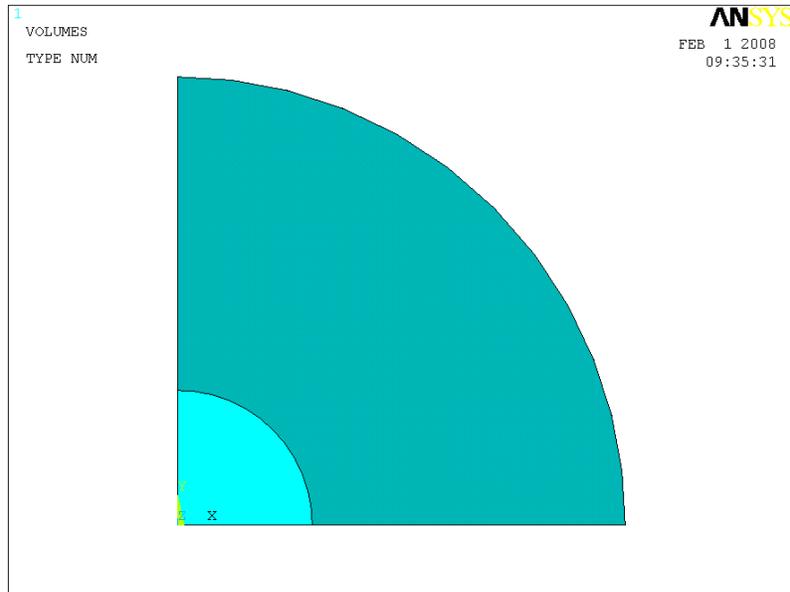
Список команд***/PREP7******CONE,1,0.3,0,1,0,90***Результаты выполнения шага 1.

Рисунок 44. Результат создания четверти конуса

Шаг 2. Удаление объема без удаления поверхностей

Пункт главного меню***Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Volumes Only***

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора ***Delete Volumes Only***. В этом окне необходимо нажать кнопку ***Pick All***.

Список команд***VDELE***

Шаг 3. Включение нумерации поверхностей

Пункт меню утилит

Utility Menu > PlotCtrls > Numbering...

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора **Plot Numbering Controls**. В этом случае:

- Устанавливаем флаг On в пункте **AREA Area numbers**.
- Нажимаем кнопку **OK**.

Список команд

/PNUM,AREA,1

Шаг 4. Отображение поверхностей модели

Пункт меню утилит

Utility Menu > Plot > Areas

Список команд

APLOT

Результаты выполнения шага 4

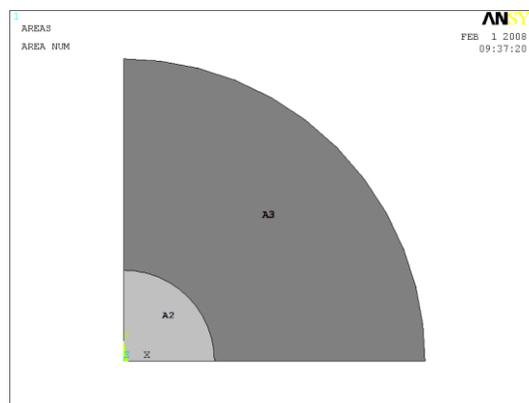


Рисунок 45. Отображение поверхностей модели

Шаг 5. Удаление поверхностей, кроме А3

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Area and Below

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора **Delete Area and Below**. В нем во второй секции необходимо:

- Выбрать опцию **Box** (Рисунок 46).
- С помощью прямоугольника выбрать все поверхности модели (Рисунок 47).
- В первой секции окна выбрать опцию **Unpick** (Рисунок 48).

З а м е ч а н и е! Курсор (стрелка) должен перевернуться

- Выбрать поверхность **А3**. Для этого в поле ввода четвертой секции необходимо ввести номер **3** (Рисунок 49) и нажать на **Enter** на клавиатуре.
- Нажать кнопку **OK** в окне **Delete Area and Below** (Рисунок 50).

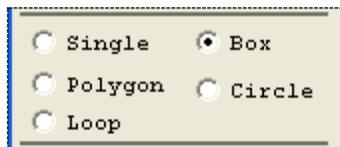


Рисунок 46. Вторая секция окна *Delete Area and Below* с выбранной опцией *Box*

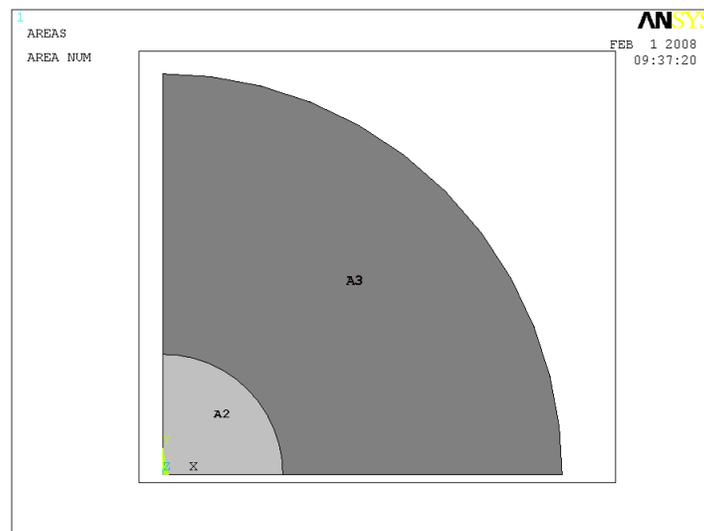


Рисунок 47. Выбор поверхностей всей модели



Рисунок 48. Первая секция окна с выбранной опцией *Unpick*



Рисунок 49. Четвертая секция окна *Delete Area and Below* с введенным номером поверхности

Список команд

ADELE,1,2,1,1

ADELE,4,5,1,1

/REPLOT

Результаты выполнения шага 5

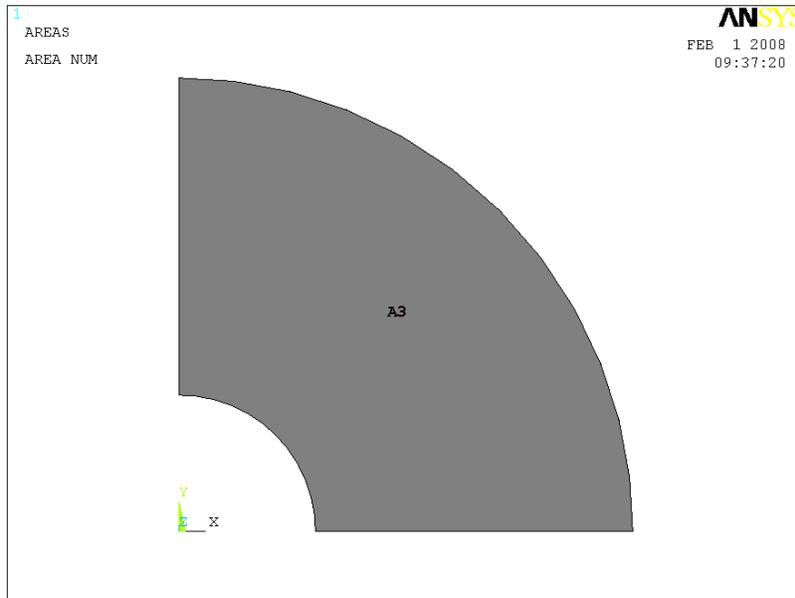


Рисунок 50. Отображение оставшейся поверхности модели

Шаг 6. Включение нумерации линий и выключение поверхностей

Пункт меню утилит

Utility Menu > PlotCtrl > Numbering...

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

- устанавливаем флаг On в окне с меткой ***LINE***;
- устанавливаем флаг Off в окне с меткой ***AREA***;
- нажимаем кнопку ***OK*** для подтверждения окончания выбора.

Список команд

/PNUM,AREA,0

/PNUM,LINE,1

Шаг 7. Отображение линий

Пункт меню утилит

Utility Menu > Plot > Lines

После выполнения данного шага появятся нумерованные линии модели (Рисунок 51).

Список команд

L PLOT

Результаты выполнения шага 7

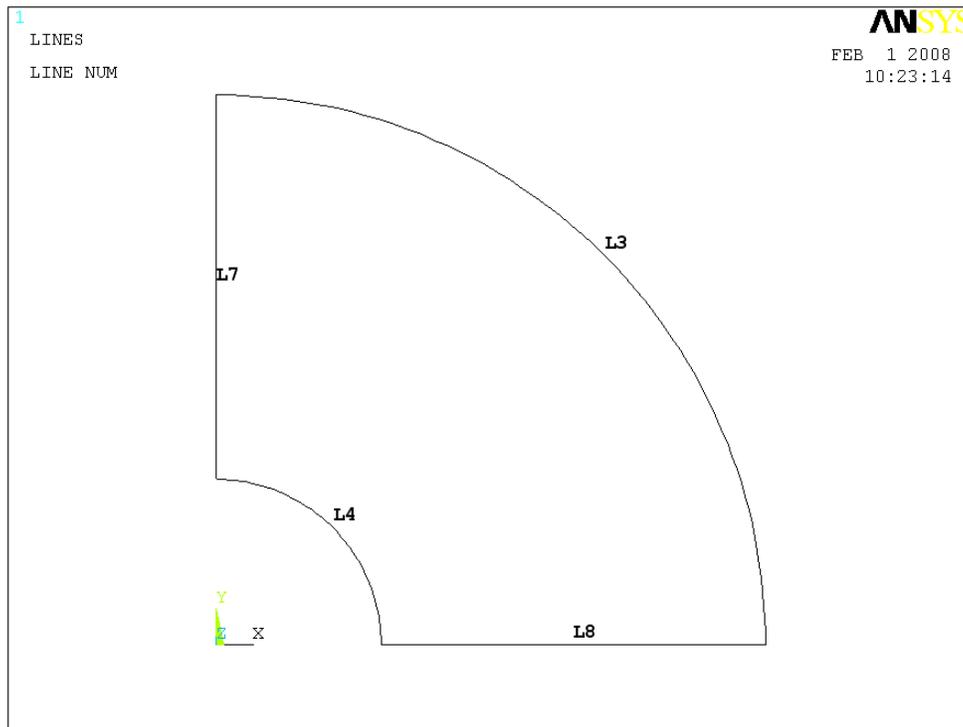


Рисунок 51. Нумерация линий модели

Шаг 8. Создание «составных частей» (component) из линий модели

Utility Menu > Select > Component Manager...

При использовании данного пункта меню появится окно **Component Manager**. Далее необходимо:

- Нажать первую кнопку **Create Component**  окна **Component Manager**.
- В появившемся окне **Create Component** выбираем раздел **Lines**, указываем, что выбор будет осуществляться с помощью «мыши» (необходимо поставить флаг в разделе **Pick Entities**), в окне ввода указываем имя новой «составной части» (**component**) (в данном случае **LINE_3**).
- Нажимаем кнопку **OK**.
- Далее необходимо с помощью «мыши» выбрать линию **L3** (Рисунок 51) и нажать кнопку **OK** в окне выбора **Reselect lines**.

- Нажать первую кнопку **Create Component**  окна **Component Manager**.
- В окне ввода указываем имя новой «составной части» (**component**) (в данном случае **LINE_4**).
- Нажимаем кнопку **OK**.
- Далее необходимо с помощью «мыши» выбрать линию **L4** (Рисунок 51) и нажать кнопку **OK** в окне выбора **Reselect lines**.
- Нажать первую кнопку **Create Component**  окна **Component Manager**.
- В окне ввода указываем имя новой «составной части» (**component**) (в данном случае **LINE_7**).
- Нажимаем кнопку **OK**.
- Далее необходимо с помощью «мыши» выбрать линию **L7** (Рисунок 51) и нажать кнопку **OK** в окне выбора **Reselect lines**.
- Нажать первую кнопку **Create Component**  окна **Component Manager**.
- В окне ввода указываем имя новой «составной части» (**component**) (в данном случае **LINE_8**).
- Нажимаем кнопку **OK**.
- Далее необходимо с помощью «мыши» выбрать линию **L8** (Рисунок 51) и нажать кнопку **OK** в окне выбора **Reselect lines**.
- Закрываем окно **Component Manager**.

Шаг 9. Сохранение созданной модели в отдельном db-файле

Utility Menu > File > Save as...

При использовании пункта главного меню появляется окно выбора **Save DataBase**. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, **C:\example4**), в которой будет храниться файл, полностью соответствует примеру 1 этого раздела, однако в данном случае, необходимо определить другое имя файла (например, **example4.db**) в окне **Save DataBase to**.

Пример 5. Модель каркаса

Пример демонстрирует возможности решения динамических задач, для каркасных конструкций. К каркасу приложены нагрузки, которые можно интерпретировать как смещение грунта при землетрясении. Кроме того, пример демонстрирует методику построения модели «сверху-вниз», т.е. вначале будет создан трехмерный твердотельный объект, затем будут последовательно удалены объем и грани объекта, а останутся только ребра и ключевые точки.

Шаг 1. Создание правильной призмы

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Prism > Triangular

В полях ввода появившегося диалогового окна ***Triangular Prism*** вводим значения, определяющие геометрические размеры каркаса (Таблица 1), и затем нажимаем кнопку ***OK*** (Рисунок 52).

З а м е ч а н и е! Нулевые значения можно не вводить, а оставить пустыми соответствующие поля ввода окна ***Triangular Prism***.

Таблица 1. Значение полей окна *Triangle Prism*

| <i>Наименование параметра</i> | <i>Значение</i> |
|--------------------------------------|------------------------|
| <i>WP X</i> | <i>0</i> |
| <i>WP Y</i> | <i>0</i> |
| <i>Radius</i> | <i>10</i> |
| <i>Theta</i> | <i>90</i> |
| <i>Depth</i> | <i>10</i> |

Список команд***/PREP7******RPR4,3,,10,90,10***

З а м е ч а н и е! Поля для ввода координаты в командах можно оставлять пустыми, в этом случае «по умолчанию» они будут равны нулю.

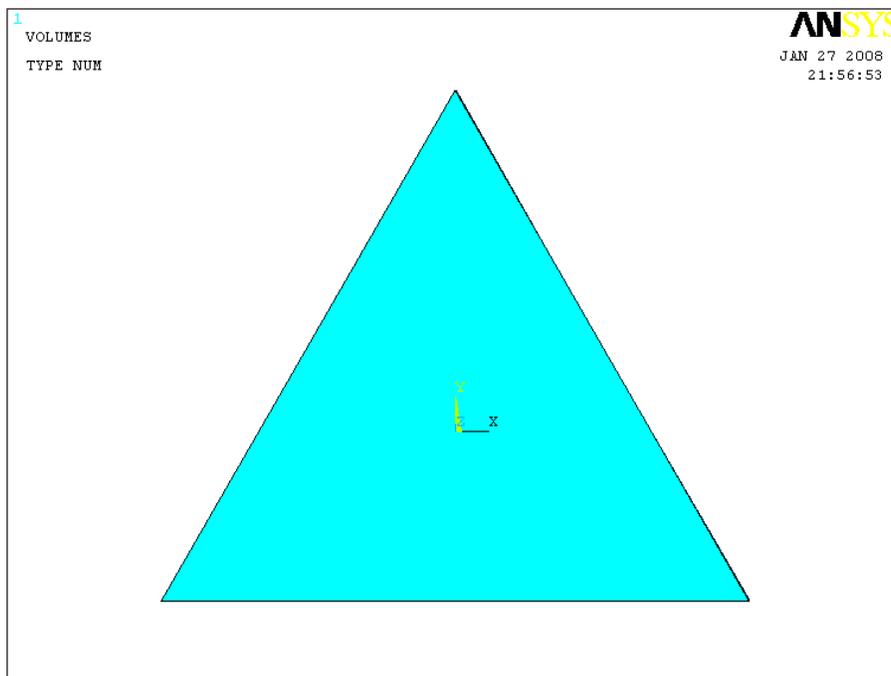
Результаты выполнения шага 1.

Рисунок 52. Результат создания призмы

Шаг 2. Удаление объема, без удаления граней, ребер и вершин

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Volumes Only

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора ***Delete Volumes Only***. В нем необходимо нажать кнопку ***Pick All***.

Список команд**VDELE**

Шаг 3. Удаление граней пирамиды, без удаления ребер и вершин

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Areas Only

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора **Delete Areas Only**. В нем необходимо нажать кнопку **Pick All**.

Список команд**ADELE**

Шаг 4. Включение нумерации ключевых точек и линий

Пункт меню утилит

Utility Menu > PlotCtrls > Numbering...

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора **Plot Numbering Controls**. В этом случае:

- Устанавливаем флаг On в пункте **KP Keypoint numbers**.
- Устанавливаем флаг On в пункте **LINE Line numbers**.
- Нажимаем кнопку **OK**.

Список команд

/PNUM,KP,1

/PNUM,LINE,1

Шаг 5. Отображение линий

Пункт меню утилит

Utility Menu > Plot > Lines

Список команд

L PLOT

Шаг 6. Просмотр модели в изометрии

Для отображения модели в изометрии следует воспользоваться кнопкой

Isometric View  на дополнительной панели инструментов (Рисунок 53) либо воспользоваться пунктом меню утилит **Utility Menu > PlotCtrl > Pan Zoom Rotate...**. В появившемся окне **Pan-Zoom-Rotate** во второй секции следует воспользоваться кнопкой **Iso**.

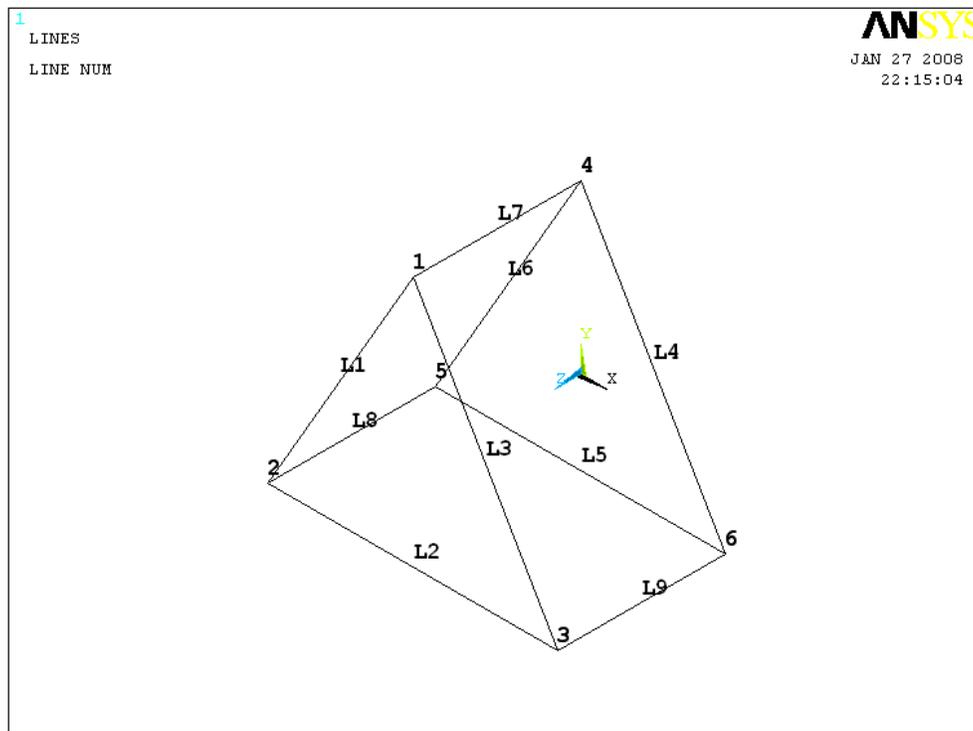


Рисунок 53. Изометрия модели

Шаг 7. Сохранение созданной модели в отдельном db-файле

Utality Menu > File > Save as...

При использовании пункта главного меню появляется окно выбора *Save DataBase*. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, *C:\example5*), в которой будет храниться файл, полностью соответствует примеру 1 этого раздела, однако в данном случае, необходимо определить другое имя файла (например, *example5.db*) в окне *Save DataBase to*.

Использование моделей материалов и типов конечных элементов LS-DYNA

Выбор опции *LS-DYNA Explicit* в ANSYS осуществляется с использованием пункта главного меню:

Main Menu > Preferences ...

При использовании данного пункта появляется диалоговое окно *Preferences for GUI Filtering* (Рисунок 54), в котором необходимо установить флаг напротив *LS-DYNA Explicit* в разделе *Discipline options* и подтвердить выбор с помощью кнопки **OK**.

З а м е ч а н и е! С помощью данного пункта можно решить только задачи структурного анализа.

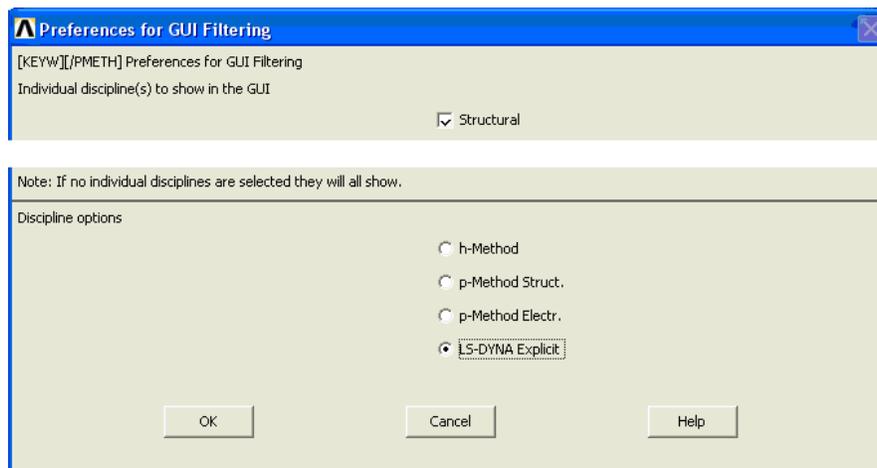


Рисунок 54. Выбор типа решаемой задачи

После выполнения указанных действий остаются доступными только пункты главного меню, непосредственно связанные с решением структурных задач.

Далее последовательность действий имеет вид:

- Выбираем тип конечных элементов раздела *LS-DYNA Explicit* (Определяем необходимые опции и константы.)
- Выбираем модель деформирования материала. (Определяем необходимые опции и константы.)
- Последовательно присваиваем номер материала и набора констант соответствующей компоненте модели.
- Строим конечно-элементное разбиение.

З а м е ч а н и е! Последовательность действий изменить нельзя.

Элементы ANSYS / LS-DYNA. Общие сведения

LS-DYNA Explicit имеет собственные элементы, которые не используются в ANSYS. Однако, также как и в ANSYS каждый тип элементов имеет свое имя, например *BEAM161*. Имя имеет две части: буквенную, обозначающую категорию элемента и цифровую, обозначающую его номер.

Вырожденные элементы

Вырожденные элементы, это элементы, имеющие изначально четырехугольную или шестигранную форму, но путем совмещения двух или более узлов принявшие форму треугольника для плоских элементов или четырехгранника, призмы либо клина для объемных. Обычно подобные элементы возникают в местах перехода от более грубого к более мелкому разбиению, а также при моделировании тел сложной формы.

Выбор используемых элементов

Чтобы выбрать элементы, которые будут использоваться в модели, необходимо выбрать пункт меню:

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

При выборе данного пункта появится диалоговое окно *Element Types* (Рисунок 55).

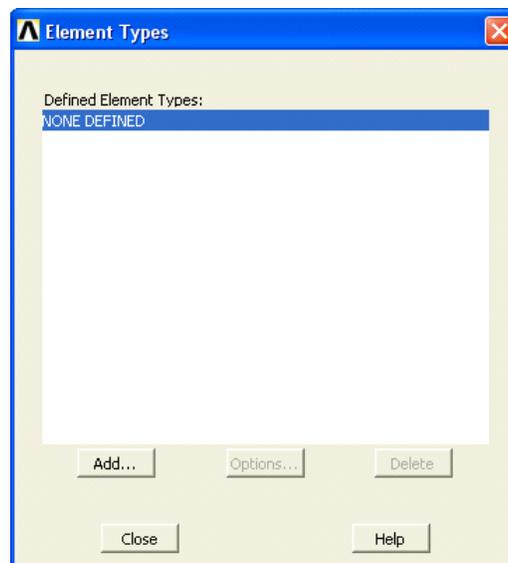


Рисунок 55. Диалоговое окно *Element Types*

Список *Defined Element Types* содержит типы элементов, которые выбраны для использования в текущей модели. В списке приводятся следующие данные:

- номер, который присвоен данному типу элемента в модели;
- название типа элемента.

Если выбранных типов элементов нет, в списке появляется надпись ***NONE DEFINED***.

В диалоговом окне находятся несколько кнопок, выполняющих следующие действия:

- ***Add...*** – позволяет добавить к списку используемых типов элементов новый тип.
- ***Options*** – позволяет настроить выбранный в списке тип элементов. При ее нажатии появляется диалоговое окно настройки типов элементов. Данное окно имеет свой вид для каждого типа элементов.
- ***Delete*** – кнопка, позволяющая удалить выбранный в данный момент тип элементов.
- ***Close*** – закрывает диалоговое окно.
- ***Help*** – выводит на экран справку.

При нажатии кнопки ***Add*** на экран выводится диалоговое окно ***Library of Element Types***, содержащее библиотеку типов элементов (Рисунок 56).

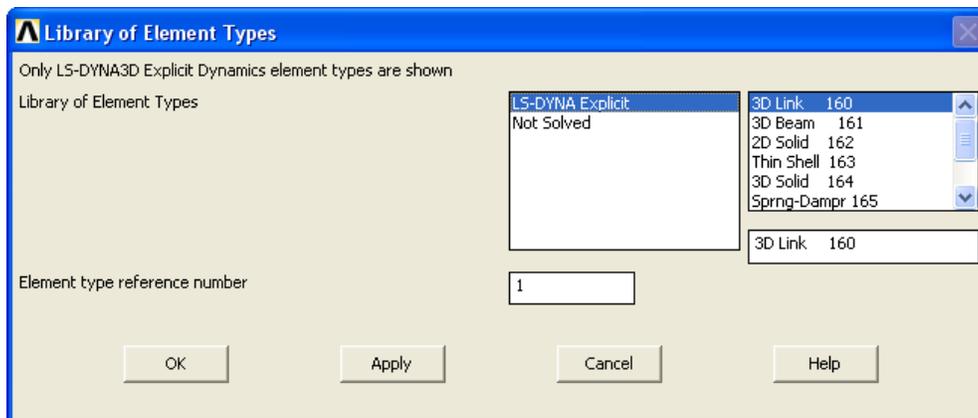


Рисунок 56. Диалоговое окно выбора типа элементов

В левом списке ***Library of Element Types*** расположен только один раздел ***LS-DYNA Explicit***. В правом появляется список элементов, относящихся к данному разделу. Описание элемента, как правило, содержит

данные о размерности задачи (двумерная или трехмерная), и особенностях моделей, для которых он используется (оболочки, твердые тела и пр.).

Определение констант используемых элементов с помощью пункта *Real Constants*

Для того, чтобы задать константы элементов, которые будут использоваться в модели, необходимо выбрать пункт меню:

Main Menu > Preprocessor > Real Constants

При выборе данного пункта появится диалоговое окно *Real Constants*. Список *Real Constants* содержит список элементов, для которых определены константы в текущей модели. В списке приводятся следующие данные (Рисунок 57):

- номер, который присвоен данному типу элемента в модели;
- название типа элемента.

Если для выбранных элементов нет констант, в списке появляется надпись **NONE DEFINED**.

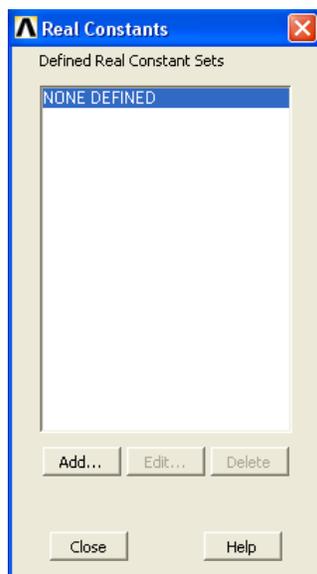


Рисунок 57. Окно *Real Constants*

В диалоговом окне находятся несколько кнопок, выполняющих следующие действия:

- **Add...** – позволяет добавить к списку элементов с определенными константами новые элементы и их константы. После нажатия

данной клавиши появится окно *Element Type for ...* (Рисунок 58), в котором необходимо из списка уже существующих элементов (выбранных ранее с помощью окна *Defined Element Types*) выбрать элементы, для которых будут определены константы. Для подтверждения выбора следует нажать **OK**. После этого появится окно, в котором следует заполнить константы, используемые данным типом элементов и нажать **OK**.

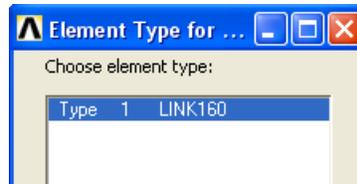


Рисунок 58. Окно *Element Type for ...*

- **Edit...** – позволяет отредактировать уже определенные константы. После нажатия этой кнопки появится окно *Element Type for ...* (Рисунок 58) и далее необходимо повторить порядок действий аналогичный действиям при использовании кнопки *Add...*
- **Delete** – кнопка, позволяющая удалить выбранный в данный момент тип элементов.
- **Close** – закрывает диалоговое окно.
- **Help** – выводит на экран справку.

Основные элементы *LS-DYNA Explicit* и их константы

Элементы 3D Mass 166

Элементы *MASS166* используются в решении динамических задач с сосредоточенными массами. Это точечный элемент, имеющий девять степеней свободы. Элемент *MASS166* определяется одной узловой точкой с сосредоточенной массой.

Элемент дает возможность определить сосредоточенную инерцию вращения в узловых точках. При включенной опции учета инерции вращения необходимо дополнительно определить шесть полярных моментов инерции. Выбор опции учета массы или инерции вращения выполняется с помощью кнопки *Options...* в окне *Element Types*.

Для использования и массы, и инерции вращения необходимо использовать два элемента для одной и той же узловой точки.

Нельзя приложить к данному типу элементов поверхностные и объемные нагрузки.

З а м е ч а н и е! Необходимо задать фиктивные свойства материалов для определения корректного поведения элемента, хотя эти свойства не используются в решении.

Элементы 3D Link 160

Элементы *LINK160* используются в инженерных задачах для моделирования пружин и связей. Элементы работают только на сжатие и растяжение, изгиб для них не учитывается, т.е. предполагается что элемент имеет однородное напряженное состояние. Однако для этого необходимо задать площадь поперечного сечения в разделе *Real Constants*.

Элементы имеют два узла на концах и дополнительный узел для определения ориентации системы координат элемента. Этот узел необходим для определения начальных условий для элемента. Элемент должен иметь не нулевую длину, т.е. узлы не должны совпадать.

Данный тип элементов может использовать: изотропную упругую, билинейную кинематическую и кинематическую-пластическую модели деформирования материалов.

Элементы Link 167

Элементы *LINK167* используются для моделирования поведения упругих тросов. Данные элементы нуждаются в определении одной точки ориентации сечения элемента. Они могут только растягиваться и не сопротивляются сжатию. Этот тип элементов можно использовать только с соответствующим материалом (*Cable* из *Discrete Element Properties*). Эта модель предполагает, что пользователь должен определить следующие параметры плотность (*DENS*), модуль упругости (*EX*) или номер нагрузочной кривой, которая определяется массивом экспериментально измеренных пар точек (*напряжение, деформация*).

Нельзя приложить к данному типу элементов поверхностные и объемные нагрузки.

З а м е ч а н и е! Площадь поперечного сечения должна быть больше нуля.

Элементы *Spring-Dampr 165*

Элементы *COMBI165* используются для моделирования пружинной или демпфирующей систем, и даже таких сложных энерго-поглощающих систем, как подушки безопасности. Данный элемент имеет только две узловые точки (по концам элемента).

З а м е ч а н и е! Невозможно определить одновременно и упругие, и демпфирующие свойства для одного и того же элемента. Для того, чтобы задать оба свойства, необходимо создать два элемента (один с упругими, второй с демпфирующими свойствами) между одними и теми же ключевыми точками.

Для этого элемента можно использовать следующие специальные модели материалов (*LS-DYNA*> *Discrete Element Properties*): линейно-упругие пружины (*Spring*> *Linear Elastic*), упруго-пластическая пружина (*Spring*> *Elastoplastic*), нелинейно упругая пружина (*Spring*> *Nonlinear Elastic*), вязко-упругая модель Максвелла (*Spring*> *Maxwell Viscosity*), неупругое сжатие (*Spring*> *Inelastic*) или амортизатор с линейной (*Damper*> *Linear Viscosity*) или нелинейной вязкостью (*Damper*> *Nonlinear Viscosity*).

Нельзя приложить к данному типу элементов поверхностные и объемные нагрузки.

Элементы *3D Beam 161*

Элементы *BEAM161* используются для моделирования балок. В отличие от *LINK160*, они работают не только на растяжение-сжатие, но и на изгиб.

Элемент *BEAM161* имеет три узла: два на концах и один устанавливающий начальную ориентацию осевого сечения элемента.

Жесткость при скручивании не учитывается.

Данный тип элементов может использовать: изотропную упругую, билинейную кинематическую, кинематическую-пластическую, вязкоупругую модели деформирования материалов, а также модель деформирования по степенному и кусочно-линейному закону пластичности.

Стандартные поперечные сечения балочных элементов

При использовании балочных элементов, следует выбрать форму и размеры их поперечного сечения, с помощью которого система определяет необходимые характеристики элемента. ANSYS/LS-DYNA позволяет использовать несколько разных сечений в одной модели, то есть в одной модели балочные элементы могут иметь разный профиль и размеры поперечного сечения. Доступен набор стандартных сечений (Рисунок 59 - Рисунок 67).

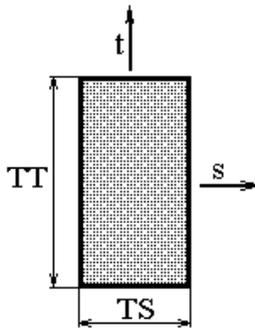


Рисунок 59. Прямоугольник

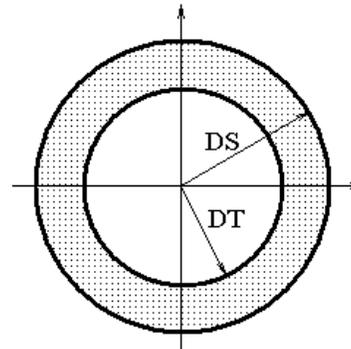


Рисунок 60. Труба

З а м е ч а н и е! На рисунках используются следующие обозначения: d – высота сечения; w – ширина сечения; t_f – толщина полки; t_w – толщина перемычки.

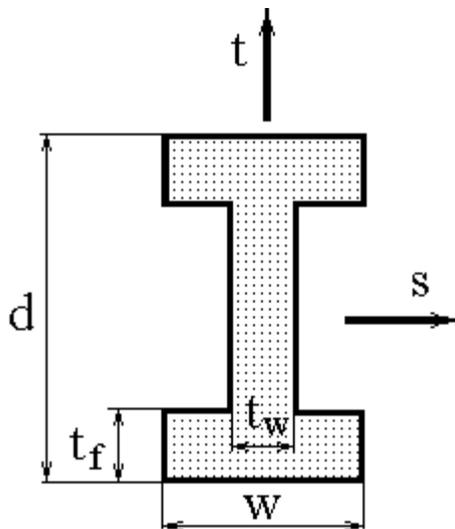


Рисунок 61. W-сечение

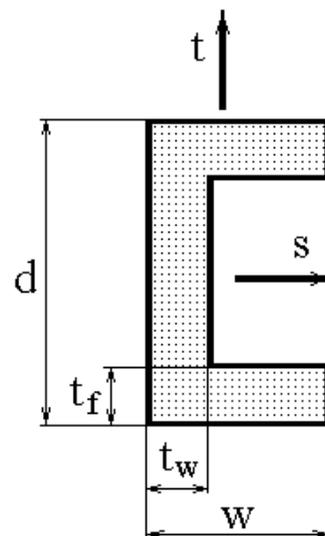


Рисунок 62. С-сечение

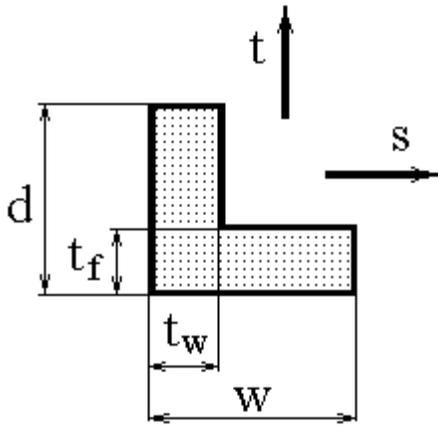


Рисунок 63. Угловое сечение

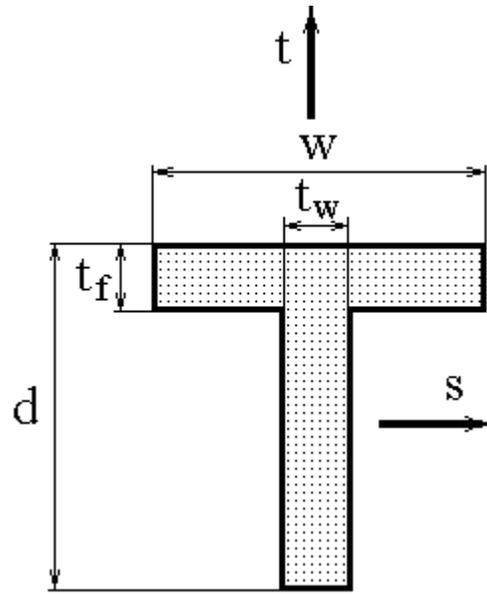


Рисунок 64. Т-сечение

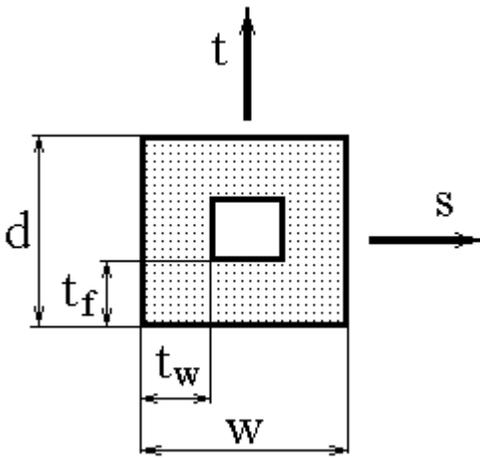


Рисунок 65. Прямоугольная труба

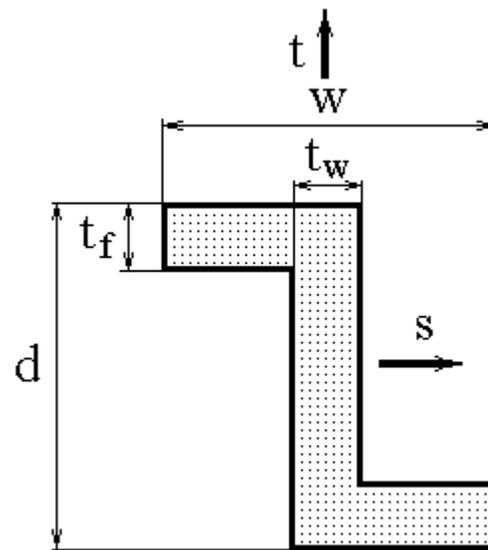


Рисунок 66. Z-сечение

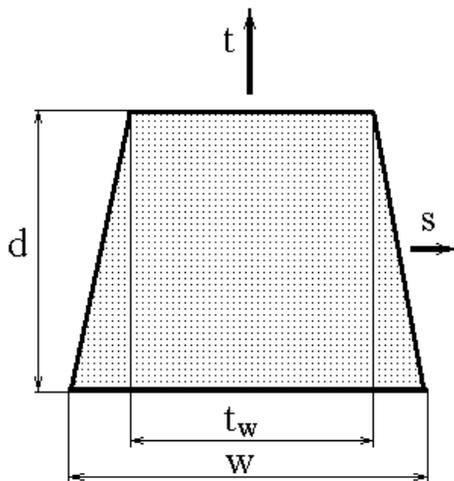


Рисунок 67. Трапецидальное сечение

Константы балочных элементов

В ANSYS / LS-Dyna при определении констант балочных элементов принято двойное условное обозначение узлов, находящихся на концах элемента – I (либо 1), J (либо 2), кроме того, используется узел K , определяющий направление S (Рисунок 68). Кроме того, используются нормированные (относительные) координаты s и t ($s = \{-1, 0, 1\}$, $t = \{-1, 0, 1\}$), определяющие положение осей координат по краям или по центру элемента (Рисунок 68).

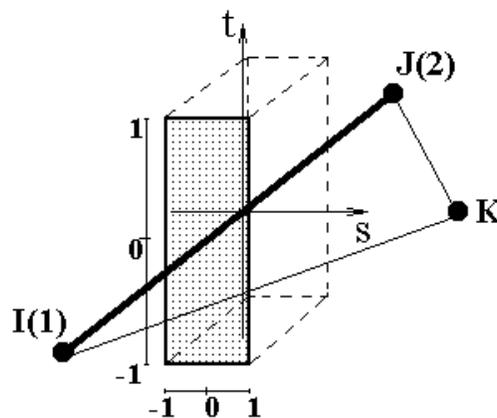


Рисунок 68. Расположение осей и узлов на балочном элементе

Во втором окне **Real Constant Set Number 1** заполняются следующие константы:

- **SHRF** - коэффициент сдвига (по умолчанию **1.0** для прямоугольных сечений рекомендуется **5/6**).

Константы, используемые с опцией **Rectangular** или **Arbitrary**:

- **TS1** - толщина балки в направлении **s** в узле **1 (I)**.
- **TS2** - толщина балки в направлении **s** в узле **2 (J)**.
- **TT1** - толщина балки в направлении **t** в узле **1 (I)**.
- **TT2** - толщина балки в направлении **t** в узле **2 (J)**.

Константы, используемые только с опцией **Tubular**:

- **DS1** - внешний диаметр трубы в узле **1 (I)**.
- **DS2** - внешний диаметр трубы в узле **2 (J)**.
- **DT1** - внутренний диаметр трубы в узле **1 (I)**.
- **DT2** - внутренний диаметр трубы в узле **2 (J)**.

Константы, используемые со всеми опциями только для элементов **Hughes-Liu**:

- **NSLOC** - Местоположение нормали к базовой поверхности на оси **s** Принимает значения (раскрывающийся список):
 1. **1** нормаль к правой грани (**s = 1**);
 2. **0** нормаль к срединной поверхности;
 3. **-1** нормаль к левой грани (**s = -1**);
- **NTLOC** - Местоположение нормали к базовой поверхности на оси **t**. Принимает значения (раскрывающийся список):
 1. **1** нормаль к верхней грани (**t = 1**);
 2. **0** нормаль к срединной поверхности;
 3. **-1** нормаль к нижней грани (**t = -1**);

В третьем окне **Real Constant Set Number 1** заполняются константы:

- **NIP** - число точек интегрирования;
- **A** - площадь поперечного сечения;
- **W** – ширина сечения;
- **D** – высота сечения;
- **RA = A/(W D)** - относительная площадь поперечного сечения;
- **ICST** - стандартный тип поперечного сечения:
 1. **W**-сечение (двуглавое);
 2. **C**-сечение (корытный профиль);
 3. угловое сечение;
 4. **T**-сечение;
 5. прямоугольное сечение;

- 6. **Z**-сечение;
- 7. трапецеидальное сечение;
- **ISS** - момент инерции относительно **s**-оси;
- **ITT** - момент инерции относительно **t**-оси;
- **IRR** - полярный момент инерции;
- **SA** - поверхность сдвига;
- **TF** - толщина полки;
- **TW** - толщина перемычки;

Только для элементов типа Hughes-Liu:

SREF – координата **s** исходной поверхности, перпендикулярной оси **s**. Данный параметр используется, если балочный элемент соединен с оболочечным или другим балочным элементом по внешней поверхности положения начала оси **s** к поверхности элемента;

- **TREF** – положение начала оси **t** к поверхности элемента.

Последовательность действий при выборе балочных элементов и их сечений. Определение соответствующих опций и констант

- Выбираем пункт меню **Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/ Edit/ Delete**. При выборе данного пункта появится диалоговое окно **Element Types** (Рисунок 55).
- Нажимаем кнопку **Add...**
- В окне **Library of Element Types** выбираем элемент **3D Beam 161**.
- Нажимаем **OK**.
- Нажимаем кнопку **Options...**
- В окне **BEAM161 element type options** устанавливаем следующие опции:
 1. Первый раздел **Element Formulation Options**. По умолчанию выбрана универсальная опция **Hughes-Liu** используемая со всеми типами деформирования материалов.
 2. Второй раздел **Qadrature Rule to be used**. По-умолчанию выбрана **2x2 Gauss (def)**.
 3. Третий раздел **Int.Rule arbitrary section (1-9999)**. Окно «по умолчанию» заполнено нулем. Это позволяет в четвертом разделе **Cross section type** выбирать сечения

такие как *Rectangular* (прямоугольный брусок) или *Tubular* (цилиндрическая труба). Если в третьем разделе заполнить окно любой цифрой > 0 , то в четвертом разделе следует выбрать опцию *Arbitrary* (сечение из списка стандартных).

- Нажимаем **OK** в окне *BEAM161 element type options*.
- В окне *Element Types* нажимаем **Close**.
- Далее выбираем пункт меню *Main Menu > Preprocessor > Real Constants*. При выборе данного пункта появится диалоговое окно *Real Constants* (Рисунок 57).
- Нажимаем кнопку *Add... .*
- В появившемся окне выбираем (если элементов несколько) *BEAM161*. Нажимаем **OK**.
- В первом окне *Real Constant Set Number 1, for BEAM161* указываем номер («по умолчанию» будет всегда стоять номер по порядку). Нажимаем **OK**.
- Во втором окне *Real Constant Set Number 1, for BEAM161* следует указать переменные *SHRF, TS1, TS2, TT1, TT2* (либо *SHRF, DS1, DS2, DT1, DT2*), а также выбрать в раскрывающемся меню *NSLOC* и *NTLOC* (см. предыдущий раздел, касающийся описания переменных).
- Нажимаем **OK**.

З а м е ч а н и е! Если в окне *BEAM161 element type options* в третьем разделе *Int.Rule arbitrary section (1-9999)* установлена опция *0*, то определение констант после нажатия **OK** во втором окне *Real Constant Set Number 1, for BEAM161* заканчивается.

- Если в третьем разделе *Int.Rule arbitrary section (1-9999)* окна *BEAM161 element type options* задано не нулевое значение (т.е. выбран пункт *Arbitrary* в четвертом разделе), то появится третье окно выбора *Real Constant Set Number 1, for BEAM161* (Рисунок 69), в котором необходимо задать количество точек интегрирования *No. of int. pts NIP* и относительную площадь поперечного сечения *Relative Area RA*. В раскрывающемся списке *Std. Section type* следует выбрать сечение из набора стандартных сечений, либо оставить указанную «по умолчанию» *Non-Standard(def)* и нажать **OK**.

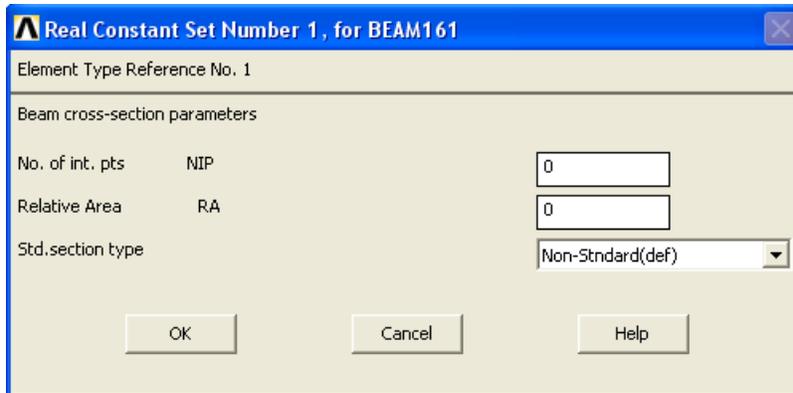


Рисунок 69. Третье окно *Real Constant Set Number*

- Если выбрано стандартное сечение из раскрывающегося списка, то появится четвертое окно *Real Constant Set Number 1, for BEAM161*, в котором необходимо заполнить размеры сечения и нажать **OK**.
- В другом случае (выбрана на предыдущем шаге опция *Non-Standard(def)* и указаны значения параметров *No. of int. pts NIP* и *Relative Area RA*), появится четвертое окно, в котором будет необходимо ввести три массива: массив *t*-координат точек интегрирования $T(i)$, массив *s*-координат точек интегрирования $S(i)$ и массив весовых коэффициентов $WF(i)$, где i – индекс точки интегрирования (Рисунок 70, Рисунок 71) и нажать **OK**.

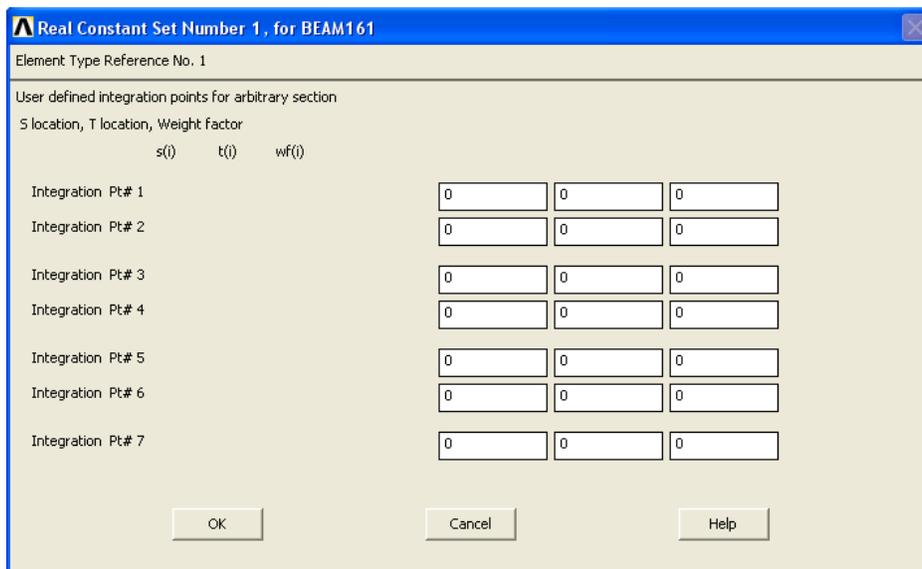


Рисунок 70. Четвертое окно *Real Constant Set Number 1, for BEAM161* для *Non-Standard* сечения

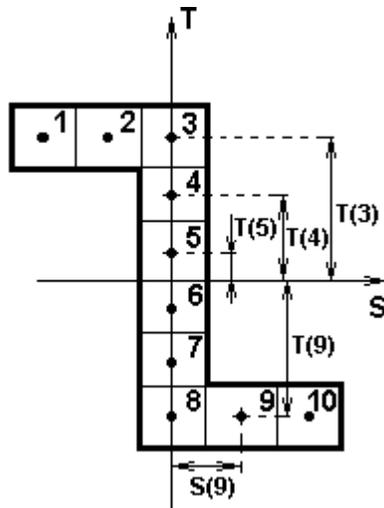


Рисунок 71. Расположение 10 точек интегрирования, и соответствующих массивов $S(i)$ и $T(i)$ на Z сечении

Элементы *2D Solid 162*

Элемент *PLANE162* представляет собой плоский четырехугольник и может использоваться для решения плоских (плоское напряженное и плоское деформированное состояние) и осесимметричных задач (Рисунок 72). Данный элемент имеет четыре узла, но может вырождаться и принимать треугольную форму. Использование данных элементов треугольной формы не рекомендуется.

Данный элемент может использоваться в расчетах на прочность с использованием линейных, а также пластических и других нелинейных материалов.

Предполагается, что площадь этого элемента является ненулевой. При осесимметричном анализе элементы должны быть расположены в плоскости X - Y , при этом Y -ось должна быть осью симметрии. Радиальное сечение осесимметричного объекта должно быть расположено в первой четверти ($X > 0, Y > 0$).

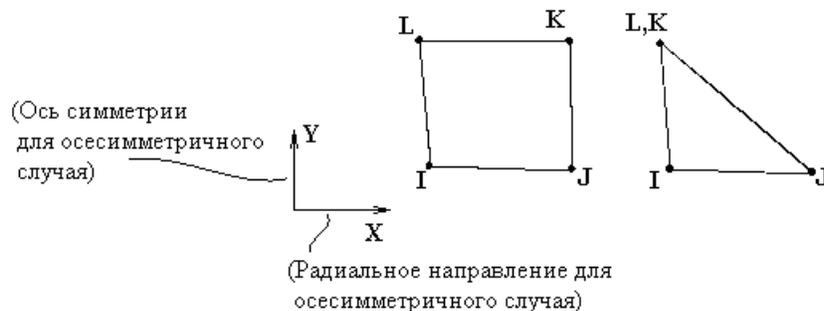


Рисунок 72. Обычная и вырожденная форма элемента *PLANE162*

Для указания того что решается осесимметричная задача необходимо в окне *PLANE162 element type options* выбрать опцию *Axisymmetric*. Кроме того в данном окне существует еще две опции решения плоских задач механики твердого тела: плоское напряженное состояние (*Plane Stress*) и плоская деформация (*Plane Strain Z=0*).

При плоском напряженном состоянии в направлении оси *OZ*, перпендикулярной плоскости *XOY* рисунка (экрана) нет напряжений, но есть строго определенные деформации. При плоском деформированном состоянии (или плоской деформации) в направлении оси *OZ*, перпендикулярной плоскости *XOY* рисунка деформация отсутствуют, но есть строго определенные напряжения.

При выборе элементов *PLANE162* и определении опций напряженно-деформированного состояния для плоских моделей необходимо выполнить следующую последовательность действий:

- Выбираем пункт меню *Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/ Edit/ Delete*. При выборе данного пункта появится диалоговое окно *Element Types* (Рисунок 55).
- Нажимаем кнопку *Add... .*
- В окне *Library of Element Types* выбираем элемент *2D Solid 162*.
- Нажимаем *OK*.
- Нажимаем кнопку *Options... .*
- В окне *PLANE162 element type options* (Рисунок 73) устанавливаем следующие опции:
 1. Первый раздел *Stress/Strain Options*. «По умолчанию» в раскрывающемся списке выбрана опция *Plane stress*. Можно выбрать *Plane Strain Z=0* или *Axisymmetric*.
 2. Второй раздел *Material Continuum*. По умолчанию выбрана *Lagrangian*.
- Нажимаем *OK* в окне *PLANE162 element type options*.
- В окне *Element Types* нажимаем *Close*.

З а м е ч а н и е! Элементы *PLANE162* не требуют определения констант.

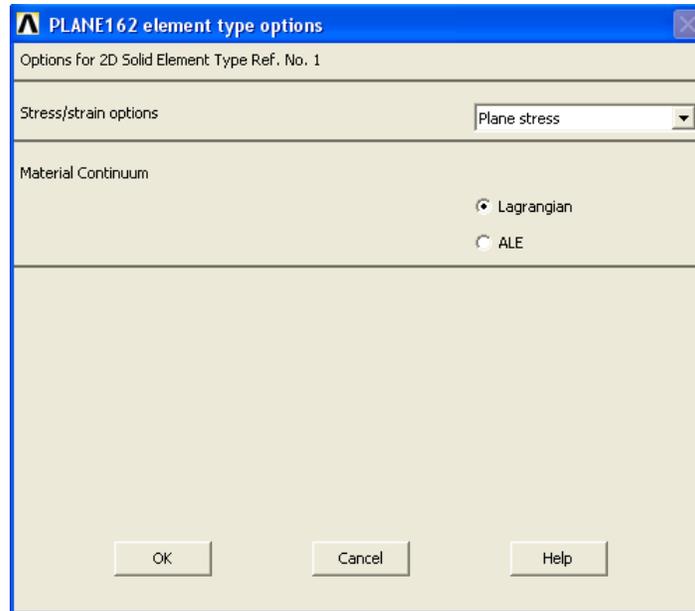


Рисунок 73. Окно *PLANE162 element type options*

Элементы 3D Solid 164

Элемент **SOLID164** представляет собой объемный шестигранник с восемью узлами, расположенными в вершинах. Форма элементов может быть вырожденной: четырехгранной, призматической, пирамидальной (Рисунок 74).

Положительное по знаку давление на поверхности элемента действует нормально поверхности «внутри» элемента.

Данный тип элементов позволяет использовать изотропные, ортотропные, анизотропные материалы, разнообразные модели упруго-пластических материалов, модели деформирования резины. Кроме того, предоставляется возможность использовать модели сжимаемой жидкости, а также повреждения композиционных материалов и бетона.

При выборе элементов **SOLID164** для определения опций необходимо выполнить следующую последовательность действий:

- Выбираем пункт меню *Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/ Edit/ Delete*. При выборе данного пункта появится диалоговое окно *Element Types*.
- Нажимаем кнопку *Add...*
- В окне *Library of Element Types* выбираем элемент **3D Solid 164**.
- Нажимаем **OK**.
- Нажимаем кнопку *Options...*

- В окне *SOLID164 element type options* (Рисунок 75) устанавливаем следующие опции:
 1. Первый раздел *Solid Element Formulation*. «По умолчанию» в раскрывающемся списке выбрана опция *Const.Strss(def)*.
 2. Вторым раздел *Material Continuum*. «По умолчанию» выбрана *Lagrangian*.

З а м е ч а н и е! Опция *Lagrangian* может использоваться со всеми моделями деформирования среды.

- Нажимаем *OK* в окне *SOLID164 element type options*.
- В окне *Element Types* нажимаем *Close*.

З а м е ч а н и е! Предполагается, что объем элемента является ненулевым. Элементы *SOLID164* не требуют определения констант.

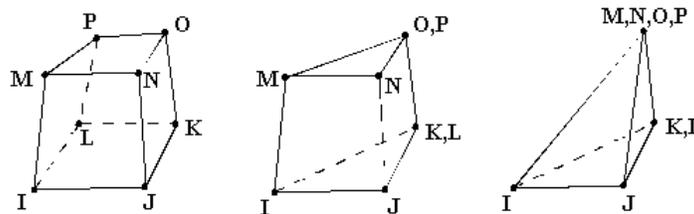


Рисунок 74. Обычная и некоторые вырожденные формы элемента *SOLID164*

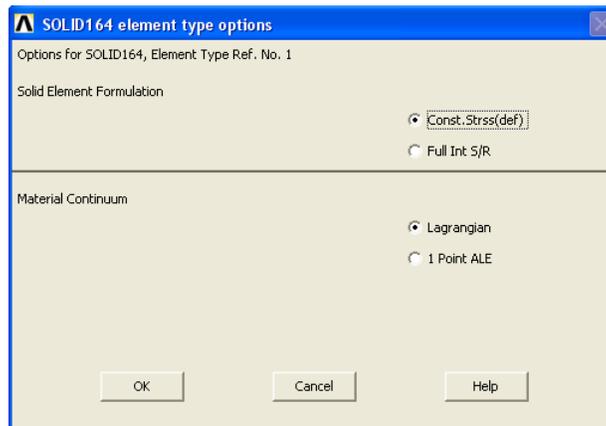


Рисунок 75. Окно *SOLID164 element type options*

Элементы 3D Tet-Solid 168

3D Tet-Solid 168 – элемент *SOLID168* представляет собой объемный четырехгранник с десятью узлами, расположенными в вершинах и серединах

сторон. Элементы данного типа лучше всего использовать для нерегулярных сеток, полученных свободным разбиением (Рисунок 76).

Положительное по знаку давление на поверхности элемента действует нормально поверхности «внутри» элемента.

Данный тип элементов позволяет использовать изотропные, ортотропные, анизотропные материалы, разнообразные модели упруго-пластических материалов, модели деформирования резины. Предоставляется также возможность использовать модели сжимаемой жидкости, а также повреждения композиционных материалов и бетона.

З а м е ч а н и е! Последовательность действий при выборе элементов *3D Tet-Solid 168* и определение опций полностью соответствует элементу *SOLID164*.

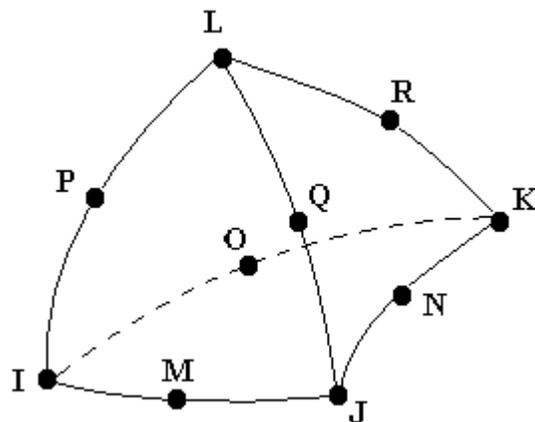


Рисунок 76. Элемент *SOLID168*

Элементы *Thin Shell 163*

Элемент *SHELL163* представляет собой плоский четырехугольник и используется для моделирования тонкостенных оболочечных конструкций. Данный элемент имеет четыре узла, но может вырождаться и принимать треугольную форму.

Данный тип элементов позволяет использовать изотропные, ортотропные, анизотропные материалы, разнообразные модели упруго-пластических материалов, модели деформирования резины. Кроме того, предоставляется возможность использовать модели сжимаемой жидкости, а также повреждения композиционных материалов и бетона.

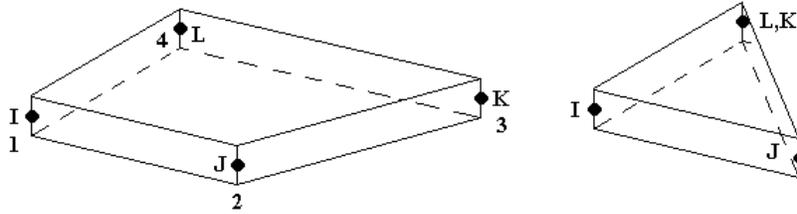


Рисунок 77. Формы элемента *Shell163*

Последовательность действий при определении опций элементов *Thin Shell 163*

- Выбираем пункт меню *Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/ Edit/ Delete*. При выборе данного пункта появится диалоговое окно *Element Types* (Рисунок 55).
- Нажимаем кнопку *Add...*
- В окне *Library of Element Types* выбираем элемент *Thin Shell 163*. Нажимаем *OK*.
- Нажимаем кнопку *Options...*
- В окне *Shell163 element type options* (Рисунок 78) устанавливаем следующие опции:
 1. Первый раздел окна *Shell163 element type options*. «По умолчанию» в раскрывающемся списке *Element Formulation* выбрана опция *Belychko(def)*. В качестве значения *Quadrature Rule* «по умолчанию» выбрана *Gauss (1-5 Pts)* (с наименьшим числом точек интегрирования). Опция *Trapezoidal* выбирается когда точек интегрирования более 5, но менее 100. Это касается прежде всего многослойных композиционных материалов
 2. Второй раздел *Layered Composite Mode*. «По умолчанию» выбрана *Non-Composite*. Это означает, что элемент не будет иметь слоев.
 3. Третий раздел *Integration rule ID*. «По умолчанию» выбрана опция 0. Если в первом разделе в качестве значения *Quadrature Rule* выбрана опция *Trapezoidal* и во втором разделе выбрана опция *Composite*, то в третьем разделе *Integration rule ID* следует указать целое число кратное количеству слоев.
- Нажимаем *OK* в окне *Shell163 element type options*.
- В окне *Element Types* нажимаем *Close*.

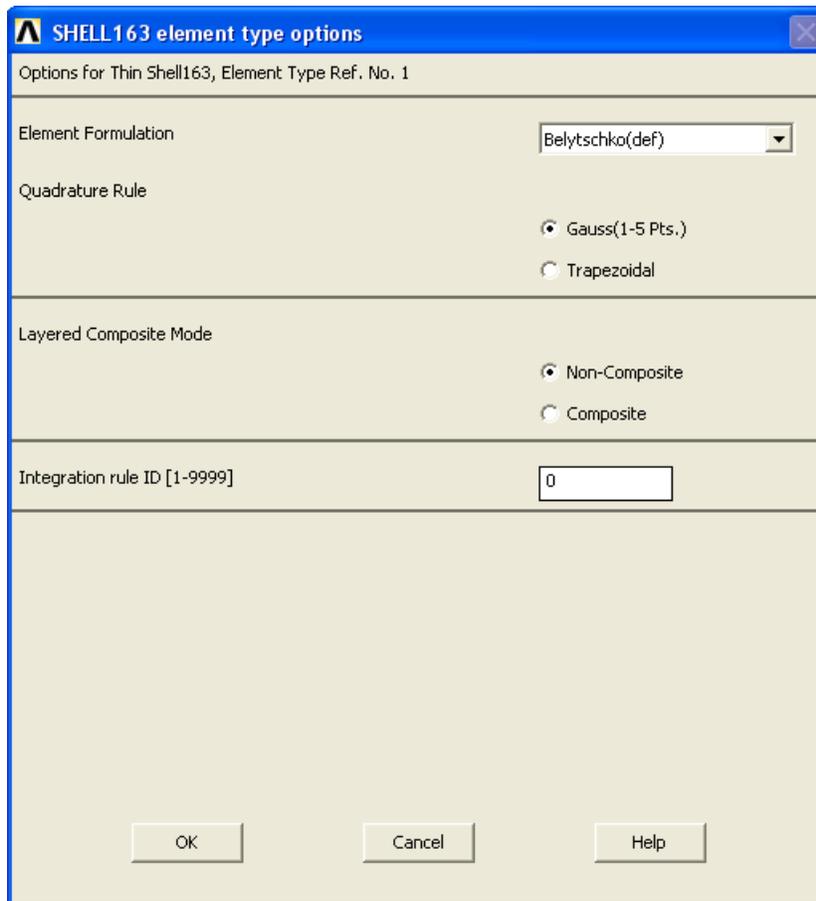


Рисунок 78. Окно *SHELL163 element type options*

Опции *Element Formulation* окна *Shell163 element type options*

Использование первой опции *Hughes-Liu* в раскрывающемся списке *Element Formulation* эффективно в случае больших деформаций конструкции. Однако выбор опции существенно увеличивает вычислительные затраты.

Использование опции *Belytschko(def)* позволяет наиболее быстро решать динамические задачи. Не следует использовать данную опцию при больших деформациях, т.к. она не точно отображает сильное изменение геометрии конечно-элементной сетки в отличие от первой опции *Hughes-Liu*.

Третья опция *BCIZ Triangular* основана на использовании теории *Kirchhoff*. Использование опции несколько увеличивает время решения задачи.

Четвертая опция *C0 Triangular* основана на теории оболочек *Mindlin-Reissner*.

Использование пятой опции *Belytschko-Membr* позволяет не рассматривать изгибную жесткость конструкции (безмоментная теория).

З а м е ч а н и е! Кроме того, можно выбрать опции *S/R Hughes-Liu*, *S/R co-rotational*, *Belytschko-Levt'n*, *Full Integr Membr*, *Belytschko-Wong*, *Fast Hughes-Liu*, *Full Intgr Shell*, которые являются модификациями предыдущих опций.

Опции *1, 2, 6-12* могут быть использованы в случае переключения элементов (и соответственно решателя) *Explicit-to-Implicit*. Опции *10* и *12* рекомендуются для пластического формообразования (штамповки).

Если используется модель гиперэластичного материала для элементов *SHELL163*, то вне зависимости от опции, выбранной пользователем, в раскрывающемся меню *Element Formulation* будет использована модификация опции *Belytschko-Tsay*.

Последовательность действий при определении констант оболочечных элементов *Thin Shell 163*

Выбираем пункт меню *Main Menu > Preprocessor > Real Constants*. При выборе данного пункта появится диалоговое окно *Real Constants* (Рисунок 57). Далее:

- Нажимаем кнопку *Add...*
- В появившемся окне *Element Type for...* выбираем (если элементов несколько) *Shell163*. Нажимаем *OK*.
- В первом окне *Real Constant Set Number 1, for Shell163* указываем номер («по умолчанию» будет всегда стоять номер по порядку). Нажимаем *OK*.
- Во втором окне *Real Constant Set Number 1, for Shell163* следует указать переменные *SHRF, NIP, T1, T2, T3, T4*:
 1. *SHRF* - коэффициент сдвига. Рекомендуемое значение *5/6*, «по умолчанию» (если пусто) значение равно *1*.
 2. *NIP* (число точек интегрирования, если окно пусто или введен *0*, то «по умолчанию» значение *2*), если ранее выбраны опции композиционного материала, то желательно чтобы было выполнено, чтобы *NIP* было кратно количеству слоев.
 3. *T1* - толщина оболочки в узле *I* (Рисунок 77).

4. T_2 - толщина оболочки в узле J (Рисунок 77).
 5. T_3 - толщина оболочки в узле K (Рисунок 77).
 6. T_4 - толщина оболочки в узле L (Рисунок 77).
- Нажимаем **OK**.
 - В окне **Real Constants** нажимаем **Close**.

Особенности определения свойств многослойных композиционных материалов

В окне **Shell163 element type options** (Рисунок 78) устанавливаем следующие опции:

- Первый раздел. В раскрывающемся списке **Element Formulation** необходимо выбрать одну из опций (см. предыдущий пункт). В качестве значения **Quadrature Rule** «по умолчанию» выбрана **Gauss (1-5 Pts)** (с наименьшим числом слоев). Опция **Trapezoidal** выбирается когда слоев более 5, но менее 100.
- Следует выбрать **Composite** во втором разделе **Layered Composite Mode**.
- Следует указать целое число кратное количеству слоев в композиционном материале третьем разделе **Integration rule ID**.
- Нажимаем **OK** в окне **Shell163 element type options**.
- В окне **Element Types** нажимаем **Close**.

Во втором окне **Real Constant Set Number 1, for Shell163** следует указать переменные **SHRF, NIP, T1, T2, T3, T4**:

- **SHRF** - коэффициент сдвига. Рекомендуемое значение 5/6, «по умолчанию» (если пусто) значение равно 1.
- **NIP** – опции композиционного материала, желательно чтобы было выполнено, что **NIP** кратно количеству слоев (параметр из окна **Shell163 element type options**, см. выше).
- **T1** – суммарная толщина композиционной слоистой оболочки в узле I (Рисунок 79).
- **T2** - суммарная толщина композиционной слоистой оболочки в узле J (Рисунок 79).
- **T3** - суммарная толщина композиционной слоистой оболочки в узле K (Рисунок 79).
- **T4** - суммарная толщина композиционной слоистой оболочки в узле L (Рисунок 79).
- Нажимаем **OK**.

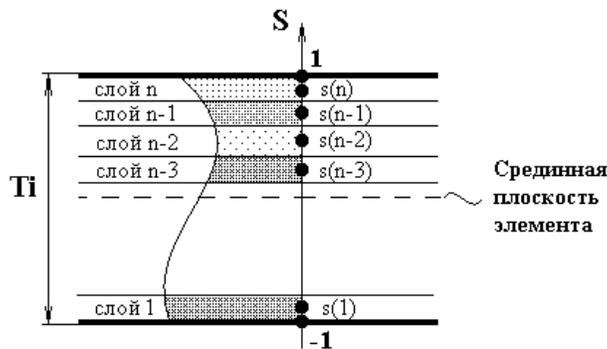


Рисунок 79. Схема элемента *Shell163*

- В третьем окне *Real Constant Set Number 1, for THIN SHELL163* (Рисунок 80) необходимо указать для каждой точки интегрирования следующие параметры:
 1. Относительную координату $S(i)$ точки интегрирования с номером i .
 2. Весовой коэффициент $WF(i)$, т.е. толщина связанная с точкой интегрирования, деленная на действительную толщину оболочки.
 3. ID модели материала для каждого слоя в отдельности параметр $MAT(i)$.
- В окне *Real Constants* следует нажать кнопку *Close*.

Рисунок 80. Вид третьего окна *Real Constant Set Number 1, for Shell163*

Определение коэффициентов вязкости и демпфирования. Корректировка формы деформированных элементов

Определение объемной вязкости

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Bulk Viscosity

Данный пункт меню предназначен для глобального переопределения значений коэффициентов объемной вязкости, заданных «по умолчанию». Это может быть рекомендовано для решения задач с учетом воздействия ударных волн (в частности, исследования фронта ударной волны).

При использовании указанного пункта появляется окно *Bulk Viscosity* (Рисунок 81), в котором необходимо заполнить поля *Quadratic Viscosity Coefficient* (значение «по умолчанию» равно **1.5**) и *Linear Viscosity Coefficient* (значение «по умолчанию» равно **0.06**). Для переопределения значений необходимо нажать **OK**.

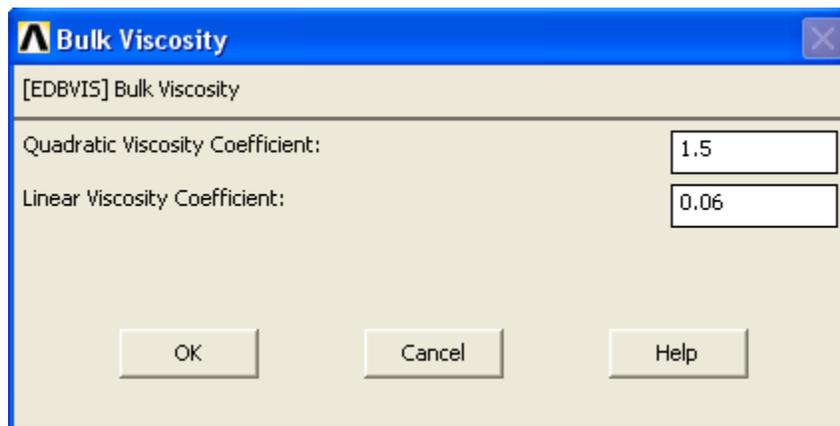


Рисунок 81. Окно *Bulk Viscosity*

Определение демпфирования

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Damping

При использовании данного пункта меню появляется окно *Damping Options for LS-DYNA Explicit* (Рисунок 82), в котором можно определить номер «группы» (*part*) модели с помощью раскрывающегося списка *PART number*, номер кривой определяющей демпфирование «группы» *Curve ID*. Данный параметр принимает значения:

- θ - используется постоянный коэффициент демпфирования, заданный переменной *System Damping Constant*.
- N ($N > 0$) - номер созданной кривой (в этом случае значение *System Damping Constant* не используется). Усилие демпфирования f определяется уравнением $f = -d(t)m v$, где $d(t)$ – коэффициент демпфирования, как функция времени, m – масса, v - скорость.

После определения параметров необходимо нажать кнопку **OK**.

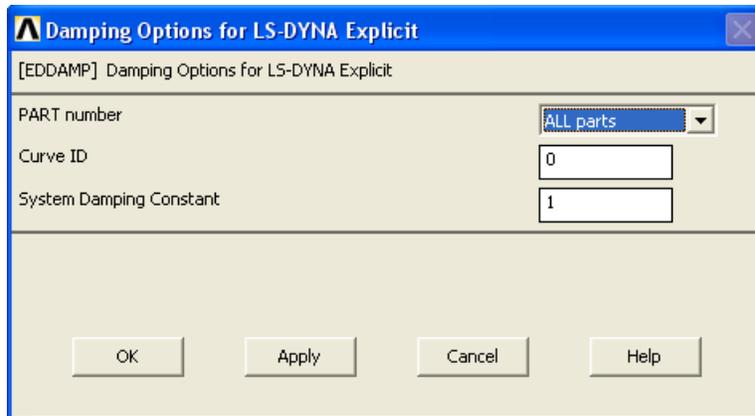


Рисунок 82. Окно *Damping Options for LS-DYNA Explicit*

Глобальный параметр корректировки искаженной формы элементов

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Hourglass Ctrl's > Global

При использовании данного пункта меню появляется окно *Hourglass Controls* (Рисунок 83), в котором можно переопределить значение параметра *Set Hourglass Coefficient to* установленного «по умолчанию» (*0.1*). Использование значения более *0.15* может привести к неустойчивости решения.

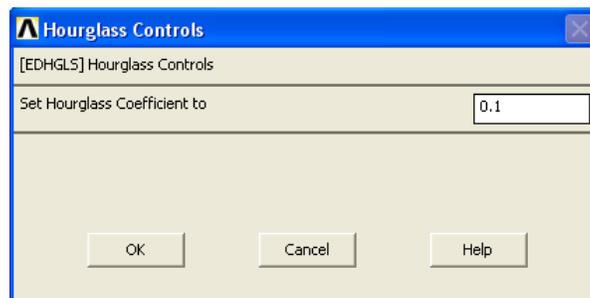


Рисунок 83. Окно *Hourglass Controls*

Локальные параметры корректировки искаженной формы элементов

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Hourglass Ctrl > Local

При использовании данного пункта меню появляется окно *Define Hourglass Material Properties* (Рисунок 84), в котором можно переопределить номер материала модели (*Material Reference Number*), задать тип подавления искаженной формы элементов (*VAL1 Hourglass control type*), который может принимать 6 значений:

- 0, 1 - Стандартная форма вязкости LS-DYNA («по умолчанию»).
- 2 - форма вязкости *Flanagan-Belytschko*.
- 3 - форма вязкости *Flanagan-Belytschko* с точным интегрированием по объему для объемных элементов.
- 4 - форма жесткости по *Flanagan-Belytschko*.
- 5 - форма жесткости по *Flanagan-Belytschko* с точным интегрированием по объему для объемных элементов.

З а м е ч а н и е! Для объемных элементов типы подавления различаются, но для оболочечных элементов опции 1-3 и 4, 5 идентичны.

Кроме того, в окне *Define Hourglass Material Properties* необходимо определить следующие параметры:

- Коэффициент подавления искажения формы *VAL2 Hourglass coefficient*. «По умолчанию» его значение равно 0.1, значения данного параметра больше чем 0.15 могут приводить к неустойчивости.
- Квадратичный коэффициент объемной вязкости *VAL3 Quadratic bulk viscosity coefficient* равен «по умолчанию» 1.5.
- Линейный коэффициент объемной вязкости *VAL4 Linear bulk viscosity coefficient* равен «по умолчанию» 0.06.
- Коэффициент подавления при изгибе оболочечного элемента *VAL5 Hourglass coefficient for shell bending* равен «по умолчанию» значению *VAL2*.
- Коэффициент подавления при искривлении поперечного сечения оболочки *VAL6 Hourglass coefficient for shell warping* равен «по умолчанию» значению *VAL2*.

После определения параметров необходимо нажать кнопку **OK**.

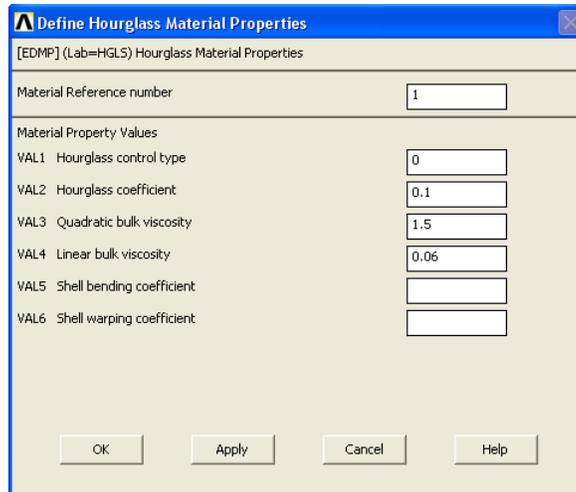


Рисунок 84. Окно *Define Hourglass Material Properties*

Локальные системы координат

Создание локальной системы координат

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Local CS > Create Local CS

Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Constraints > Apply > Local CS > Create Local CS

Main Menu > Solution > Constraints > Apply > Local CS > Create Local CS

При использовании одного из этих пунктов меню появляется окно *Create Local CS at Specified Location* (Рисунок 85), в котором можно:

- Определить номер координатной системы в поле *CID Coordinate system ID Number*.
- В полях $X1$, $Y1$, $Z1$ задаются X , Y , и Z координаты точки на локальной X -оси.
- В полях $X2$, $Y2$, $Z2$ задаются X , Y , и Z координаты точки на локальной XY плоскости.
- В полях $X3$, $Y3$, $Z3$ задаются X , Y , и Z координаты точки начала локальной системы координат («по умолчанию» $X3 = 0$, $Y3 = 0$, $Z3 = 0$).
- Для подтверждения необходимо нажать **OK**.

З а м е ч а н и е! Локальные системы координат могут применяться для определения свойств ортотропных материалов.

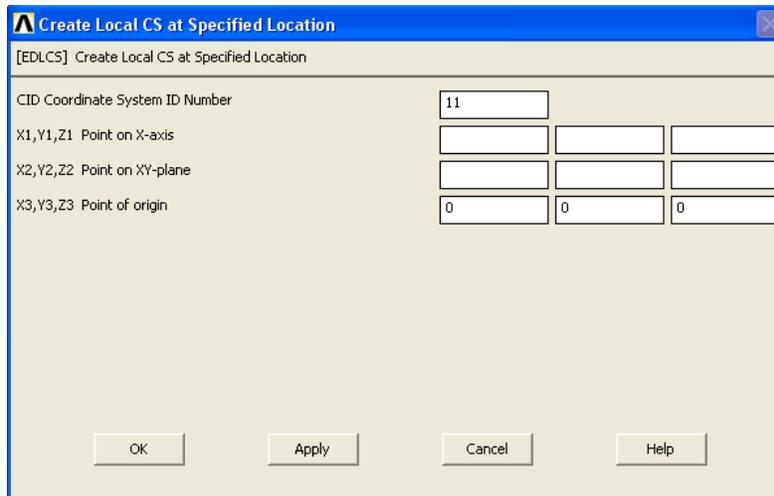


Рисунок 85. Окно *Create Local CS at Specified Location*

Отображение списка созданных локальных систем координат

Main Menu> *Preprocessor*> *Material Props*> *Local CS*> *List*

Main Menu> *Preprocessor*> *LS-DYNA Options*> *Constraints*> *Apply*> *Local CS*> *List*

Main Menu> *Solution*> *Constraints*> *Apply*> *Local CS*> *List*

При использовании одного из этих пунктов меню появляется окно *List Local CS* (Рисунок 86), в котором в поле ввода *CID Coordinate system ID Number* можно ввести номер локальной координатной системы, данные о которой пользователь хочет прочитать, либо ввести ключевое слово *ALL* («по умолчанию») если пользователь хочет увидеть список всех координатных систем. Для подтверждения необходимо нажать *OK*. После этого появится окно *EDLS Command* (Рисунок 87), в котором будут отображены данные о локальных системах координат.

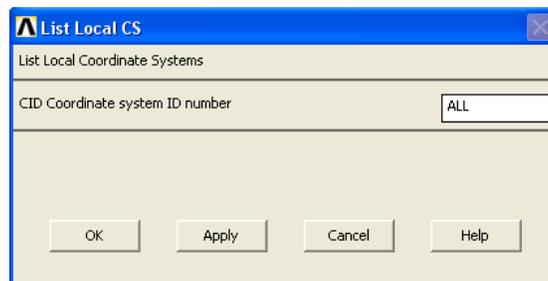


Рисунок 86. Окно *List Local CS*

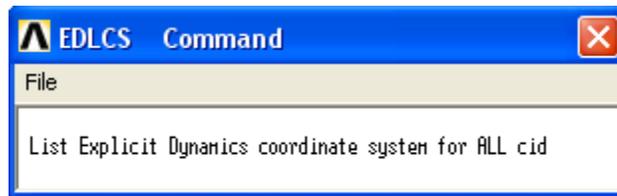


Рисунок 87. Окно *EDLS Command*

Удаление локальных систем координат

Main Menu> *Preprocessor*> *Material Props*> *Local CS*> *Delete*

Main Menu> *Preprocessor*> *LS-DYNA Options*> *Constraints*> *Apply*> *Local CS*> *Delete*

Main Menu> *Solution*> *Constraints*> *Apply*> *Local CS*> *Delete*

При использовании одного из этих пунктов меню появляется окно *Delete Local CS* (Рисунок 88), в котором в поле ввода *CID Coordinate system ID Number* можно ввести номер локальной координатной системы, которую пользователь хочет удалить, либо ввести ключевое слово *ALL*, если пользователь хочет удалить все координатные системы. Для подтверждения необходимо нажать *OK*.

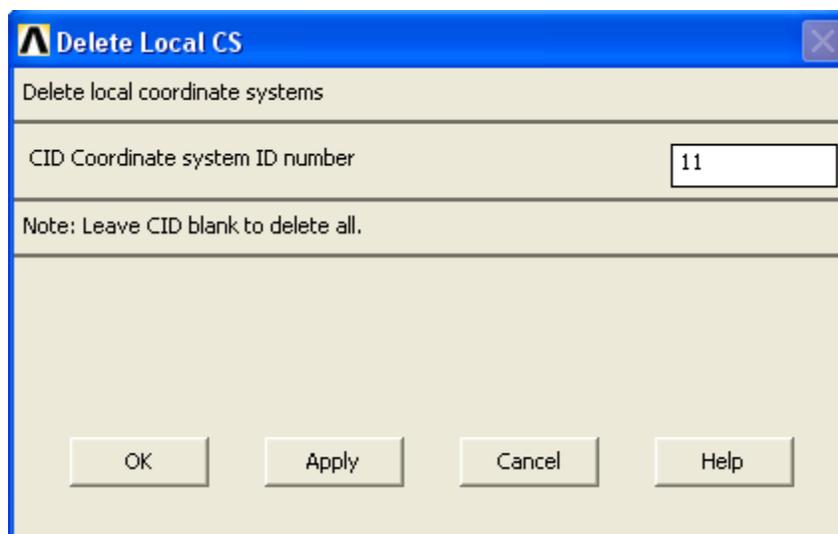


Рисунок 88. Окно *Delete Local CS*

Выбор физической модели деформирования материала

Общие сведения

Определение физических свойств материалов можно осуществить с помощью пункта главного меню:

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models

В этом случае пользователь получает доступ к главному окну ***Define Material Model Behavior*** (Рисунок 89), с помощью которого он получает возможность не только определить физическое поведение материала, но и указать конкретные значения необходимых констант.

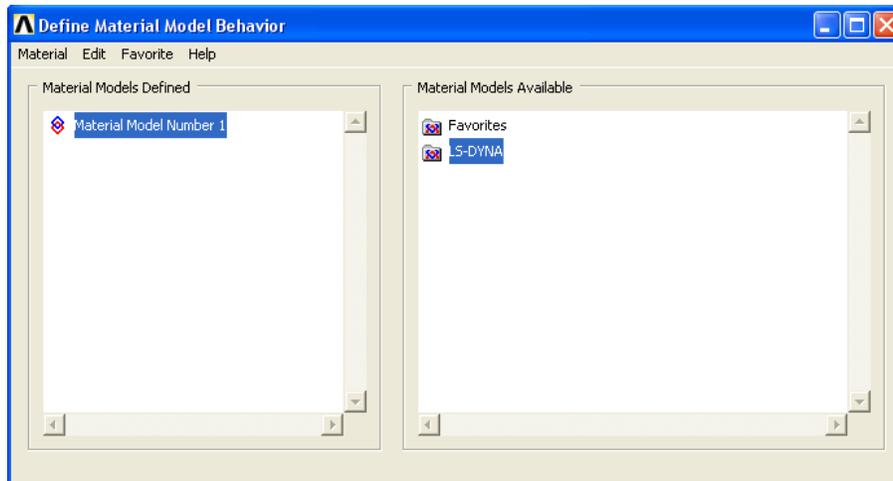


Рисунок 89. Окно *Define Material Model Behavior*

Работа с окнами ***Material Models Defined*** и ***Material Models Available*** в ANSYS/LS-DYNA совершенно аналогична работе с данными окнами в ANSYS. Это касается как определения материала, редактирования значений, удаления моделей, сохранения свойств материалов в файле и т.д.

Однако следует отметить, что пункты окна ***Material Models Available*** в ANSYS/LS-DYNA существенно отличаются от ANSYS. Прежде всего корневой пункт ***Favourites*** окна ***Material Models Available*** содержит только один подпункт ***Linear Static***. Однако LS-DYNA ориентирована на решение динамических задач, поэтому данный пункт не представляет большого интереса.

Для решения задачи необходимо установить физическую связь между деформациями и напряжениями, учитывающими особенности поведения материала объекта, находящегося под воздействием внешних нагрузок.

З а м е ч а н и е! Нельзя просмотреть диаграммы деформирования материалов ANSYS / LS-DYNA.

Раздел *LS-DYNA*> *Linear* окна *Material Models Available*

Линейно-деформируемый изотропный материал

Деформацию (удлинение) параллелепипеда из изотропного материала в любом направлении определяет один модуль Юнга (***EX***), а деформацию в поперечном направлении при растяжении/сжатии - коэффициент Пуассона (***NUXY***), изменение же прямых углов параллелепипеда при приложении касательных усилий – модуль сдвига (***GXY***), вычисляемый через модуль упругости и коэффициент Пуассона: $EX/(2(1+NUXY))$. Для решения динамических задач необходимо определить также плотность (***DENS***).

Таким образом, для решения задачи для линейно-деформируемых изотропных следует использовать следующий пункт в окне *Material Models Available*:

LS-DYNA> *Linear*> *Elastic*> *Isotropic*

При его использовании появляется окно *Linear Isotropic Properties for Materi...* (Рисунок 90), в котором следует определить требуемые значения ***DENS***, ***EX***, ***NUXY*** – плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона. После этого необходимо подтвердить окончание ввода нажатием кнопки ***OK*** или отказаться от проведения данной операции нажатием кнопки ***Cancel***.

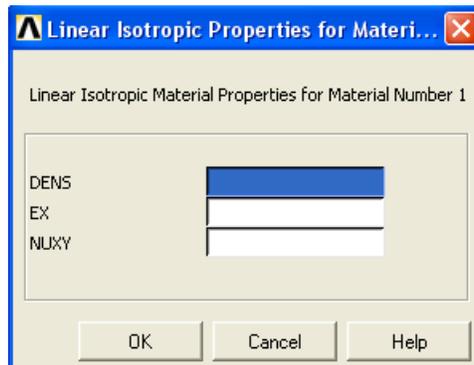


Рисунок 90. Окно определения свойств линейных изотропных материалов

Ортотропный материал

В этом случае нормальную деформацию параллелепипеда из ортотропного материала в любом направлении определяет три модуля Юнга (E_X , E_Y , E_Z), деформацию в поперечном направлении при растяжении/сжатии – три коэффициента поперечной деформации (ν_{XY} , ν_{YZ} , ν_{XZ}), изменения прямых углов параллелепипеда определяют модули сдвига (G_{XY} , G_{YZ} и G_{XZ}), а также номер локальной координатной системы (*Coord ID*). Для решения динамических задач необходимо определить также плотность ($DENS$).

Определить упругие постоянные, соответствующие применению ортотропной модели, можно с использованием следующего пункта в окне *Material Models Available*:

LS-DYNA> Linear> Elastic> Orthotropic

При его использовании появляется окно *Linear Orthotropic Properties for Mate...* (Рисунок 91), в котором следует ввести требуемые значения. После этого необходимо подтвердить окончание ввода нажатием кнопки **OK** или отказаться от проведения данной операции нажатием кнопки **Cancel**. Многоточие в названии окна указывает на номер материала, который определяет пользователь.

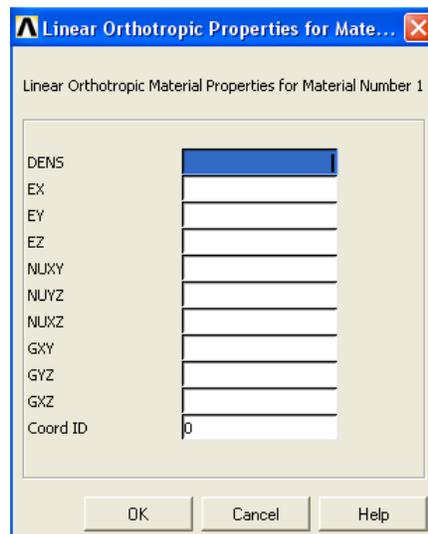


Рисунок 91. Окно определения свойств линейных ортотропных материалов

Анизотропный материал

В отличие от ANSYS анизотропные материалы требуют определения только полной матрицы упругости 6×6 . Матрица (тензор) должна быть симметрической и положительно-определенной. Поэтому полная матрица имеет только **21** независимое значение упругих констант, а также плотность (**DENS**) и номер локальной координатной системы (**Coord ID**).

Определить упругие постоянные, соответствующие применению анизотропной модели, можно с использованием следующего пункта в окне **Material Models Available**:

LS-DYNA > Linear > Elastic > Anisotropic

При его использовании появляется окно **Anisotropic Elasticity for Mate...** (Рисунок 92), в котором следует определить требуемые значения матрицы упругости. После этого необходимо подтвердить окончание ввода нажатием кнопки **OK** или отказаться от проведения данной операции нажатием кнопки **Cancel**. Многоточие в названии окна указывает на номер материала, который определяет пользователь.

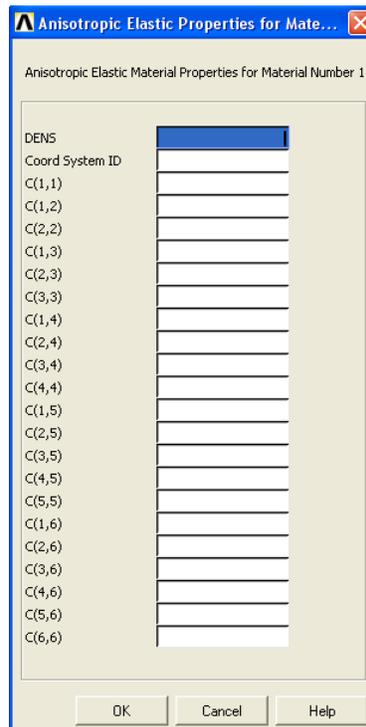


Рисунок 92. Окно определения упругих свойств анизотропных материалов

Упругая жидкость

Для использования модели упругой жидкости необходимо использовать следующий пункт окна *Material Models Available*:

LS-DYNA > ***Linear*** > ***Elastic*** > ***Fluid***

При его использовании появляется окно *Elastic Fluid Properties for Materi...* (Рисунок 93), в котором необходимо ввести плотность (*DENS*) и модуль жесткости (*Bulk Modulus*), либо вместо модуля жесткости необходимо ввести модуль упругости (*EX*) и коэффициент поперечной деформации (*NUXY*). Тогда модуль жесткости (*Bulk Modulus*) вычисляется по введенным модулю упругости и коэффициенту Пуассона.

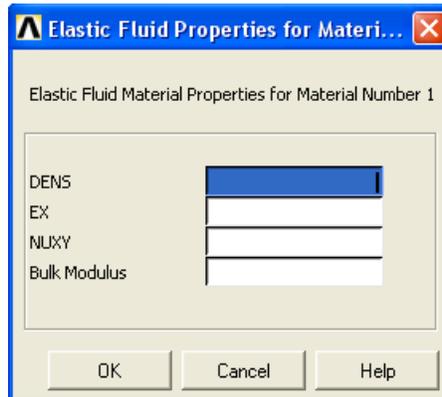


Рисунок 93. Окно *Elastic Fluid Properties for Materi...*

Некоторые материалы раздела *LS-DYNA* > *Nonlinear* окна *Material Models Available*

Нелинейная упругость

Несмотря на то, что наиболее употребляемой моделью в конструкторских расчетах является модель линейного деформирования материала (закон Гука), существует достаточно много технических задач, в которых необходимо провести анализ, не укладывающийся в рамки этого простейшего случая. Наиболее интересным, с прикладной точки зрения, вариантом деформирования материалов являются нелинейная упругость. При нелинейном упругом деформировании деформация является обратимой,

разгрузка в этом случае происходит по той же кривой, что и нагружение, и после снятия нагрузки деформация полностью исчезает, как и в линейном случае, т.е. тело полностью восстанавливает свою первоначальную форму.

С помощью графического интерфейса в разделе *Material Models Available* > *LS-DYNA* > *Nonlinear* > *Elastic* > *Hyperelasticity* можно выбрать некоторые модели упругого нелинейного деформирования материала и их константы.

Модели упруго-пластического деформирования материалов

З а м е ч а н и е! Материал *Bilinear Kinematic* отсутствует в LS-DYNA. При создании *k*-файла он будет преобразован в *Plastic Kinematic*, и все недостающие коэффициенты будут обнулены.

Билинейное кинематическое упрочнение

Билинейное кинематическое упрочнение учитывает эффект Баушингера. Переход изотропных материалов из упругого состояния в пластическое определяется критерием Мизеса.

З а м е ч а н и е! Экспериментально установлено, что модель удовлетворительно описывает деформации большинства металлов.

Поведение материалов описывается билинейной кривой деформирования, начинающейся в начале координат с положительными значениями деформаций и напряжений. Наклон первого участка кривой определяется исходя из упругих характеристик материалов (модуля упругости *E_X*, коэффициента Пуассона *NU_{XY}*). В точке с указанным пользователем значением предела текучести (*Yield Stress*), кривая продолжается вдоль второй прямой, определяемой касательным модулем (*Tangent Modulus*), имеющим те же единицы, что и модуль упругости. Касательный модуль не может быть меньше, чем нуль, и не больше, чем модуль упругости. Кроме того необходимо определить плотность материала (*DENS*). Выбор данной модели деформирования осуществляется с помощью следующего пункта в окне *Material Models Available*:

LS-DYNA > *Nonlinear* > *Inelastic* > *Kinematic Hardening* > *Bilinear Kinematic*

При использовании этого пункта необходимо заполнить данные в окне *Bilinear Kinematic Hardening for Mat* (Рисунок 94).

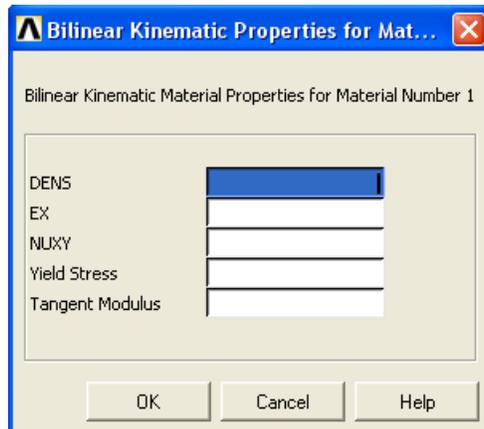


Рисунок 94. Окно *Bilinear Kinematic Hardening for Mat ...*

Пластическая кинематическая модель материала

Модель материала *Plastic Kinematic* позволяет учитывать в отдельности как изотропную или кинематическую, так и смешанную модель упрочнения. Она учитывает влияние скорости деформирования с использованием модели *Cowper-Symonds*. Связь деформаций и напряжений может быть установлена только для одной температуры. Кроме того, данная модель поддерживает опцию разрушения материала при достижении определенного уровня деформации.

Пункт меню окна *Material Models Available*:

LS-DYNA> *Nonlinear*> *Inelastic*> *Kinematic Hardening*> *Plastic Kinematic*

В окне *Plastic Kinematic Hardening for Mate ...* Необходимо определить плотность материала (*DENS*), модуль упругости (*EX*), коэффициента Пуассона (*NUXY*), значение предела текучести (*Yield Stress*), касательный модуль (*Tangent Modulus*), параметр упрочнения (*Hardning Parm*), значение коэффициентов модели *Cowper-Symonds* (коэффициенты *Strain Rate (c)* и *Strain Rate (P)*), значение деформации разрушения (*Failure Strain*).

З а м е ч а н и е! Значение параметра упрочнения *Hardning Parm* меняется от 0 до 1. Нуль соответствует кинематическому упрочнению (учитывающему эффект Баушингера), единица – изотропному (не учитывающего эффект Баушингера).

Отличия в построении конечно-элементного разбиения средствами ANSYS / LS-DYNA от средств ANSYS

З а м е ч а н и е! Необходимо всем компонентам модели последовательно присвоить атрибуты (номера материалов и вещественных констант) до построения разбиения. При решении задачи средствами ANSYS/LS-DYNA значений «по умолчанию» не существует, даже если в модели используется только один материал.

Средства построения конечно-элементного разбиения в ANSYS и ANSYS/LS-DYNA практически идентичны. Это позволяет пользователям, имеющим опыт работы в ANSYS, достаточно быстро освоиться с работой в ANSYS/LS-DYNA. Однако имеются незначительные формальные отличия при построении разбиения (Таблица 2).

В ANSYS/LS-DYNA наиболее удобным средством при построении разбиения является не использование пунктов главного меню, а применение средств *MeshTool* (пункт главного меню: *Main Menu*> *Preprocessor*> *Meshing*> *MeshTool*).

Таблица 2. Соответствие основных операций построения конечно-элементного разбиения ANSYS и ANSYS/LS-DYNA

| | Операция в ANSYS | Операция в ANSYS/LS-DYNA |
|----|--|---|
| 1. | Назначение атрибутов отдельным компонентам | Отличий от ANSYS нет |
| 2. | Установка размеров элементов по умолчанию | Отличий от ANSYS нет |
| 3. | Средства соединения линий и поверхностей при проведении упорядоченного разбиения | Отличий от ANSYS нет |
| 4. | Построение свободного разбиения | Отличий от ANSYS нет |
| 5. | Создание сетки с элементами переменного размера | Отличий от ANSYS нет |
| 6. | Выбор геометрии элементов | Отличий от ANSYS нет |
| 7. | Создание упорядоченного разбиения объема | В ANSYS/LS-DYNA: 1. конечно-элементная сетка строится без предварительного разбиения одной из граней плоскими элементами; 2. для создания упорядоченного |

| | | |
|-----|---|---|
| | | разбиения в объеме нужно либо просто указать объем, либо последовательно указать объем, грань, с какой начинается вытягивание, и, далее, указать грань, на которой завершается вытягивание. |
| 8. | Удаление сетки | Отличий от ANSYS нет |
| 9. | Локальное уточнение сетки | Отличий от ANSYS нет |
| 10. | Создание разбиения на балочные элементы с узлами ориентации | В ANSYS/LS-DYNA: 1. для балочного элемента необходим только один узел ориентации; 2. отсутствует <i>Beam Tool</i> или аналогичные средства определения параметров сечения; 3. параметры сечения определяются через множество констант. |

З а м е ч а н и е! В отличие от ANSYS в ANSYS/LS-DYNA отсутствуют (а точнее – не работают) средства визуализации пространственной структуры балочных элементов, т.е. просмотреть ориентацию в пространстве сечений балочной конструкции и распределение деформаций и напряжений стандартными средствами ANSYS – не возможно.

Примеры использования моделей деформирования материалов и типов элементов LS-DYNA

Большинство шагов по построению конечно-элементных сеток может быть выполнено тремя способами: с помощью инструментов *MeshTool*, с помощью пунктов главного меню и с помощью команд, вводимых в командной строке. В данных примерах, там, где это возможно, описаны все три способа. Поэтому большинство пунктов примеров состоят из трех частей.

Перед демонстрацией способов построения разбиения отметим следующее:

- Необходимо стремиться, чтобы в исследуемой области (части модели) не было элементов с плохой формой. Это существенно улучшит достоверность получаемых результатов.
- В исследуемой области разбиение должно быть более мелким и увеличиваться с удалением от рассматриваемой области. Это позволит получать достоверные результаты с наименьшими затратами времени.
- Вид построенного разбиения должен быть как можно ближе к регулярному.

Большинство шагов по построению конечно-элементных сеток может быть выполнено двумя способами: с помощью инструментов *MeshTool* и с помощью пунктов главного меню. В данных примерах описаны все оба способа. Поэтому некоторые пункты примеров состоят из трех частей.

Пример 1. Построение упорядоченного разбиения радиального сечения цилиндрического образца с концентратором

Шаг 1. Чтение существующей модели из db-файла

Utility Menu > File > Resume from...

При использовании пункта меню утилит появляется окно *Resume DataBase*. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, *C:\example1*), в которой хранится уже созданный файл полностью изложена ранее, однако в данном случае необходимо выбрать другой файл (например, *example1.db*) в списке *Resume DataBase From*, в котором хранится вторая созданная модель.

Шаг 2. Включение опции LS-DYNA Explicit

Main Menu > Preferences...

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

- Устанавливаем флажок в поле с меткой *LS-DYNA Explicit* (Рисунок 54).
- Нажимаем кнопку *OK* или *Apply* для подтверждения выбора.

Шаг 3. Выбор типа элемента для разбиения

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

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

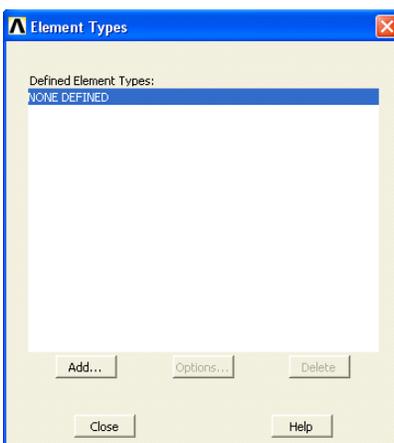


Рисунок 95. Вид окна *Elements Types*

- При его использовании появляется окно *Element Types* (Рисунок 95) с надписью *None Defined*, означающей, что к настоящему моменту ни один из типов элементов не выбран для использования при разбиении. В этом случае:
- Нажимаем кнопку *Add...*
- В появившемся окне *Library of Elements Types* (Рисунок 96) следует выбрать из раздела *LS-DYNA Explicit* (т.к. решается задача структурного анализа) элемент *2D Solid 162*.

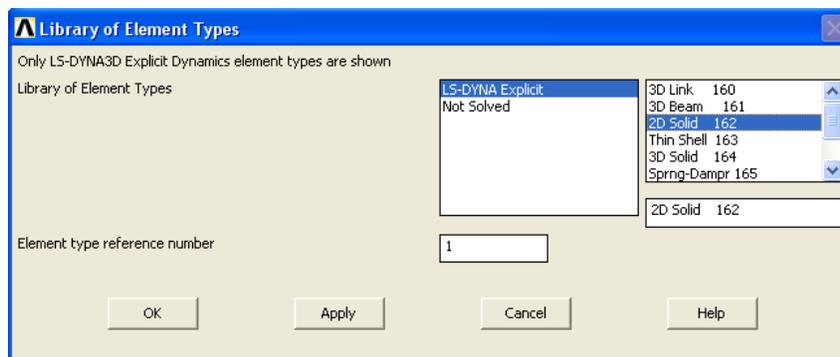


Рисунок 96. Выбор из раздела *LS-DYNA Explicit* окна *Library of Elements* элемента *2D Solid 162*

- Нажать кнопку **OK** в окне *Library of Elements Types*.
- Нажать кнопку **Options...** в окне *Element Types*.
- В раскрывающемся списке с меткой **Stress/Strain options** появившегося окна *PLANE162 element type options* (Рисунок 97), выбираем раздел *Axisymmetric*, т.к. предполагаем, что образец является цилиндрическим.
- Нажать кнопку **OK** в окне *PLANE162 element type options*.
- Задать опцию *Volume weighted*, указывающую, что задача будет решаться для цилиндрического объема. Нажать кнопку **OK** в окне *PLANE162 weighting option* (Рисунок 98).
- Нажимаем кнопку **Close** в окне *Element Type* (Рисунок 95).

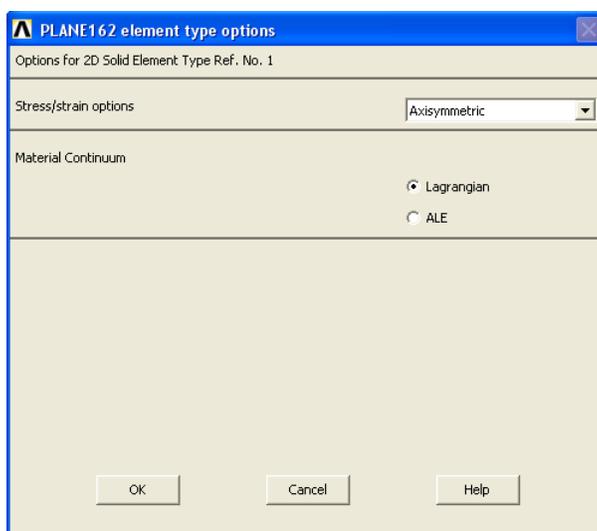


Рисунок 97. Вид окна *PLANE162 element type options*

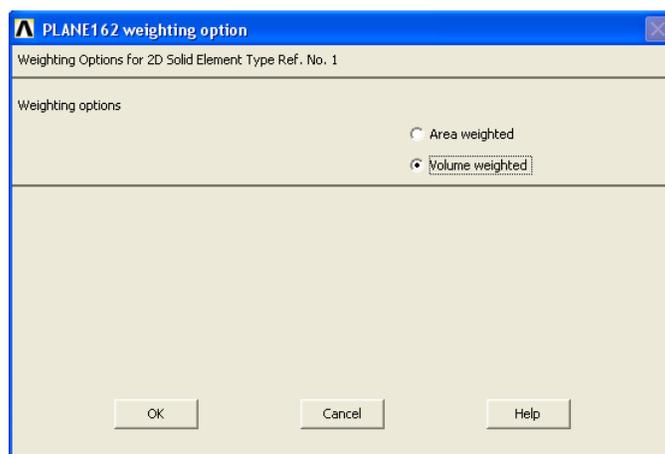


Рисунок 98. Окно *PLANE162 weighting option*

Шаг 4. Последовательность действий при выборе материала *Plastic Kinematic*

Для определения модели материала необходимо воспользоваться пунктом главного меню:

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models

При его использовании появится окно ***Define Material Model Behavior***, в котором необходимо выбирать пункт соответствующий интересующей модели материала.

Таблица 3. Свойства материала образца

| <i>Наименование параметра</i> | <i>Значение</i> |
|---|------------------------|
| <i>Плотность (кг/м³)</i> | <i>7865</i> |
| <i>Модуль упругости (Па)</i> | <i>2E11</i> |
| <i>Коэффициент Пуассона</i> | <i>0.27</i> |
| <i>Предел текучести (Па)</i> | <i>3.10E8</i> |
| <i>Касательный модуль (Па)</i> | <i>7.63E8</i> |
| <i>Параметр упрочнения</i> | <i>0</i> |
| <i>Деформационный коэффициент (C) (с⁻¹)</i> | <i>40.0</i> |
| <i>Деформационный коэффициент (P)</i> | <i>5.0</i> |
| <i>Деформация разрушения</i> | <i>0.75</i> |

В данном случае необходимо использовать пункт окна ***Material Models Available*** (Рисунок 99):

LS-DYNA > Nonlinear > Inelastic > Kinematic Hardning > Plastic Kinematic

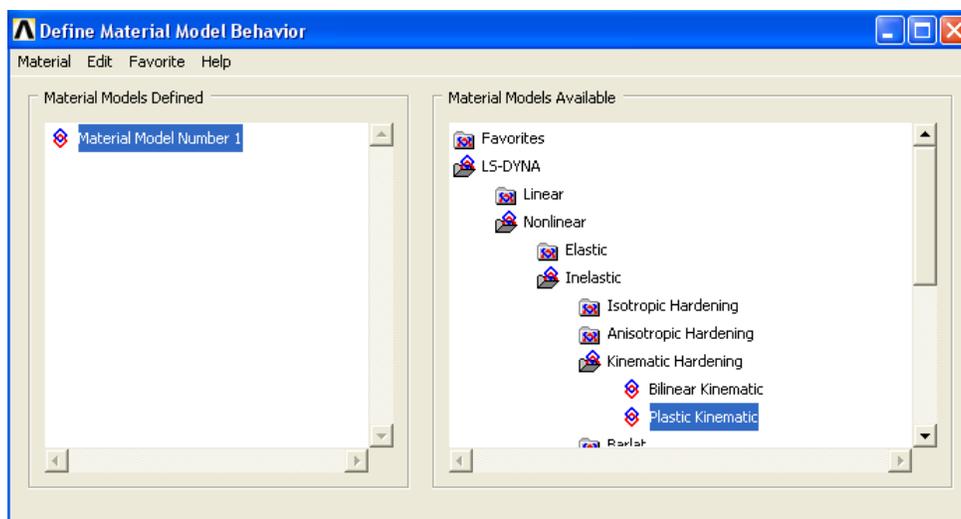


Рисунок 99. Расположение пункта меню *Plastic Kinematic*

При его использовании появляется окно *Plastic Kinematic Properties for Mat...* (Рисунок 100). В этом случае:

- Определяем требуемые значения (Таблица 3).
- Нажимаем кнопку *ОК*.

З а м е ч а н и е! В окне *Define Material Model Behavior* > *Material Models Defined* появилась подпись *Plastic Kinematic* это свидетельствует о создании модели.

- Закрываем окно *Define Material Model Behavior*.

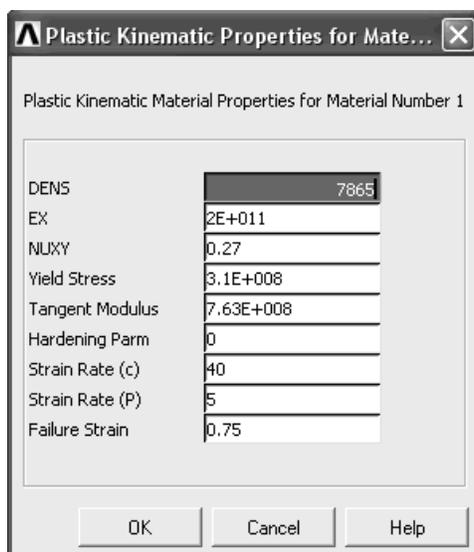


Рисунок 100. Окно назначения упругих констант

Шаг 5. Присвоение номера материала твердым компонентам модели

Можно воспользоваться любым из трех перечисленных ниже способов для назначений номера материала для отдельных поверхностей.

Средства MeshTool

Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool...

Для установки атрибутов элементов (в частности, материалов) необходимо воспользоваться раскрывающимся списком *Element Attributes* первой секции *MeshTool* (Рисунок 101):

- Устанавливаем пункт *Areas* в раскрывающемся списке *Element Attributes* первой сверху секции диалогового окна *MeshTool* (Рисунок 101).
- Нажимаем кнопку *Set*.
- В окне выбора *Area Attributes* нажимаем кнопку *Pick All*.
- В появившемся окне *Area Attributes* нажимаем *OK*.
- Нажимаем кнопку *Close* в окне *MeshTool*.

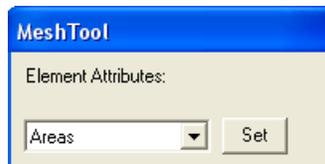


Рисунок 101. Первая сверху секция окна *MeshTool*

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Areas

В появившемся окне *Area Attributes* нажимаем *OK*.

Список команд

AATT,1,0,1,0

Шаг 6. Включение нумерации линий и выключение нумерации ключевых точек

Для того, чтобы правильно выполнить разбиение, сначала следует настроить плотность разбиения, установив количество делений на линиях. Для облегчения этой задачи следует знать номера линий. На данном шаге будет включено отображение номеров линий при отрисовке модели.

Пункт меню утилит

Utility Menu> PlotCtrls> Numbering...

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

- устанавливаем флаг  On в окне с меткой ***LINE***;
- устанавливаем флаг  Off в окне с меткой ***KP***;
- нажимаем кнопку ***OK*** для подтверждения окончания выбора (Рисунок 102).

З а м е ч а н и е! После выполнения команд иногда необходимо перерисовать отображаемую фигуру с помощью пункта меню утилит ***Utility Menu> Plot> Replot ...***

Список команд

/PNUM,KP,0

/PNUM,LINE,1

/REPLOTT

Результаты выполнения шага 6

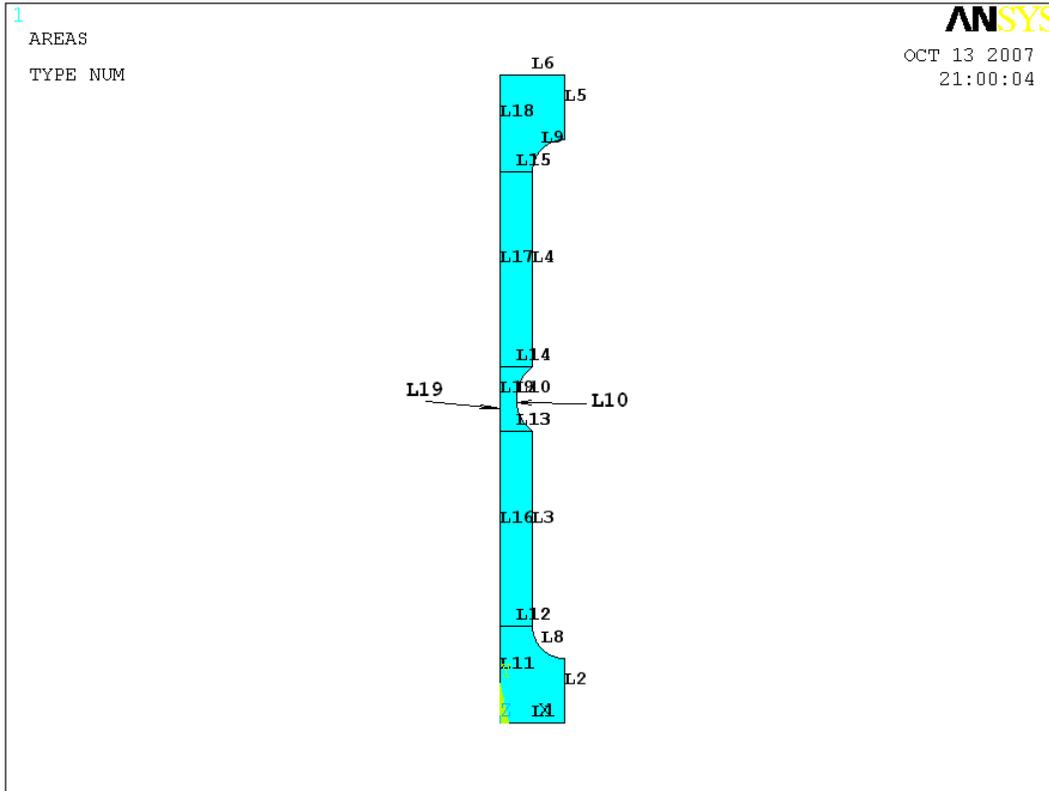


Рисунок 102. Модель примера 1 с включенной нумерацией линий

Шаг 7. Назначение количества делений на линиях при разбиении

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

Средства MeshTool

Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool...

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

- Воспользуемся кнопкой *Set* с меткой *Lines* из третьей сверху секции диалогового окна *MeshTool* (Рисунок 103).
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* (Рисунок 104) выбираем линии *L3, L4*.

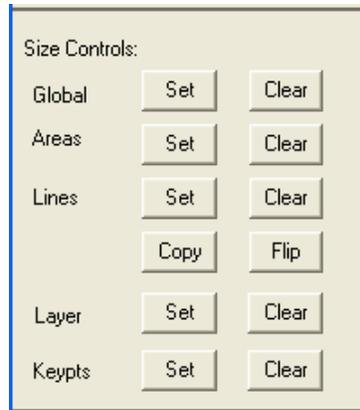


Рисунок 103. Третья сверху секция окна *MeshTool*

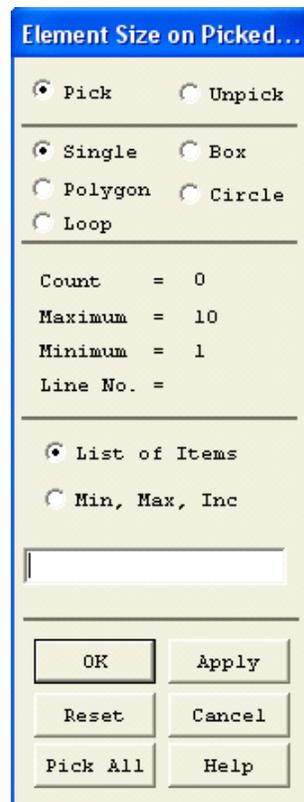


Рисунок 104. Окно выбора *Element Size on Picked Lines*

- Нажимаем *OK* или *Apply*.
- В поле *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что линия делится на *10* отрезков узлами конечноэлементной сетки.

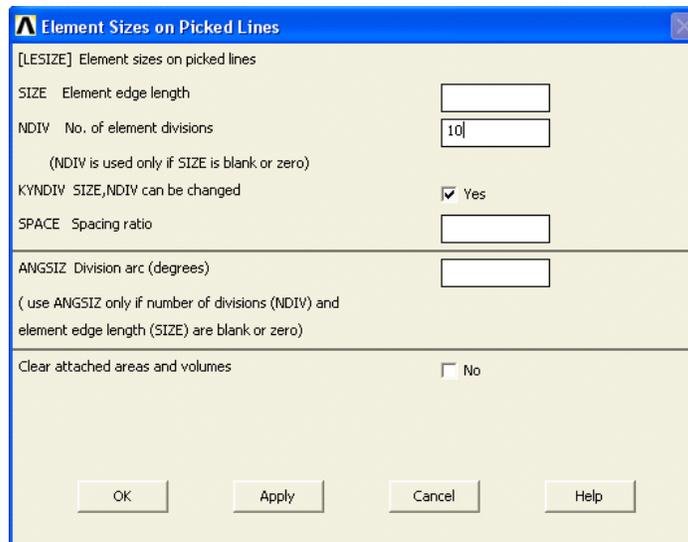


Рисунок 105. Вид окна *Element Sizes on Picked Lines*

- Нажимаем *Apply* в окне *Element Sizes on Picked Lines* (Рисунок 105), т.к. еще будем продолжать назначать количество разбиений на других линиях.
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* (Рисунок 104) выбираем линию *L10*.
- Нажимаем *OK* или *Apply*.
- В поле с меткой *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что линия делится на *15* отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем *Apply*.
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* выбираем линии *L5*.
- Нажимаем в окне *OK* или *Apply*.
- В поле с меткой *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что линия делится на *8* отрезка узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем в окне *Apply*.
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* выбираем линии *L1*, *L11*, *L6*, *L18*.
- Нажимаем в окне *OK* или *Apply*.
- В поле с меткой *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что линия делится на *4* отрезка узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем кнопку *OK* в окне *Element Sizes on Picked Lines*.

- Нажимаем кнопку *Close* в окне *MeshTool*.

Пункт главного меню

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

При его использовании:

- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* (Рисунок 104) выбираем линии *L3, L4*.
- Нажимаем в окне *OK* или *Apply*.
- В поле *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что линия делится на *10* отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем *Apply* в окне *Element Sizes on Picked Lines* (Рисунок 105), т.к. еще будем продолжать назначать количество разбиений на других линиях.
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* (Рисунок 104) выбираем линию *L10*.
- Нажимаем в окне *OK* или *Apply*.
- В поле с меткой *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что линия делится на *15* отрезка узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем *Apply*.
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* выбираем линии *L5*.
- Нажимаем в окне *OK* или *Apply*.
- В поле с меткой *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что линия делится на *8* отрезка узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем в окне *Apply*.
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* выбираем линии *L1, L11* и *L6, L18*.
- Нажимаем в окне *OK* или *Apply*.
- В поле с меткой *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что линия делится на *4* отрезка узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем в окне *OK*.

Список команд*LESIZE,3,,10**LESIZE,4,,10**LESIZE,5,,8**LESIZE,10,,15**LESIZE,1,,4**LESIZE,11,,4**LESIZE,6,,4**LESIZE,18,,4**Шаг 8. Явное выполнение конкатенации линий*

На предыдущих шагах модель образца была разделена на 5 подобластей, некоторые из них имеют более 4 сторон. Построение упорядоченного разбиения возможно лишь для поверхностей, имеющих не более четырех линий границы. Использование явной конкатенации в случае большего количества ограничивающих линий позволяет «объединить» некоторые линии в одну для проведения упорядоченного разбиения.

З а м е ч а н и е! Явное выполнение конкатенации не доступно в окне *MeshTool*.

Пункт главного меню*Main Menu> Preprocessor> Meshing> Concatenate> Lines*

При его использовании:

- С помощью окна выбора *Concatenate Lines* выбираем линии *L1*, *L11* (Рисунок 102), которые при разбиении будут «считаться» одной стороной.
- Нажимаем в окне *Apply*.

- С помощью окна выбора *Concatenate Lines* выбираем линии *L6*, *L18* (Рисунок 102), которые при разбиении также будут «считаться» одной стороной.
- Нажимаем в окне *OK*.

Список команд

LCCAT,1,11

LCCAT,6,18

Шаг 9. Построение упорядоченного разбиения по 4 сторонам поверхности

Средства *MeshTool*

Main Menu > Preprocessor > MeshTool

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

- В первом раскрываемся списке выбираем раздел *Area* – т.к. будут разбиваться поверхности.
- Выбираем форму элементов, а именно пункт *Quad* – для того, чтобы разбиение было выполнено четырехсторонними элементами.
- Выбираем вид разбиения, а именно пункт *Mapped* – разбиение должно быть упорядоченным.
- Во втором раскрываемся списке выбираем пункт *3 or 4 sided* – разбиение четырех или трехсторонней поверхности (Рисунок 106).
- Нажимаем кнопку *Mesh*.
- С помощью появившегося окна выбора *Mesh Areas* указываем, что собираемся разбивать все поверхности с помощью кнопки *Pick All*.
- Нажимаем кнопку *Close* в окне *MeshTool*.

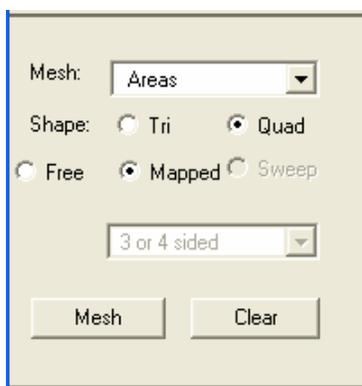


Рисунок 106. Вид четвертой секции окна *MeshTool* с опциями построения упорядоченного разбиения по четырем сторонам

Пункт главного меню

Построение упорядоченного разбиения поверхности выполняется с помощью пункта меню:

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

При использовании данного пункта меню появится окно выбора *Mesh Areas*. После этого необходимо нажать кнопку *Pick All*.

Шаг 10. Сохранение измененной модели в db-файле

Utility Menu > Save as ...

При использовании пункта главного меню появляется окно выбора *Save DataBase*. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, *C:\example1*), в которой будет храниться модель (Рисунок 107), полностью описана ранее. В данном случае, необходимо выбрать имя существующего файла (*example1.db*) в окне *Save DataBase to* и нажать кнопку *Yes* («по умолчанию» включена кнопка *No*) для перезаписи существующего файла.

Результат построения упорядоченного разбиения для примера 1

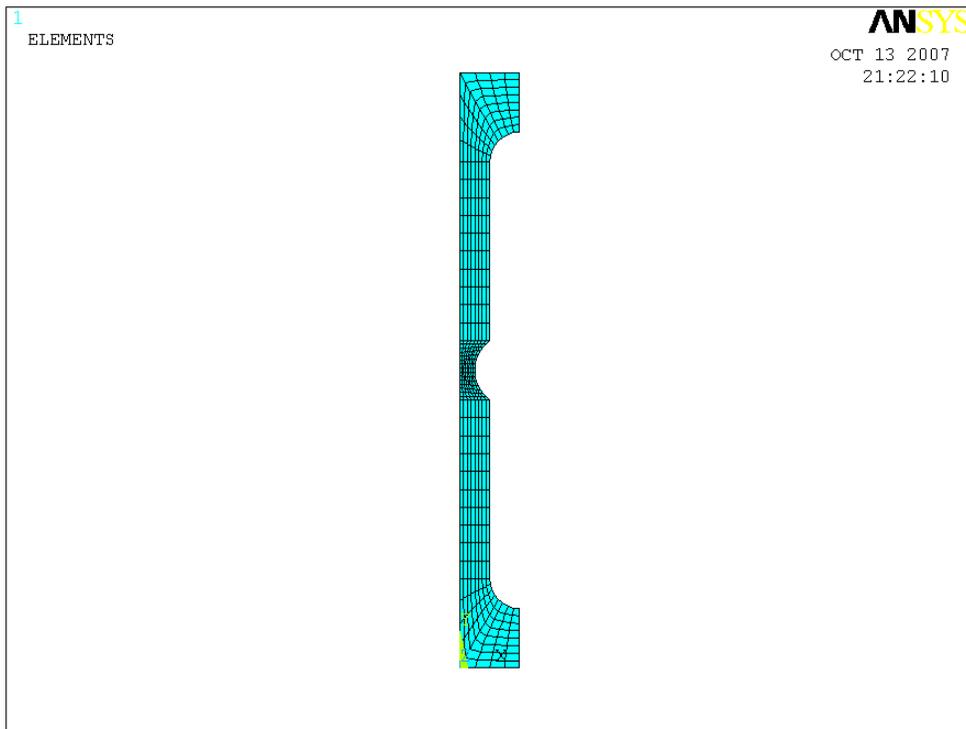


Рисунок 107. Результат построения конечноэлементного разбиения модели примера 1

Пример 2. Построение упорядоченного разбиения твердотельной модели рессоры

Шаг 1. Чтение существующей модели из db-файла

Utility Menu > File > Resume from...

При использовании пункта меню утилит появляется окно **Resume DataBase**. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, *C:\example2*), в которой хранится уже созданный файл полностью изложены ранее, однако в данном случае необходимо выбрать другой файл (например, *example2.db*) в списке **Resume DataBase From**, в котором хранится вторая созданная модель.

Шаг 2. Включение опции LS-DYNA Explicit

Main Menu > Preferences...

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

- Устанавливаем флажок в поле с меткой **LS-DYNA Explicit**.
- Нажимаем кнопку **OK** или **Apply** для подтверждения выбора.

Шаг 3. Выбор типа элемента для разбиения

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

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

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

- Нажимаем кнопку **Add...**
- В появившемся окне **Library of Elements Types** следует выбрать из раздела **LS-DYNA Explicit** элемент **3D Solid 164** (Рисунок 108).
- Нажать кнопку **OK** в окне **Library of Elements Types**.
- Нажимаем кнопку **Close** в окне **Element Type** (Рисунок 95).

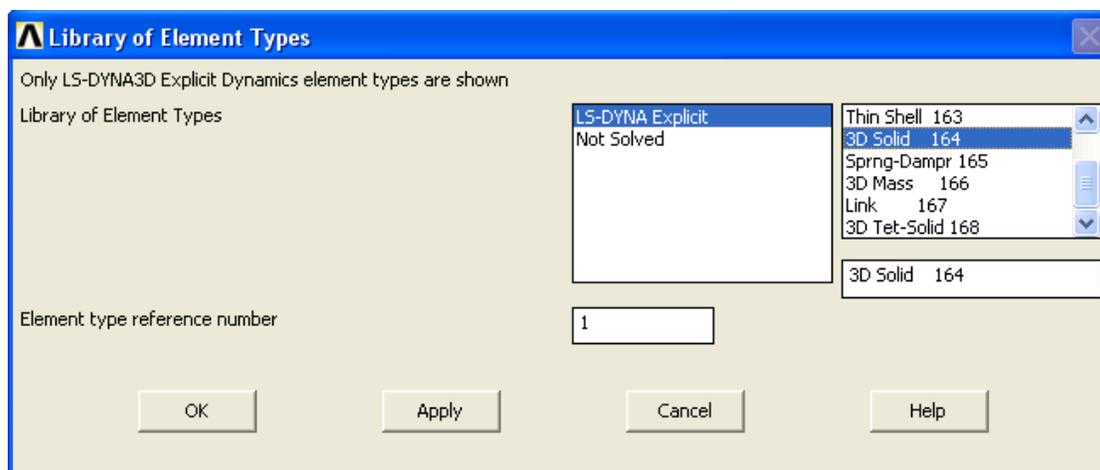


Рисунок 108. Выбор из раздела *LS-DYNA Explicit* окна *Library of Elements* элемента *3D Solid 164*

Шаг 4. Последовательность действий при определении механических характеристик рессоры

Для определения модели материала необходимо воспользоваться пунктом главного меню:

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models

При его использовании появится окно ***Define Material Model Behavior***, в котором необходимо выбирать пункт соответствующий интересующей модели материала.

Таблица 4. Механические характеристики материала рессоры

| <i>Наименование параметра</i> | <i>Значение</i> |
|-------------------------------------|-----------------|
| <i>Плотность (кг/м³)</i> | <i>7865</i> |
| <i>Модуль упругости (Па)</i> | <i>2E11</i> |
| <i>Коэффициент Пуассона</i> | <i>0.27</i> |

В данном случае необходимо использовать пункт окна ***Material Models Available*** (Рисунок 109):

LS-DYNA > Linear > Elastic > Isotropic

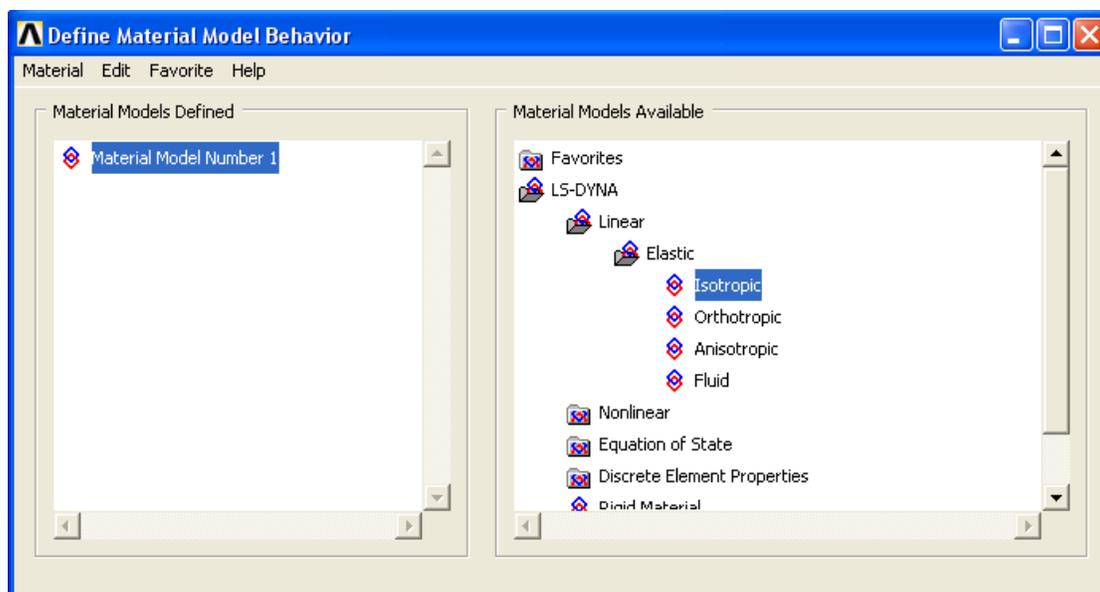


Рисунок 109. Расположение пункта меню *Isotropic*

При его использовании появляется окно *Linear Isotropic Properties for Mat...* (Рисунок 110). В этом случае:

- Определяем требуемые значения (Таблица 4).
- Нажимаем кнопку **OK**.

З а м е ч а н и е! В окне *Define Material Model Behavior* > *Material Models Defined* появилась подпись *Linear Isotropic*, это свидетельствует о создании модели.

- Закрываем окно *Define Material Model Behavior*.

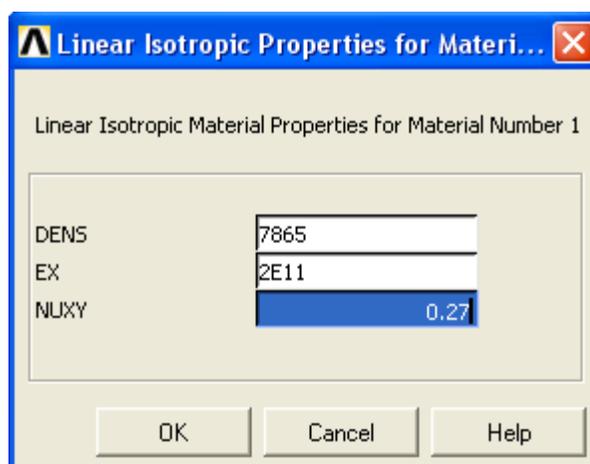


Рисунок 110. Окно назначения упругих констант

Шаг 5. Включение нумерации линий и выключение нумерации поверхностей

Пункт меню утилит

Utility Menu> PlotCtrl> Numbering...

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

- устанавливаем флаг  в окне с меткой **LINE**;
- устанавливаем флаг  в окне с меткой **Area**;
- нажимаем кнопку **OK** для подтверждения окончания выбора.

Команда

/PNUM,AREA,0

/PNUM,LINE,1

Шаг 6. Отображение линий

Пункт меню утилит

Utility Menu> Plot> Lines

Список команд

LPLOT

Шаг 7. Отображение изометрии модели

Для отображения модели в изометрии (Рисунок 111) следует воспользоваться кнопкой **Isometric View**  на дополнительной панели инструментов либо воспользоваться пунктом меню утилит **Utility Menu> PlotCtrl> Pan Zoom Rotate...**. В появившемся окне **Pan-Zoom-Rotate** во второй секции следует воспользоваться кнопкой **Iso**.

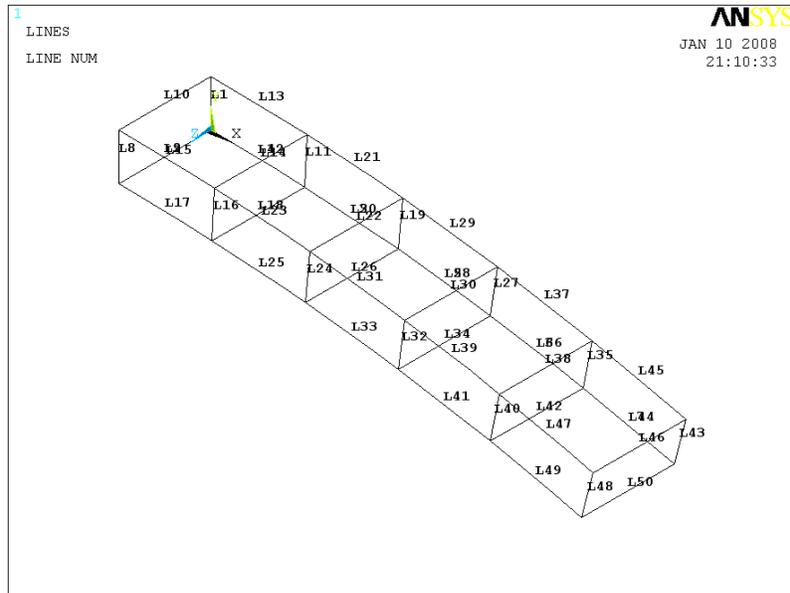


Рисунок 111. Отображение нумерации линий в изометрии

Шаг 8. Присвоение номера материала твердым компонентам модели

Можно воспользоваться любым из трех перечисленных ниже способов для назначений номера материала для отдельных поверхностей.

Средства MeshTool

Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool...

Для установки атрибутов элементов (в частности, материалов) необходимо воспользоваться раскрывающимся списком *Element Attributes* первой секции *MeshTool* (Рисунок 101):

- Устанавливаем пункт *Volumes* в раскрывающемся списке *Element Attributes* первой сверху секции диалогового окна *MeshTool*.
- Нажимаем кнопку *Set*.
- В окне выбора *Volume Attributes* нажимаем кнопку *Pick All*.
- В появившемся окне *Volume Attributes* нажимаем *OK*.

Пункт главного меню

Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Volumes

При его использовании:

- В окне выбора *Volume Attributes* нажимаем кнопку *Pick All*.
- В появившемся окне *Volume Attributes* нажимаем *OK*.

Список команд

VATT,1,0,1,0

Шаг 9. Назначение количества делений линий твердотельной модели узлами конечно-элементной сетки

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

Средства MeshTool

Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool...

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

- Воспользуемся кнопкой *Set* с меткой *Lines* из третьей сверху секции диалогового окна *MeshTool* (Рисунок 103).
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* (Рисунок 104) выбираем линии *L13, L21, L29, L37, L45*.
- Нажимаем в окне *OK* или *Apply*.
- В поле *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* (Рисунок 105) указываем, что линия делится на *10* отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем *Apply* в окне *Element Sizes on Picked Lines* (Рисунок 105), т.к. еще будем продолжать назначать количество разбиений на других линиях.
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* выбираем линию *L10*.
- Нажимаем в окне *OK* или *Apply*.
- В поле с меткой *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что линия делится на *12* отрезка узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем *Apply*.

- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* выбираем линии *L8*.
- Нажимаем в окне *OK* или *Apply*.
- В поле с меткой *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что линия делится на *3* отрезка узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем в окне *OK*.

Пункт главного меню

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

При его использовании:

- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* (Рисунок 104) выбираем линии *L13, L21, L29, L37, L45*.
- Нажимаем *OK* или *Apply*.
- В поле *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* (Рисунок 105) указываем, что линия делится на *10* отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем *Apply* в окне *Element Sizes on Picked Lines* (Рисунок 105), т.к. еще будем продолжать назначать количество разбиений на других линиях.
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* (Рисунок 104) выбираем линию *L10*.
- Нажимаем *OK* или *Apply*.
- В поле с меткой *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что линия делится на *12* отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем *Apply*.
- С помощью окна выбора *Element Size on Picked...* выбираем линии *L8*.
- Нажимаем *OK* или *Apply*.
- В поле с меткой *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что линия делится на *3* отрезка узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем *OK*.

Список команд*LESIZE,13,,,10**LESIZE,21,,,10**LESIZE,29,,,10**LESIZE,37,,,10**LESIZE,45,,,10**LESIZE,10,,,12**LESIZE,8,,,3**Шаг 10. Построение упорядоченного разбиения объемов*Средства *MeshTool**Main Menu> Preprocessor> MeshTool*

Для построения упорядоченного разбиения используем четвертую (сверху) секцию окна *MeshTool* (Рисунок 106):

- В первом раскрывающемся списке выбираем раздел *Volumes* – т.к. будут разбиваться объемы.
- В разделе *Shape* выбираем форму элементов, а именно пункт *Hex* – для того, чтобы разбиение было выполнено шестигранными элементами.
- Выбираем вид разбиения, а именно упорядоченный *Mapped*.
- Нажимаем кнопку *Mesh*.
- С помощью появившегося окна выбора *Mesh Volumes* указываем что собираемся разбивать все объемы с помощью кнопки *Pick All*.

Пункты главного меню

Построение упорядоченного разбиения поверхности выполняется с помощью пункта меню:

Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh> Volumes> Mapped> 4 or 6 sided

При использовании данного пункта меню появится окно выбора *Mesh Volumes*. После этого необходимо нажать кнопку *Pick All*.

Шаг 11. Сохранение измененной модели в db-файле

Utility Menu > File > Save as...

При использовании пункта главного меню появляется окно выбора *Save DataBase*. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, *C:\example2*), в которой будет храниться модель (Рисунок 112), полностью описана ранее. В данном случае, необходимо выбрать имя существующего файла (*example2.db*) в окне *Save DataBase to* и нажать кнопку *Yes* («по умолчанию» включена кнопка *No*) для перезаписи существующего файла.

Результат построения упорядоченного разбиения для примера 1

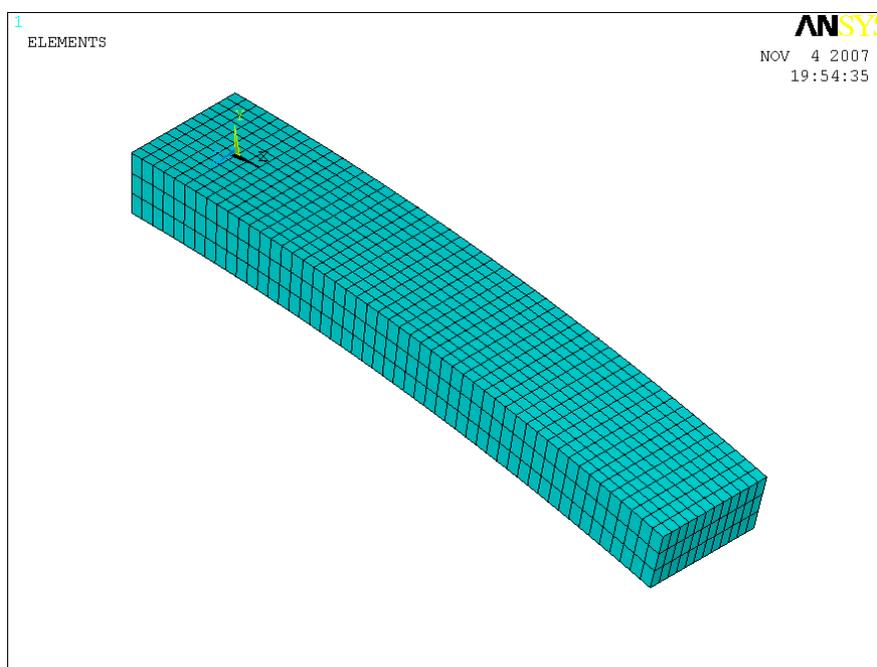


Рисунок 112. Результат построения конечноэлементного разбиения модели примера 2

Пример 3. Построение упорядоченного разбиения радиального сечения пули и листа двуслойной брони

Шаг 1. Чтение существующей модели из db-файла

Utility Menu > File > Resume from...

При использовании пункта меню утилит появляется окно **Resume DataBase**. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, *C:\example3*), в которой хранится уже созданный файл полностью изложены ранее, однако в данном случае необходимо выбрать другой файл (например, *example3.db*) в списке **Resume DataBase From**, в котором хранится вторая созданная модель.

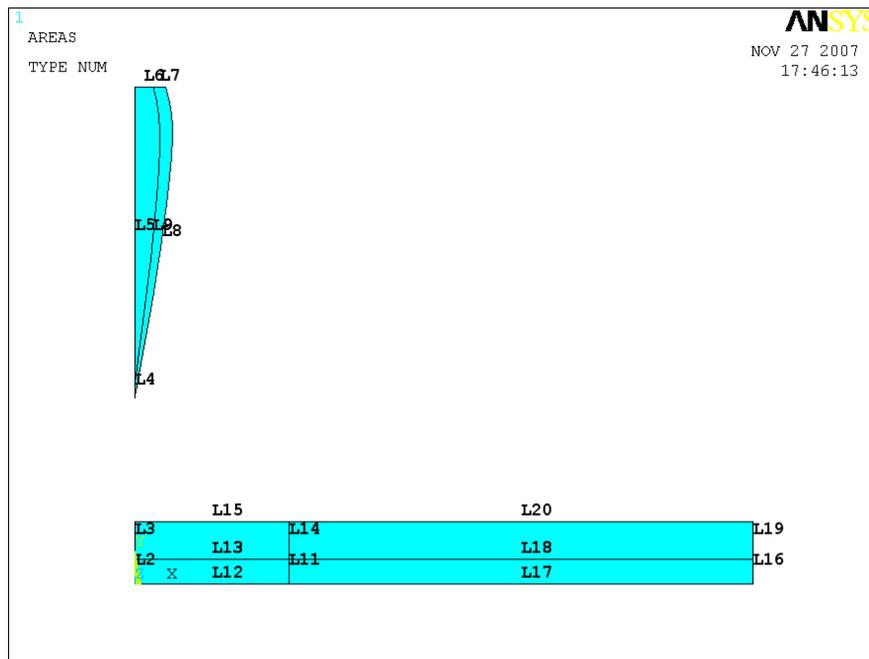


Рисунок 113. Результат выполнения шага 1

Шаг 2. Включение опции LS-DYNA Explicit

Main Menu > Preferences...

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

- Устанавливаем флажок в поле с меткой **LS-DYNA Explicit**.
- Нажимаем кнопку **OK** для подтверждения выбора.

Шаг 3. Выбор типа элемента для разбиения

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

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

- При его использовании появляется окно *Element Types* (Рисунок 95) с надписью *None Defined*, означающей, что к настоящему моменту ни один из типов элементов не выбран для использования при разбиении. В этом случае:
 1. Нажимаем кнопку *Add...*
 2. В появившемся окне *Library of Elements Types* (Рисунок 96) следует выбрать из раздела *LS-DYNA Explicit* элемент *2D Solid 162*.
 3. Нажать кнопку *OK* в окне *Library of Elements Types*.
 4. Нажать кнопку *Options...* в окне *Element Types*.
 5. В раскрывающемся списке с меткой *Stress/Strain options* появившегося окна *PLANE162 element type options* (Рисунок 97) выбираем раздел *Axisymmetric*, т.к. предполагаем, что модель является осесимметричной.
 6. Нажать кнопку *OK* в окне *PLANE162 element type options*.
 7. Задать опцию *Volume weighted*, указывающую, что задача будет решаться для цилиндрического объема. Нажать кнопку *OK* в окне *PLANE162 weighting option* (Рисунок 98).
 8. Нажимаем кнопку *Close* в окне *Element Type* (Рисунок 95).

Шаг 4. Определение механических характеристик пули и двуслойной брони

Сердечник пули выполнен из сверхтвёрдого, упругого, неразрушающегося материала близкого по механическим свойствам к карбиду титана (Таблица 5), внешний слой пули - материал близкий по своим механическим свойствам к меди (Таблица 6). Первый (внешний) слой брони выполнен из стали, второй (внутренний) слой выполнен из материала близкого по механическим свойствам к алюминию (Таблица 6).

З а м е ч а н и е! Механические характеристики стали (первого слоя брони) для модели *Plastic Kinematic* взяты из раздела *Explicit Dynamics Material Model Descriptions*.

Таблица 5. Механические характеристики твердосплавного сердечника

| <i>Наименование параметра</i> | <i>Значение</i> |
|-------------------------------------|-----------------|
| <i>Плотность (кг/м³)</i> | <i>4000</i> |
| <i>Модуль упругости (Па)</i> | <i>4.9E11</i> |
| <i>Коэффициент Пуассона</i> | <i>0.3</i> |

Таблица 6. Механические свойства брони и покрытия пули

| <i>Наименование параметра</i> | <i>Значение</i> | | |
|---|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | <i>Покры- тие пули</i> | <i>Первый слой брони</i> | <i>Второй слой брони</i> |
| <i>Плотность (кг/м³)</i> | <i>8330</i> | <i>7865</i> | <i>2720</i> |
| <i>Модуль упругости (Па)</i> | <i>1.4E11</i> | <i>2E11</i> | <i>7.6E10</i> |
| <i>Коэффициент Пуассона</i> | <i>0.35</i> | <i>0.27</i> | <i>0.34</i> |
| <i>Предел текучести (Па)</i> | <i>9.0E7</i> | <i>3.10E8</i> | <i>1.5E8</i> |
| <i>Касательный модуль (Па)</i> | <i>2.92E8</i> | <i>7.63E8</i> | <i>2.5E7</i> |
| <i>Параметр упрочнения</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>0</i> |
| <i>Деформационный коэффициент, (C) (с⁻¹)</i> | <i>40.0</i> | <i>40.0</i> | <i>40.0</i> |
| <i>Деформационный коэффициент, (P)</i> | <i>5.0</i> | <i>5.0</i> | <i>5.0</i> |
| <i>Деформация разрушения</i> | <i>0.54</i> | <i>0.75</i> | <i>0.65</i> |

Для определения свойств сердечника необходимо использовать пункт окна *Material Models Available* (Рисунок 114, Рисунок 115, Таблица 6):

LS-DYNA> Linear> Elastic> Isotropic

Для создания второй модели материала (покрытия пули) используется пункт раскрывающегося меню **Define Material Model Behavior > Material > New Model...** (Рисунок 116). В окне **Define Material ID** необходимо нажать кнопку **OK**, т.е. подтвердить назначение номера 2 следующему материалу.

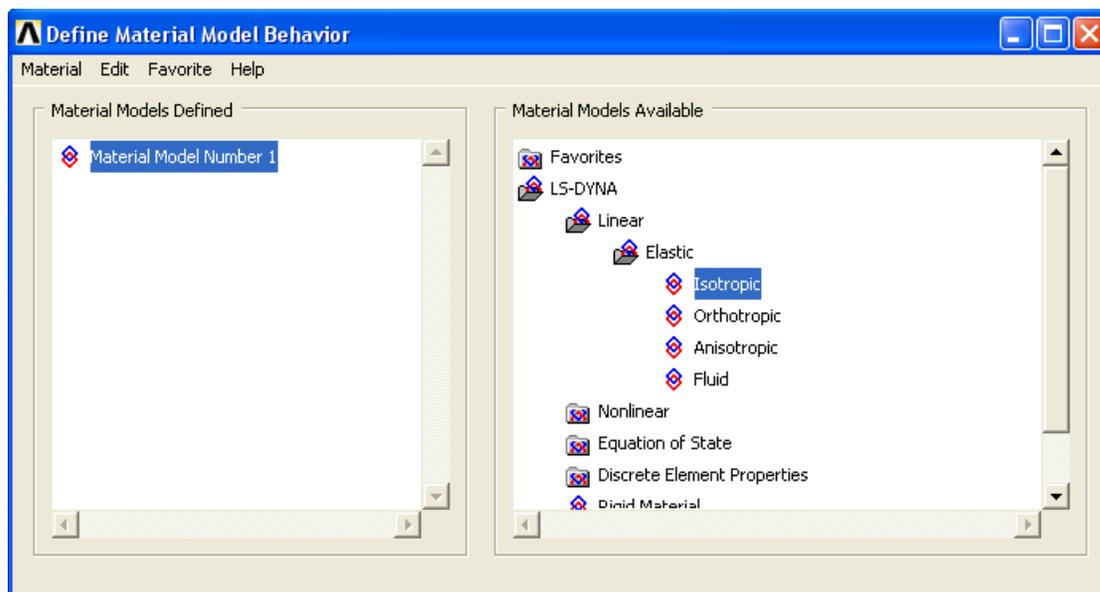


Рисунок 114. Расположение пункта *Isotropic*

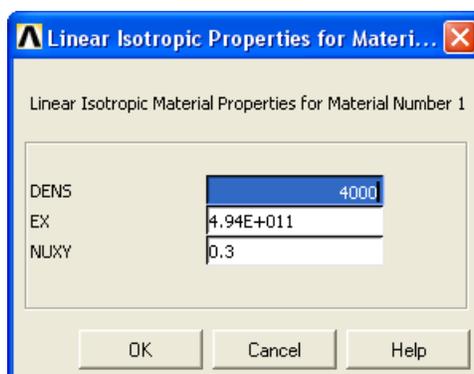


Рисунок 115. Окно назначения констант материала *Isotropic*



Рисунок 116. Пункт раскрывающегося меню окна **Define Material Model Behavior**

Для определения свойств покрытия пули (номер материала 2) используется модель *Plastic Kinematic*. Для этого необходимо использовать пункт окна *Material Models Available*:

LS-DYNA> *Nonlinear*> *Inelastic*> *Kinematic Hardning*> *Plastic Kinematic*

При его использовании появляется окно *Plastic Kinematic Properties for Mat...*. В этом случае:

- Определяем требуемые значения (Таблица 6).
- Нажимаем кнопку **ОК**.

З а м е ч а н и е! В окне *Define Material Model Behavior*> *Material Models Defined* у материала *Material Model Number 2* появилась подпись *Plastic Kinematic*, это свидетельствует о создании модели.

Для создания третьей модели материала первого слоя брони еще раз используется пункт раскрывающегося меню *Define Material Model Behavior*> *Material*> *New Model...*. В окне *Define Material ID* необходимо нажать кнопку **ОК**, т.е. подтвердить назначение номера 3 новому материалу. Дальнейшие действия по определению свойств *Plastic Kinematic* материала первого слоя брони полностью повторяют предыдущее изложение.

З а м е ч а н и е! Необходимо повторить действия по определению параметров модели *Plastic Kinematic* для материала номер 4, который соответствует второму слою брони (Таблица 6).

Закрываем окно *Define Material Model Behavior*.

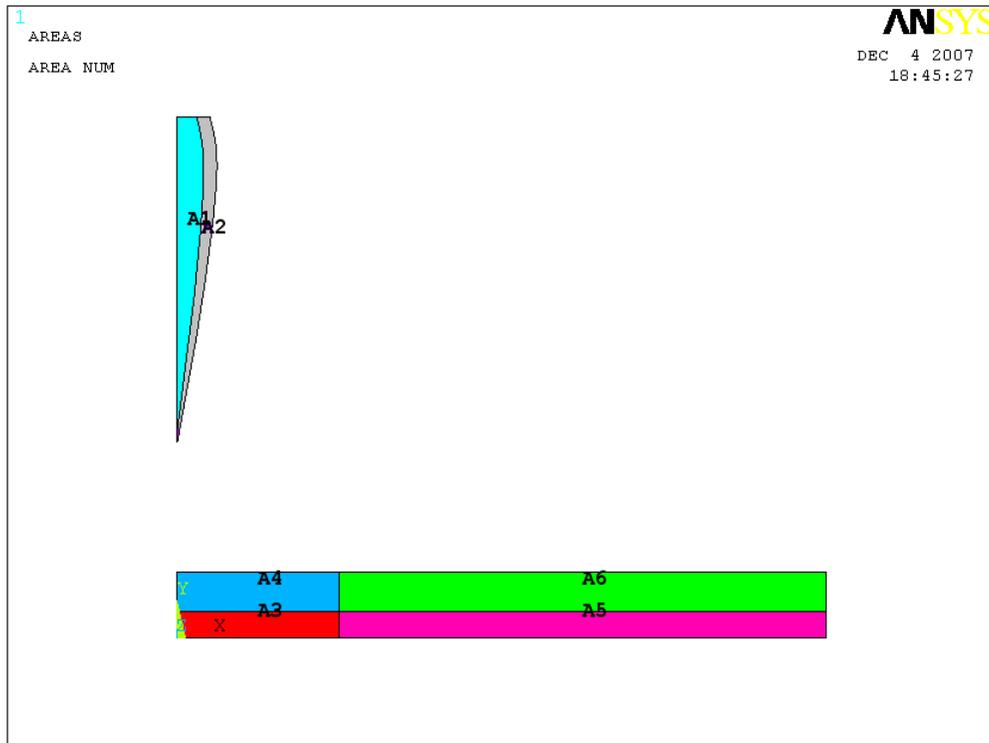
Шаг 5. Включение нумерации поверхностей и выключение нумерации линий

Пункт меню утилит

Utility Menu> *PlotCtrls*> *Numbering...*

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора *Plot Numbering Controls*. В этом случае:

- Устанавливаем флаг On в пункте *AREA Area numbers*.
- Устанавливаем флаг Off в пункте *LINE Line numbers*.
- Нажимаем кнопку **ОК** (Рисунок 117).

Список команд***/PNUM,LINE,0******/PNUM,AREA,1******/REPLOT*****Рисунок 117. Нумерация поверхностей модели***Шаг 6. Назначение различных материалов различным частям модели*

Можно воспользоваться любым из трех перечисленных ниже способов для назначений номера материала для отдельных поверхностей.

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

Для установки атрибутов элементов (в частности, материалов) необходимо воспользоваться раскрывающимся списком *Element Attributes* первой секции *MeshTool* (Рисунок 101):

- Устанавливаем пункт *Areas* в раскрывающемся списке *Element Attributes* первой сверху секции диалогового окна *MeshTool* (Рисунок 101).
- Нажимаем кнопку *Set*.
- С помощью окна выбора *Area Attributes* выбираем поверхности *A1*.
- Нажимаем *OK*.
- В появившемся окне *Area Attributes* (Рисунок 118) нажимаем *Apply*.

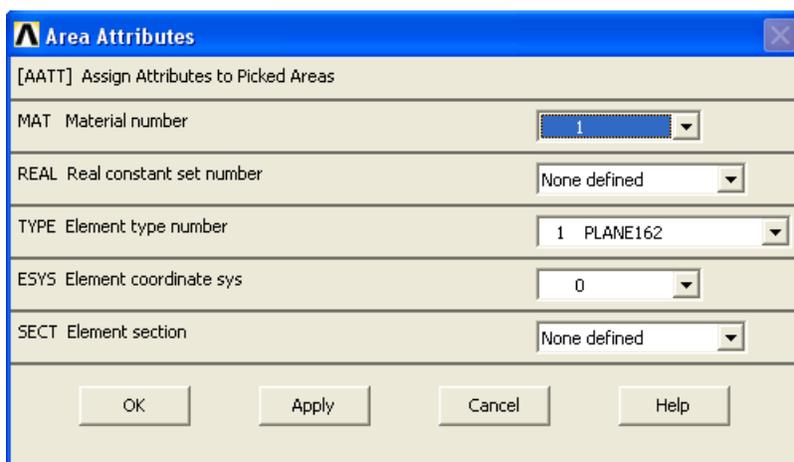


Рисунок 118. Вид окна *Area Attributes*

- С помощью окна выбора *Area Attributes* выбираем поверхности *A2*.
- Нажимаем *OK*.
- В появившемся окне *Area Attributes* (Рисунок 118) в раскрывающемся списке *MAT Material number* выбираем материал номер *2*.
- Нажимаем *Apply*.
- С помощью окна выбора *Area Attributes* выбираем поверхности *A4, A6*.
- Нажимаем *OK*.
- В появившемся окне *Area Attributes* (Рисунок 118) в раскрывающемся списке *MAT Material number* выбираем материал номер *3*.
- Нажимаем *Apply*.

- С помощью окна выбора *Area Attributes* выбираем поверхности *A3, A5*.
- Нажимаем **ОК**.
- В появившемся окне *Area Attributes* (Рисунок 118) в раскрывающемся списке *MAT Material number* выбираем материал номер 4.
- Нажимаем **ОК**.

Пункт главного меню

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

При его использовании:

- С помощью окна выбора *Area Attributes* выбираем поверхности *A1*.
- В появившемся окне *Area Attributes* (Рисунок 118) нажимаем **Apply**.
- С помощью окна выбора *Area Attributes* выбираем поверхности *A2*.
- Нажимаем **ОК**.
- В появившемся окне *Area Attributes* (Рисунок 118) в раскрывающемся списке *MAT Material number* выбираем материал номер 2.
- Нажимаем **Apply**.
- С помощью окна выбора *Area Attributes* выбираем поверхности *A4, A6*.
- Нажимаем **ОК**.
- В появившемся окне *Area Attributes* (Рисунок 118) в раскрывающемся списке *MAT Material number* выбираем материал номер 3.
- Нажимаем **Apply**.
- С помощью окна выбора *Area Attributes* выбираем поверхности *A3, A5*.
- Нажимаем **ОК**.
- В появившемся окне *Area Attributes* (Рисунок 118) в раскрывающемся списке *MAT Material number* выбираем материал номер 4.
- Нажимаем **ОК**.

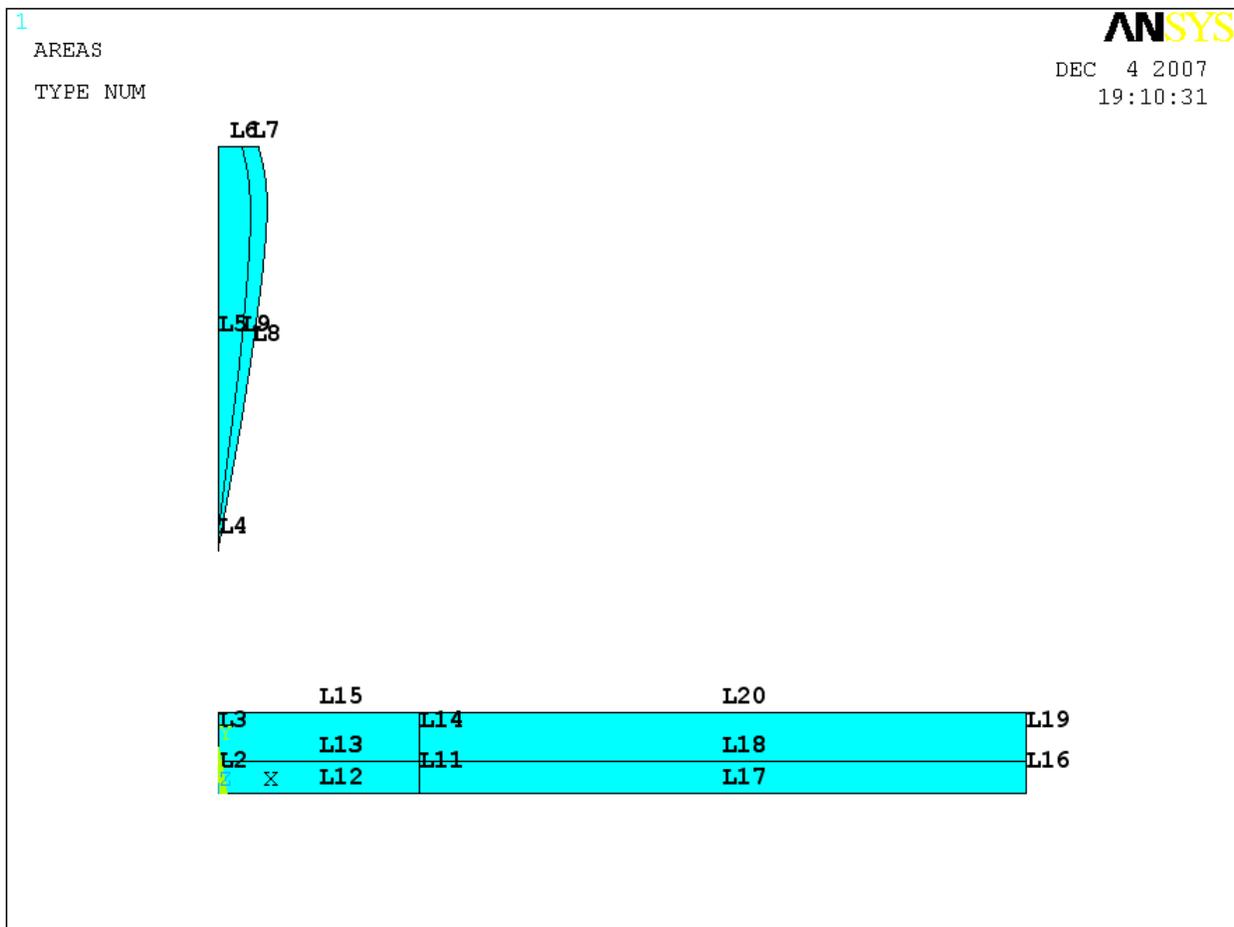
Список команд*ASEL,S,AREA,,1**AATT,1,0,1,0,0**ASEL,S,AREA,,2**AATT,2,0,1,0,0**ASEL,S,AREA,,4**AATT,3,0,1,0,0**ASEL,S,AREA,,6**AATT,3,0,1,0,0**ASEL,S,AREA,,3**AATT,4,0,1,0,0**ASEL,S,AREA,,5**AATT,4,0,1,0,0**ASEL,ALL*

Шаг 7. Включение нумерации линий и выключение нумерации поверхностей

Пункт меню утилит***Utility Menu> PlotCtrls> Numbering...***

При использовании данного пункта меню появляется окно выбора ***Plot Numbering Controls***. В этом случае:

- Устанавливаем флаг Off в пункте ***AREA Area numbers***.
- Устанавливаем флаг On в пункте ***LINE Line numbers***.
- Нажимаем кнопку ***OK*** (Рисунок 119).

Команда***/PNUM,LINE,1******/PNUM,AREA,0******/REPLOT*****Рисунок 119. Модель с включенной нумерацией линий**

Шаг 8. Назначение количества делений линий модели узлами конечно-элементной сетки

Можно воспользоваться любым из трех перечисленных ниже способов (средствами *Meshtool*, пунктом главного меню или командой *LESIZE*) для назначений количества делений линий модели узлами конечно-элементной сетки.

Средства MeshTool

Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool...

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

- Воспользуемся кнопкой **Set** с меткой **Lines** раскрывающегося списка третьей сверху секции диалогового окна **MeshTool** (Рисунок 103).
- С помощью окна выбора **Element Size on Picked...** (Рисунок 104) выбираем линии **L6, L7**.
- Нажимаем **OK** или **Apply**.
- В поле **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем, что линии делятся на четное число (>2) отрезков узлами конечноэлементной сетки (Рисунок 105).
- Нажимаем **Apply** в окне **Element Sizes on Picked Lines**, т.к. еще будем продолжать назначать количество делений выбранных линий узлами конечно-элементной сетки.
- С помощью окна выбора **Element Size on Picked...** (Рисунок 104) выбираем линии **L3**.
- Нажимаем **OK** или **Apply**.
- В поле с меткой **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем, что линии делится на **6** отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем **Apply**.
- С помощью окна выбора **Element Size on Picked...** выбираем линии **L2**.
- Нажимаем **OK** или **Apply**.
- В поле с меткой **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем, что линии делятся на **4** отрезка узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем **Apply**.
- С помощью окна выбора **Element Size on Picked...** выбираем линию **L12**.
- Нажимаем в окне **OK** или **Apply**.
- В поле с меткой **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем, что линии делится на **20** отрезков узлами конечноэлементной сетки.

- Нажимаем в окне **OK**.

Пункт главного меню

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

При его использовании:

- С помощью окна выбора **Element Size on Picked...** (Рисунок 104) выбираем линии **L6, L7**.
- Нажимаем **OK** или **Apply**.
- В поле **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем, что линии делятся на четное число (>2) отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем **Apply** в окне **Element Sizes on Picked Lines**, т.к. еще будем продолжать назначать количество разбиений на других линиях.
- С помощью окна выбора **Element Size on Picked...** (Рисунок 104) выбираем линии **L3**.
- Нажимаем **OK** или **Apply**.
- В поле с меткой **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем, что линии делится на **6** отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем **Apply**.
- С помощью окна выбора **Element Size on Picked...** выбираем линии **L2**.
- Нажимаем **OK** или **Apply**.
- В поле с меткой **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем, что линии делится на **4** отрезка узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем **Apply**.
- С помощью окна выбора **Element Size on Picked...** выбираем линию **L12**.
- Нажимаем **OK** или **Apply**.
- В поле с меткой **NDIV** появившегося окна **Element Sizes on Picked Lines** указываем, что линии делится на **20** отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем **OK**.

Список команд*LESIZE,6,,4**LESIZE,7,,4**LESIZE,3,,6**LESIZE,2,,4**LESIZE,12,,20*

Шаг 9. Построение упорядоченного разбиения по 3 или 4 сторонам поверхности

Средства **MeshTool****Main Menu > Preprocessor > MeshTool**

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

- В первом раскрывающемся списке выбираем раздел **Area** – т.к. будут разбиваться поверхности.
- Выбираем форму элементов (пункт **Quad** для того чтобы разбиение было выполнено четырехсторонними элементами).
- Выбираем вид разбиения (пункт **Mapped** разбиение должно быть упорядоченным).
- Во втором раскрывающемся списке выбираем пункт **3 or 4 sided** – разбиение четырех или трехсторонней поверхности (Рисунок 106).
- Нажимаем кнопку **Mesh**.
- С помощью появившегося окна выбора **Mesh Areas** указываем что собираемся разбивать все поверхности с помощью кнопки **Pick All**.

Пункты главного меню

Построение упорядоченного разбиения поверхности выполняется с помощью пункта меню:

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

При использовании данного пункта меню появится окно выбора **Mesh Areas**. После этого с помощью появившегося окна выбора **Mesh Areas** указываем, что собираемся разбивать все поверхности с помощью кнопки **Pick All** (Рисунок 120).

Шаг 10. Сохранение измененной модели в db-файле

Utality Menu > Save as ...

При использовании пункта главного меню появляется окно выбора **Save DataBase**. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, **C:\example3**), в которой будет храниться модель (Рисунок 120), полностью описана ранее. В данном случае, необходимо выбрать имя существующего файла (**example3.db**) в окне **Save DataBase to** и нажать кнопку **Yes** («по умолчанию» включена кнопка **No**) для перезаписи существующего файла.

Результат построения упорядоченного разбиения для примера 3

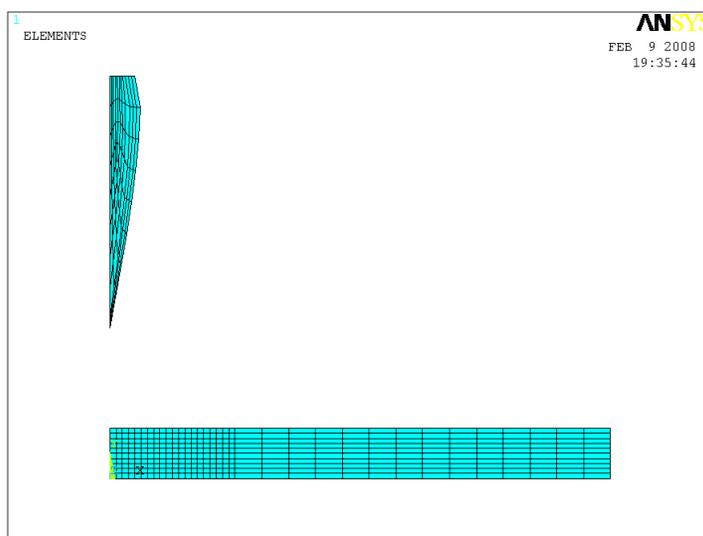


Рисунок 120. Результат построения конечноэлементного разбиения модели примера 3

Пример 4. Построение упорядоченного разбиения конической оболочки

Шаг 1. Чтение существующей модели из db-файла

Utility Menu > File > Resume from...

При использовании пункта меню утилит появляется окно **Resume DataBase**. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, **C:\example4**), в которой хранится уже созданный файл полностью изложены ранее, однако в данном случае необходимо выбрать другой файл (например, **example4.db**) в списке **Resume DataBase From**, в котором хранится вторая созданная модель (Рисунок 121).

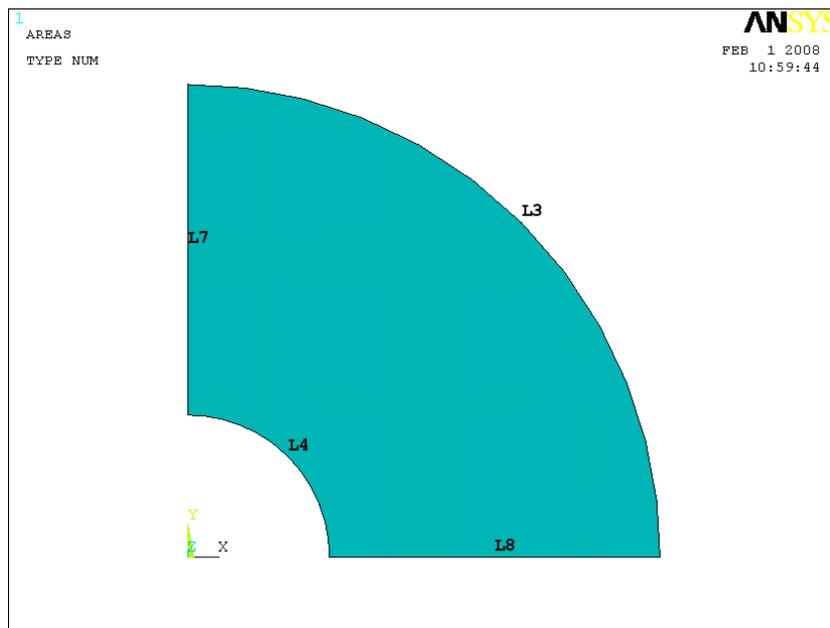


Рисунок 121. Результат выполнения шага 1

Шаг 2. Включение опции LS-DYNA Explicit

Main Menu > Preferences...

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

- Устанавливаем флажок в поле с меткой **LS-DYNA Explicit**.
- Нажимаем кнопку **ОК** для подтверждения выбора.

Шаг 3. Выбор типа элементов для разбиения модели

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

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

При его использовании появляется окно *Element Types* (Рисунок 95) с надписью *None Defined*, означающей, что к настоящему моменту ни один из типов элементов не выбран для использования при разбиении. В этом случае:

- Нажимаем кнопку *Add...*
- В появившемся окне *Library of Elements Types* следует выбрать из раздела *LS-DYNA Explicit* элемент *Thin Shell 163*.
- Нажать кнопку *OK* в окне *Library of Elements Types*.

З а м е ч а н и е! Используется значение опций установленное «по умолчанию».

- Нажимаем кнопку *Close* в окне *Element Type* (Рисунок 95).

Шаг 4. Определение констант оболочечных элементов

Будем предполагать, что оболочка выполнена из листа постоянной толщины. Толщина оболочечных элементов указывается с помощью пункта главного меню:

Main Menu > Preprocessor > Real Constants

При использовании данного пункта меню:

- В окне *Real Constants* (Рисунок 122) необходимо нажать кнопку *Add...*
- В окне *Element Type for Real Co...* (Рисунок 123) необходимо нажать кнопку *OK*, т.к. тип элементов *SHELL163* выбран «по умолчанию» (он – один в списке).
- В первом окне *Real Constant Set Number 1, for THIN SHELL163* необходимо также нажать *OK*, т.е. формально подтвердить указанный «по умолчанию» номер множества констант.
- Во втором окне *Real Constant Set Number 1, for THIN SHELL163* необходимо ввести требуемые параметры (Рисунок 124, Таблица 7) и нажать кнопку *OK*.
- В окне *Real Constants* (Рисунок 122) нажимаем кнопку *Close*.

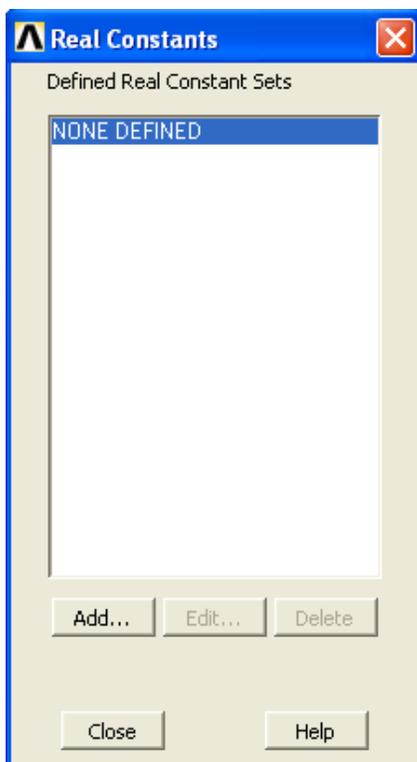
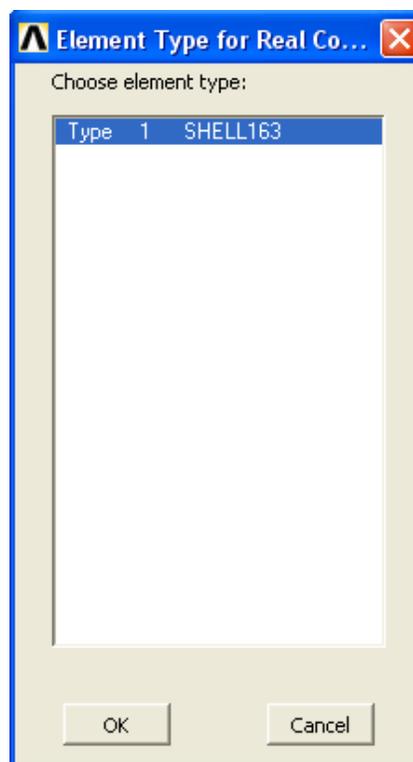
Рисунок 122. Окно *Real Constants*Рисунок 123. Окно *Element Type for Real Co...*

Таблица 7. Значения констант оболочечных элементов

| <i>Наименование параметра</i> | <i>Значение</i> |
|-------------------------------|-----------------------|
| <i>SHRF</i> | <i>0.83333...</i> |
| <i>NIP</i> | <i>«по умолчанию»</i> |
| <i>T1</i> | <i>0.05</i> |
| <i>T2</i> | <i>0.05</i> |
| <i>T3</i> | <i>0.05</i> |
| <i>T4</i> | <i>0.05</i> |

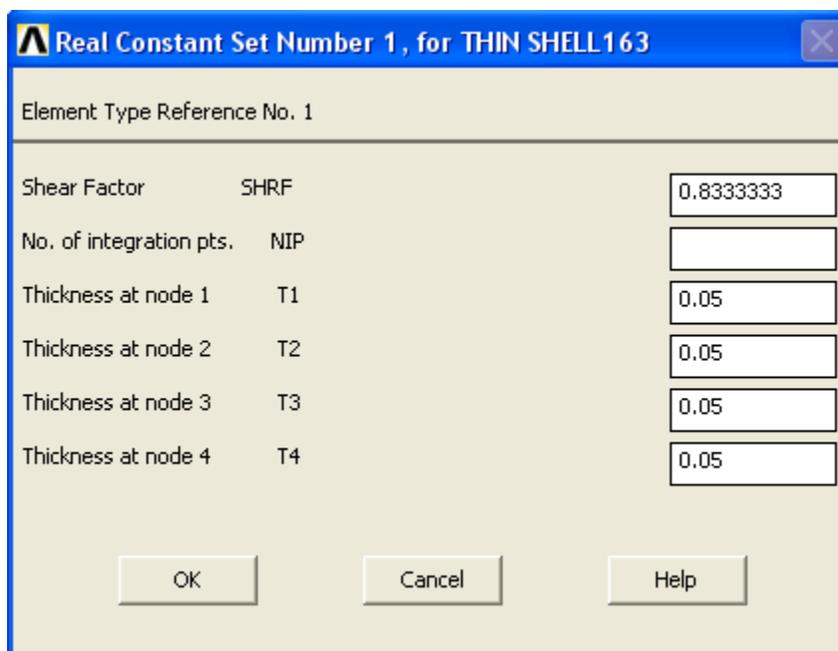


Рисунок 124. Окно *Real Constant Set Number 1, for THIN SHELL163* с заполненными полями ввода

Шаг 5. Последовательность действий при определении механических характеристик оболочки

З а м е ч а н и е! Данный шаг демонстрирует, что не все поля модели материала *Plastic Kinematic* должны быть заполнены (Таблица 8). Отсутствие значений в некоторых полях делает ее аналогичной модели *Bilinear Kinematic*.

Будем предполагать, что оболочка выполнена из стального листа. Для определения модели материала необходимо воспользоваться пунктом главного меню:

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models

При его использовании появится окно *Define Material Model Behavior*, в котором необходимо выбирать пункт соответствующий интересующей модели материала.

Таблица 8. Механические свойства оболочки

| <i>Наименование параметра</i> | <i>Значение</i> |
|---|-----------------|
| <i>Плотность (кг/м³)</i> | <i>7865</i> |
| <i>Модуль упругости (Па)</i> | <i>2E11</i> |
| <i>Коэффициент Пуассона</i> | <i>0.27</i> |
| <i>Предел текучести (Па)</i> | <i>3.10E8</i> |
| <i>Касательный модуль (Па)</i> | <i>7.63E8</i> |
| <i>Параметр упрочнения</i> | <i>0</i> |
| <i>Деформационный коэффициент, (C) (с⁻¹)</i> | <i>0</i> |
| <i>Деформационный коэффициент, (P)</i> | <i>0</i> |
| <i>Деформация разрушения</i> | <i>0</i> |

Для определения свойств оболочки используется модель *Plastic Kinematic*. Для этого необходимо использовать пункт окна *Material Models Available* (Рисунок 99):

LS-DYNA> Nonlinear> Inelastic> Kinematic Hardning> Plastic Kinematic

При его использовании появляется окно *Plastic Kinematic Properties for Mat...*. В этом случае:

- Определяем требуемые значения (Таблица 8).
- Нажимаем кнопку **ОК**.

Закрываем окно *Define Material Model Behavior* (Рисунок 99).

Шаг 6. Присвоение атрибутов компонентам твердотельной модели

Можно воспользоваться любым из трех перечисленных ниже способов для назначений номера материала для отдельных поверхностей.

Средства MeshTool

Main Menu> Preprocessor> Meshing> MeshTool...

Для установки атрибутов элементов (в частности, материалов) необходимо воспользоваться раскрывающимся списком *Element Attributes* первой секции *MeshTool* (Рисунок 101):

- Устанавливаем пункт *Areas* в раскрывающемся списке *Element Attributes* первой сверху секции диалогового окна *MeshTool* (Рисунок 101).
- Нажимаем кнопку *Set*.
- В окне выбора *Area Attributes* нажимаем *Pick All*.
- В появившемся окне *Area Attributes* (Рисунок 118) нажимаем *OK*.

Пункт главного меню

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

При его использовании:

- В окне выбора *Area Attributes* нажимаем *Pick All*.
- В появившемся окне *Area Attributes* (Рисунок 118) нажимаем *OK*.

Список команд

AATT,1,1,1,0,0

Шаг 7. Назначение количества делений узлами конечноэлементной сетки линий при разбиении

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

Средства MeshTool

Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool...

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

- Воспользуемся кнопкой *Set* с меткой *Lines* из третьей сверху секции диалогового окна *MeshTool* (Рисунок 103).
- В окне выбора *Element Size on Picked...* (Рисунок 104) нажимаем кнопку *Pick All*.

- В поле *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* (Рисунок 105) указываем, что линия делится на **20** отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем в окне **OK**.

Пункт главного меню

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

При его использовании:

- В окне выбора *Element Size on Picked...* (Рисунок 104) нажимаем кнопку *Pick All*.
- В поле *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* (Рисунок 105) указываем, что линия делится на **20** отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем в окне **OK**.

Список команд

LESIZE,ALL,,,20

Шаг 8. Построение упорядоченного разбиения по 3 или 4 сторонам поверхности

Средства *MeshTool*

Main Menu> Preprocessor> MeshTool

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

- В первом раскрываемом списке выбираем раздел *Area* – т.к. будут разбиваться поверхности.
- Выбираем форму элементов, а именно пункт *Quad* – для того чтобы разбиение было выполнено четырехсторонними элементами.
- Выбираем вид разбиения, а именно пункт *Mapped* – разбиение должно быть упорядоченным.

- Во втором раскрывающемся списке выбираем пункт *3 or 4 sided* – разбиение четырех или трехсторонней поверхности (Рисунок 106).
- Нажимаем кнопку *Mesh*.
- В окне выбора *Mesh Areas* нажимаем кнопку *Pick All*.

Пункт главного меню

Построение упорядоченного разбиения поверхности выполняется с помощью пункта меню:

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

После этого с помощью появившегося окна выбора *Mesh Areas* указываем что собираемся разбивать все поверхности с помощью кнопки *Pick All* (Рисунок 125).

Шаг 9. Сохранение измененной модели в db-файле

Utality Menu > Save as ...

При использовании пункта главного меню появляется окно выбора *Save DataBase*. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, *C:\example4*), в которой будет храниться модель (Рисунок 125), полностью описана ранее. В данном случае, необходимо выбрать имя существующего файла (*example4.db*) в окне *Save DataBase to* и нажать кнопку *Yes* («по умолчанию» включена кнопка *No*) для перезаписи существующего файла.

Результат построения упорядоченного разбиения для примера 4

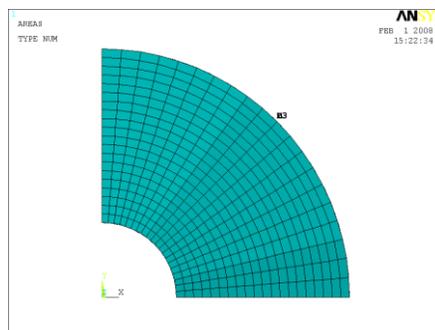


Рисунок 125. Результат построения конечноэлементного разбиения модели примера 4

Пример 5. Построение разбиения каркаса балочными элементами с узлами ориентации

Шаг 1. Чтение существующей модели из db-файла

Utility Menu > File > Resume from...

При использовании пункта меню утилит появляется окно **Resume DataBase**. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, *C:\example5*), в которой хранится уже созданный файл полностью изложены ранее, однако в данном случае необходимо выбрать другой файл (например, *example5.db*) в списке **Resume DataBase From**, в котором хранится вторая созданная модель (Рисунок 126).

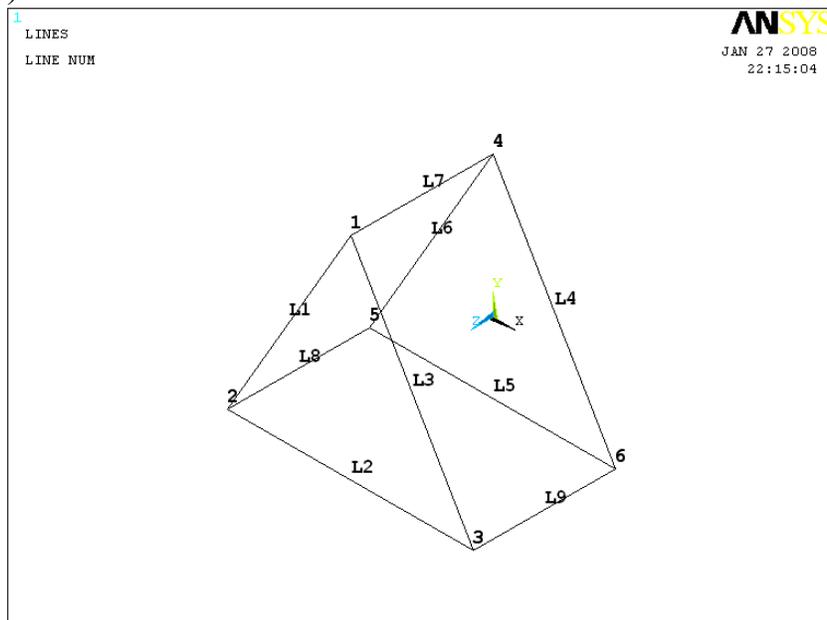


Рисунок 126. Результат выполнения шага 1

Шаг 2. Включение опции LS-DYNA Explicit

Main Menu > Preferences...

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

- Устанавливаем флажок в поле с меткой **LS-DYNA Explicit**.
- Нажимаем кнопку **ОК** для подтверждения выбора.

Шаг 3. Выбор типа элемента для разбиения

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

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

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

- Нажимаем кнопку *Add...*
- В появившемся окне *Library of Elements Types* следует выбрать из раздела *LS-DYNA Explicit* элемент *3D Beam 161*.
- Нажать кнопку *OK* в окне *Library of Elements Types*.
- Нажимаем кнопку *Close* в окне *Element Type*.

З а м е ч а н и е! «По умолчанию» выбран прямоугольный профиль балочного элемента.

Шаг 4. Определение констант сечения балочных элементов

З а м е ч а н и е! В ANSYS/LS-DYNA нет окна *Beam Tool* и все параметры сечения балочных элементов определяются с помощью констант.

Геометрические размеры сечения элементов указываются с помощью пункта главного меню:

Main Menu > Preprocessor > Real Constants

При использовании данного пункта меню:

- В окне *Real Constants* необходимо нажать кнопку *Add...*
- В окне *Element Type for Real Co...* необходимо нажать кнопку *OK*, т.к. тип элементов *BEAM161* выбран «по умолчанию» (он — один в списке).
- В первом окне *Real Constant Set Number 1, for BEAM161* необходимо также нажать *OK*, т.е. формально подтвердить указанный «по умолчанию» номер множества констант.
- Во втором окне *Real Constant Set Number 1, for BEAM161* необходимо ввести требуемые параметры (Рисунок 127, Таблица 9) и нажать кнопку *OK*.
- В окне *Real Constants* нажимаем кнопку *Close*.

Таблица 9. Значение вещественных констант для выбранного сечения

| <i>Наименование параметра</i> | <i>Значение</i> |
|-------------------------------|-------------------|
| <i>SHRF</i> | <i>0.83333...</i> |
| <i>TS1</i> | <i>0.5</i> |
| <i>TS2</i> | <i>0.5</i> |
| <i>TT1</i> | <i>0.1</i> |
| <i>TT2</i> | <i>0.1</i> |

Real Constant Set Number 1, for BEAM161

Element Type Reference No. 1

| | | |
|-------------------------|------|--------------|
| Shear Factor | SHRF | 0.8333333333 |
| Thickness@node 1- s dir | TS1 | 0.5 |
| Thickness@node 2- s dir | TS2 | 0.5 |
| Thickness@node 1- t dir | TT1 | 0.1 |
| Thickness@node 2- t dir | TT2 | 0.1 |

Location of reference surface

Normal to s-axis NSLOC: Center

Normal to t-axis NTLOC: Center

OK Cancel Help

Рисунок 127. Окно *Real Constant Set Number 1, for BEAM161* с заполненными полями ввода

Шаг 5. Последовательность действий при определении механических характеристик балочных элементов

Будем предполагать, что каркас выполнен из стальных балок (Таблица 3). При этом необходимо воспользоваться пунктом главного меню:

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models

При его использовании появится окно **Define Material Model Behavior**, в котором необходимо выбирать пункт соответствующий интересующей модели материала.

Для определения свойств балок используется модель **Plastic Kinematic**. Для этого необходимо использовать пункт окна **Material Models Available** (Рисунок 99):

LS-DYNA > Nonlinear > Inelastic > Kinematic Hardning > Plastic Kinematic

В появившемся окне **Plastic Kinematic Properties for Mat...** :

- Определяем требуемые значения (Таблица 3).
- Нажимаем кнопку **OK**.

Далее, закрываем окно **Define Material Model Behavior** (Рисунок 99).

Шаг 6. Назначение атрибутов (материала и точек ориентации) компонентам модели

Можно воспользоваться любым из трех перечисленных ниже способов для назначений атрибутов для отдельных линий.

Средства MeshTool

Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool...

Для установки атрибутов элементов необходимо воспользоваться раскрывающемся списком **Element Attributes** первой секции **MeshTool**:

- Устанавливаем пункт **Lines** в раскрывающемся списке **Element Attributes** первой сверху секции диалогового окна **MeshTool**.
- Нажимаем кнопку **Set**.
- С помощью окна выбора **Line Attributes** выбираем линию **L1** (Рисунок 126).
- Нажимаем **OK** или **Apply**.

- В появившемся окне *Line Attributes* (Рисунок 128) устанавливаем флаг Yes в разделе *Pick Orientation Keypoints* и нажимаем *OK*.

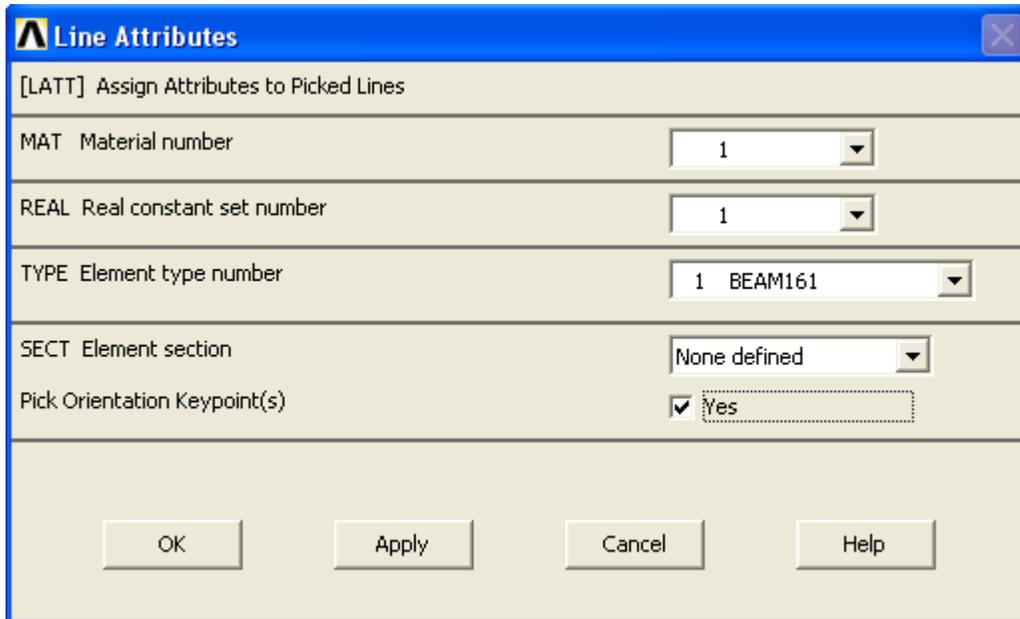


Рисунок 128. Вид окна *Area Attributes*

- С помощью окна выбора *Line Attributes* выбираем ключевую точку 3 (точка ориентации для линии *L1*).
- Нажимаем *Apply*.
- С помощью окна *Line Attributes* выбираем линию *L2* (Рисунок 126).
- Нажимаем *OK* или *Apply*.
- В окне *Line Attributes* нажимаем *OK*, т.к. все значения остаются без изменений.
- С помощью окна выбора *Line Attributes* выбираем ключевую точку 1 (точка ориентации для линии *L2*).
- Нажимаем *Apply*.
- Продолжаем выполнять операцию определения атрибутов для линий *L3 – L9* (Рисунок 126, Таблица 10).

Таблица 10. Номера точек ориентации для линий модели (Рисунок 126)

| <i>Номер линии</i> | <i>Номер ключевой точки</i> |
|--------------------|-----------------------------|
| <i>L1</i> | <i>3</i> |
| <i>L2</i> | <i>1</i> |
| <i>L3</i> | <i>2</i> |
| <i>L4</i> | <i>5</i> |
| <i>L5</i> | <i>4</i> |
| <i>L6</i> | <i>6</i> |
| <i>L7</i> | <i>3</i> |
| <i>L8</i> | <i>3</i> |
| <i>L9</i> | <i>2</i> |

Пункт главного меню**Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Lines**

При его использовании:

- С помощью окна выбора *Line Attributes* выбираем линию *L1* (Рисунок 126).
- Нажимаем **OK** или *Apply*.
- В появившемся окне *Line Attributes* устанавливаем флаг  **Yes** в разделе *Pick Orientation Keypoints* и нажимаем **OK**.
- С помощью окна выбора *Line Attributes* выбираем ключевую точку *3* (точка ориентации для линии *L1*).
- Нажимаем *Apply*.
- С помощью окна *Line Attributes* выбираем линию *L2* (Рисунок 126).

- Нажимаем *OK* или *Apply*.
- В окне *Line Attributes* нажимаем *OK*, т.к. все значения остаются без изменений.
- С помощью окна выбора *Line Attributes* выбираем ключевую точку *1* (точка ориентации для линии *L2*).
- Нажимаем *Apply*.
- Продолжаем выполнять операцию определения атрибутов для линий *L3 – L9* (Рисунок 126, Таблица 10).

Список команд

LSEL,S,LINE,,1,,0

LATT,1,1,1,,3

LSEL,S,LINE,,2,,0

LATT,1,1,1,,1

LSEL,S,LINE,,3,,0

LATT,1,1,1,,2

LSEL,S,LINE,,4,,0

LATT,1,1,1,,5

LSEL,S,LINE,,5

LATT,1,1,1,,4

LSEL,S,LINE,,6

LATT,1,1,1,,6

LSEL,S,LINE,,7

LATT,1,1,1,,3

LSEL,S,LINE,,8

LATT,1,1,1,,3

LSEL,S,LINE,,9

LATT,1,1,1,,2

LSEL,ALL

Шаг 7. Назначение количества делений линий модели узловыми точками конечно-элементного разбиения

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

Средства MeshTool

Main Menu> Preprocessor> Meshing> MeshTool...

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

- Воспользуемся кнопкой *Set* с меткой *Lines* из третьей сверху секции диалогового окна *MeshTool*.
- В окне выбора *Element Size on Picked...* нажимаем кнопку *Pick All*.
- В поле *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что все линии делятся на *10* отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем *OK* в окне *Element Sizes on Picked Lines*.

Пункт главного меню

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

При его использовании:

- В окне выбора *Element Size on Picked...* нажимаем кнопку *Pick All*.
- В поле *NDIV* появившегося окна *Element Sizes on Picked Lines* указываем, что все линии делятся на *10* отрезков узлами конечноэлементной сетки.
- Нажимаем *OK* в окне *Element Sizes on Picked Lines*.

Список команд*LESIZE,ALL,,10**Шаг 8. Построение разбиения каркаса*Средства *MeshTool**Main Menu> Preprocessor> MeshTool*

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

- В первом раскрывающемся списке выбираем раздел *Lines* – т.к. будут разбиваться линии.
- Нажимаем кнопку *Mesh*.
- С помощью появившегося окна выбора *Mesh Lines* указываем что собираемся разбивать все линии с помощью кнопки *Pick All*.

Пункты главного меню

Построение разбиения линий выполняется с помощью пункта меню:

Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh> Lines

При использовании данного пункта меню появится окно выбора *Mesh Line*. После этого указываем что собираемся разбивать все линии с помощью кнопки *Pick All*.

*Шаг 9. Сохранение измененной модели в db-файле**Utality Menu> Save as ...*

При использовании пункта главного меню появляется окно выбора *Save DataBase*. В этом случае последовательность действий, связанная с выбором логического диска, папки (например, *C:\example5*), в которой будет храниться модель (Рисунок 129), полностью описана ранее. В данном случае необходимо выбрать имя существующего файла (*example5.db*) в окне *Save DataBase to* и нажать кнопку *Yes* («по умолчанию» включена кнопка *No*) для перезаписи существующего файла.

Результат построения разбиения для примера 5

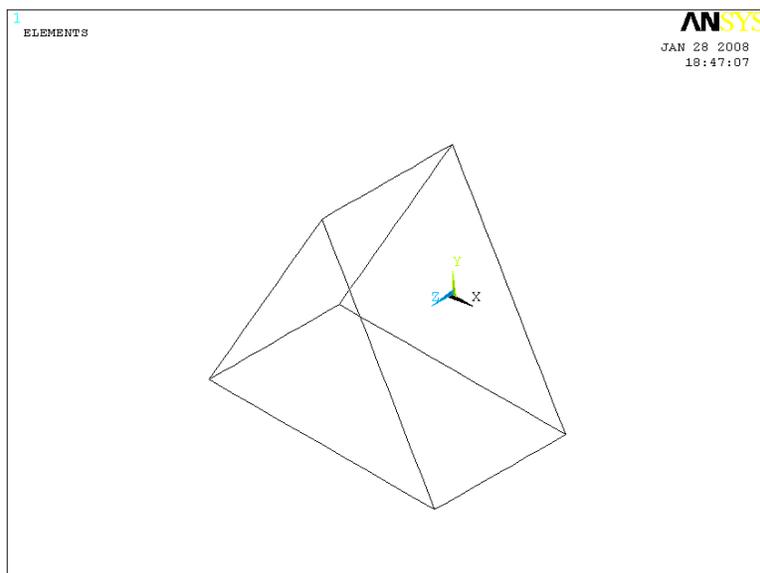


Рисунок 129. Результат построения конечноэлементного разбиения модели примера 5

Литература

1. Журавков М. А. Простейшая модель высокоскоростного взаимодействия пули с твердосплавным сердечником и композиционной брони / М. А. Журавков, **А. С. Кравчук**, А. С. Чашинский // X Белорусская математическая конференция : тез. докладов межд. научн. конф. Минск, 3-7 ноября 2008 г. – Часть 2. – Минск : Институт математики НАН Беларуси, 2008. – С. 115.
2. Журавков М. А. Разрушение цилиндрического образца с концентратором / М. А. Журавков, **А. С. Кравчук**, А. С. Быков, С. М. Дорофеев // Аналитические методы анализа и дифференциальных уравнений : тез. докл. межд. конференции 14-19 сент. 2009 г. Минск, Беларусь. – Минск : ИМ НАНБ, 2009. – С. 65.
3. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач [Электронный ресурс] : курс лекций для студ. мех.-мат. фак. обучающихся по специальности 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 5 ч. Ч. 1. Графический интерфейс и командная строка. Средства создания геометрической модели / **А. С. Кравчук**, **А. Ф. Смалюк**, **А. И. Кравчук**. – Электрон. текстовые дан. – Минск : БГУ, 2013. – 130 с.: ил. – Библиогр.: с. 128. – Загл. с тит. экрана. – № 001228052013. Деп. в БГУ 28.05.2013.
4. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач [Электронный ресурс] : курс лекций для студ. мех.-мат. фак. обучающихся по специальности 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 5 ч. Ч. 2. Средства отображения и редактирования геометрических компонентов твердотельной модели. Примеры создания твердотельных моделей средствами ANSYS для решения физических задач / **А. С. Кравчук**, **А. Ф. Смалюк**, **А. И. Кравчук**. – Электрон. текстовые дан. – Минск : БГУ, 2013. – 145 с.: ил. – Библиогр.: с. 143. – Загл. с тит. экрана. – № 001328052013. Деп. в БГУ 28.05.2013.
5. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач [Электронный ресурс] : курс лекций для студ. мех.-мат. фак. обучающихся по специальности 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 5 ч. Ч. 3. Определение физических констант материалов и конечноэлементное разбиение твердотельной модели. Примеры выполнения этих действий с построенными ранее моделями / **А. С. Кравчук**, **А. Ф. Смалюк**, **А. И. Кравчук**. – Электрон.

- текстовые дан. – Минск : БГУ, 2013. – 193 с.: ил. – Библиогр.: с. 190. – Загл. с тит. экрана. – № 001428052013. Деп. в БГУ 28.05.2013.
6. Электронная библиотека механики и физики. Лекции по ANSYS с примерами решения задач [Электронный ресурс] : курс лекций для студ. мех.-мат. фак. обучающихся по специальности 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 5 ч. Ч. 4. Ограничения и нагрузки. Разделы Solution и General Postproc главного меню. Примеры постановки краевых задач, их решения и просмотра результатов / **А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк, А. И. Кравчук.** – Электрон. текстовые дан. – Минск : БГУ, 2013. – 118 с.: ил. – Библиогр.: с. 116 . – Загл. с тит. экрана. – № 001528052013. Деп. в БГУ 28.05.2013.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Введение | 3 |
| ANSYS/LS-DYNA. Общая характеристика интерфейса и средств создания твердотельной модели детали | 4 |
| Общая характеристика графического интерфейса | 4 |
| Общая характеристика средств моделирования | 4 |
| Создание «составной части» модели | 4 |
| Примеры создания твердотельных моделей для LS-DYNA средствами ANSYS | 6 |
| Предварительные действия. Выбор системы физических единиц | 7 |
| Пример 1. Построение радиального сечения цилиндрического образца с концентратором | 7 |
| Пример 2. Построение модели криволинейного листа рессоры | 22 |
| Пример 3. Модель радиального сечения двуслойной брони и пули с твердосплавным сердечником | 38 |
| Пример 4. Модель конической оболочки | 50 |
| Пример 5. Модель каркаса | 58 |
| Использование моделей материалов и типов конечных элементов LS-DYNA | 63 |
| Элементы ANSYS / LS-DYNA. Общие сведения | 64 |
| Вырожденные элементы | 64 |
| Выбор используемых элементов | 64 |
| Определение констант используемых элементов с помощью пункта <i>Real Constants</i> | 66 |
| Основные элементы <i>LS-DYNA Explicit</i> и их константы | 67 |
| Определение коэффициентов вязкости и демпфирования. | |
| Корректировка формы деформированных элементов | 87 |
| Определение объемной вязкости | 87 |
| Определение демпфирования | 87 |
| Глобальный параметр корректировки искаженной формы элементов | 88 |
| Локальные параметры корректировки искаженной формы элементов | 89 |
| Локальные системы координат | 90 |
| Создание локальной системы координат | 90 |
| Отображение списка созданных локальных систем координат | 91 |
| Удаление локальных систем координат | 92 |
| Выбор физической модели деформирования материала | 93 |

| | |
|---|------------|
| Общие сведения..... | 93 |
| Раздел <i>LS-DYNA</i> > <i>Linear</i> окна <i>Material Models Available</i> | 94 |
| Некоторые материалы раздела <i>LS-DYNA</i> > <i>Nonlinear</i> окна <i>Material Models Available</i> | 97 |
| Отличия в построении конечно-элементного разбиения средствами ANSYS / LS-DYNA от средств ANSYS | 100 |
| Примеры использования моделей деформирования материалов и типов элементов LS-DYNA..... | 101 |
| Пример 1. Построение упорядоченного разбиения радиального сечения цилиндрического образца с концентратором | 102 |
| Пример 2. Построение упорядоченного разбиения твердотельной модели рессоры | 117 |
| Пример 3. Построение упорядоченного разбиения радиального сечения пули и листа двуслойной брони | 126 |
| Пример 4. Построение упорядоченного разбиения конической оболочки..... | 140 |
| Пример 5. Построение разбиения каркаса балочными элементами с узлами ориентации..... | 148 |
| Литература..... | 158 |