

*В.Д. МАСЛОВ, К.А. НИКОЛЕНКО*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ  
В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ  
ANSYS/LS-DYNA**

**2007**



**САМАРА**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

*В. Д. МАСЛОВ, К. А. НИКОЛЕНКО*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ  
В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ  
ANSYS/LS-DYNA

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2007

УДК 004.9(075)  
ББК 32.79  
М744



**Инновационная образовательная программа  
"Развитие центра компетенции и подготовка  
специалистов мирового уровня в области аэро-  
космических и геоинформационных технологий"**

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. А. М и х е е в,  
канд. техн. наук, доц. А. П. Б ы к о в

М744 **Маслов В.Д.**  
**Моделирование процессов листовой штамповки в про-  
граммном комплексе ANSYS/LS-DYNA: учеб. пособие /**  
*В. Д. Маслов, К. А. Николенко.* – Самара: Изд-во Самар. гос.  
аэрокосм. ун-та, 2007. – 80 с. : ил.

**ISBN 978-5-7883-0579-0**

Рассмотрена методика анализа формоизменяющих операций листовой штамповки с использованием программного комплекса ANSYS/LS-DYNA. Приведены рекомендации по постановке задачи для ее решения в комплексе ANSYS/LS-DYNA, по выбору модели деформируемого материала, заданию его механических свойств. Использование программного комплекса ANSYS/LS-DYNA показано на примере анализа операции осесимметричной вытяжки тонколистовой заготовки.

Учебное пособие предназначено для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по специальностям: «Обработка металлов давлением», «Машины и технологии обработки металлов давлением».

УДК 004.9(075)  
ББК 32.79

**ISBN 978-5-7883-0579-0**

© Маслов В.Д., Николенко К.А., 2007  
© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2007

Учебное издание

*Маслов Валентин Дмитриевич,  
Николенко Константин Анатольевич*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛИСТОВОЙ  
ШТАМПОВКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ  
ANSYS/LS-DYNA**

*Учебное пособие*

Технический редактор М. В. Х а р д и н  
Редакторская обработка Н. С. К у п р и я н о в а  
Корректорская обработка Л. Я. Ч е г о д а е в а  
Доверстка В. С. Т е л е п о в а

Подписано в печать 9.10.07. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Печ. л. 5.  
Тираж 120 экз. Заказ . ИП-ж24/2007

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного  
аэрокосмического университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление.....	3
Введение .....	4
1. О методе конечных элементов .....	5
2. Основные этапы решения практических задач.....	6
3. Основные стадии моделирования .....	7
3.1. Препроцессорная подготовка.....	7
3.2. Постпроцессорная обработка.....	18
4. Моделирование процесса вытяжки тонколистового металла в конечно-элементном комплексе ANSYS/LS-DYNA.....	20
4.1. Анализ моделируемой задачи .....	21
4.2. Создание рабочей папки и запуск ANSYS.....	24
4.3. Выбор решателя.....	26
4.4. Выбор типа элемента.....	27
4.5. Задание констант для выбранного типа элемента.....	28
4.6. Выбор модели материала и задание свойств материалов заготовки и оснастки .....	31
4.7. Создание геометрии .....	35
4.8. Создание сетки конечных элементов .....	48
4.9. Создание идентификационных частей .....	56
4.10. Задание контактных пар и коэффициента трения.....	60
4.11. Задание граничных условий .....	62
4.12. Задание кинематических нагрузок.....	64
4.13. Учет HOURGLASS .....	68
4.14. Задание времени длительности процесса .....	69
4.15. Задание формата базы данных расчета .....	70
4.16. Задание количества шагов расчета .....	70
4.17. Запуск задачи на расчет .....	71
5. Просмотр результатов моделирования в конечноэлементном комплексе ANSYS.....	73
5.1. Генерация постпроцессора ANSYS .....	73
5.2. Просмотр рассчитанных шагов.....	74
5.3. Выбор масштаба отображения геометрии .....	75
5.4. Загрузка выбранного шага расчета.....	76
5.5. Отображение значений напряжений и деформаций .....	77
5.6. Завершение работы в конечно-элементном комплексе ANSYS.....	79
Заключение .....	80
Список литературы .....	80

## ВВЕДЕНИЕ

К деталям современной авиационно-космической техники, изготавливаемым из листа, к автокузовным деталям сложной пространственной формы предъявляются высокие требования по точности размеров, прочности и надежности в эксплуатации, металлоемкости и внешнему виду. Задача технолога состоит в том, чтобы спроектировать наиболее рациональный технологический процесс изготовления детали, с минимальным числом переходов, высоким коэффициентом использования материала, обеспечивающим получение изделия с заданными эксплуатационными характеристиками.

Компьютерное моделирование позволяет получить большой объем информации, провести всестороннее исследование процесса пластического деформирования, определить его особенности, рассмотреть и сопоставить большое количество альтернативных вариантов технологических процессов.

Весьма большими возможностями в этом плане обладает программный комплекс ANSYS (продукт фирмы ANSYS Inc).

ANSYS является универсальным так называемым «тяжелым» конечно-элементным пакетом, предназначенным для решения в единой среде (и на одной и той же конечно-элементной модели) различных инженерных задач: прочности, теплопроводности, электромагнетизма, гидрогазодинамики и пр.

Для решения задач пластического деформирования металлов в программный комплекс ANSYS включен модуль ANSYS/LS-DYNA – полностью интегрированная в среду ANSYS всемирно известная программа для расчета высоконелинейных процессов – LS-DYNA. Программный комплекс имеет ANSYS/LS-DYNA PrePost – Пре- и Пост процессоры, позволяющие как создавать конечно-элементную модель процессов пластического деформирования металла, так и читать, редактировать и обрабатывать результаты анализа всеми доступными средствами. В качестве Processora для решения задачи используется решатель LS/DYNA.

## 1. О МЕТОДЕ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Метод конечных элементов является одним из наиболее современных и часто применяемых численных методов для анализа сложных деформационных и физических процессов. Хотя существует большое разнообразие в формулировках, применение метода конечных элементов может быть охарактеризовано следующими свойствами [1, 8, 10]:

- физическая область задачи делится на подобласти (конечные элементы);
- искомое непрерывное распределение физической величины (зависимая переменная) аппроксимируется кусочно-непрерывными функциями на каждом конечном элементе. Параметры этих аппроксимаций становятся неизвестными параметрами задачи, определяемыми в вершинах (узлах) конечных элементов;
- подстановка аппроксимаций в определяющие уравнения (или эквивалентные им при вариационном подходе) дает систему уравнений с неизвестными узловыми параметрами. Решение системы относительно этих параметров позволяет получить приближенное решение задачи. Теоретически при стремлении размеров элементов к нулю численное решение должно сходиться к точному.

Интенсивное развитие метода конечных элементов связано с космическими исследованиями. Этот метод возник из строительной механики и теории упругости. Математики называют этот метод вариационно-разностным, подчеркивая его математическую природу [2, 3, 9]. При этом математики занимаются математическим обоснованием метода конечных элементов, проводят теоретический анализ его сходимости и точности получаемых результатов. Представители инженерного направления решают довольно сложные технические задачи, часто не задумываясь над строгим обоснованием применяемых ими приемов. А построенные алгоритмы и программы проверяют на известных точных решениях либо на эксперименте [1, 2, 4, 7].

## 2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Решение задачи с программных комплексов, основанных на применении метода конечных элементов, состоит из следующих основных этапов:

1. Идентификация задачи, присвоение ей имени, создание чертежа конструкции штампа и наложение нагрузок, то есть создание физической модели.
2. Создание геометрической модели, пригодной для решения методом конечных элементов.
3. Разбиение модели на сетку конечных элементов.
4. Приложение к модели граничных условий (наложение ограничений на перемещения, закрепление, или задание граничных нагрузок).
5. Численное решение системы уравнений, которое осуществляется автоматически с помощью решателя LS-DYNA.
6. Анализ результатов.

Этапы 1,2,3,4 относятся к препроцессорной стадии, этап 5 – к процессорной стадии, этап 6 – к постпроцессорной стадии.

Наиболее трудоемкий этап решения задачи с помощью метода конечных элементов – это создание конечно-элементной модели на стадии препроцессорной подготовки (preprocessor). Автоматическое построение сетки элементов не гарантирует от ошибок. Правильное приложение нагрузок и граничных условий также представляет определенные трудности.

Пятый из перечисленных этапов (численное решение системы уравнений с помощью решателя LS/DYNA) выполняется автоматически и, как правило, особых трудностей не вызывает.

Решение задачи пластического деформирования заготовки с помощью программного комплекса ANSYS/LS-DYNA при последующей обработке результатов может дать ответ на ряд конкретных технологических вопросов, таких как прогнозирование возможного разрушения заготовки либо образование складок при штамповке и т.д. [4, 5, 6].

### **3. ОСНОВНЫЕ СТАДИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Как отмечалось выше, решение задач с помощью программного комплекса ANSYS/LS-DYNA состоит из трех этапов: препроцессорная (предварительная) подготовка (Preprocessing), получение решения (Solving the Equations) и постпроцессорная обработка результатов (Postprocessing). Приведем краткое содержание основных шагов при выполнении каждого из этапов.

#### **3.1. ПРЕПРОЦЕССОРНАЯ ПОДГОТОВКА**

На стадии препроцессорной подготовки выполняется выбор типа расчета, построение модели и приложение нагрузок (включая и граничные условия). Здесь задаются необходимые для решения исходные данные. Пользователь выбирает координатные системы и типы конечных элементов, определяет модель поведения деформируемого материала, указывает упругие постоянные и физико-механические свойства материала, строит твердотельную модель и сетку конечных элементов, выполняет необходимые действия с узлами и элементами сетки, задает уравнения связи и ограничения. Можно также использовать модуль статистического учета для оценки ожидаемых размеров файлов и затрат ресурсов памяти.

##### **3.1.1. ВЫБОР КООРДИНАТНОЙ СИСТЕМЫ**

В программе ANSYS координатные системы используются для размещения в пространстве геометрических объектов, определения направлений степеней свободы в узлах сетки, задания свойств материала в разных направлениях, для управления графическим изображением и содержанием выходных результатов. Можно использовать декартовы, цилиндрические, сферические, эллиптические и тороидальные системы координат. Все они могут быть расположены и ориентированы в пространстве произвольным образом.

### **3.1.2. СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ**

Исходные данные, введенные при препроцессорной подготовке, становятся частью центральной базы данных программы. Эта база данных разделена на таблицы координатных систем, типов элементов, свойств материала, ключевых точек, узлов сетки, нагрузок и т. д. Как только в таблице появляются некоторые данные, на них становится возможным ссылаться по входному номеру таблицы. Например, могут быть определены несколько координатных систем, которые активизируются простой ссылкой на соответствующий номер системы (входной номер таблицы). Кроме того, существует набор команд управления базой данных, чтобы выделить некоторую ее часть для определенных операций. Выделение необходимых данных можно проводить по местоположению геометрических объектов, графическим примитивам твердой модели, типам конечных элементов, видам материалов, номерам узлов и элементов и т. п. Так, например, сложные граничные условия можно легко указать или изменить, используя геометрическое представление модели, а не номера узлов или элементов.

### **3.1.3. СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

В препроцессоре ANSYS/LS-DYNA существуют три разных способа построения геометрической модели:

- импорт модели, предварительно построенной другой программой;
- твердотельное моделирование;
- непосредственное создание модели в интерактивном режиме работы.

Можно выбрать любой из этих методов или использовать их комбинацию для построения расчетной модели.

#### **Импорт модели**

Программа ANSYS позволяет наносить сетку на модель, импортированную из другой программы, а также имеет возможность менять геометрию модели с целью упрощения расчета. Использование автоматических средств позволяет улучшить модель за счет устранения ненужных зазоров, перекрытий или взаимных внедрений ее частей, а также выполнить слияние объектов и создание

объемов. Это дает возможность получить значительно более простую расчетную модель путем ее «подчистки» и получения приемлемого варианта. Процедуры упрощения позволяют наилучшим образом подготовить модель для нанесения сетки за счет удаления отверстий, полостей и выпуклостей, исключения мелких подробностей. Модель может быть предварительно построена в других специализированных программах, скажем Компас, Solid Works, Unigraphics и пр., а затем импортирована в ANSYS/LS-DYNA для последующего построения конечно-элементной модели.

### **Твердотельное моделирование**

В программе ANSYS доступны следующие два способа моделирования: нисходящий и восходящий. В первом случае пользователь указывает только самый высокий порядок сложности объектов модели. Используемые обычно объекты (такие, как сферы и призмы, т. е. формы, которые называются геометрическими примитивами) могут быть созданы за одно обращение к меню. Например, пользователь определяет объемный примитив, а программа автоматически находит связанные с ним поверхности, линии и ключевые точки. Примитивы позволяют непосредственно указывать геометрические формы. В программе ANSYS можно легко и быстро определить в двумерном случае такие формы, как окружности и прямоугольники, или параллелепипеды, сферы, конусы и цилиндры — в трехмерном.

### **Непосредственное создание модели в интерактивном режиме работы**

В этом случае чаще всего применяется так называемое «восходящее моделирование». При восходящем моделировании пользователь строит модель, начиная с объектов самого низкого порядка. Сначала задаются ключевые точки, затем связанные с ними линии, поверхности и объемы - именно в таком порядке.

Еще одним эффективным методом построения модели в программе ANSYS является построение некоторой поверхности с помощью так называемого метода «обтягивания каркаса». С помощью этого метода можно задать некоторый набор поперечных сечений, а затем дать программе команду построить поверхность, которая будет точно соответствовать указанным сечениям.

После того как построена твердотельная модель, строится ее конечно-элементный аналог (т. е. сетка узлов и элементов).

### **3.1.4. ЗАДАНИЕ ТИПОВ ЭЛЕМЕНТОВ**

Библиотека конечных элементов программы ANSYS содержит более 80 типов, каждый из которых определяет, среди прочего, применимость элемента к той или иной области расчетов (прочностной, тепловой, магнитной и электрической анализы, движение жидкости или связанные задачи).

Для анализа листовой штамповки, как правило, применяются оболочечные конечные элементы, так как деформации в плоскости листа и изгибные деформации преобладают в процессе формообразования. Лист заготовки ведет себя и как тонкая, и как толстая оболочка в зависимости от положения и кривизны поверхности инструмента [3, 9, 10].

Библиотека элементов ANSYS/LS-DYNA содержит следующие элементы:

3D Link 160	3D Beam 161
2D Solid 162	Thin Shell 163
3D Solid 164	Spring-Damper 165
3D Mass 166	Link 167
3D Tet-Solid 168	

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

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

В решении задач пластического деформирования листовых металлических материалов наиболее широко применяются следующие типы элементов:

- Элементы категории Solid.
- Элементы категории Shell.

#### **Элементы категории Solid**

Элементы данной категории предназначены для использования при расчете твердотельных моделей. Количество узлов может колебаться от 3 до 20, в

зависимости от геометрии элемента. Эти типы элементов применяются для прочностных расчетов конструкции штамповой оснастки.

### **Элементы категории Shell**

Элементы данной категории используются для моделирования тонкостенных оболочечных конструкций. В анализе процессов пластического деформирования листовых материалов используются для создания оболочечной конструкции деформирующего инструмента (пуансонов, матриц, прижимов и пр.), а также для моделирования деформируемой металлической заготовки из листа.

В программном комплексе ANSYS/LS-DYNA для моделирования процессов пластического деформирования металлической листовой заготовки используется элемент Thin Shell 163. Этот элемент имеет форму четырехугольной пластины с четырьмя узлами по углам. Допускает использование нелинейных материалов. Пластины и оболочки, которые моделируются данными элементами, могут быть достаточно толстыми.

После выбора типов элементов необходимо задать их константы. Константы элемента - это свойства, специфичные для данного типа элемента. Например, при анализе операций штамповки из листа задается толщина оболочки.

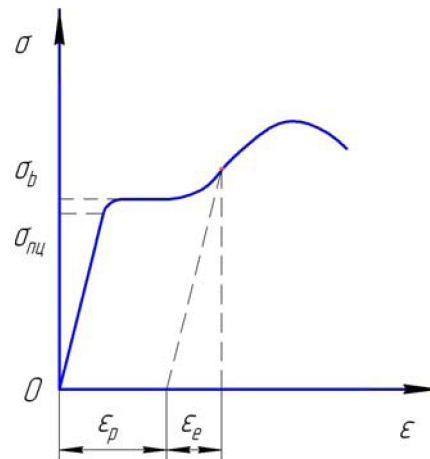
### **3.1.5. ЗАДАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

Свойства материала задаются для различных типов элементов. В зависимости от цели исследования свойства могут быть линейными, нелинейными и (или) анизотропными.

Линейные свойства могут зависеть или не зависеть от температуры, быть изотропными или ортотропными.

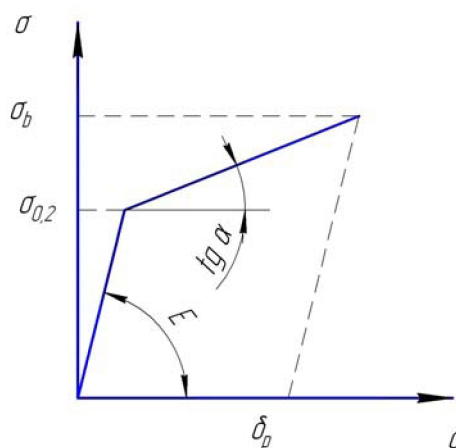
Основная масса задач пластического деформирования материалов – это задачи, связанные с большими необратимыми деформациями, то есть деформациями за пределами выполнения закона Гука. Зависимость напряжений  $\sigma$  от деформаций  $\epsilon$  для металлов и машиностроительных материалов вначале имеет линейный характер. Величина напряжений, за пределом которых линейная связь между деформациями и напряжениями нарушается, называется пределом

пропорциональности  $\sigma_{\text{пл}}$ . Даже если материал не имеет выраженной площадки текучести, то в качестве предела текучести  $\sigma_T$  выбирается условный предел текучести - определенный уровень напряжений, соответствующий некоторому критическому значению остаточной деформации образца (рисунок 1).



**Рисунок 1 - Связь между деформациями и напряжениями за пределом упругости при одноосном растяжении**

Поскольку решение задач с учетом пластичности гораздо сложнее линейных задач теории упругости, в ряде случаев для изотропных тел используют некоторые упрощения связи  $\sigma_T - \varepsilon$  для реального материала. Часто в технических расчетах диаграмму растяжения аппроксимируют в виде кусочно-ломаных прямых или так называемых диаграмм Прандтля (рисунок 2).



**Рисунок 2 - Билинейная кривая упрочнения**

Наиболее простой является аппроксимация диаграммы растяжения образца двумя отрезками - билинейная аппроксимация (BKIN – билинейное кинематическое упрочнение и BISO – билинейное изотропное упрочнение).

### **Билинейное кинематическое упрочнение**

Билинейное кинематическое упрочнение предполагает, что материал циклически идеальный и учитывает эффект Баушингера. Переход из упругого состояния в пластическое определяется критерием Мизеса.

### **Билинейное изотропное упрочнение**

Данная модель не описывает эффекта Баушингера. Переход из упругого состояния в пластическое определяется критерием Мизеса.

Поведение материала в обеих этих моделях описываются билинейной кривой деформирования, начинающейся в начале координат с положительными значениями деформаций и напряжений. Наклон первого участка кривой определяется из упругих характеристик материала. В точке с указанным пользователем значением предела текучести, кривая продолжается вдоль второго угла, определяемого касательным модулем, имеющим те же единицы, что и модуль упругости. Касательный модуль не может быть меньше нуля и больше модуля упругости.

Величина касательного модуля может быть определена по зависимости:

$$E_{\text{tan}} = (\sigma_B - \sigma_T) / \delta_p;$$

где  $\sigma_B$  -  $\sigma_T$  - соответственно предел прочности и предел текучести исследуемого материала при испытании на одноосное растяжение;

$\delta_p$  - относительное равномерное удлинение образца.

Пример задания свойств материала при билинейном кинематическом упрочнении приведен в таблице 1.

**Таблица 1**

### **Bilinear Kinematic Plasticity Example: Titanium Alloy (Билинейное кинематическое пластическое упрочнение: титановый сплав)**

MP,ex,1,100e9	! Pa
MP,nuxy,1,.36	! No units
MP,dens,1,4650	! kg/m3
TB,BKIN,1	
TBDATA,1,70e6	! Yield stress (Pa)
TBDATA,2,112e6	! Tangent modulus (Pa)

Пример задания билинейного изотропного упрочнения показан в таблице 2.

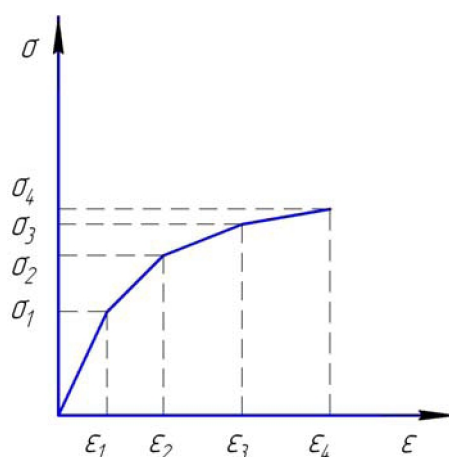
**Таблица 2**

**Bilinear Isotropic Plasticity Example: Nickel Alloy (Билинейное изотропное пластическое упрочнение: Никелевый сплав)**

MP,ex,1,180e9	! Pa
MP,nuxy,1,.31	! No units
MP,dens,1,8490	! kg/m3
TB,BISO,1	
TBDATA,1,900e6	! Yield stress (Pa)
TBDATA,2,445e6	! Tangent modulus (Pa)

В ряде случаев, когда изотропный деформируемый материал имеет более сложную диаграмму либо исследователь хочет более точно отразить участок диаграммы в пластической области, то используется аппроксимирующая диаграмма с помощью ломаной, содержащей два и более прямолинейных участка (MKIN – многолинейное (мультилинейное) кинематическое упрочнение и MISO – многолинейное (мультилинейное) изотропное упрочнение).

Поведение материала в этом случае описывается линейно-ломаной кривой (рисунок 3), начинающейся в начале координат.



**Рисунок 3 - Зависимость напряжений от деформаций в виде ломаной линии**

В общем случае изотропное упрочнение рекомендуется использовать при определении конечных деформаций (больших истинных деформаций, превосходящих величину в металлах на 5 – 10 процентов), в случае

14

пропорционального неперiodического нагружения. Кинематическое упрочнение следует использовать в случае непропорционального или циклического нагружения, когда истинные деформации относительно малы (менее 5 – 10 процентов).

Анизотропное упрочнение используется для моделирования процессов деформирования металлов, поведение которых различно в направлении осей  $x, y, z$ . Модель такого упрочнения необходимо применять для анализа процессов пластического деформирования металлов, подвергнутых предварительным деформациям (например, металлический лист, изготовленный прокаткой).

Программный комплекс ANSYS/LS-DYNA дает возможность выполнять анализ процессов пластического деформирования с учетом двух видов анизотропии:

- трансверсальной анизотропии свойств;
- ортотропной анизотропии свойств.

Трансверсальная анизотропия характеризуется следующими видами анизотропии свойств:

- в плоскости листа свойства постоянные и не зависят от направления;
- по толщине листа свойства отличаются от свойств в плоскости листа.

Такая анизотропия часто называется нормальной анизотропией и характеризуется показателем нормальной анизотропии

$$R = \varepsilon_B / \varepsilon_S;$$

где  $\varepsilon_B$ ,  $\varepsilon_S$  - соответственно деформации сужения и деформации утонения образца при его испытании на одноосное растяжение.

Пример задания механических свойств материала для модели трансверсального упругопластического упрочнения приведен в таблице 3.

Кривая упрочнения задана кусочно-монотонной кривой EDCURVE.

Таблица 3

## Transversely Anisotropic Elastic Plastic Example: 1010 Steel

(Трансверсальное анизотропное упруго-пластическое упрочнение – сталь 1010)

MP,ex,1,207e9	! Pa
MP,nuxy,1,.29	! No units
MP,dens,1,7845	! kg/m3
TB,PLAW,,,7	
TBDATA,1,128.5e6	! Yield stress (Pa)
TBDATA,2,202e5	! Initial strain at failure
TBDATA,3,1.41	! r-value
TBDATA,4,1	! Yield stress vs. plastic strain curve (see EDCURVE below)
*DIM,STRAIN,,5	
*DIM,YLDSTRES,,5	
Strain(1) = 0,.05,.1,.15,.2 YldStres(1)=207e6,210e6,214e6,218e6,220e6 ! yield stress EDCURVE,ADD,1,Strain (1),YldStres(1)	

В том случае, если возникает необходимость более точного анализа влияния анизотропии свойств на поведение материала при пластическом формоизменении, программный комплекс ANSYS/LS-DYNA дает возможность воспользоваться моделью материала, учитывающей неодинаковость свойств в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Применительно к листовым материалам, это направление прокатки листа, а также направления, расположенные под углом в  $45^\circ$  и  $90^\circ$  к направлению прокатки. Такая анизотропия свойств характеризуется тремя параметрами:  $R_0$ ,  $R_{45}$ ,  $R_{90}$ . Каждый из показателей определяется при испытании на одноосное растяжение образцов, вырезанных соответственно под углами 0, 45 и 90 градусов к направлению прокатки используемого листа. Такая модель материала в программном комплексе носит название 3-параметрическая модель Барлатта. Пример задания такой модели материала приведен в таблице 4.

**Parameter Barlat Example: Aluminum 5182 (Трехпараметрическая модель упрочнения Барлата: Алюминиевый сплав)**

MP,ex,1,76e9	! Pa
MP,nuxy,1,.34	! No units
MP,dens,1,2720	! kg/m3
TB,PLAW,,,,3	
TBDATA,1,1	! Hardening rule of 1 (yield stress)
TBDATA,2,25e6	! Tangent modulus (Pa)
TBDATA,3,145e6	! Yield stress (Pa)
TBDATA,4,0.170	! Barlat exponent, m
TBDATA,5,.73	! R00
TBDATA,6,.68	! R45
TBDATA,7,.65	! R90
TBDATA,8,0	! CSID

### 3.1.6. ПОСТРОЕНИЕ СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В программе ANSYS предусмотрено несколько способов генерации сетки: использование метода экструзии, создание упорядоченной сетки и создание произвольной сетки.

#### Метод экструзии

Метод экструзии (выдавливания) используется для превращения областей двумерной сетки в трехмерные объекты, состоящие из параллелепипедов, клиновидных элементов или их комбинации. Процесс экструзии осуществляется с помощью процедур смещения из плоскости, буксировки, поступательного и вращательного перемещений.

#### Создание упорядоченной сетки

Построение упорядоченной сетки требует предварительного разбиения модели на отдельные составные части с простой геометрией, а затем — выбора таких атрибутов элемента и соответствующих команд управления качеством сетки, чтобы можно было построить конечно-элементную модель с упорядоченной сеткой. Создаваемая программой ANSYS упорядоченная сетка

может состоять из шестигранных, четырехугольных и треугольных элементов. Для получения треугольной сетки программа выделяет области модели, предназначенные для нанесения упорядоченной сетки, создает сначала четырехугольную сетку, а затем превращает ее в сетку из треугольных элементов.

### **Создание произвольной сетки (автоматически)**

Программа ANSYS имеет в своем составе генераторы произвольной сетки, с помощью которых сетка может наноситься непосредственно на модель достаточно сложной геометрии без необходимости строить сетку для отдельных частей и затем собирать их в единую модель. Произвольную сетку можно строить из треугольных, четырехугольных и четырехгранных элементов.

### **3.1.7. ПРИЛОЖЕНИЕ НАГРУЗОК И ПОЛУЧЕНИЕ РЕШЕНИЯ**

После того как при препроцессорной подготовке построена расчетная модель, можно переходить к стадии решения задачи. Этот этап включает в себя задание вида анализа и его опций, нагрузок, шага решения и заканчивается запуском на счет конечно-элементной задачи.

Программа ANSYS/LS-DYNA предусматривает два метода решения задач, связанных с расчетом конструкций (Structural problems): h-метод и p-метод. Первый из перечисленных методов может применяться при любом типе расчетов (статический, динамический, тепловой и т. п.), в то время как второй метод может использоваться только в линейном статическом анализе. При прочих равных условиях, h-метод требует более частой сетки, чем p-метод.

### **3.2. ПОСТПРОЦЕССОРНАЯ ОБРАБОТКА**

В программе ANSYS стадия постпроцессорной обработки следует за стадиями препроцессорной подготовки и получения решения. С помощью постпроцессорных средств программы имеется возможность обратиться к результатам решения и интерпретировать их нужным образом.

Итогом работы программы на постпроцессорной стадии является графическое и (или) табличное представление результатов. Графическое

изображение может быть выведено на монитор в интерактивном режиме во время постпроцессорной обработки или преобразовано в твердую копию.

На стадии получения решения результаты записываются в базу данных программы ANSYS и в так называемый «файл результатов». Результаты, полученные на каждом дополнительном шаге решения, накапливаются как наборы данных.

Количество и тип данных определяются видом выполняемого анализа и выбором опций, установленных на стадии получения решения. Для каждого шага по нагрузке пользователь указывает, сохранять ли результаты для каждого дополнительного шага решения, для последнего из них или для некоторого сочетания промежуточных и финального шагов. Кроме того, можно указать перечень сохраняемых результатов, выбрав, например, перемещения, напряжения силы реакции и т.п.

## **4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ ТОНКОЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS/LS-DYNA**

Рассмотрено пошаговое моделирование процесса формообразования тонколистового металла в конечно-элементный комплекс ANSYS/LS-DYNA. Моделируется операция вытяжки с прижимом и формовкой дна. Для моделирования используется десятая версия ANSYS. Просмотр результатов моделирования осуществляется в постпроцессоре ANSYS [1, 3, 5, 6].

Подготовка задачи в ANSYS/LS-DYNA в рассматриваемом примере осуществляется через меню программы

### **Анализ моделируемой задачи**

При построении физической задачи необходимо определиться со следующими параметрами:

- технологические характеристики процесса (размеры заготовки и инструмента, свойства материала заготовки и инструмента и т.д.);
- тип и поведение кинематических нагрузок.

### **Основные этапы моделирования**

Построение задачи листового формообразования в ANSYS для последующего решения в LS-DYNA будем осуществлять по следующим шагам.

**Этап 1:** Задание начальных параметров расчета.

Сюда входит: выбор типа и количество математических элементов; при необходимости задание параметров выбранного типа элемента; выбор типа и задание свойств используемых материалов.

Шаг 1 – Выбор типа расчета.

Шаг 2 – Выбор типа элемента.

Шаг 3 – Задание атрибутов элементов.

Шаг 4 – Задание свойств материала.

**Этап 2:** Построение геометрии.

Здесь следует отметить, что для построения отдельных, «простых», геометрических элементов достаточно использовать возможности ANSYS. Но в некоторых случаях имеет смысл импортировать геометрию, предварительно построенную в какой-либо САД системе.

Шаг 5 – Построение геометрии.

**Этап 3:** Создание сетки конечных элементов.

Шаг 6 – Построение сетки конечных элементов.

Шаг 7 – Создание частей.

**Этап 4:** Задание заключительных параметров расчета.

В зависимости от вариации моделируемой задачи задаются различные типы параметров. В общем случае это время расчета, контактные пары и коэффициент трения, кинематические нагрузки и т.п.

Шаг 8 – Задание контактных пар и коэффициента трения.

Шаг 9 – Задание граничных условий (для симметричной задачи).

Шаг 10 – Задание кинематических нагрузок (скорость, перемещение, усилие и т.д.).

Шаг 11 – Ввод параметров для предотвращения искажения координатной сетки.

Шаг 12 – Задание времени расчета.

Шаг 13 – Выбор типа выходного файла.

Шаг 14 – Задание количества шагов расчета.

Шаг 15 – Выбор записи спецфайлов.

Шаг 16 – Запуск задачи на расчет.

Рассмотрим пошаговое построение задачи для расчета процесса вытяжки.

#### **4.1. АНАЛИЗ МОДЕЛИРУЕМОЙ ЗАДАЧИ**

Задача: Вытяжка цилиндрической детали с формовкой дна.

Деталь осесимметричная.

Вытяжка осуществляется в один переход.

Для предотвращения гофр используется прижим.

Геометрические параметры заготовки:

Толщина заготовки – 1,5 мм.

Диаметр заготовки – 100 мм.

На рисунке 4 представлена схема оснастки, а также заготовка и деталь для процесса вытяжки.

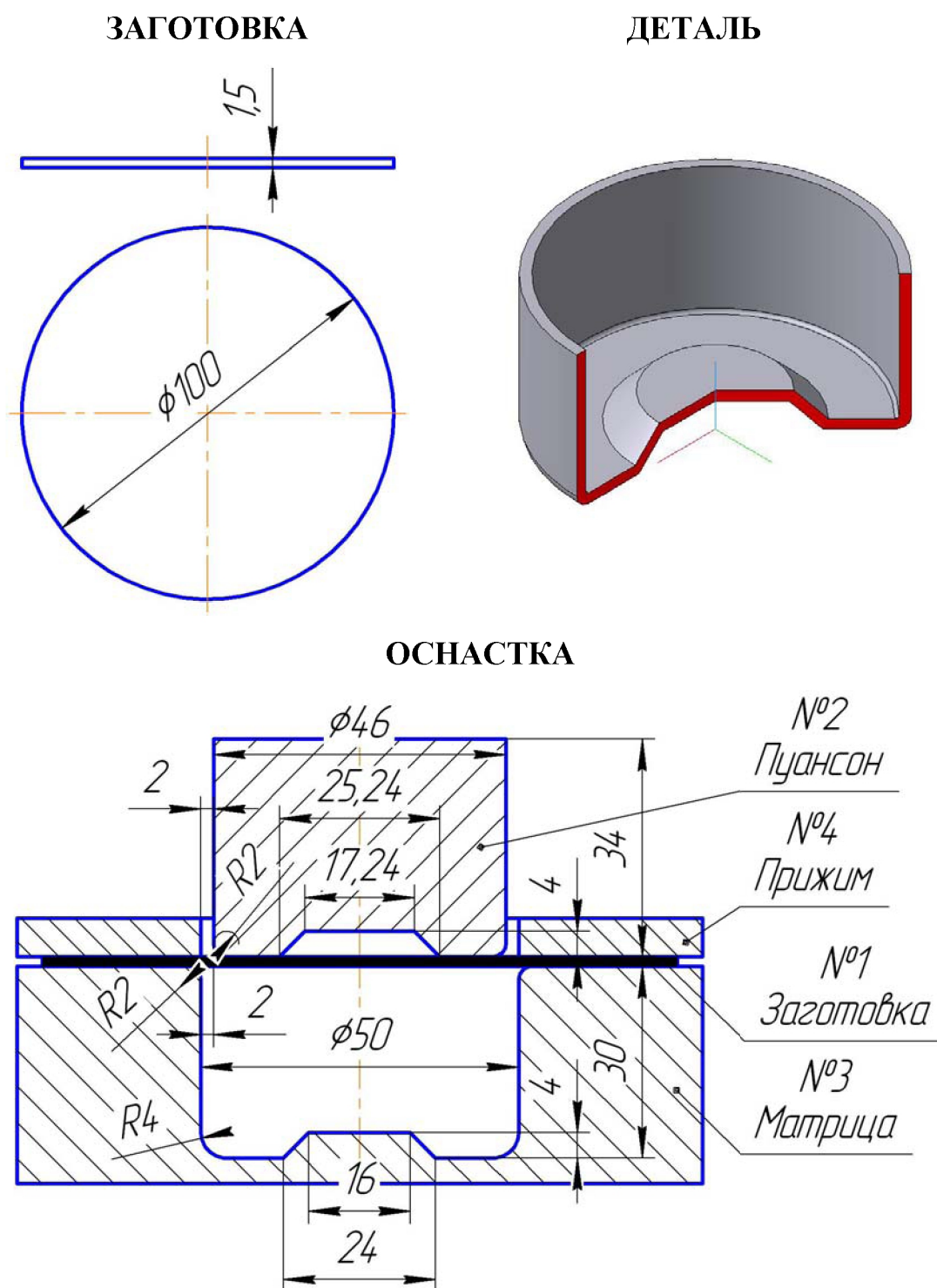


Рисунок 4 - Оснастка и заготовка для процесса вытяжки

Для моделирования процесса вытяжки необходимо задать геометрию заготовки и инструмента (то есть пуансона, матрицы и прижима).

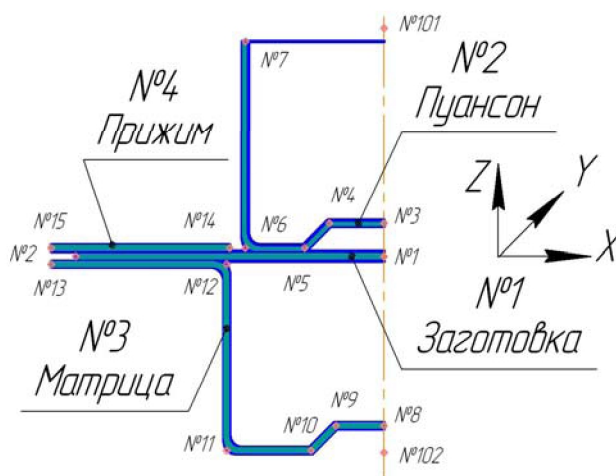
Количество моделируемых в задаче геометрических элементов равно четырем:

- 1 - заготовка;
- 2 - пуансон;
- 3 - матрица;
- 4 - прижим.

Задание номеров заготовки и оснастки необходимо для дальнейшего построения задачи.

С целью сокращения количества задаваемых конечных элементов и уменьшения времени расчета при геометрическом моделировании следует учитывать плоскости геометрической симметрии. В частности, при моделировании осесимметричной вытяжки достаточно использовать одну четвертую часть оснастки и заготовки.

Для моделирования оснастки используются поверхности оснастки, которые касаются заготовки в процессе формообразования. На рисунке 5 представлена схема моделируемых поверхностей касания оснастки и заготовка по срединной поверхности с координатами ключевых точек и ориентация геометрии относительно декартовой системы координат.



**Рисунок 5 - Эскиз моделируемых поверхностей касания оснастки и заготовка**

Для моделирования процесса используется тип элемента - Thin Shell 163. Это оболочковый элемент с 12 степенями свободы. Данный тип элемента используется как для моделирования заготовки, так и для моделирования поверхности оснастки.

Для задания свойств материала используется система единиц СИ [5, 6]:  
плотность – кг/м<sup>3</sup>; длина – м; напряжение – Па; время – с; сила – Н.

Модель материала - Bilinear Kinematic.

Материал заготовка - стали 12X18H10T.

Материал оснастки - стали У8.

Скорость перемещения пуансона относительно матрицы - 1000 мм/с.

Используется два вида кинематических нагрузок:

Перемещение пуансона – пуансон перемещается на 40 мм.

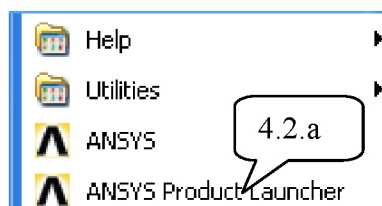
Усилие прижима – усилие прижима постоянно и составляет 10000 Н.

Следует учесть, что в данной задаче направление приложенной нагрузки и перемещение должны совпадать с осью, определяющей перемещение пуансона.

## 4.2. СОЗДАНИЕ РАБОЧЕЙ ПАПКИ И ЗАПУСК ANSYS

На диске «С» создать папку с именем «Vit».

**A.** Через меню «Пуск → Все программы» запустить «ANSYS Product Launcher» (рисунок 6).



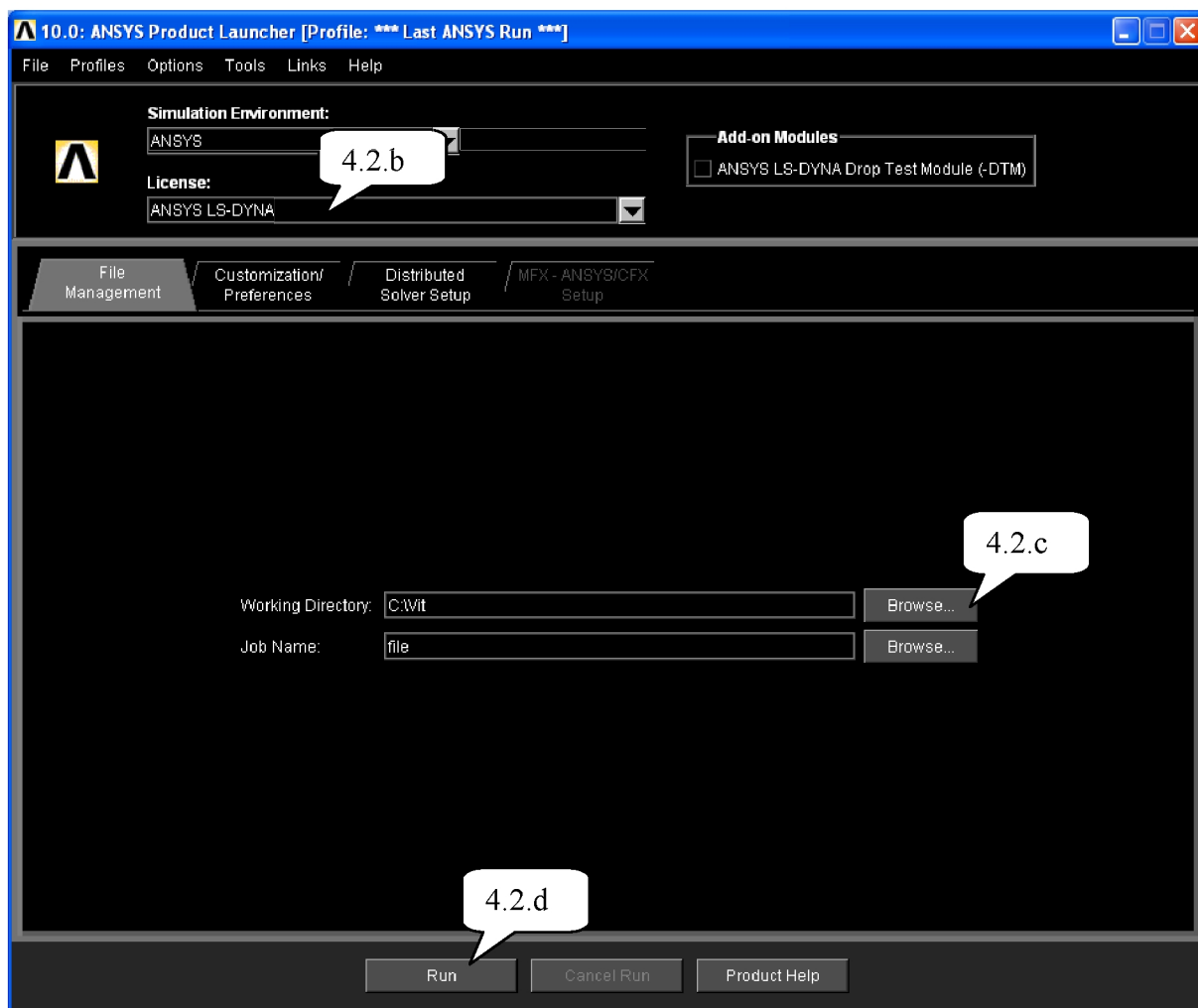
**Рисунок 6 - Запуск ANSYS Product Launcher**

**B.** Указать лицензию (рисунок 7).

License: → ANSYS LS-DYNA

**C.** Прописать в строке путь к выбранной папке или выбрать путь, нажав «Browse...».

**D.** Запустить ANSYS, нажав «Run».

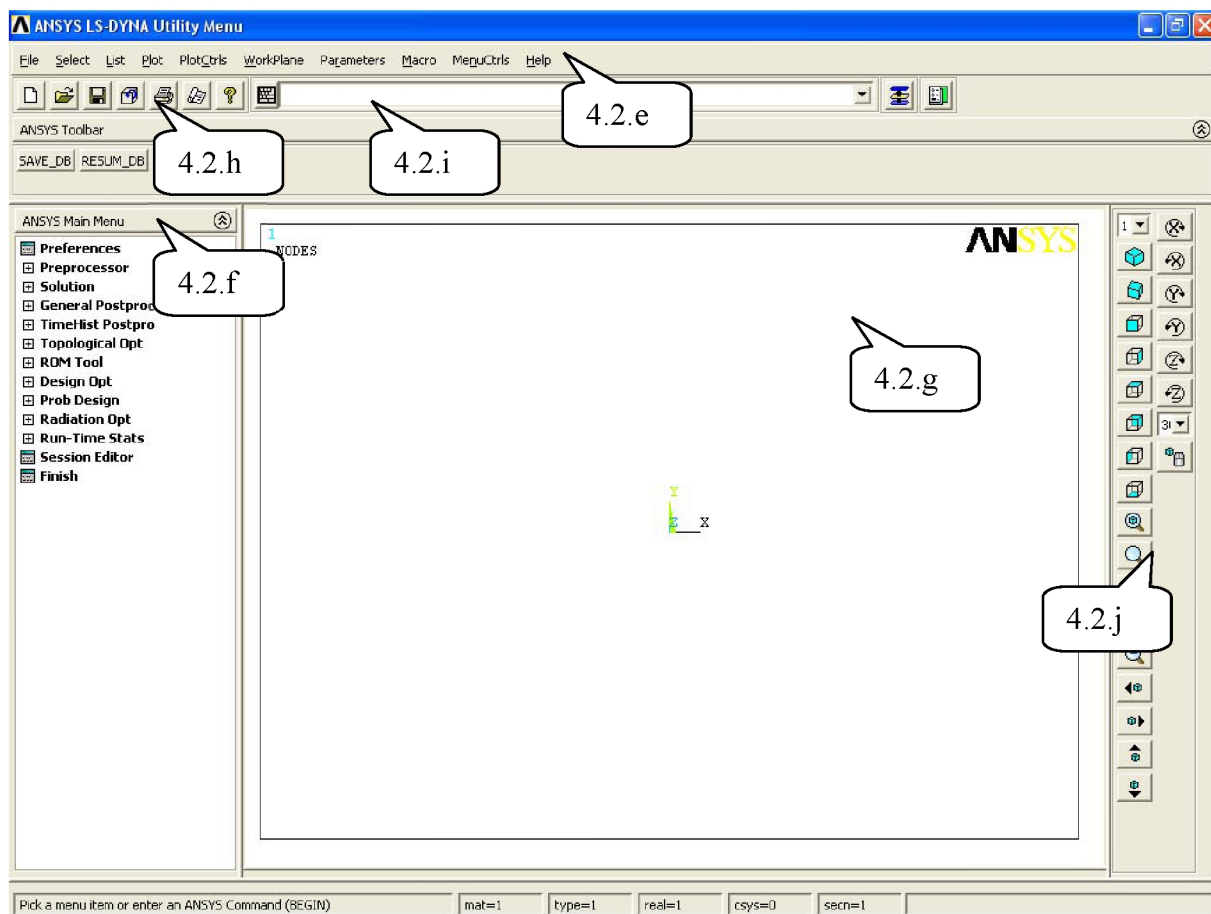


**Рисунок 7 - Запуск ANSYS**

В результате запускается окно «ANSYS LS\_DYNA Utility Menu», в котором выполняются основные действия по построению задачи и просмотр результатов построения (рисунок 8).

Выделим шесть областей для работы (рисунок 8):

- E.** ANSYS LS\_DYNA Utility Menu;
- F.** ANSYS Main Menu;
- G.** Рабочее пространство;
- H.** Меню рабочих иконок;
- I.** Командная строка;
- J.** Меню иконок управления.



**Рисунок 8 - Окно «ANSYS LS\_DYNA Utility Menu»**

Далее представлено пошаговое моделирование задачи.

### **4.3. ВЫБОР РЕШАТЕЛЯ**

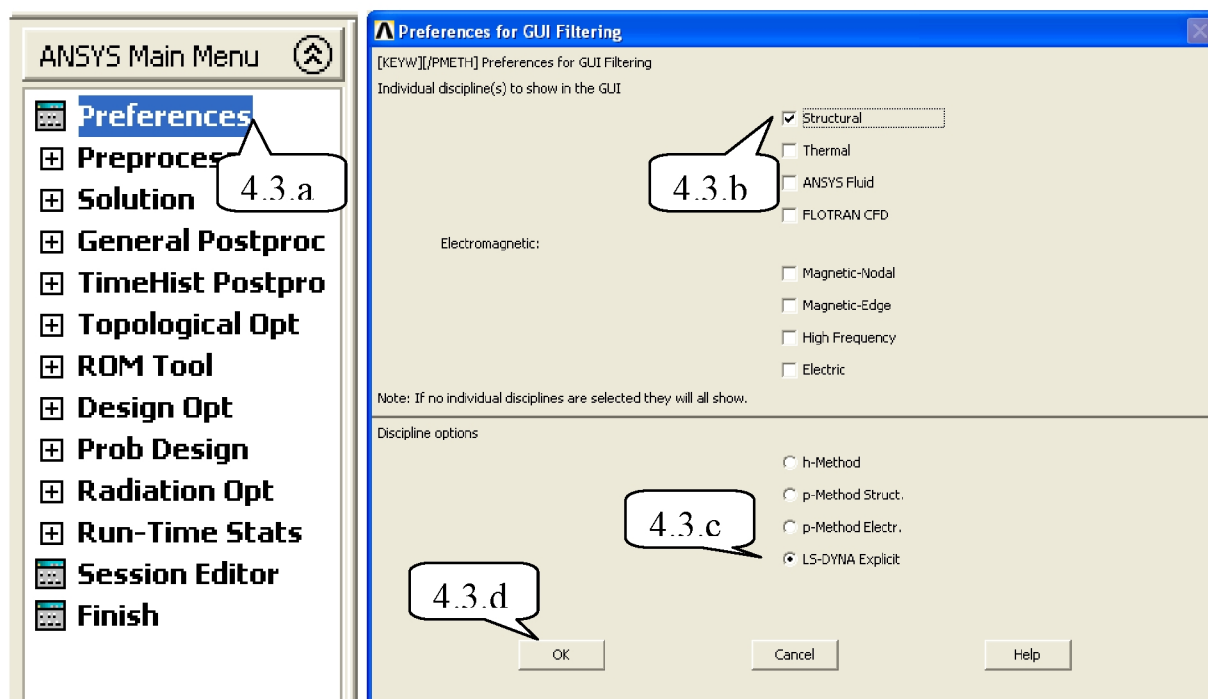
**A.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Preferences for GUI Filtering» (рисунок 9).

ANSYS Main Menu → Preferences.

**B.** В окне «Preferences for GUI Filtering» поставить галочку напротив Structural.

**C.** В этом же окне поставить точку напротив LS-DYNA Explicit.

**D.** Для подтверждения нажать «Ok».



**Рисунок 9 - Выбор решателя**

#### **4.4. ВЫБОР ТИПА ЭЛЕМЕНТА**

**A.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Element Types» (рисунок 10).

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Add/Edit/Delete.

**B.** В появившемся окне «Element Types» нажать «Add...» и запустить окно библиотеки элементов «Library of Element Types».

**C.** В окне «Library of Element Types» выбирать LS-DYNA Explicit.

**D.** Затем выбирать тип элемента Thin Shell 163.

**E.** Для подтверждения выбранного типа элемента нажать «Ok».

**F.** После чего в окне «Element Types» появится выбранный тип элемента и его номер.

**G.** Для закрытия окна «Element Types» нажать «Close».

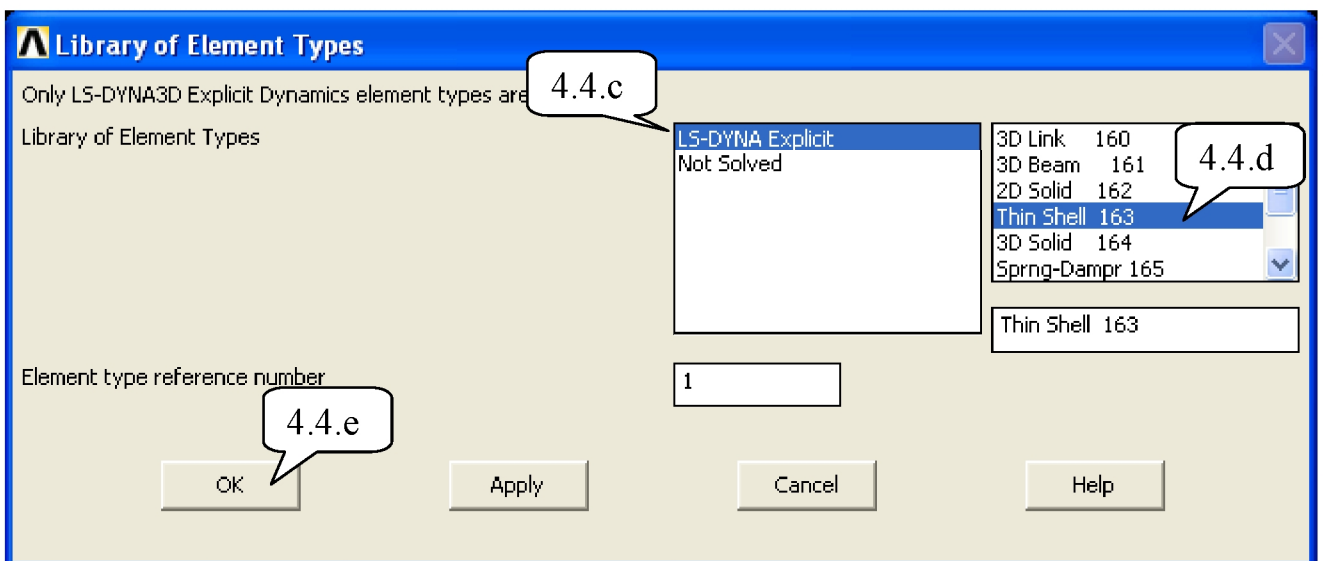
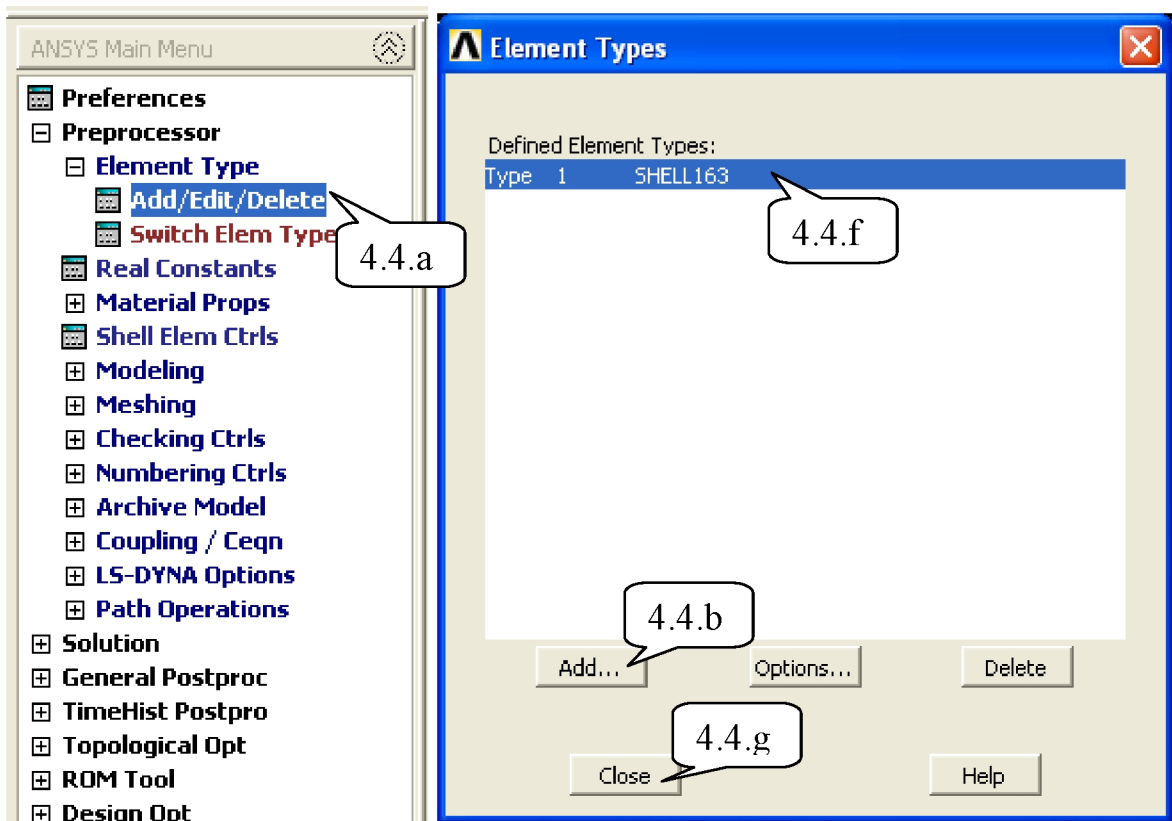


Рисунок 10 - Выбор типа элемента

## 4.5. ЗАДАНИЕ КОНСТАНТ ДЛЯ ВЫБРАННОГО ТИПА ЭЛЕМЕНТА

Необходимо задать константы для выбранного типа элемента заготовки и оснастки. Задаем константы для заготовки (рисунок 11).

**А.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Real Constants».

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Real Constants

**В.** В появившемся окне «Real Constants» нажать «Add...» и запустить окно выбора типов элементов для реальных констант «Element Types for Real Constants».

**С.** В появившемся окне «Element Types for Real Constants» выделить тип элемента «Thin Shell 163».

**Д.** Для подтверждения выбранного типа элемента нажать «Ok».

**Е.** В появившемся окне «Real Constants Set Number 1, for THIN SHELL 163» по умолчанию стоит номер Real Constants Set No. - 1.

**Ф.** Для подтверждения нажать «Ok».

В появившемся окне задать значения для типа элемента Thin Shell 163 №1:

**Г.** Shear Factor SHRF – 5/6

**Н.** No. of integration pts. NIP – 5

**И.** Thickness at node 1 T1 – 0.0015

**Ж.** Для подтверждения нажать «Ok».

Задаем константы для оснастки. Для этого повторяем пункты с **В** по **Ж**. При этом:

Пункт **Е.** В появившемся окне «Real Constants Set Number 2, for THIN SHELL 163» по умолчанию стоит номер Real Constants Set No. – 2.

Пункт **Н.** No. of integration pts. NIP – 3.

Пункт **И.** Thickness at node 1 T1 – 0.001.

**К.** В результате в окне «Real Constants» представлены два вида заданных констант: Set 1 и Set 2.

**Л.** На этом задание констант окончено. Нажать «Close» для закрытия окна «Real Constants».

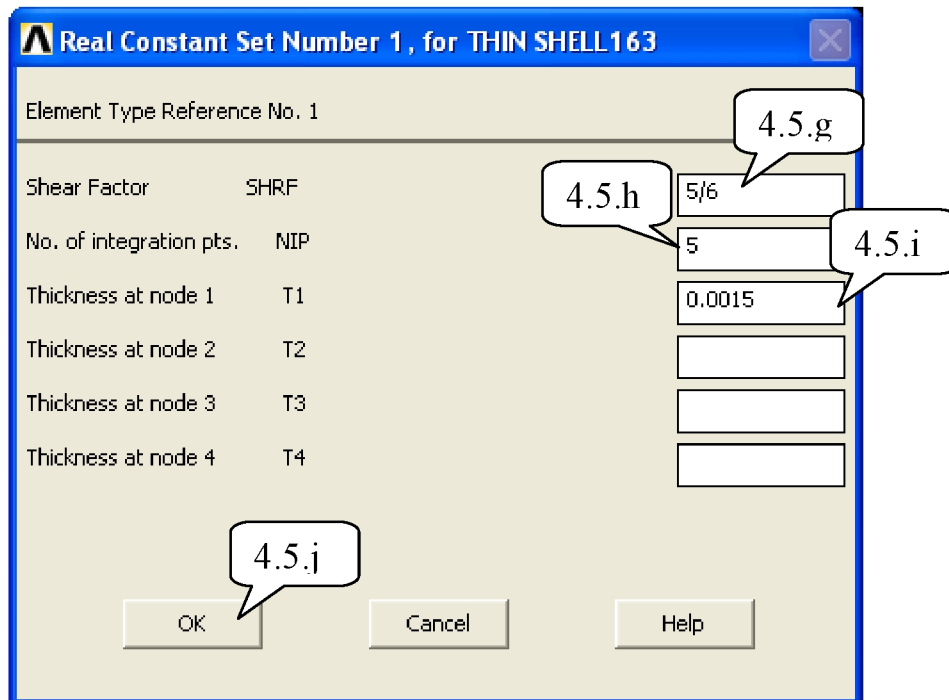
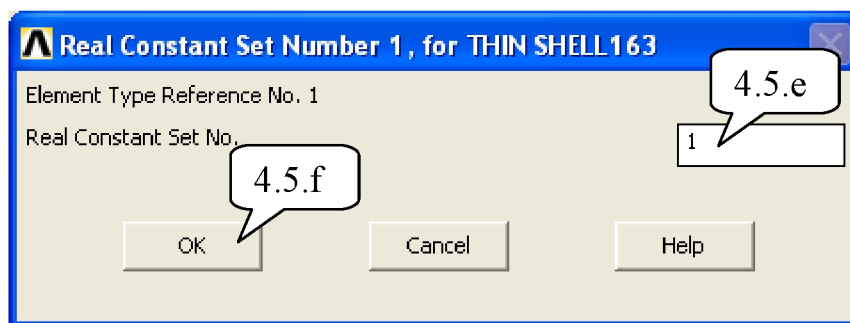
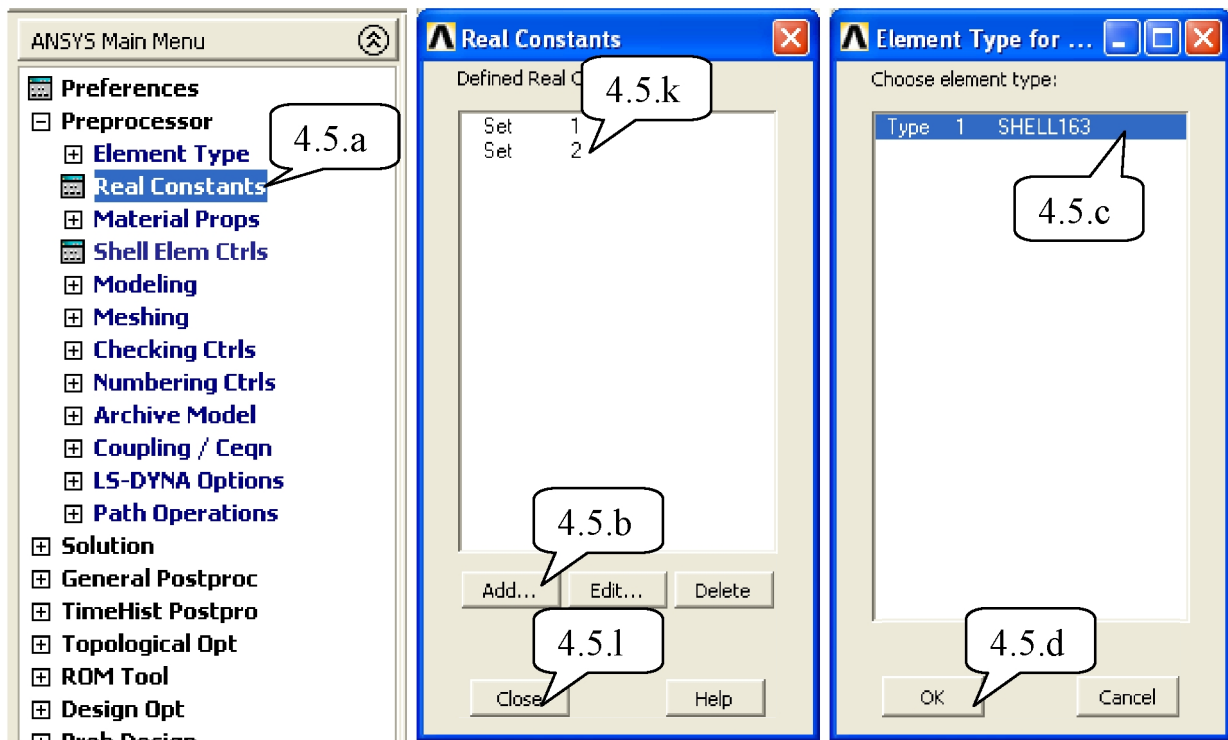


Рисунок 11 - Задание констант для выбранного типа элемента

## 4.6. ВЫБОР МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА И ЗАДАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ЗАГОТОВКИ И ОСНАСТКИ

Задаем модель материала заготовки - Bilinear Kinematic (рисунок 12).

**A.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Define Material Models Behavior».

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Material Props → Material Models

**B.** В левой части окна «Define Material Models Behavior» в меню «Material Models Defined» по умолчанию создана заготовка материала Material Model Number 1.

**C.** В правой части окна «Define Material Models Behavior» в меню «Material Models Available» выбрать (двойным щелчком левой кнопки мыши) модель материала Bilinear Kinematic.

Окна «Define Material Models Behavior» → Меню «Material Models Available» → LS-DYNA → Nonlinear → Inelastic → Kinematic Hardening → Bilinear Kinematic

В появившемся окне Bilinear Kinematic Material Properties for Material Number 1 задать свойства стали 12X18H10T:

**D.** DENS (плотность – кг/м<sup>3</sup>) – 7900

**E.** EX (модель упругости - Па) – 195e9

**F.** NUXY (коэффициент Пуассона) – 0.3

**G.** Yield Stress (предел текучести - Па) – 210e6

**H.** Tangent Modulus (Тангенциальный модуль - Па) – 709e6

**I.** Для подтверждения нажать «Ок».

**Задать модель материала оснастки – Rigid Material.**

**Задаем модель материала и свойства для элемента оснастки - «Пуансон».**

**J.** В окне «Define Material Models Behavior» создать заготовку материала для оснастки.

Окно Define Material Models Behavior → Utility Menu (строка в верхней части окна) → Material → New Model...

**К.** В появившемся окне «Define Material ID» в строке Define Material ID по умолчанию стоит номер 2. Для подтверждения нажать «Ok».

**L.** В левой части окна «Define Material Models Behavior» в меню «Material Models Defined» появилась заготовка материала Material Model Number 2. Выделить ее (при условии если не выделена).

**M.** В правой части окна «Define Material Models Behavior» в меню «Material Models Available» выбрать модель материала Rigid Material.

Окна «Define Material Models Behavior» → Меню «Material Models Available» → LS-DYNA → Rigid Material

В появившемся окне «Rigid Material Properties for Material Number 2» задать свойства стали У8.

**N.** DENS – 7850

**O.** EX – 210e9

**P.** NUXY – 0.3

**Q.** В строке Translational Constraint Parameter выбрать X and Y disps.

**R.** В строке Rotational Constraint Parameter выбрать All rotations.

**S.** Для подтверждения нажать «Ok».

**Задаем модель материала и свойства для элемента оснастки - «Матрица».**

Для этого повторяем пункты с **J** по **S**. При этом:

**Пункт К.** В появившемся окне «Define Material ID» в строке Define Material ID по умолчанию стоит номер 3. Для подтверждения нажать «Ok».

**Пункт L.** В левой части окна «Define Material Models Behavior» в меню «Material Models Defined» появилась заготовка материала Material Model Number 3. Выделить ее (при условии если не выделена).

В появившемся окне «Rigid Material Properties for Material Number 3» задать свойства стали У8.

**Пункт Q.** В строке Translational Constraint Parameter выбрать All disps.

**Задаем модель материала и свойства для элемента оснастки - «Прижим».**

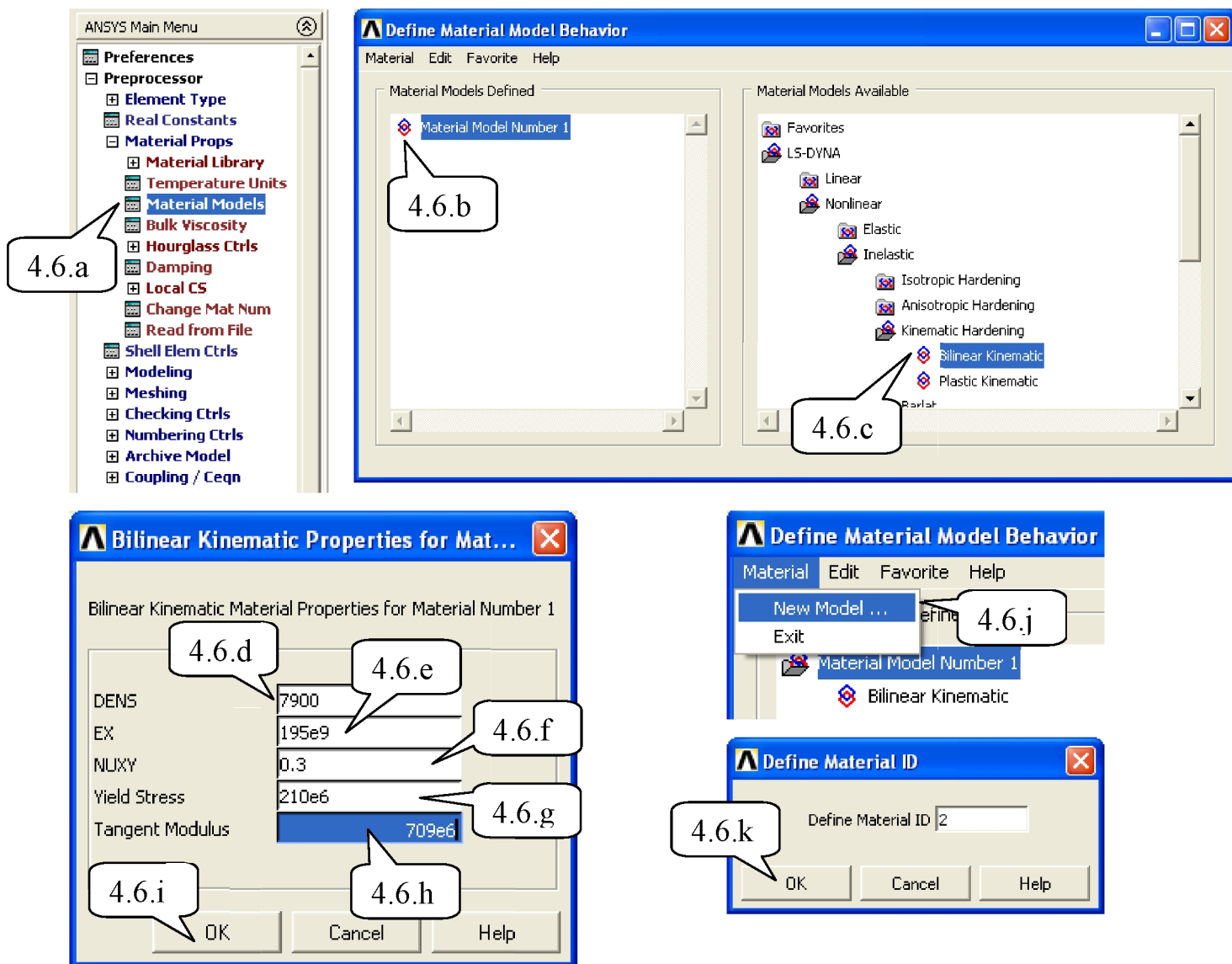
Для этого повторяем пункты с **J** по **S**. При этом:

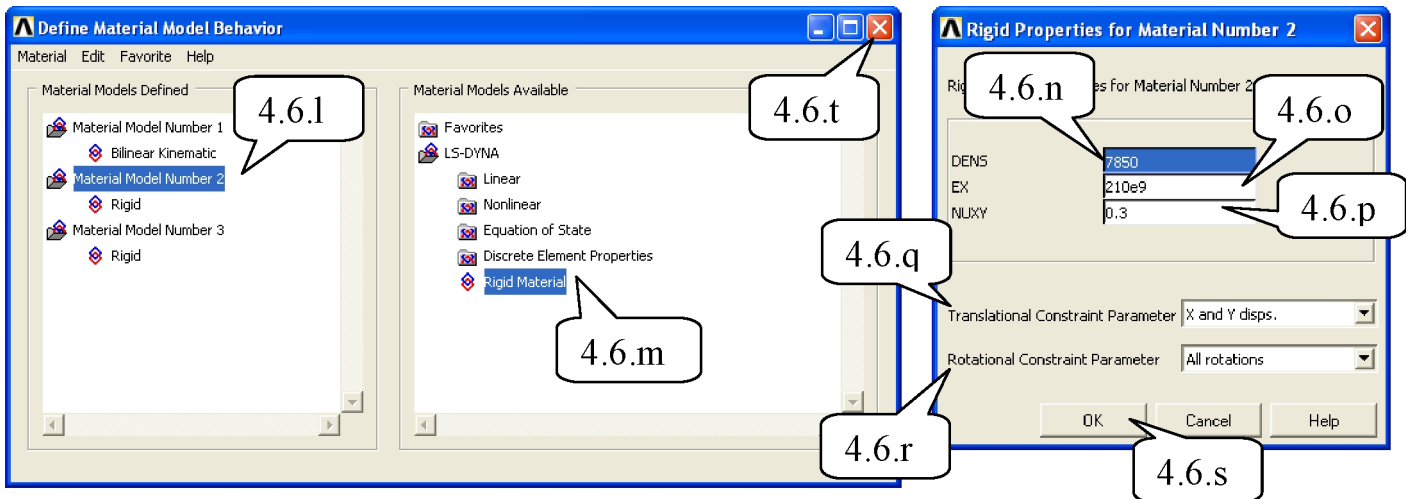
**Пункт К.** В появившемся окне «Define Material ID» в строке Define Material ID по умолчанию стоит номер 4. Для подтверждения нажать «Ok».

**Пункт L.** В левой части окна «Define Material Models Behavior» в меню «Material Models Defined» появилась заготовка материала Material Model Number 4. Выделить ее (при условии если не выделена).

В появившемся окне «Rigid Material Properties for Material Number 4» задать свойства стали У8. При этом для элемента оснастки «Прижим» последовательность действий соответствует пунктам с **N** по **S** без изменений.

**T.** На этом выбор модели материала и задание свойств окончено. Закрываем окно «Define Material Models Behavior».





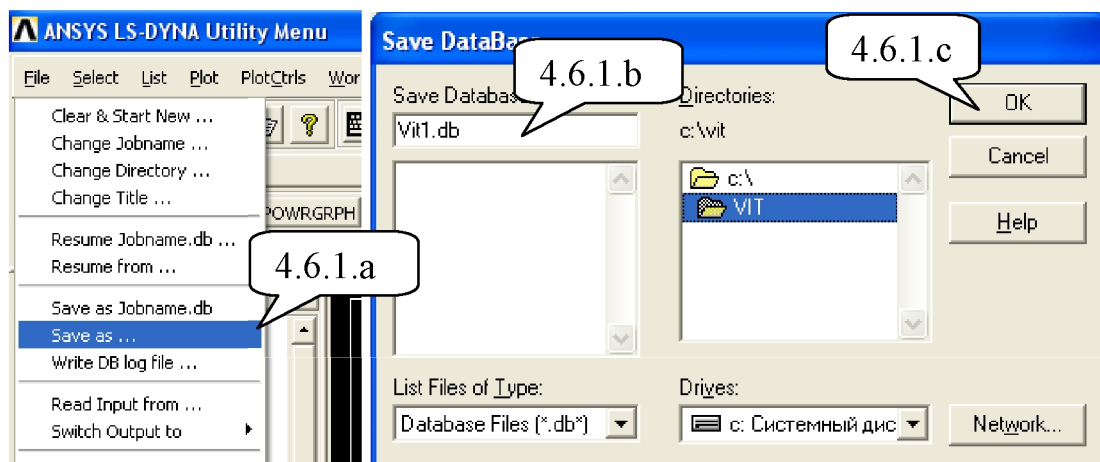
**Рисунок 12 - Выбор модели материала и задание свойств материалов заготовки и оснастки**

На этом этапе построения задачи следует сохранить базу данных. Сохранить созданную базу данных под именем Vit1.

#### 4.6.1. СОХРАНЕНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ

Ниже представлена последовательность, необходимая для построения созданной базы данных (рисунок 13).

- A.** Через Utility Menu ANSYS LS\_DYNA запустить окно «Save DataBase».
- B.** В строке «Save Database to» вместо «\*.db» написать имя базы данных – «Vit1.db».
- C.** Для подтверждения нажать «Ok».



**Рисунок 13 - Сохранение базы данных**

## 4.7. СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИИ

Создавать геометрию заготовки и оснастки будем в следующей последовательности:

Создать ключевые точки.

По ключевым точкам создать линии.

По линиям создать поверхности.

Перед созданием геометрических объектов познакомимся с некоторыми приемами геометрической визуализации.

### 4.7.1. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИМИТИВОВ

В данном случае к визуализации геометрических примитивов относим (рисунок 14):

#### **Отображение точек, линий, поверхностей, элементов, узлов**

**A.** Для отображения точек необходимо через меню программы ввести следующую команду:

ANSYS LS\_DYNA Utility Menu → Plot → Keypoints → Keypoints

**B.** Для отображения линий необходимо:

ANSYS LS\_DYNA Utility Menu → Plot → Lines

**C.** Для отображения поверхностей необходимо:

ANSYS LS\_DYNA Utility Menu → Plot → Areas

**D.** Для отображения элементов необходимо:

ANSYS LS\_DYNA Utility Menu → Plot → Elements

**E.** Для отображения узлов необходимо:

ANSYS LS\_DYNA Utility Menu → Plot → Nodes

#### **Отображение номеров точек, линий, поверхностей**

**F.** Через Utility Menu ANSYS LS-DYNA запустить окно «Plot Numbering Controls».

ANSYS LS-DYNA Utility Menu → PlotCtrls → Numbering...

**G.** Для отображения номеров точек необходимо в окне «Plot Numbering Controls» поставить галочку напротив KP Keypoint numbers.

**Н.** Для отображения номеров линий необходимо в окне «Plot Numbering Controls» поставить галочку напротив LINE Line numbers.

**И.** Для отображения номеров поверхностей необходимо в окне «Plot Numbering Controls» поставить галочку напротив AREA Area numbers.

**Ж.** Для подтверждения нажать «Ok».

**Вращение, перемещение, увеличение или уменьшение, позиционирование, а также вписывание в рабочее окно всех отображенных геометрических объектов (примитивов)**

**К.** Для вращения, перемещения, увеличения или уменьшения геометрических объектов необходимо в меню иконок управления (справа от рабочего окна) включить иконку с изображением компьютерной мыши. После чего:

для вращения - нажать и удерживать правую кнопку мыши, после чего перемещать курсор в рабочей области до достижения желаемого результата;

для перемещения - нажать и удерживать левую кнопку мыши, после чего перемещать курсор в рабочей области до достижения желаемого результата;

для увеличения или уменьшения - вращать колесо мыши в рабочей области до достижения желаемого результата.

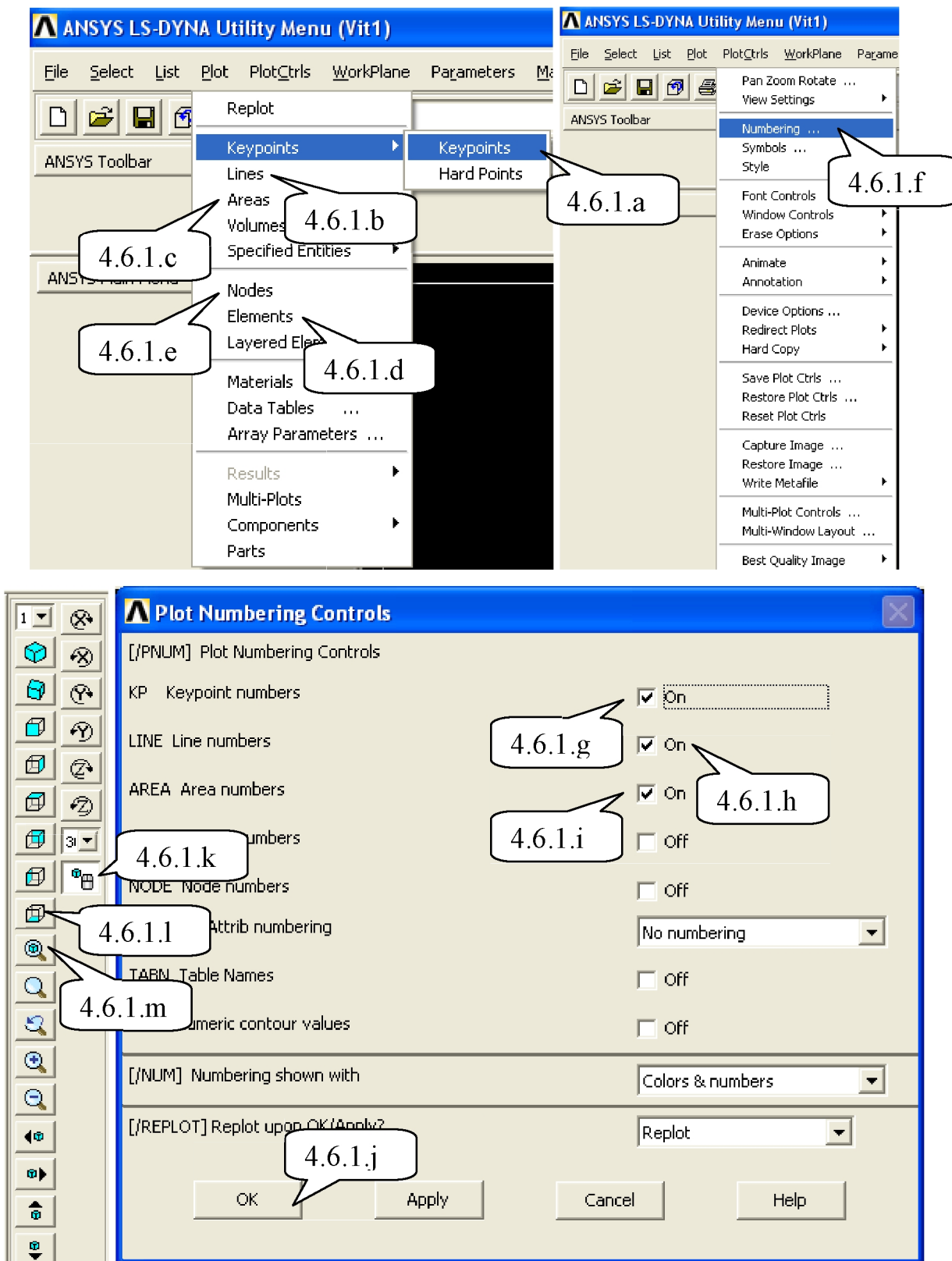
**Л.** Для позиционирования относительно осей координат использовать в меню иконок управления иконки с изображением параллелограмма с подсвеченной гранью. При построении данной задачи использовать следующее позиционирование:

Ось X – вправо. Ось Y – от Вас. Ось Z – вверх.

Для позиционирования нажать в меню рабочих иконок иконку параллелограмма с подсвеченной нижней гранью.

**М.** Для вписывания в рабочее окно всех отображенных геометрических объектов использовать в меню рабочих иконок иконку с изображением увеличительного стекла с вписанным в него параллелограммом.

Следует отметить, что здесь описаны основные (необходимые для дальнейшего построения задачи) приемы визуализации. Данные приемы дублируются различными иконками и командами.



**Рисунок 14 - Визуализация геометрических примитивов**

#### 4.7.2. СОЗДАНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК

Номера и координаты точек представлены в таблице 6. Всего должно быть задано пятнадцать точек (таблица 5).

**Таблица 5**

**Номера и координаты ключевых точек**

Принадлежность точек геометрическим элементам, заготовке и оснастке	Номер точки	Значение по оси X	Значение по оси Y	Значение по оси Z
Заготовка	1	0	0	0
	2	-0.05	0	0
Пуансон	3	0	0	0.00525
	4	-0.00883	0	0.00525
	5	-0.001283	0	0.00125
	6	-0.0355	0	0.00125
	7	-0.0325	0	0.03475
Матрица	8	0	0	-0.02725
	9	-0.00779	0	-0.02725
	10	-0.01179	0	-0.03125
	11	-0.0355	0	-0.03125
	12	-0.0355	0	-0.00125
	13	-0.054	0	-0.00125
Прижим	14	-0.035	0	0.00125
	15	-0.054	0	0.00125

Для создания точек необходимо (рисунок 15):

**А.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Create Keypoints in Active Coordinate System».

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Keypoints → In Active CS

**В.** В окне «Create Keypoints in Active Coordinate System» в строке NPT Keypoint number задать номер точки - 1.

C. В строке X,Y,Z, Location in active CS в первом окне задать значение координаты точки по оси X - 0.

D. В строке X,Y,Z, Location in active CS во втором окне задать значение координаты точки по оси Y - 0.

E. В строке X,Y,Z, Location in active CS в третьем окне задать значение координаты точки по оси Z - 0.

F. Для подтверждения нажать «Apply».

G. Затем, аналогичным образом, ввести значения еще для четырнадцати точек. После ввода номера и координат последней точки нажать «Ok».

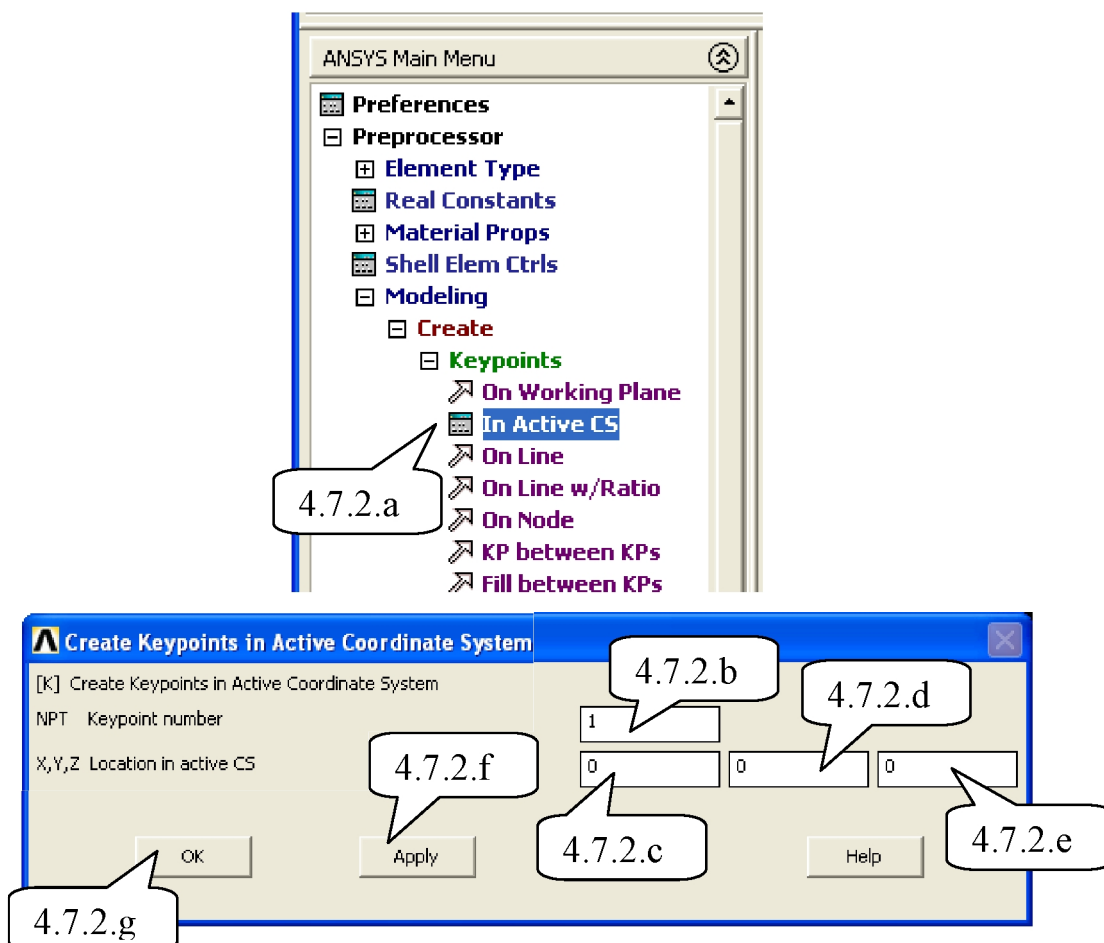
Отобразить построенные точки – пункт 4.7.1.a.

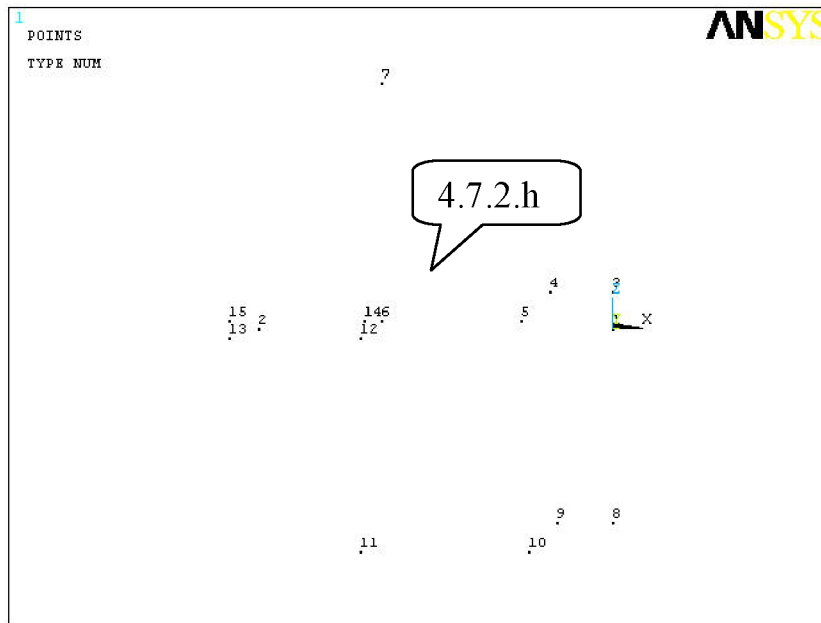
Отобразить номера точек – пункт 4.7.1.f и пункт 4.7.1.g.

Выполнить позиционирование - пункт 4.7.1.1.

Вписать в рабочее окно построенные геометрические примитивы (точки) – 2.7.1.m.

H. Для сравнения результаты построения представлены в рабочем окне ANSYS.





**Рисунок 15 – Создание ключевых точек**

### 4.7.3. СОЗДАНИЕ ЛИНИЙ

Линии описывают заготовку и рабочие поверхности оснастки. Для построения линий соединим ключевые точки, распределенные между различными геометрическими элементами (рисунок 16):

Заготовка: Точка №1 → Точка №2.

Пуансон: Точка №3 → Точка №4, Точка №4 → Точка №5; Точка №5 → Точка №6; Точка №6 → Точка №7.

Матрица: Точка №8 → Точка №9, Точка №9 → Точка №10; Точка №10 → Точка №11; Точка №11 → Точка №12; Точка №12 → Точка №13.

Прижим: Точка №14 → Точка №15.

**A.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Create Straight Line».

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Lines → Lines → Straight Line

**B.** Для построения линии, описывающей заготовку, нужно нажать левой кнопкой мыши на точке с номером 1, затем на точку с номером 2 или ввести номера точек 1, 2 через запятую в строке окна «Create Straight Line».

С. Для подтверждения, после ввода номеров точек в строке, нажать «Apply».

Для построения линии, описывающей пуансон, ввести номера точек 3, 4. Нажать «Apply». Затем номера точек 4, 5. Нажать «Apply» и т.д. до построения всех линий, относящихся к пуансону. Аналогичным образом рисуем линии для матрицы и прижима.

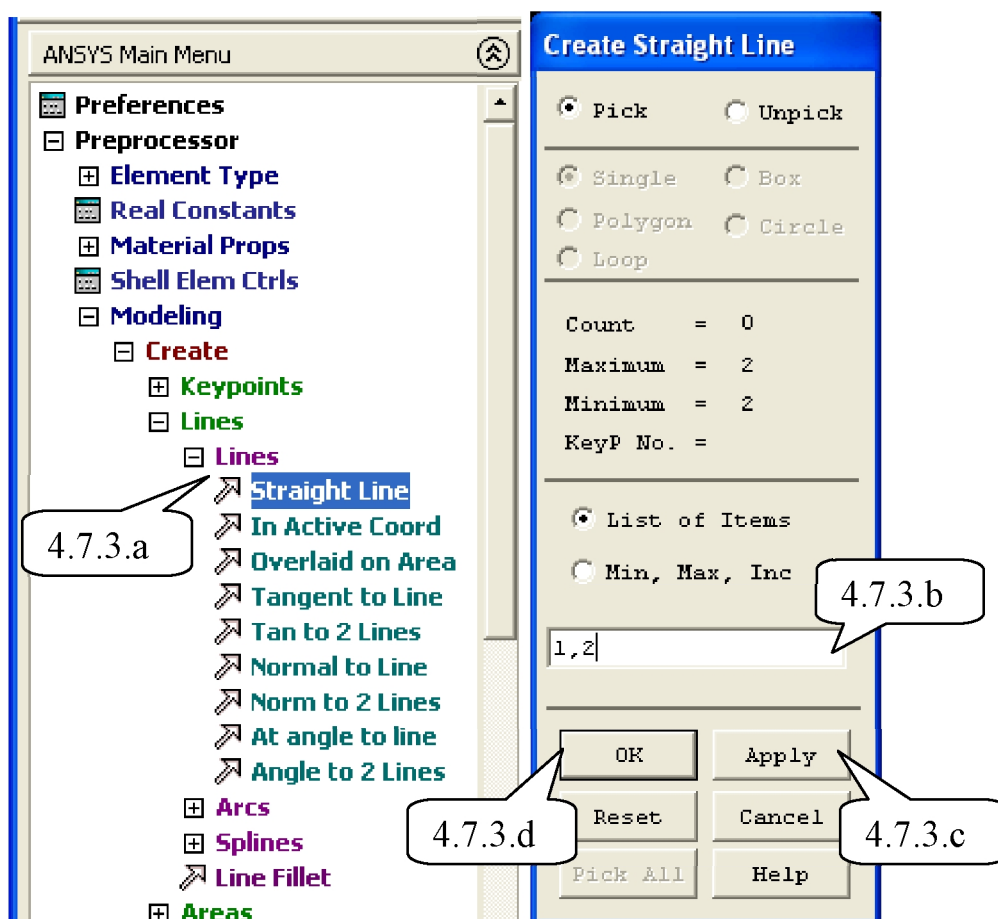
Д. После ввода последней линии нажать «Ok».

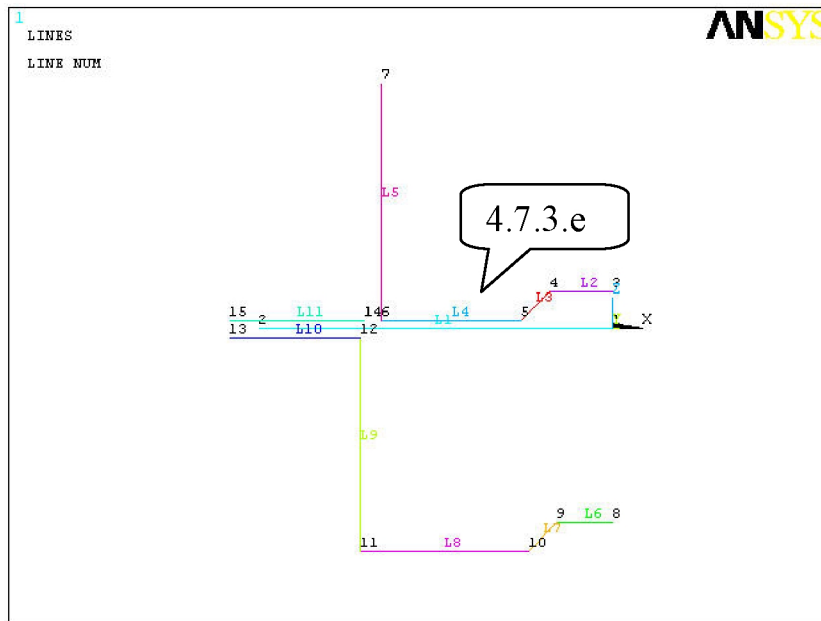
Отобразить построенные линии – пункт 2.7.1.b.

Отобразить номера линий – пункт 2.7.1.d и пункт 2.7.1.f.

По необходимости выполнить позиционирование и вписать в рабочее окно;

Е. Для сравнения результаты построения представлены в рабочем окне ANSYS.





**Рисунок 16 – Создание линий**

#### **4.7.4. СОЗДАНИЕ РАДИУСОВ СКРУГЛЕНИЯ**

Необходимо создать радиус закругления пуансона и радиус закругления матрицы. Для этого скруглим углы, образованные линиями L4-L5 для пуансона и линиями L8-L9 и L9-L10 для матрицы (рисунок 17).

**A.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Line Fillet».

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → Lines → Line Fillet

**B.** Для построения скругления пуансона нужно нажать левой кнопкой мыши на линии с номером L4, затем на линии с номером L5, или ввести номера линий 4, 5 через запятую в строке окна «Line Fillet».

**C.** Для подтверждения, после ввода номеров линий в строке, нажать «Apply».

**D.** В появившемся окне «Line Fillet» в строке «RAD Fillet radius» ввести значения радиуса скругления пуансона – 0.002 (при вводе значений десятичных цифр вместо запятой ставится точка).

**E.** Для подтверждения нажать «Apply».

Аналогичным образом задать скругление матрицы. При этом:

Пункт В. Для верхней части матрицы ввести номера линий 9, 10 через запятую в строке окна «Line Fillet».

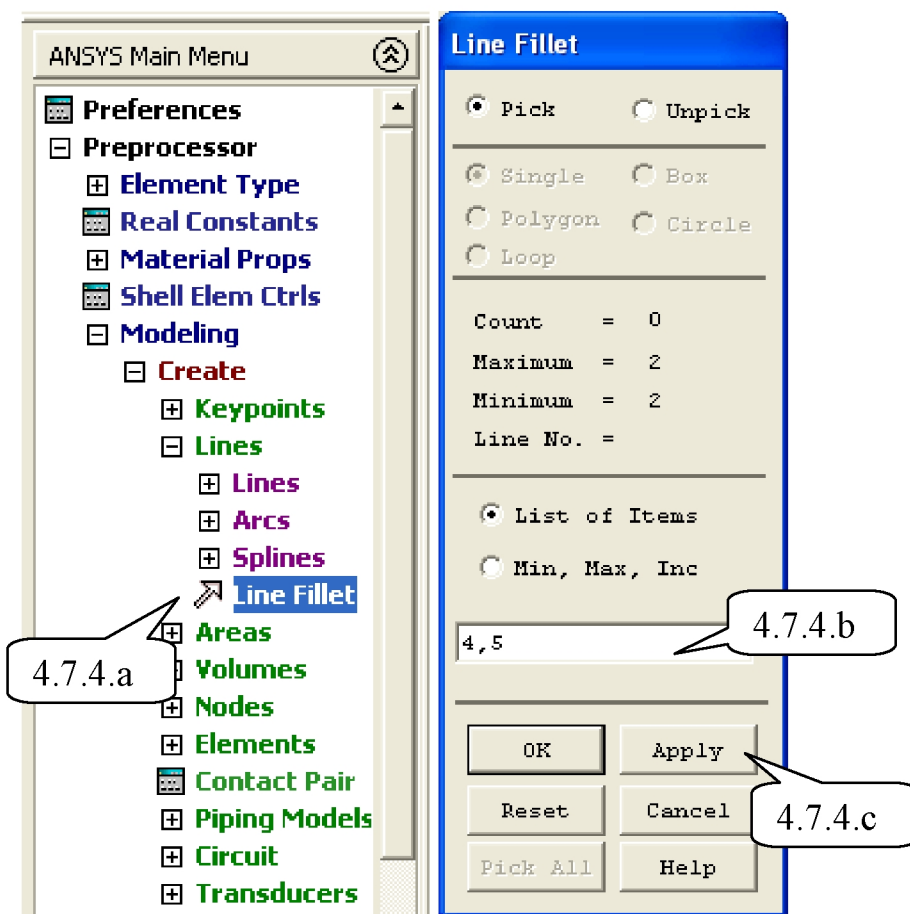
В том случае, когда радиусы скругления пуансона и матрицы не равны друг другу, следует в пункте D (для матрицы) вводить соответствующее значение радиуса скругления.

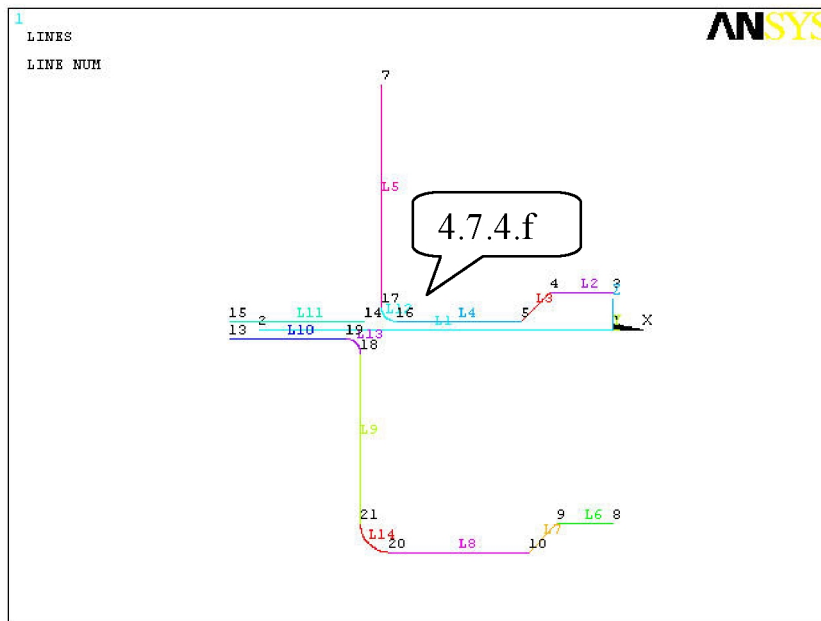
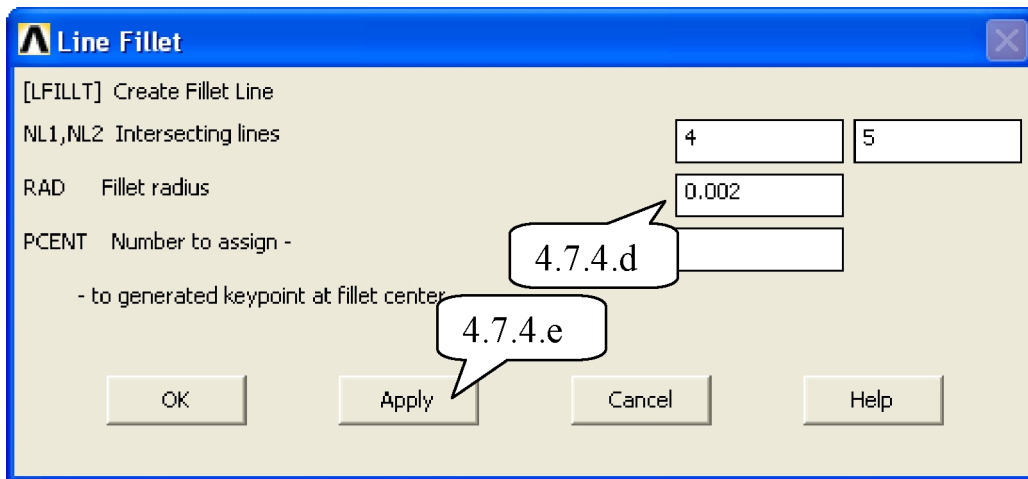
Пункт В. Для нижней части матрицы ввести номера линий 8, 9 через запятую в строке окна «Line Fillet».

Пункт D. В появившемся окне «Line Fillet» в строке RAD Fillet radius ввести значения радиуса скругления для нижней части матрицы – 0.004

Пункты С и Е. Для подтверждения нажать «Ok».

Ф. Для сравнения результаты построения представлены в рабочем окне ANSYS.





**Рисунок 17 – Создание радиусов скругления**

#### **4.7.5. СОЗДАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Для построения задачи достаточно 1/4 части геометрии заготовки и оснастки. Вследствие этого, для построения поверхности заготовки и формирующих поверхностей оснастки, создадим поверхности поворотом построенных линий на угол в 90 градусов. Для этого необходимо создать вспомогательные точки вокруг которых будет осуществляться поворот. (С этой целью необходимо выполнить последовательность, описанную в пунктах с 4.7.2.A по 4.7.2.G). Номера и координаты точек представлены в таблице 6.

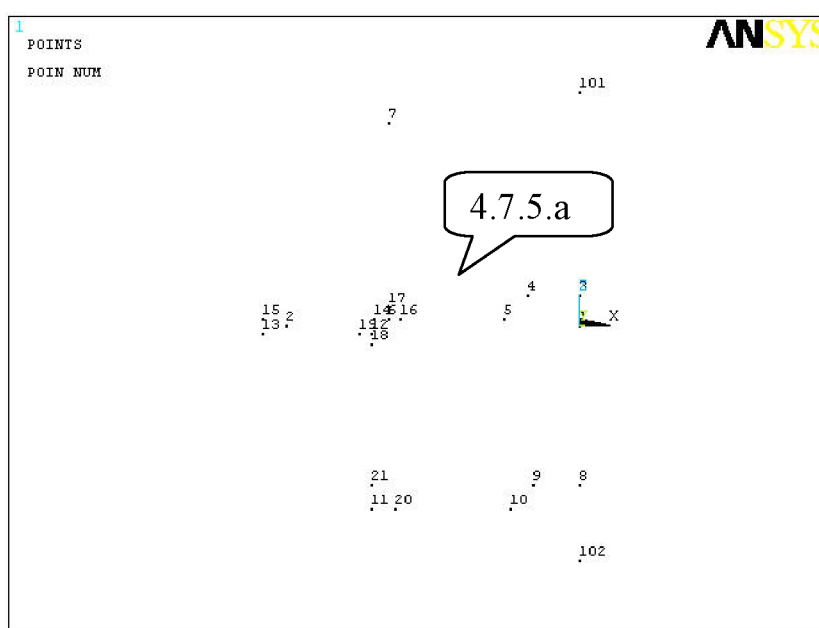
**Таблица 6**

**Номера и координаты вспомогательных точек**

Номер точки	Значение по оси X	Значение по оси Y	Значение по оси Z
101	0	0	0.04
102	0	0	-0.04

Для просмотра результатов построения выполнить пункты 4.7.1.a, 4.7.1.f, 4.7.1.g; 4.7.1.l и 4.7.1.m.

**А.** Для сравнения результаты построения представлены в рабочем окне ANSYS (рисунок 18).



**Рисунок 18 – Построение вспомогательных точек**

Построение 1/4 поверхности заготовки и формирующих поверхностей оснастки.

Перед построением, для удобства, отобразить линии и их номера, а также вписать в рабочее окно (рисунок 19).

**В.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Sweep Lines about Axis».

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Modeling → Operate → Extrude → Lines → About Axis

**С.** Для построения 1/4 поверхности заготовки нужно выделить линию с номером L1, нажав на нее левой кнопкой мыши, или ввести номер линий - 1 в строке окна «Sweep Lines about Axis».

**D.** Для подтверждения нажать «Apply».

**E.** Выделить последовательно вспомогательные точки или ввести номера точек через запятую в строке окна «Sweep Lines about Axis» – 101,102.

**F.** Для подтверждения нажать «Apply».

**G.** В появившемся окне «Sweep Lines about Axis» в строке ARC Arc length in degrees ввести значение поворота линии в градусах - 90.

**H.** Для подтверждения нажать «Apply».

Далее, для построения поверхности пуансона, выполнить последовательность действий принятую для построения поверхности заготовки (пункты с **4.7.5.B** по **4.7.5H**).

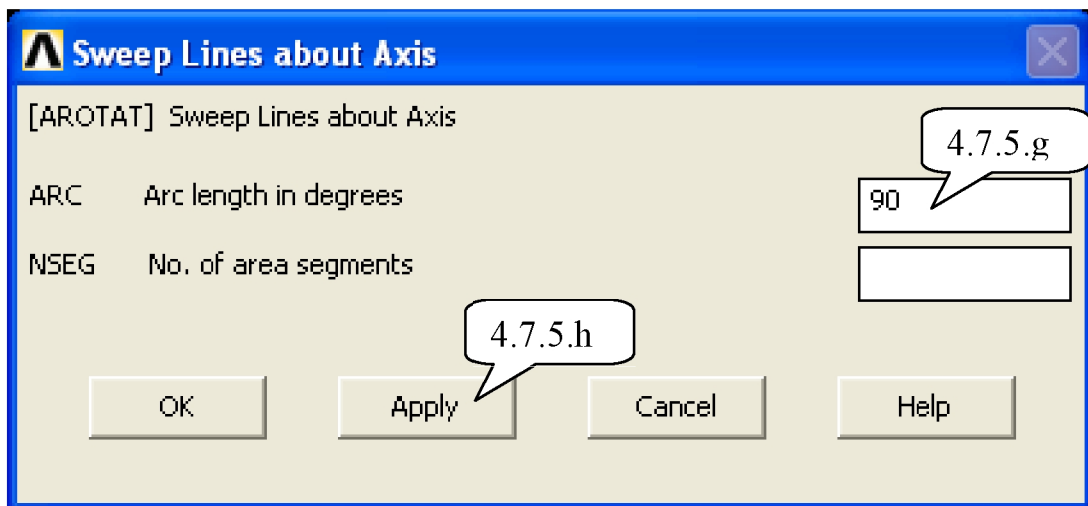
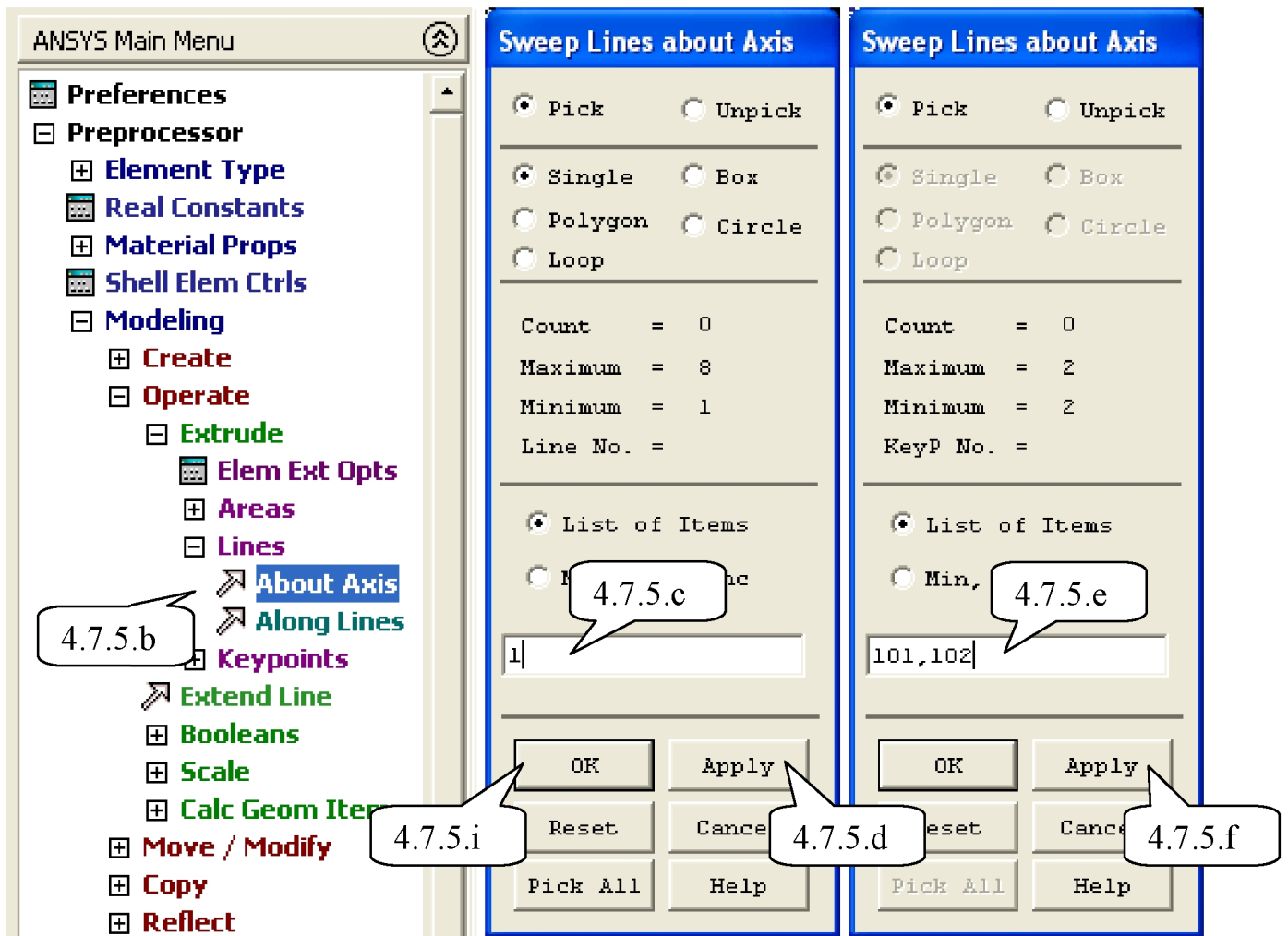
Для построения 1/4 формующей поверхности пуансона нужно выделить линии с номерами L2, L3, L4, L12 и L5, нажав на них последовательно левой кнопкой мыши, или ввести номера линий – 2,3,4,12,5 через запятую в строке окна «Sweep Lines about Axis».

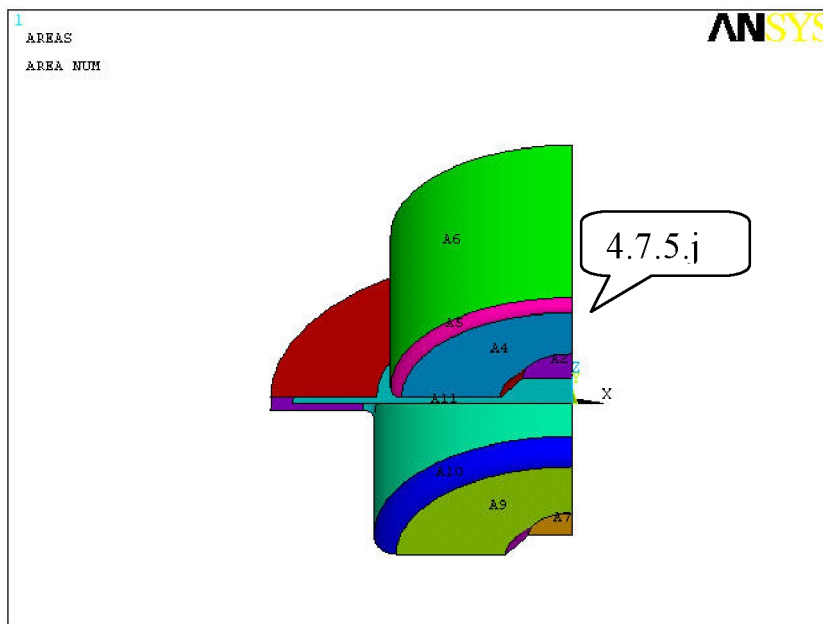
Построение 1/4 формующих поверхностей матрицы и прижима аналогично построению пуансона и заготовки. При этом для матрицы вводятся номера линий – L6, L7, L8, L14, L9, L13, L10, а для прижима – L11.

**I.** После всех построений, для закрытия окна «Sweep Lines about Axis», нажать «Ok».

Выключить номера линий и точек (для этого убрать галочки, поставленные в пунктах **4.7.1.A** и **4.7.1.B**). Отобразить построенные поверхности и их номера (пункт **4.7.1.C** и **4.7.1.G**), после чего, для удобства, позиционировать и повернуть полученное изображение.

**J.** Для сравнения результаты построения представлены в рабочем окне ANSYS.





**Рисунок 19 – Построение 1/4 поверхности заготовки и формирующих поверхностей оснастки**

На этом этапе построения задачи следует сохранить базу данных (пункт 4.6.1). Сохранить созданную базу данных под именем Vit2.

## **4.8. СОЗДАНИЕ СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Сетку конечных элементов строить с использованием построенных поверхностей. Все построения сетки осуществлять через окно «MeshTool».

Создавать сетку конечных элементов для заготовки и оснастки будем в следующей последовательности:

разбить линии созданных поверхностей на сегменты;

выбрать атрибуты для сетки (в данном случае тип элемента, номер материала и номер констант типа элемента);

построить сетку.

### **4.8.1. РАЗБИЕНИЕ ЛИНИЙ ПОСТРОЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Для построения сетки разобьем линии построенных поверхностей на определенное количество сегментов (рисунок 20):

Линии заготовки - на 20.

Линии поверхностей оснастки, лежащие в плоскости X-Y (за исключением линий формующего элемента), - на 10.

Линии поверхностей оснастки, лежащие в плоскостях симметрии Z-X и Z-Y (за исключением линий формующего элемента), - на 3.

Линии формующего элемента - на 6.

### **Разбиение линий поверхности заготовки**

**А.** Для удобства отобразить линии и их номера (пункт **4.7.1.В** и **4.7.1.Н** соответственно). По необходимости позиционировать и вписать в рабочее окно.

**В.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «MeshTool».

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Meshing → MeshTool

**С.** Запустить окно «Element Size on Picked...» для выделения линий.

Окно «Mesh Tool» → Раздел «Size Controls:» → Lines → Set

**Д.** В появившемся окне «Element Size on Picked...» в строке ввести через запятую номера линии поверхности заготовки: L1, L15, L16 - 1,15,16 (или нажать левой кнопкой мыши на линии с соответствующими номерами).

**Е.** Для подтверждения нажать «Ok».

**Ф.** В появившемся окне «Element Sizes on Picked Lines» в строке NDIV No. of element divisions ввести количество сегментов – 20.

**Г.** Для подтверждения нажать «Apply».

### **Разбиение линий поверхностей оснастки, лежащих в плоскости X-Y**

Для этого выполнить пункты с **В** по **Г** При этом:

Пункт **Д** В появившемся окне «Element Size on Picked...» в строке ввести через запятую номера линий поверхностей оснастки, лежащих в плоскости X-Y (за исключением линий формующего элемента): пуансон L37, L38, L39, L40, матрица L25, L26, L27, L28, L29, L30, прижим L42, L43;

все номера линий, вводимых в строке окна «Element Size on Picked...», - 37,38,39,40,25,26,27,28,29,30,42,43

Пункт **Ф** В появившемся окне «Element Sizes on Picked Lines» в строке NDIV No. of element divisions ввести количество сегментов – 10

## **Разбиение линий поверхностей оснастки, лежащих в плоскостях симметрии Z-X и Z-Y**

Для этого выполнить пункты с **В** по **Г** При этом:

**Пункт Д.** В появившемся окне «Element Size on Picked...» в строке ввести через запятую номера линий поверхностей оснастки, лежащих в плоскостях симметрии Z-X и Z-Y (за исключением линий формующего элемента):

плоскость симметрии Z-X: пуансон L3, L4, L12, L5, матрица L7, L8, L14, L9, L13, L10, прижим L11;

плоскость симметрии Z-Y: пуансон L32, L33, L34, L35, матрица L18, L19, L20, L21, L22, L23, прижим L41;

все номера линий, вводимых в строке окна «Element Size on Picked...», - 3,4,12,5,6,8,4,9,13,10,11,32,33,34,35,18,19,20,21,22,23,41

**Пункт Ф.** В появившемся окне «Element Sizes on Picked Lines» в строке NDIV No. of element divisions ввести количество сегментов - 3

### **Разбиение линий поверхностей формующего элемента.**

Для этого выполнить пункты с **В.** по **Ф.** При этом:

**Пункт Д** В появившемся окне «Element Size on Picked...» в строке ввести через запятую номера линий поверхностей формующих элементов оснастки:

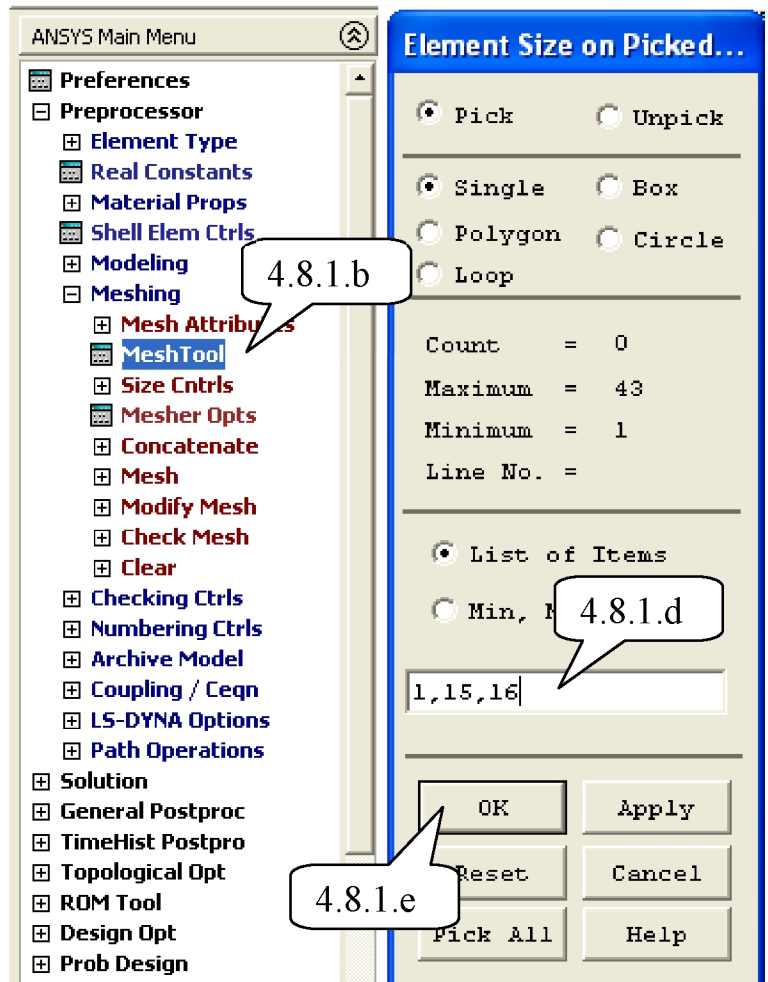
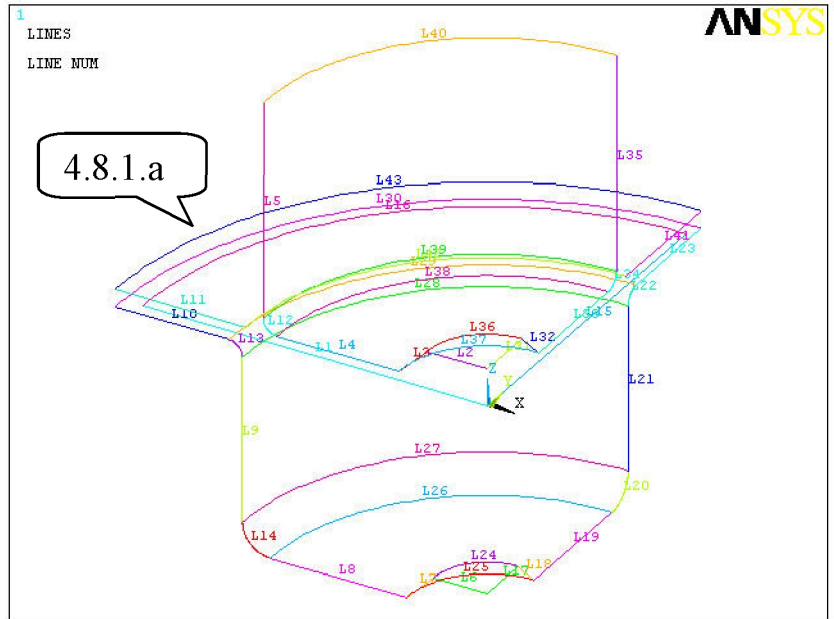
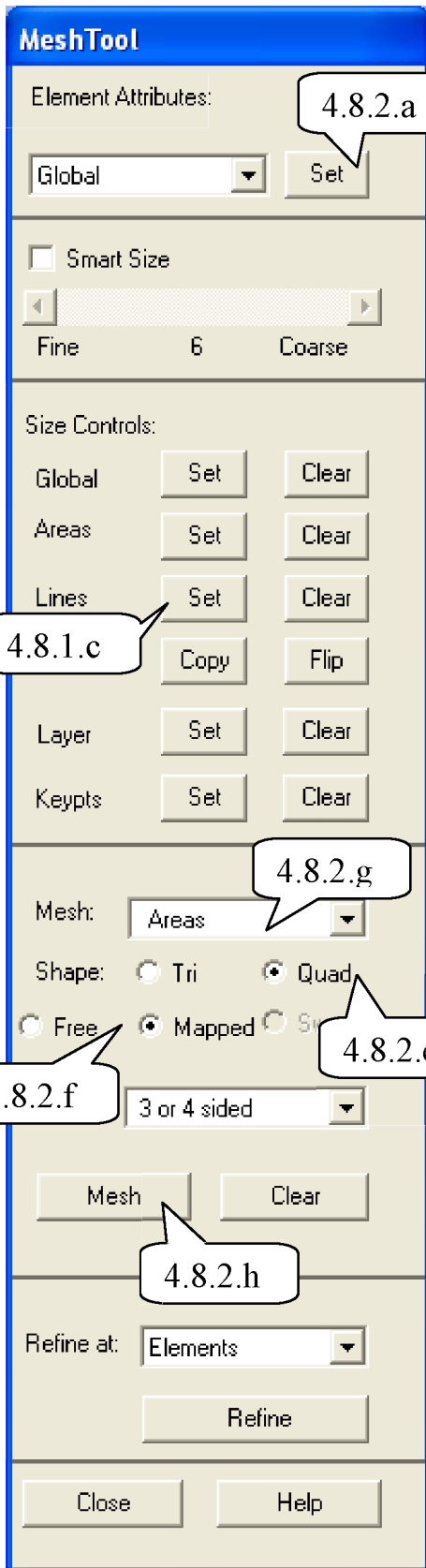
пуансон L2, L31, L36, матрица L6, L17, L24;

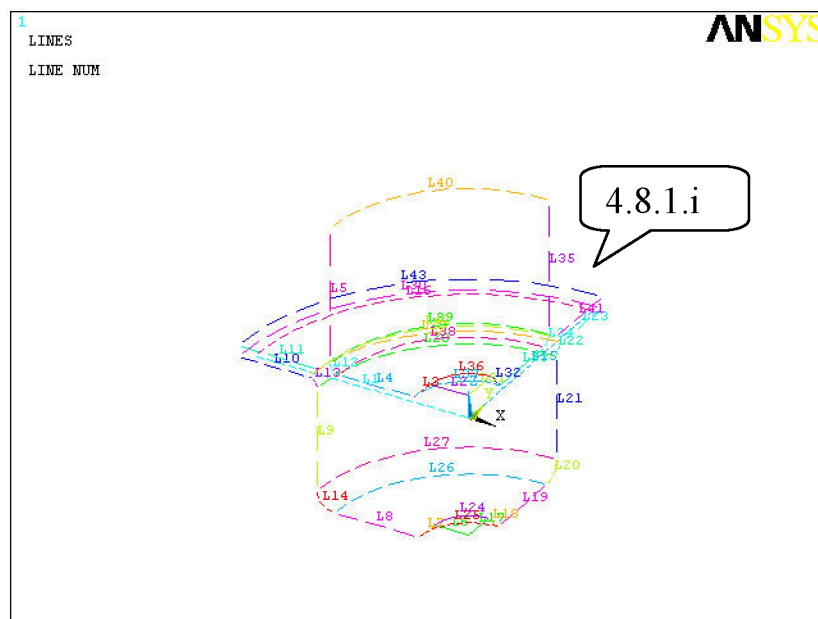
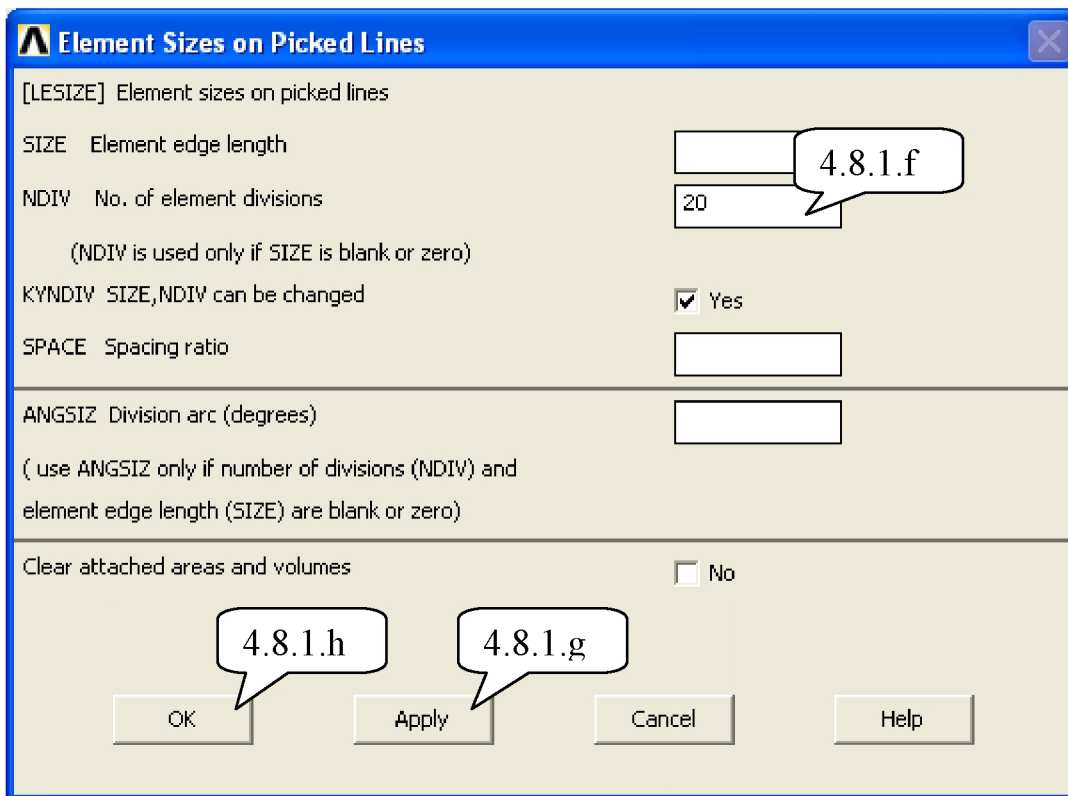
все номера линий, вводимых в строке окна «Element Size on Picked...», - 2,31,36,6,17,24

**Пункт Ф** В появившемся окне «Element Sizes on Picked Lines» в строке NDIV No. of element divisions ввести количество сегментов – 6

**Н.** Для подтверждения нажать «Ок».

**И.** Таким образом, разбиты все линии построенных поверхностей оснастки и заготовки.





**Рисунок 20 – Разбиение линий построенных поверхностей**

## **4.8.2. СОЗДАНИЕ СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Для удобства отобразить построенные поверхности и их номера (пункты 4.7.1.С и 4.7.1.І).

**Сетка конечных элементов для заготовки**

**А.** Задать атрибуты сетки для заготовки (рисунок 20).

Для этого открыть, если не открыто, окно «Mesh Tool», пункт **4.8.1.B**.

Окно «Mesh Tool» → Element Attributes: → Global → Set

**B.** В появившемся окне «Meshing Attributes» в строке «[MAT] Material number» выбираем номер 1 (в общем случае первый номер стоит по умолчанию).

**C.** В строке «[REAL] Real constant set number» выбираем номер 1 (в общем случае первый номер стоит по умолчанию).

**D.** Для подтверждения нажать «Ok».

Для определения геометрии сетки (рисунок 20):

**E.** Поставить точку перед «Quad».

Окно «Mesh Tool» → Shape: → Quad

**F.** Поставить точку перед «Mapped».

Окно «Mesh Tool» → Shape: → Mapped

**G.** Определить геометрический примитив, на который будет накладываться сетка.

Окно «Mesh Tool» → Mesh: → Areas (значение Areas стоит в первой строке меню Mesh: по умолчанию)

**H.** Для выделения поверхности с целью построения на ней сетки запустить окно «Mesh Areas».

Окно «Mesh Tool» → Раздел «Mesh:» → Mesh

**I.** Для построения сетки нужно выделить поверхность заготовки - A1, нажав на нее левой кнопкой мыши или ввести номер поверхности заготовки - 1 в строке окна «Mesh Areas» (рисунок 21).

**J.** Для подтверждения нажать «Ok».

Отобразить сетку конечных элементов заготовки (пункт **4.7.1.D**).  
Позиционировать по необходимости.

**K.** Для сравнения результаты построения представлены в рабочем окне ANSYS.

### **Сетка конечных элементов для пуансона**

Для удобства отобразить построенные поверхности (пункт **4.7.1.C**).

Выполнить действия с **4.8.2.А** по **2.8.2.Ж**. При этом:

Пункт **В**. В появившемся окне «Meshing Attributes» в строке «[MAT] Material number» выбираем номер 2.

Пункт **С**. В строке «[REAL] Real constant set number» выбираем номер 2.

Пункт **И**. Для построения сетки нужно последовательно выделить поверхности пуансона А2, А4, А5, А6, А3.

При этом следует соблюдать следующий порядок выделения:

выделить поверхности А2, А4, А5, А6 или ввести номер поверхностей пуансона – 2,4,5,6 в строке окна «Mesh Areas».

**Л**. В окне «Mesh Areas» нажать «Apply»;

выделить поверхность перехода дна пуансона к формирующему элементу пуансона - А3 или ввести номер поверхностей пуансона – 3 в строке окна «Mesh Areas».

#### **Сетка конечных элементов для матрицы**

Для удобства отобразить построенные поверхности (пункт **4.7.1.С**).

Выполнить действия с **4.8.2А** по **4.8.2.Ж**. При этом:

Пункт **В**. В появившемся окне «Meshing Attributes» в строке «[MAT] Material number» выбираем номер 3.

Пункт **С**. В строке «[REAL] Real constant set number» выбираем номер 2.

Пункт **И**. Для построения сетки нужно последовательно выделить поверхности матрицы А7, А9, А10, А11, А12, А13, А8.

При этом следует соблюдать следующий порядок выделения:

выделить поверхности А7, А9, А10, А11, А12, А13 или ввести номер поверхностей матрицы – 7,9,10,11,12,13 в строке окна «Mesh Areas»;

в окне «Mesh Areas» нажать «Apply» (пункт **4.8.2.Л**);

выделить поверхность перехода дна матрицы к формирующему элементу матрицы - А8 или ввести номер поверхностей пуансона – 8 в строке окна «Mesh Areas».

#### **Сетка конечных элементов для прижима**

Для удобства отобразить построенные поверхности (пункт **4.7.1.С**).

Выполнить действия с 4.8.2.A по 2.8.J. При этом:

Пункт В. В появившемся окне «Meshing Attributes» в строке «[MAT] Material number» выбираем номер 4.

Пункт С. В строке «[REAL] Real constant set number» выбираем номер 2.

Пункт I. Для построения сетки нужно нажать левой кнопкой мыши на поверхность прижима A14 или ввести номер поверхности прижима – 14 в строке окна «Mesh Areas».

Отобразить сетку конечных элементов заготовки (пункт 4.7.1.D).  
Позиционировать по необходимости.

М. Для сравнения результаты построения представлены в рабочем окне ANSYS.

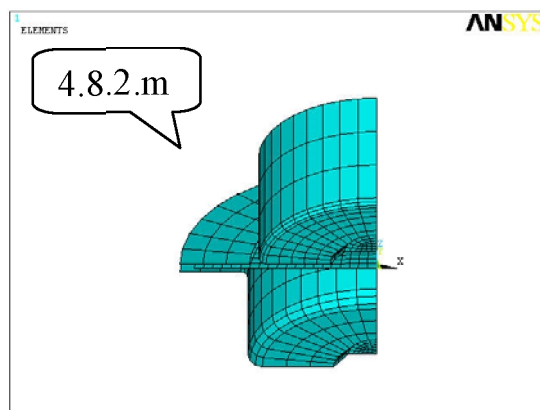
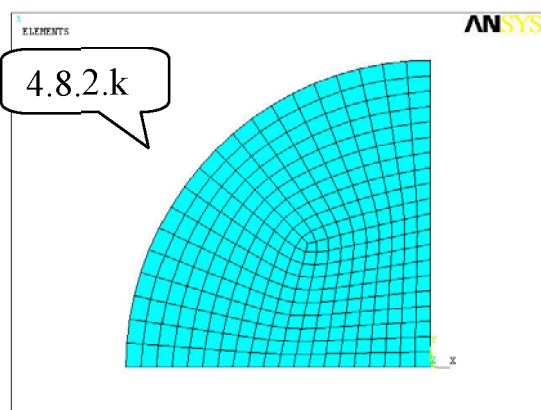
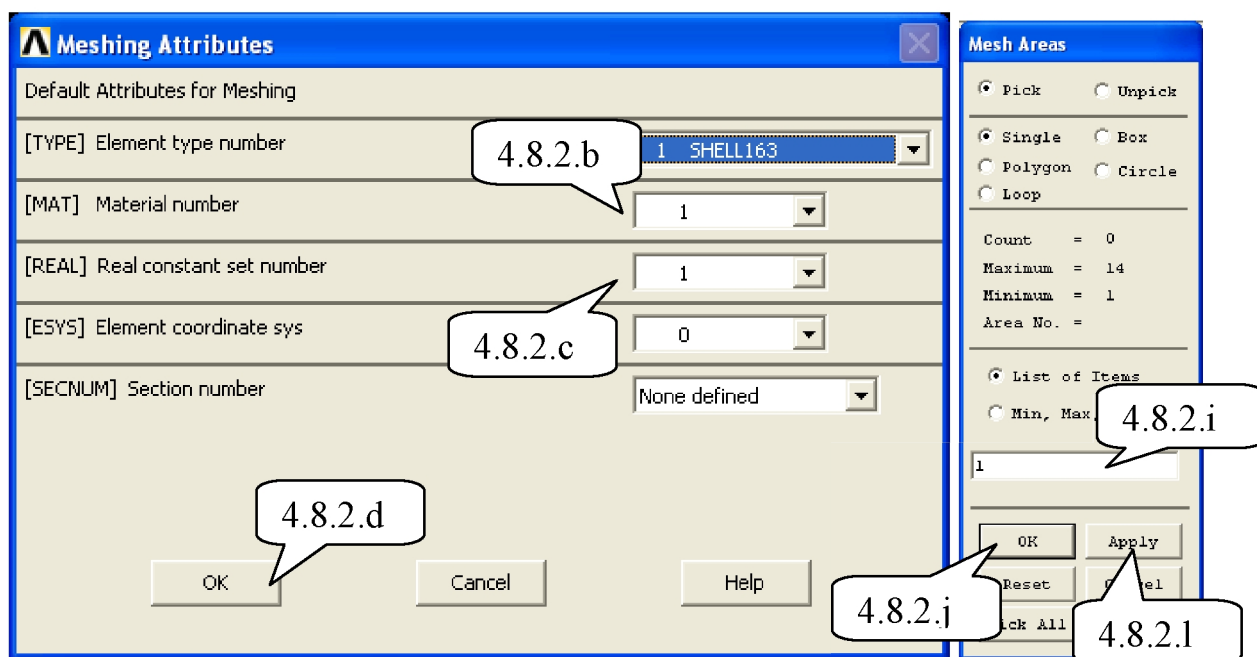


Рисунок 21 – Создание сетки конечных элементов

## 4.9. СОЗДАНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ ЧАСТЕЙ

Создание частей необходимо для идентификации элементов (рисунок 22).

### Создание части на заготовку

Для создания части на заготовку необходимо выделить все элементы заготовки.

**A.** Через Utility Menu ANSYS LS\_DYNA запустить окно «Select Entities».

ANSYS LS\_DYNA Utility Menu → Select → Entities...

**B.** В первой строчке окна «Select Entities» выбрать Elements.

**C.** Во второй строчке окна «Select Entities» выбрать By Attributes (внешний вид окна «Select Entities» изменится).

**D.** В третьей строке ввести номер 1 (обозначение номера материала заготовки).

**E.** Для подтверждения нажать «Ok».

Отобразить сетку конечных элементов заготовки (пункт **4.7.1.D**). При этом в рабочем окне останутся элементы, относящиеся к заготовке (точнее, к материалу заготовки).

**F.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Parts Data Written for LS-DYNA».

ANSYS Main Menu → Preprocessor → LS-DYNA Options → Parts Options

**G.** В окне «Parts Data Written for LS-DYNA» поставить точку напротив «Add Part».

**H.** Для подтверждения нажать «Ok».

**I.** В появившемся окне «Parts Data Written for LS-DYNA» в строке «Part ID Number» ввести номер 1 (номер-имя создаваемой части).

**J.** Для подтверждения нажать «Ok».

**K.** В появившемся окне «EDPART Command» прописаны номер и данные созданной части.

**L.** Закрыть окно «EDPART Command».

### **Создание части на пуансон**

Для создания части на пуансон выполнить действия с пункта **4.9.A** по пункт **4.9.L**. При этом:

Пункт **D**. В третьей строке ввести номер 2.

Пункт **I**. В появившемся окне «Parts Data Written for LS-DYNA» в строке «Part ID Number» ввести номер 2.

### **Создание части на матрицу**

Для создания части на матрицу выполнить действия с пункта **4.9.A** по пункт **4.9.L**. При этом:

Пункт **D**. В третьей строке ввести номер 3.

Пункт **I**. В появившемся окне «Parts Data Written for LS-DYNA» в строке «Part ID Number» ввести номер 3.

### **Создание части на прижим**

Для создания части на прижим выполнить действия с пункта **4.9.A** по пункт **4.9.L**. При этом:

Пункт **D**. В третьей строке ввести номер 4.

Пункт **I**. В появившемся окне «Parts Data Written for LS-DYNA» в строке «Part ID Number» ввести номер 4.

### **«Фиксация» созданных частей**

**M**. Через Utility Menu ANSYS LS\_DYNA отобразить сетку конечных элементов всех объектов (отобразить все элементы).

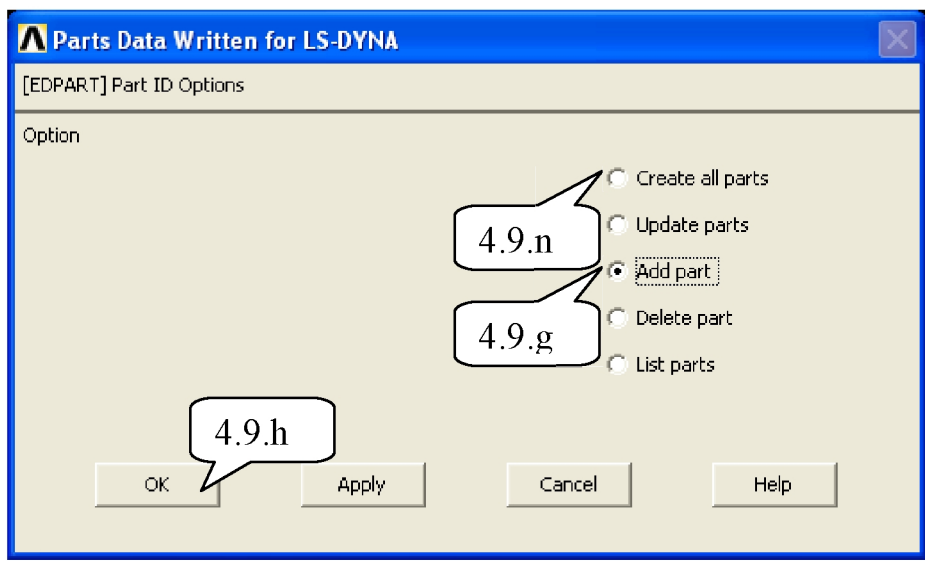
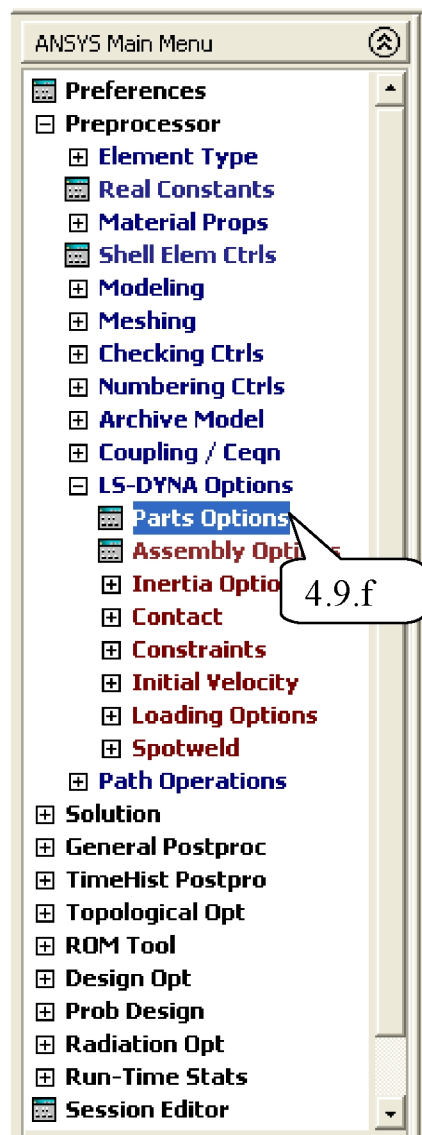
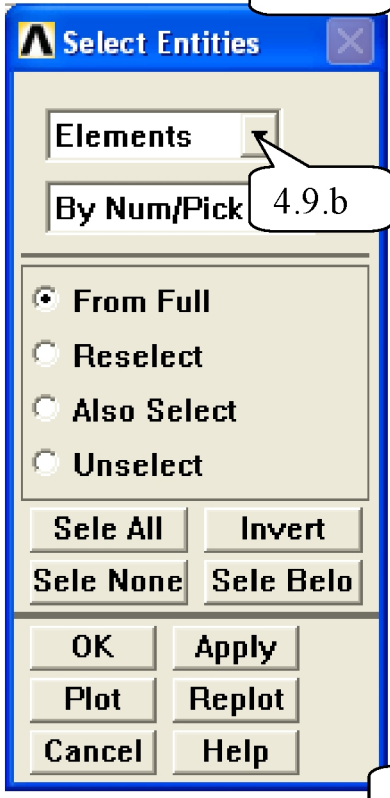
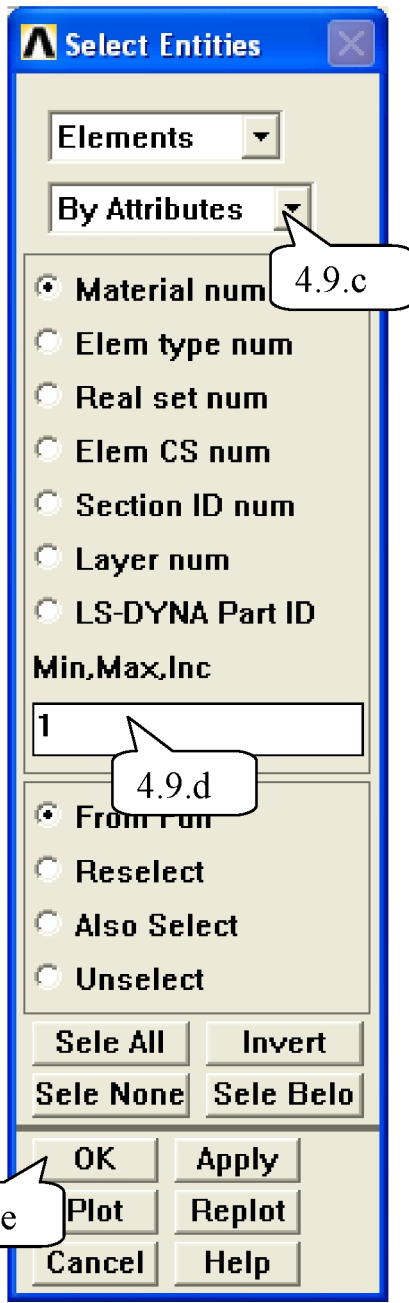
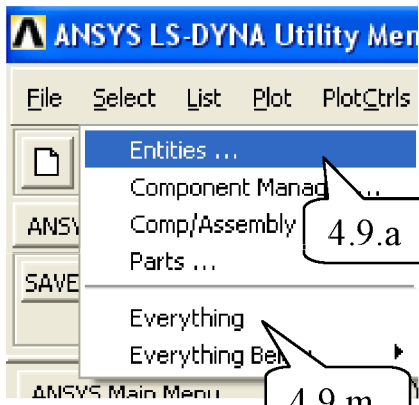
ANSYS LS\_DYNA Utility Menu → Select → Everything

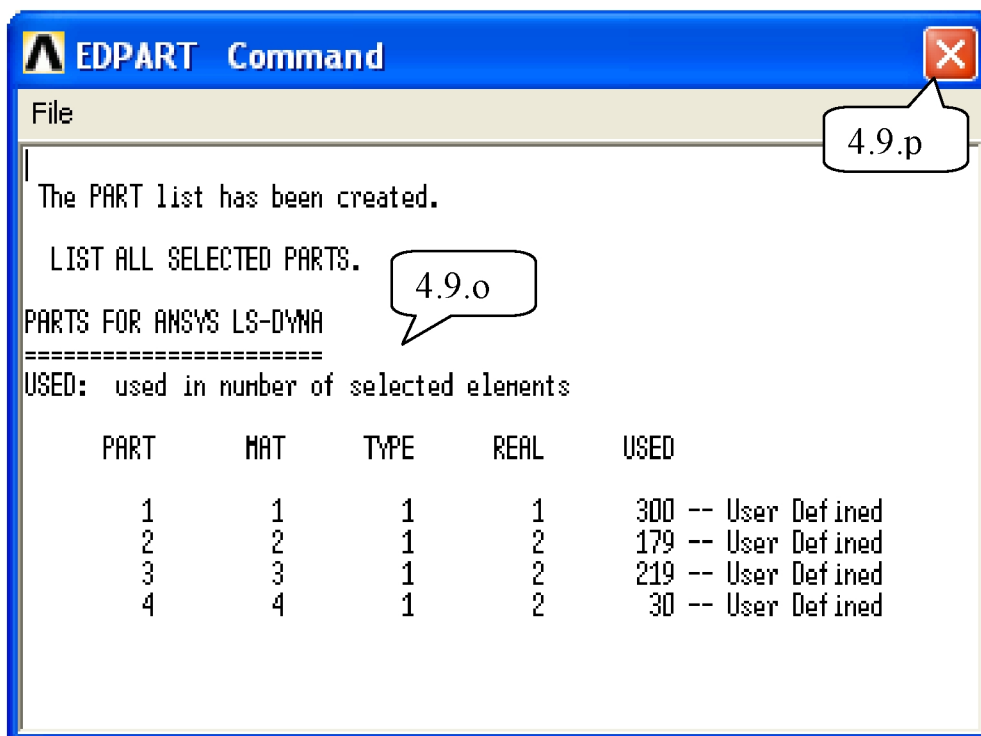
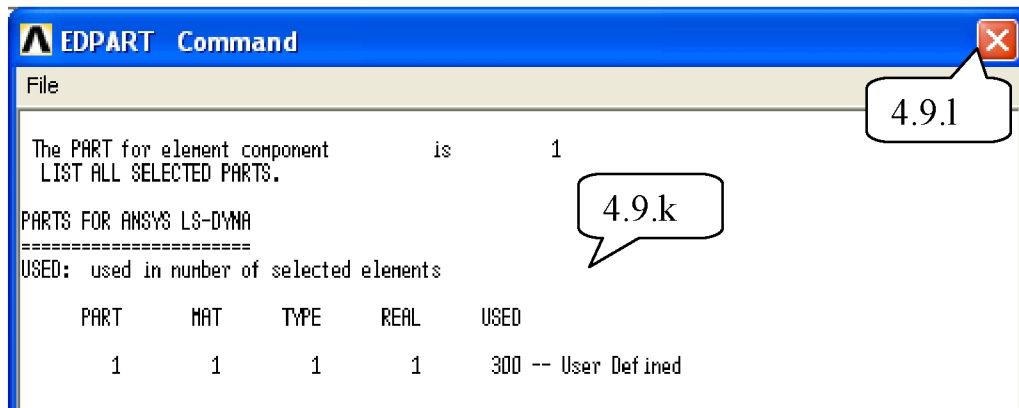
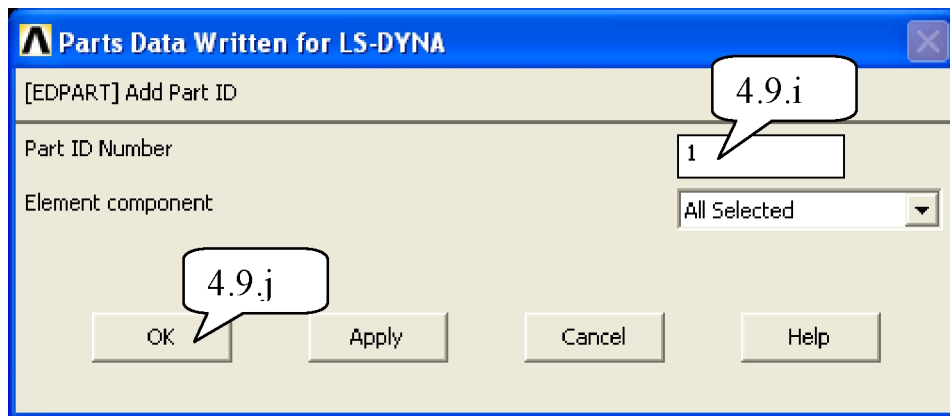
Выполнить пункт **4.9.F**.

**N**. В окне «Parts Data Written for LS-DYNA» поставить точку напротив «Create all parts». Для подтверждения нажать «Ok» (пункт **4.9.H**).

**O**. В появившемся окне «EDPART Command» прописаны номер и данные всех созданных частей.

**P**. Закрыть окно «EDPART Command».





**Рисунок 22 – Создание идентификационных частей**

На этом этапе построения задачи следует сохранить базу данных (пункт 4.6.1). Сохранить созданную базу данных под именем Vit3.

#### 4.10. ЗАДАНИЕ КОНТАКТНЫХ ПАР И КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ

В процессе формообразования происходит контакт между заготовкой и неподвижной или подвижной поверхностью инструмента или даже между элементами листа друг с другом. Математическая модель контакта включает в себя определение контакта-проникновения и наложение ограничений для предотвращения проникновения.

Задать тип контакта «поверхность о поверхность» - «автоматический» (рисунок 23).

**A.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Contact Parameter Definitions».

ANSYS Main Menu → Preprocessor → LS-DYNA Options → Contact → Define Contact

**B.** В появившемся окне «Contact Parameter Definitions» в разделе «Contact Type» в левом окне выбрать «Surface to Surf».

**C.** В разделе «Contact Type» в правом окне выбрать «Automatic (ASTS)».

**D.** В строке «Static Friction Coefficient» задать коэффициент трения - 0.12.

**E.** Для выбора контактной пары с заданными параметрами нажать «Ok».

Задать контактную пару заготовка-пуансон.

**F.** В появившемся окне «Contact Options» в строке «Contact Component or Part no.» выбрать часть под номером – 1.

**G.** В строке «Target Component or Part no. » выбрать часть под номером – 2.

**H.** Для подтверждения нажать «Apply».

Аналогичным образом задать контактные пары заготовка-матрица, заготовка-прижим и прижим-матрица. Для этого выполнить пункты с **E** по **H**. При этом:

для контактной пары заготовка-матрица в пункте **G** ставить - 3.

для контактной пары заготовка-прижим в пункте **G** ставить - 4.

для контактной пары прижим-матрица в пункте **F** ставить - 4, а в пункте **G** ставить - 3.

I. В заключение для подтверждения нажать «Ok».

(Следует отметить, в некоторых случаях помимо коэффициента трения задаются коэффициент вязкостного трения и коэффициент демпфирования вязкости, а также учет изменения толщины в контактном алгоритме.)

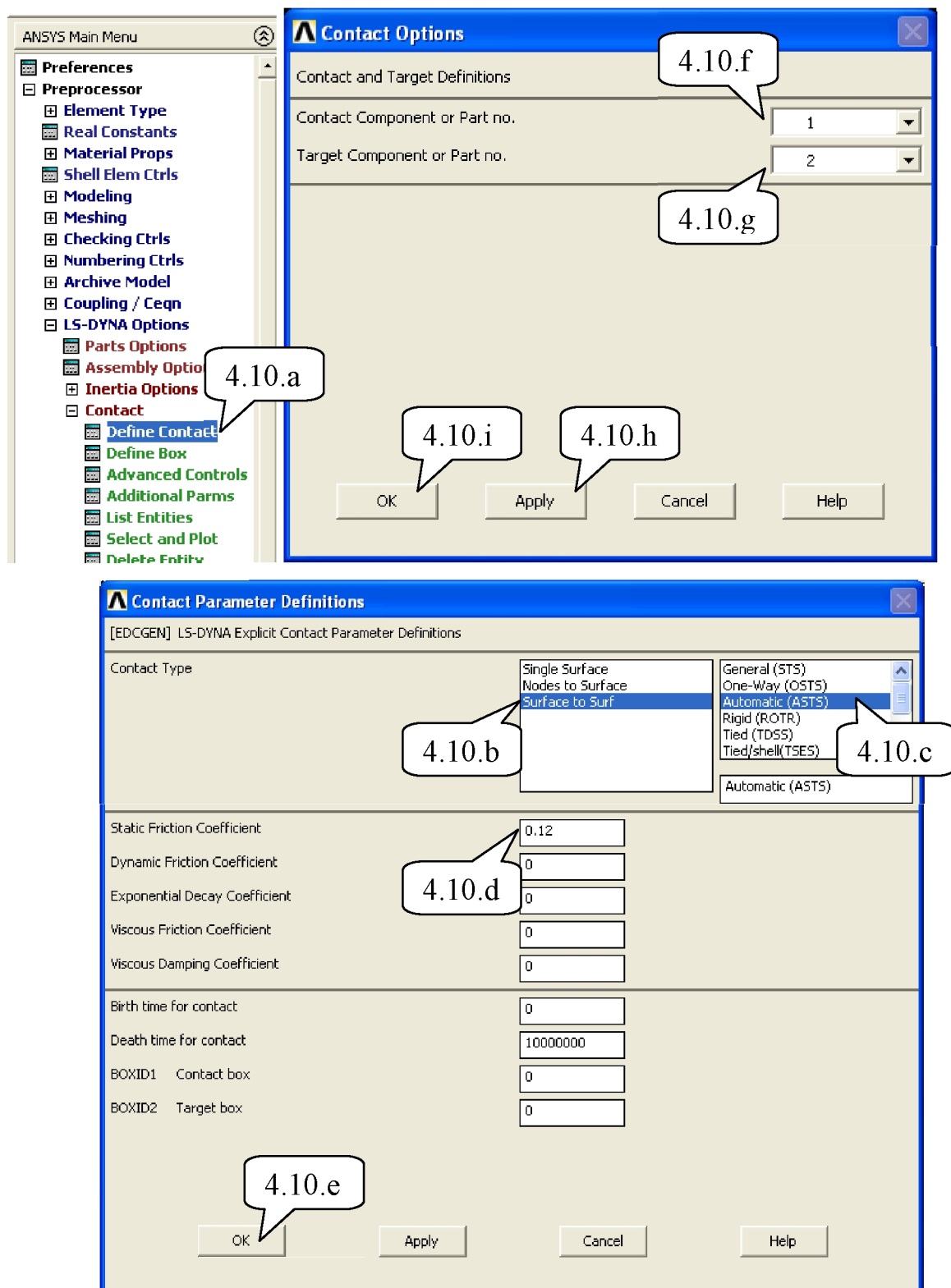


Рисунок 23 – Задание контактных пар и коэффициента трения

#### 4.11. ЗАДАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Граничные условия задаются на узлы заготовки, лежащие в плоскости симметрии. В данном случае необходимо задать граничные условия для плоскости симметрии Z-X и для плоскости симметрии Z-Y (рисунок 24).

**А.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Apply U ,ROT on Nodes».

ANSYS Main Menu → Preprocessor → LS-DYNA Options → Constraints → Apply → On Nodes

##### **Задать граничные условия для плоскости симметрии Z-X**

**В.** После появления окна «Apply U ,ROT on Nodes» выбрать периодическим нажатием левой кнопки мыши все узлы заготовки, лежащие вдоль оси X.

Для удобства выделения позиционировать построенную сетку (пункт 4.7.1).

**С.** В окне «Apply U ,ROT on Nodes» для подтверждения нажать «Ok».

**Д.** В появившемся окне «Apply U ,ROT on Nodes» в окне строки «Lab2 DOFs to be constrained» выделить UY, ROTX, ROTZ.

**Е.** Для подтверждения нажать «Apply».

**Ф.** В результате на выделенных узлах высветятся стрелки, отображающие запрет на перемещение и вращение вдоль и вокруг заданных в пункте **Д** осей координат.

##### **Задать граничные условия для плоскости симметрии Z-Y**

Для этого выполнить пункты с **В** по **Е**. При этом:

в пункте **В** выбрать периодическим нажатием левой кнопки мыши все узлы заготовки, лежащие вдоль оси Y;

в пункте **Д** в окне строки «Lab2 DOFs to be constrained» выделить UX, ROTY, ROTZ.

**Г.** В заключение для подтверждения нажать «Ok».

**Н.** В результате выделены узлы всех плоскостей симметрии.

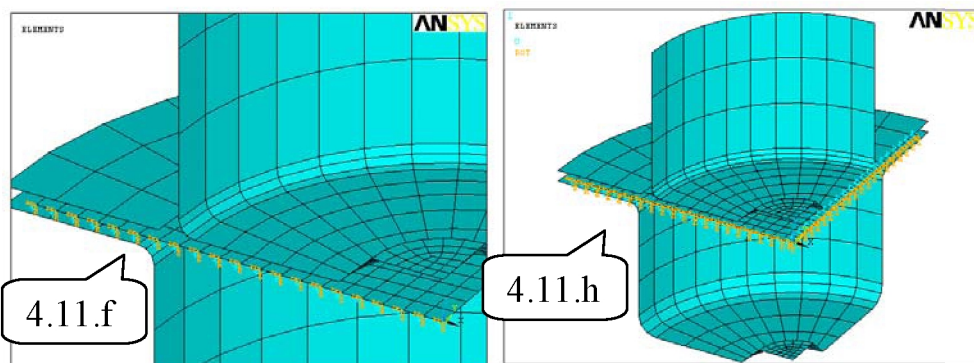
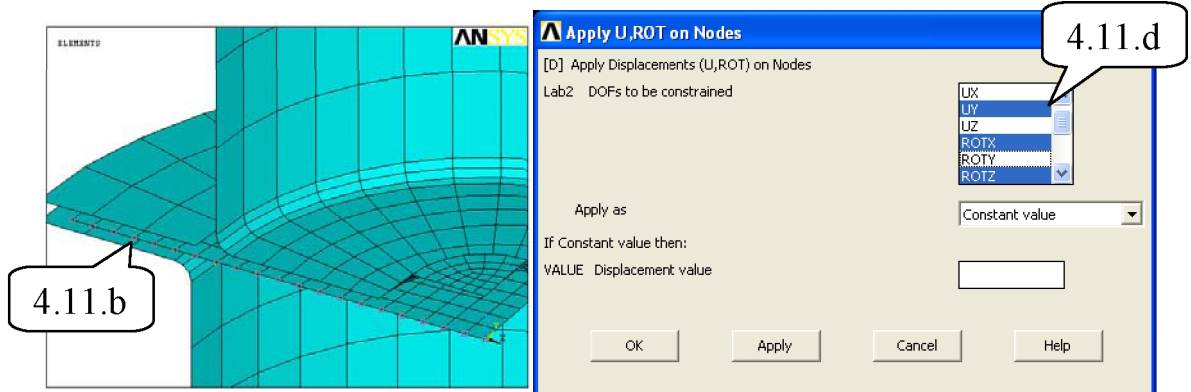
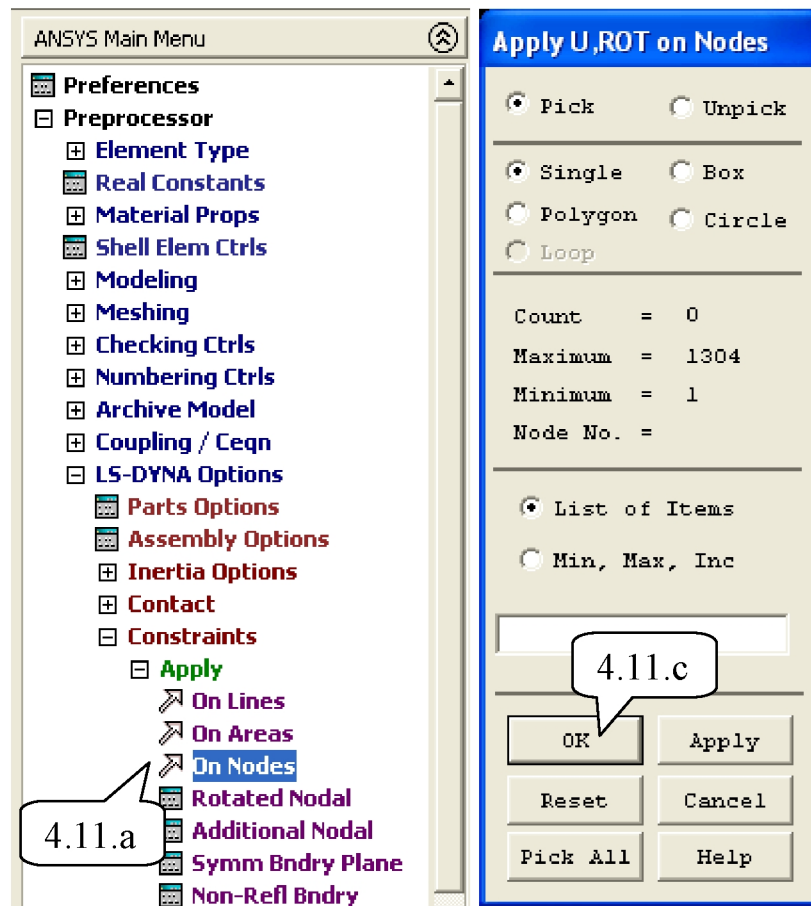


Рисунок 24 – Задание граничных условий

#### 4.12. ЗАДАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Так как для реальных задач время процесса относительно велико, то это требует очень большого количества шагов по времени и возрастания вычислительных затрат. Для снижения времени счета скорость движения пуансона в математической модели существенно завышается. Можно также искусственно завысить плотность материала заготовки, что позволяет увеличить шаг по времени и провести полный расчет за обозримое время.

В качестве кинематических нагрузок зададим перемещение на пуансон и усилие на прижим. Для этого построить график перемещения от времени и график усилия от времени (рисунок 25).

Для построения графиков необходимо рассчитать время процесса формообразования. Пуансон переместится на 30 мм со скоростью 1000 мм/с, следовательно, время на перемещение составляет - 0.03 секунды.

##### **Задание данных для времени, перемещения и усилия**

Задать имя параметра для времени:

**А.** Через Utility Menu ANSYS LS\_DYNA запустить окно «Array Parameters».

ANSYS LS\_DYNA Utility Menu → Parameters → Array Parameters → Define/Edit...

**В.** В окне «Array Parameters» нажать «Add...».

**С.** В появившемся окне «Add New Array Parameter» в строке «Par Parameter name» задать имя для параметра времени - TIME.

**Д.** Для подтверждения нажать «Ok».

Для задания имени параметра для перемещения необходимо выполнить пункты с **В** по **Д**. При этом:

в пункте **С** в строке Par Parameter name задать имя для параметра перемещение - DISP.

Для задания имени параметра для усилия необходимо выполнить пункты с **В** по **Д**. При этом:

в пункте С в строке «Par Parameter name» задать имя для параметра усилие - FORCE.

Задать табличные данные для времени:

**Е.** В окне «Array Parameters» в разделе «Currently Defined Array Parameters: (Arrays larger than 3D not shown)» выбрать, выделив, строку с именем TIME.

**Ф.** В окне «Array Parameters» нажать « Edit...».

**Г.** В появившемся окне «Array Parameter TIME» в разделе Selected: NONE во второй строке ставим значение времени - 0.03 (в первой строке оставляем 0 по умолчанию).

**Н.** Для подтверждения в окне «Array Parameter TIME» в меню «File» выбрать «Apple/Quit».

Для задания табличных данных для перемещения необходимо выполнить пункты с **Е** по **Н**. При этом:

пункт **Е**, в окне «Array Parameters» в разделе «Currently Defined Array Parameters: (Arrays larger than 3D not shown)» выбрать, выделив, строку с именем DISP;

пункт **Г**, в окне «Array Parameter DISP» в разделе «Selected: NONE» во второй строке ставим значение перемещения - -0.03 (в первой строке оставляем 0 по умолчанию).

Для задания табличных данных для усилия необходимо выполнить пункты с **Е** по **Н**. При этом:

пункт **Е**, в окне «Array Parameters» в разделе «Currently Defined Array Parameters: (Arrays larger than 3D not shown)» выбрать, выделив, строку с именем FORCE;

пункт **Г**, в окне «Array Parameter FORCE» в разделе «Selected: NONE» в первой и во второй строке ставим - -10000.

**И.** Завершив ввод данных, для закрытия окна «Array Parameters» нажать «Close».

## Построение графиков перемещения и усилия

**Ж.** Для построения графика перемещения через ANSYS Main Menu запустить окно «Specify Loads for LS-DYNA Explicit».

ANSYS Main Menu → Preprocessor → LS-DYNA Options → Loading Options → Specify Loads

**К.** В появившемся окне «Specify Loads for LS-DYNA Explicit» в окне раздела «Load Labels» выбрать RBUZ.

**Л.** В строке «Component name or PART number» выбрать номер пуансона - 2.

**М.** В строке «Parameter name for time values» выбрать параметр времени - TIME.

**Н.** В строке «Parameter name for data values» выбрать параметр перемещения - DISP.

**О.** Для подтверждения нажать «Apply».

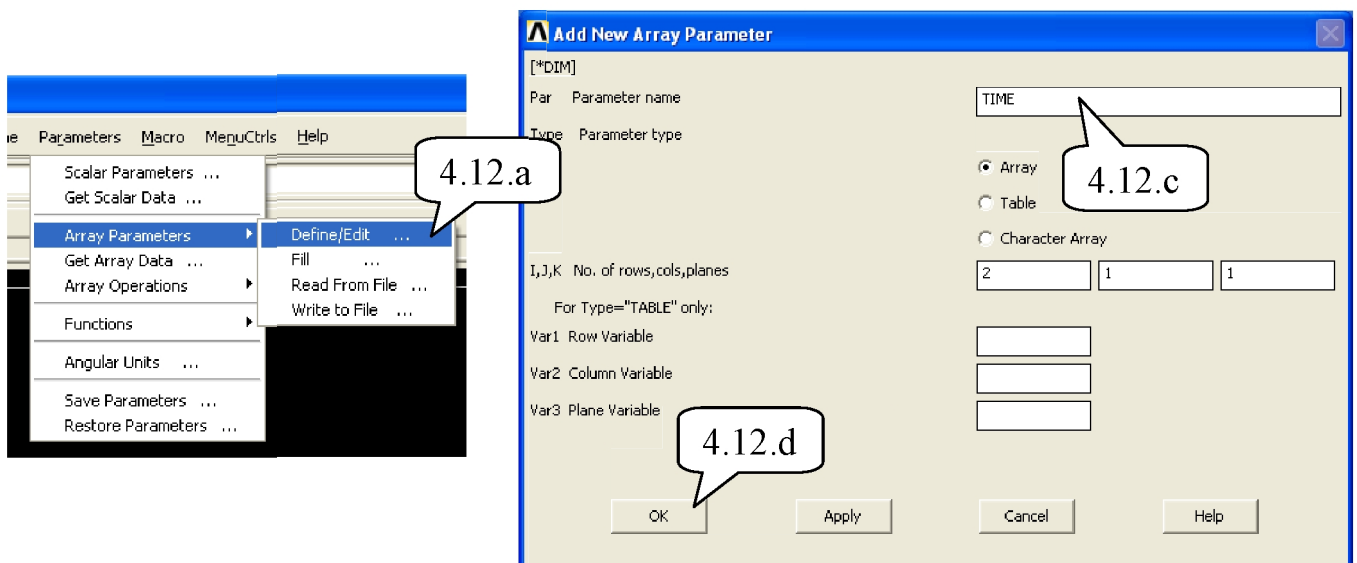
Для построения графика усилия выполнить пункты с **Ж** по **Н**. При этом:

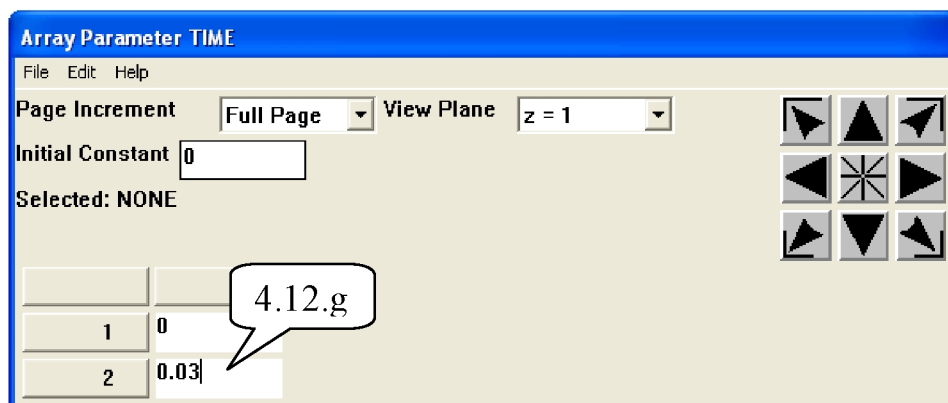
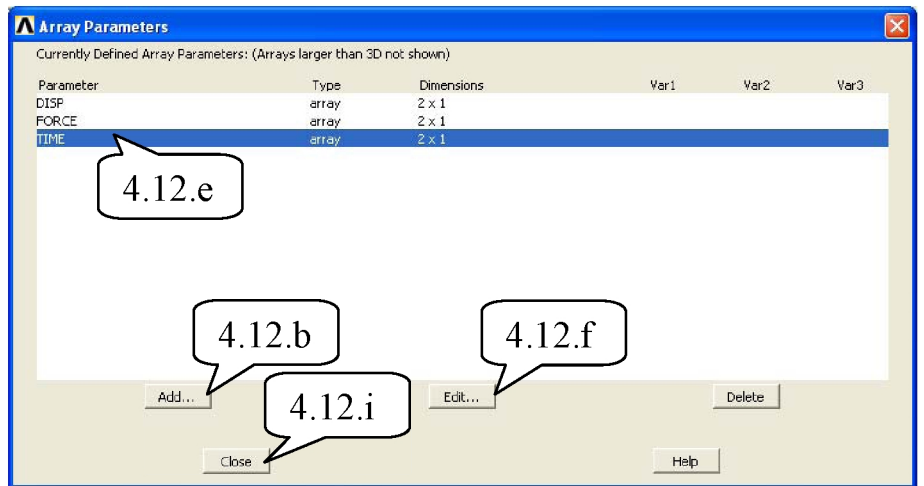
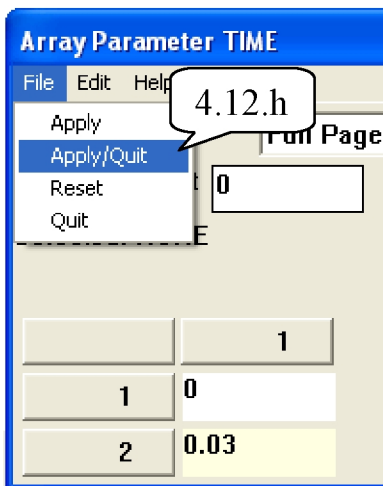
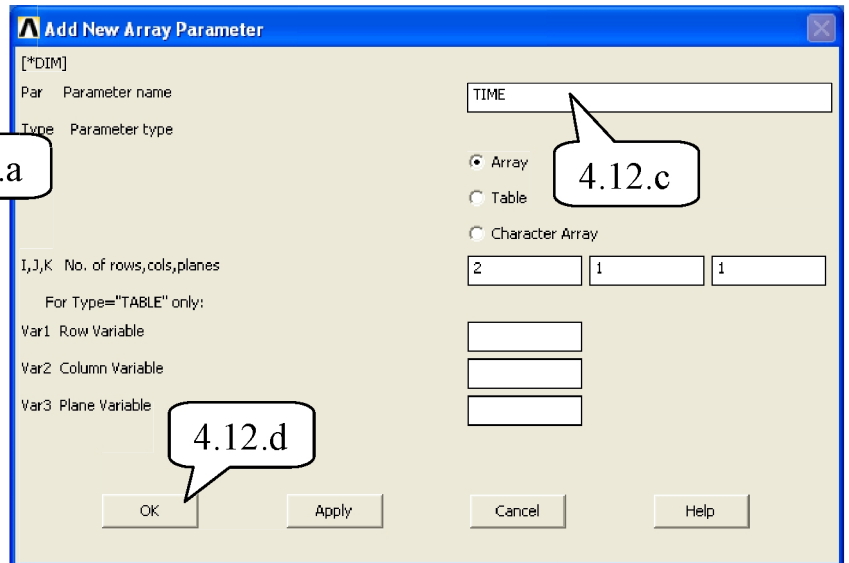
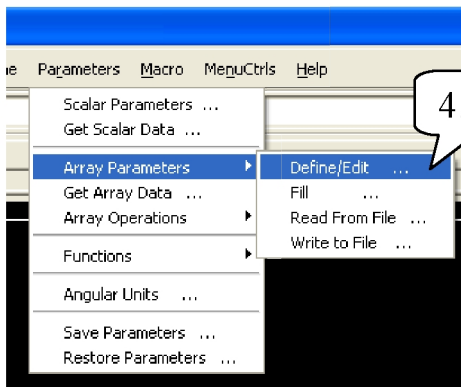
пункт **К**, в окне раздела «Load Labels» выбрать RBFZ;

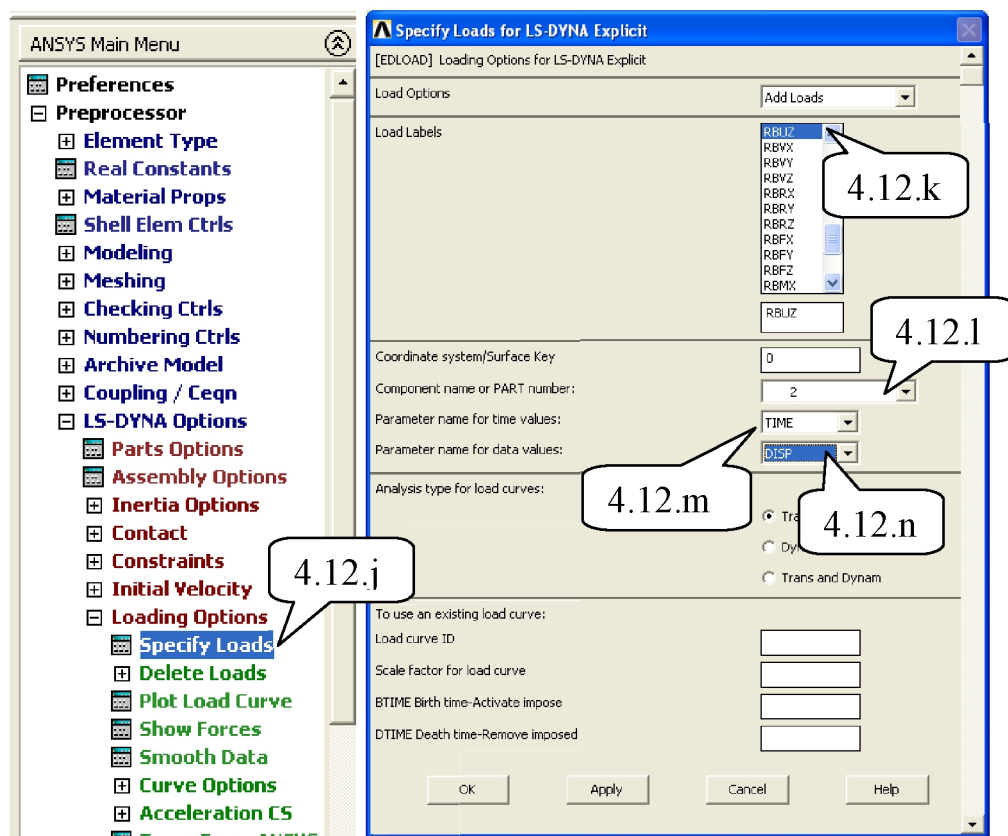
пункт **Л**, в строке «Component name or PART number» выбрать номер прижима – 4;

пункт **Н**, в строке «Parameter name for data values» выбрать параметр усилия - FORCE.

**Р.** Для подтверждения нажать «Ok».







**Рисунок 25 – Задание кинематических нагрузок**

### 4.13. УЧЕТ HOURGLASS

Учет Hourglass позволяет избежать искривления сетки в процессе расчета (рисунок 26).

**A.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Define Hourglass Material Properties».

ANSYS Main Menu → Solution → Analysis Options → Hourglass Ctrl → Local

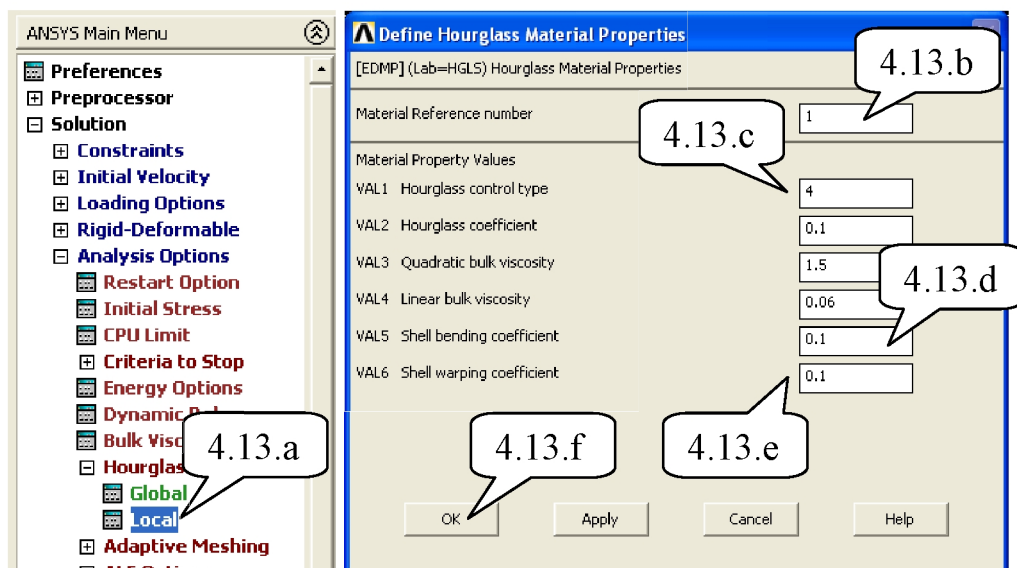
**B.** В окне «Define Hourglass Material Properties» в строке «Material Reference number» ставим номер материала заготовки - 1.

**C.** В разделе «Material Property Values» в строке «VAL1 Hourglass control type» ставим рекомендуемый коэффициент - 4.

**D.** В строке VAL5 Shell bending coefficient - 0.1

**E.** В строке «VAL6 Shell warping coefficient» - 0.1 (в остальные строках оставляем значения, выставленные по умолчанию).

**F.** Для подтверждения нажать «Ок».



**Рисунок 26 – Учет hourglass**

#### 4.14. ЗАДАНИЕ ВРЕМЕНИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА

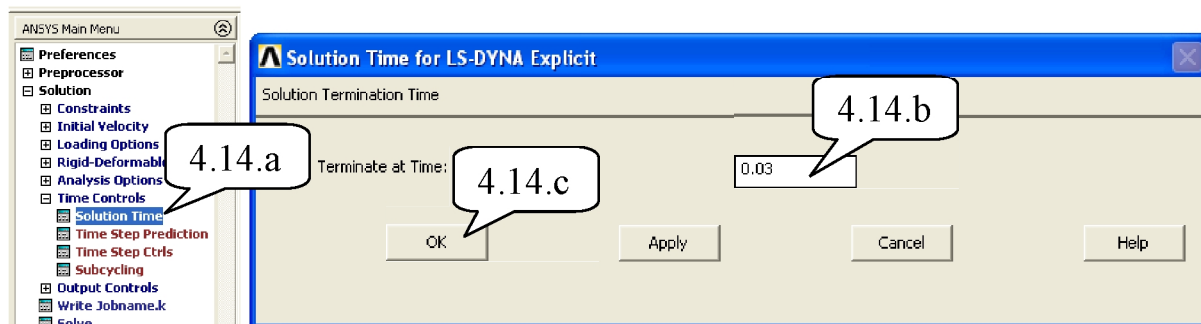
Время длительности процесса соответствует времени, рассчитанному в пункте 2.12, и составляет - 0.03 с (рисунок 27).

**A.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Solution Time for LS-DYNA Explicit».

ANSYS Main Menu → Solution → Time Controls → Solution Time

**B.** В окне «Solution Time for LS-DYNA Explicit» в строке [TIME] Terminate at Time: ставить - 0.03

**C.** Для подтверждения нажать «Ok».



**Рисунок 27 – Задание времени длительности процесса**

#### 4.15. ЗАДАНИЕ ФОРМАТА БАЗЫ ДАННЫХ РАСЧЕТА

При расчете могут быть записаны две базы данных. Одна для просмотра результатов в ANSYS (такой файл пишется под расширением \*.rst.), другая для просмотра результатов в LS\_DYNA (такой файл пишется под названием d3plot).

Задать запись в двух форматах (рисунок 28).

**A.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Specify Output File Types for LS-DYNA Solver».

ANSYS Main Menu → Solution → Output Controls → Output file Types

**B.** В окне «Specify Output File Types for LS-DYNA Solver» в строке «Produce output for...» выбираем «ANSYS and LS-DYNA».

**C.** Для подтверждения нажать «Ok».

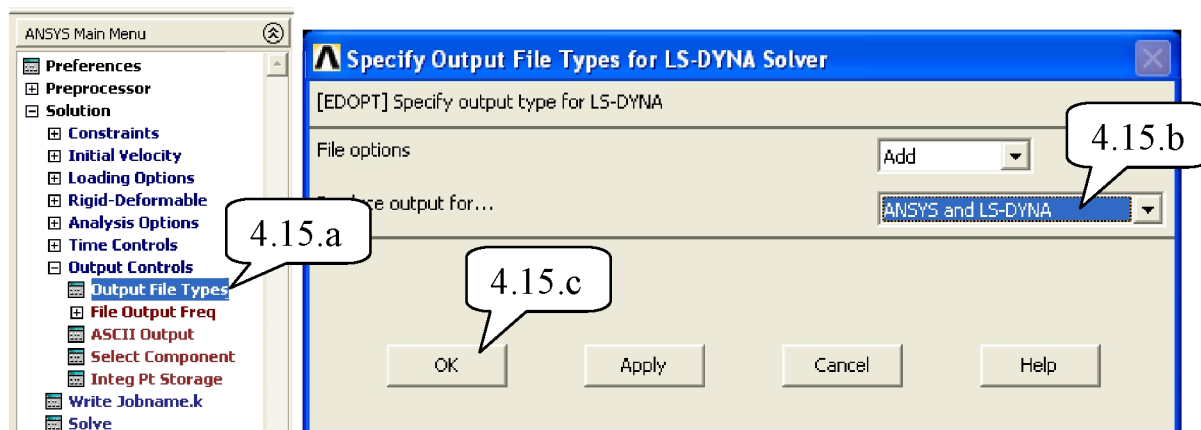


Рисунок 28 – Задание формата базы данных расчета

#### 4.16. ЗАДАНИЕ КОЛИЧЕСТВА ШАГОВ РАСЧЕТА

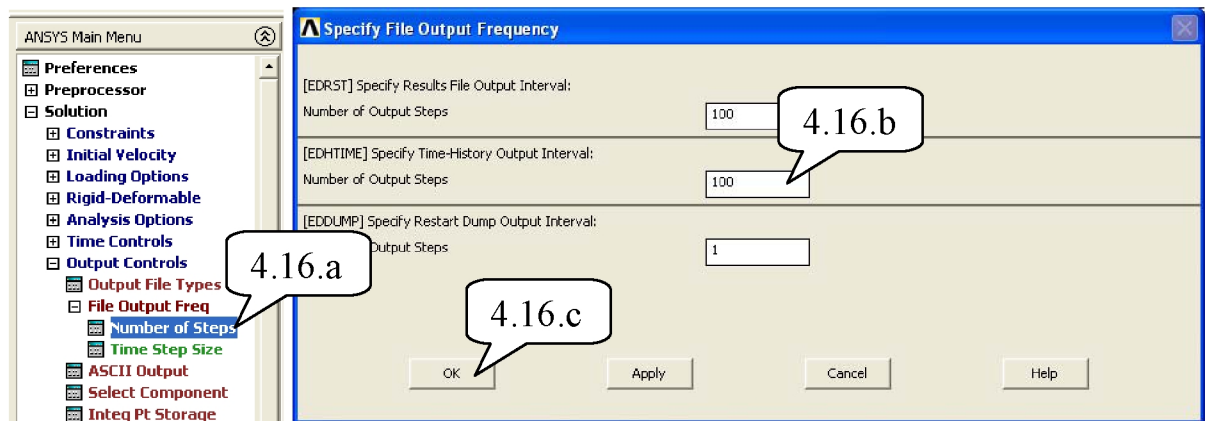
Количество шагов примем равным - 100 (рисунок 29).

**A.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Specify File Output Frequency».

ANSYS Main Menu → Solution → Output Controls → File Output Freq → Number of Steps

**B.** В окне «Specify File Output Frequency» в разделе «[EDHTIME] Specify Time-History Output Interval:» в строке «Number of Output Steps» ввести количество шагов - 100.

**C.** Для подтверждения нажать «Ok».



**Рисунок 29 – Задание количества шагов расчета**

На этом этапе построения задачи следует сохранить базу данных (пункт 4.6.1). Сохранить созданную базу данных под именем Vit4.

#### 4.17. ЗАПУСК ЗАДАЧИ НА РАСЧЕТ

Полученная база данных готова к расчету. Запустить базу на расчет (рисунок 30):

**A.** ANSYS Main Menu → Solution → Solve

Появилось два окна: «/STATUS Command» и «Solve Current Load Step».

**B.** Для подтверждения в окне «Solve Current Load Step» нажать «Ok».

**C.** Далее появляется окно решателя LS-DYNA «C:\WINDOWS\system32\cmd.exe».

#### Основные элементы управления расчетом

Рассмотрим основные команды управления расчетом.

**D.** Сочетание клавиш **Ctrl** → **C** приводит расчет в режим ожидания. При этом появляется строка для ввода команды.

Команда в виде сочетания клавиш **s** → **w** → **2** позволяет определить время расчета.

Команда в виде сочетания клавиш **s** → **w** → **1** позволяет досрочно прервать расчет.

**E.** По окончании расчета появляется окно с сообщением «Solution is done!», подтверждающее окончание расчета.

F. Для закрытия окна «Solution is done!» нажать «Close».

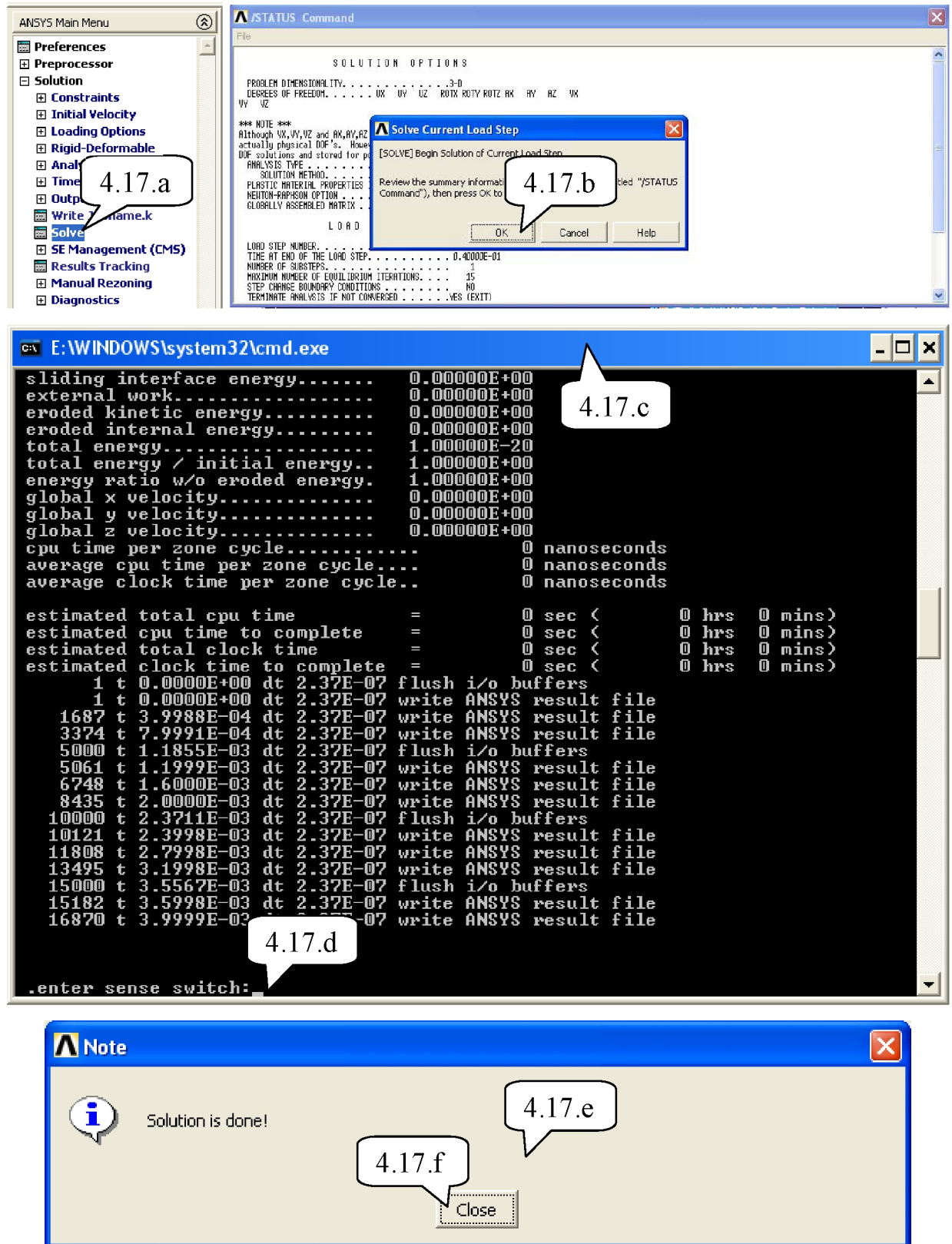


Рисунок 30 – Запуск задачи на расчет

На этом построение задачи и получение расчета завершено.

## **5. ПРОСМОТР РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS**

Для просмотра результатов моделирования воспользуемся постпроцессором конечно-элементным комплексом ANSYS.

### **5.1. ГЕНЕРАЦИЯ ПОСТПРОЦЕССОРА ANSYS**

Загрузить рассчитанную базу данных с разрешением «\*.rst». Если после решения задачи Вы вышли из ANSYS, необходимо, перед загрузкой расчетной базы, загрузить ту базу, которая запускалась на расчет. Это необходимо для отображения не только элементов заготовки, но и элементов оснастки (рисунок 31).

#### **Загрузка построенной базы данных**

- A.** Через меню рабочих иконок запустить окно «Open ANSYS Files».
- B.** В появившемся окне «Open ANSYS Files» выбрать последнюю, сохраненную при построении задачи, базу данных - «Vit4».
- C.** При этом имя выбранной базы данных пропишется в строке «Имя файла:».
- D.** Для загрузки выбранной базы данных нажать «Открыть».

#### **Загрузка рассчитанной базы данных**

- E.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Data and File Options».  
ANSYS Main Menu → General Postproc → Data & File Options
- F.** В появившемся окне «Data and File Options» по умолчанию в окне «Data to be read» выбрано All items и в строке «Results file to be read» стоит точка напротив «Read single result file» (если нет, привести в соответствие). Нажать многоточие.
- G.** В появившемся окне «Открыть» выбрать рассчитанную базу данных с расширением \*.rst - Vit4.rst.
- H.** При этом имя выбранной базы данных пропишется в строке «Имя файла:».

I. Для загрузки выбранной базы данных нажать «Открыть».

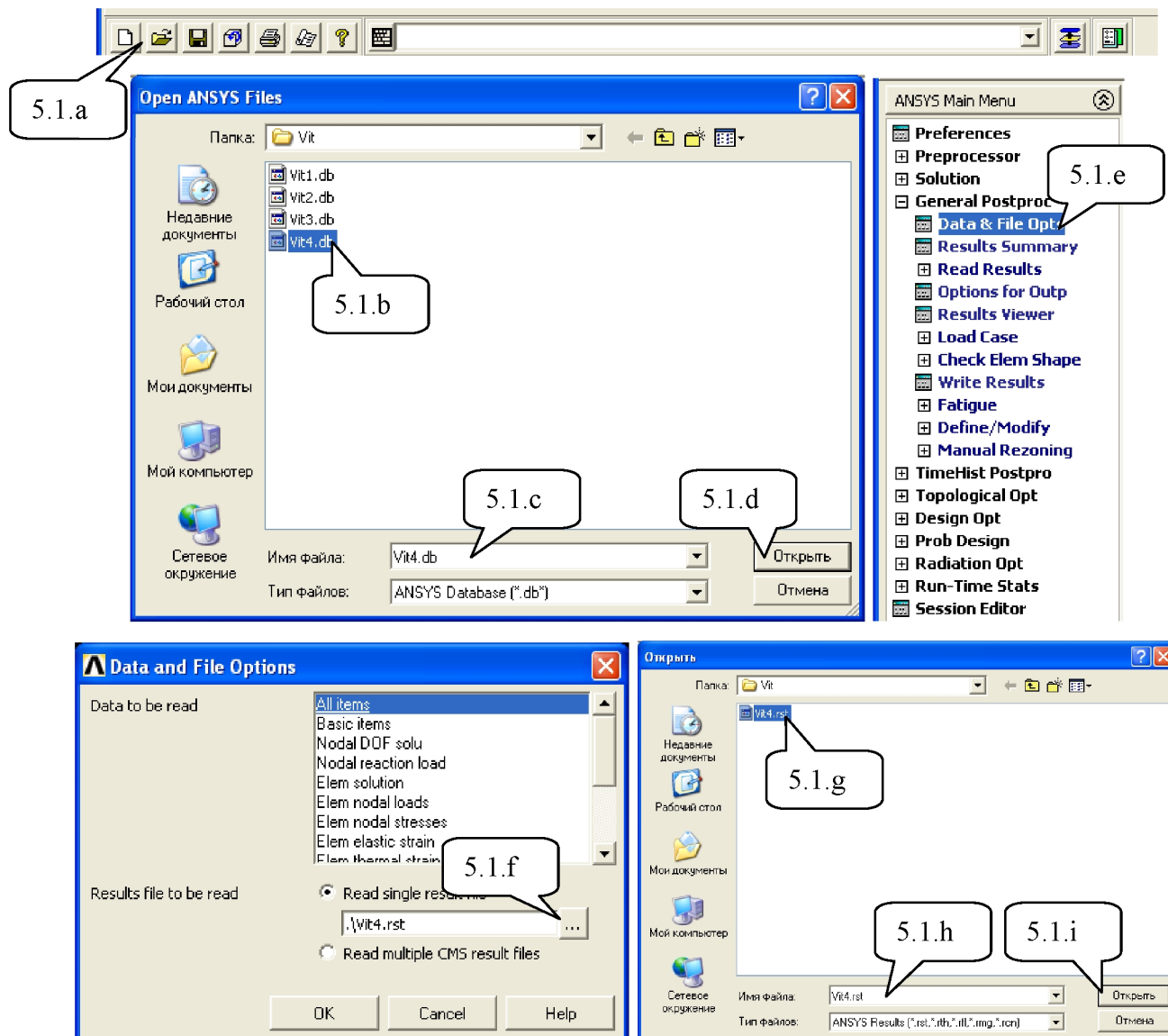


Рисунок 31 – Генерация постпроцессора ANSYS

## 5.2. ПРОСМОТР РАССЧИТАННЫХ ШАГОВ

Для просмотра количества шагов и времени каждого шага загрузить окно «SET.LIST Command» (рисунок 32).

A. Через ANSYS Main Menu запустить окно «SET.LIST Command».

ANSYS Main Menu → General Postproc → Results Summary

B. В появившемся окне «SET.LIST Command» в первом столбце «SET» прописано количество шагов (было рассчитано 102 шага).

C. Во втором столбце «TIME/FREQ» прописано время каждого шага.

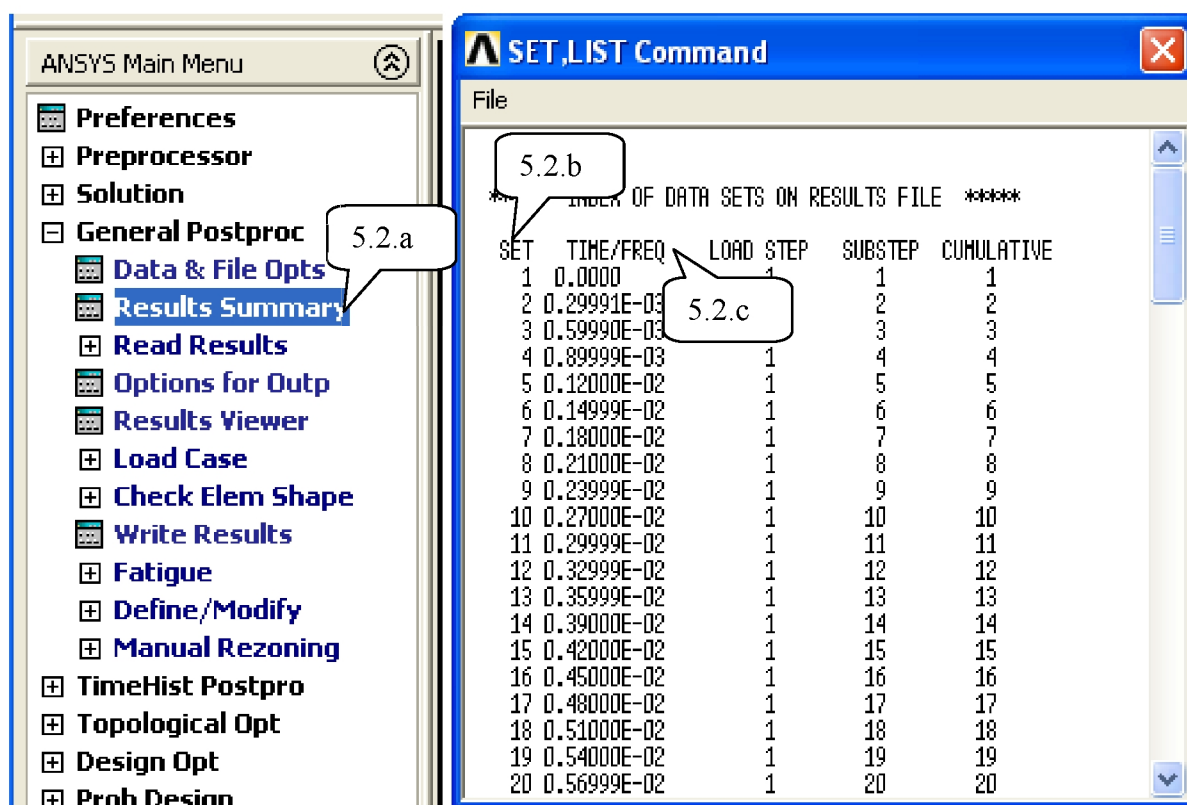


Рисунок 32 – Просмотр рассчитанных шагов

### 5.3. ВЫБОР МАСШТАБА ОТОБРАЖЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ

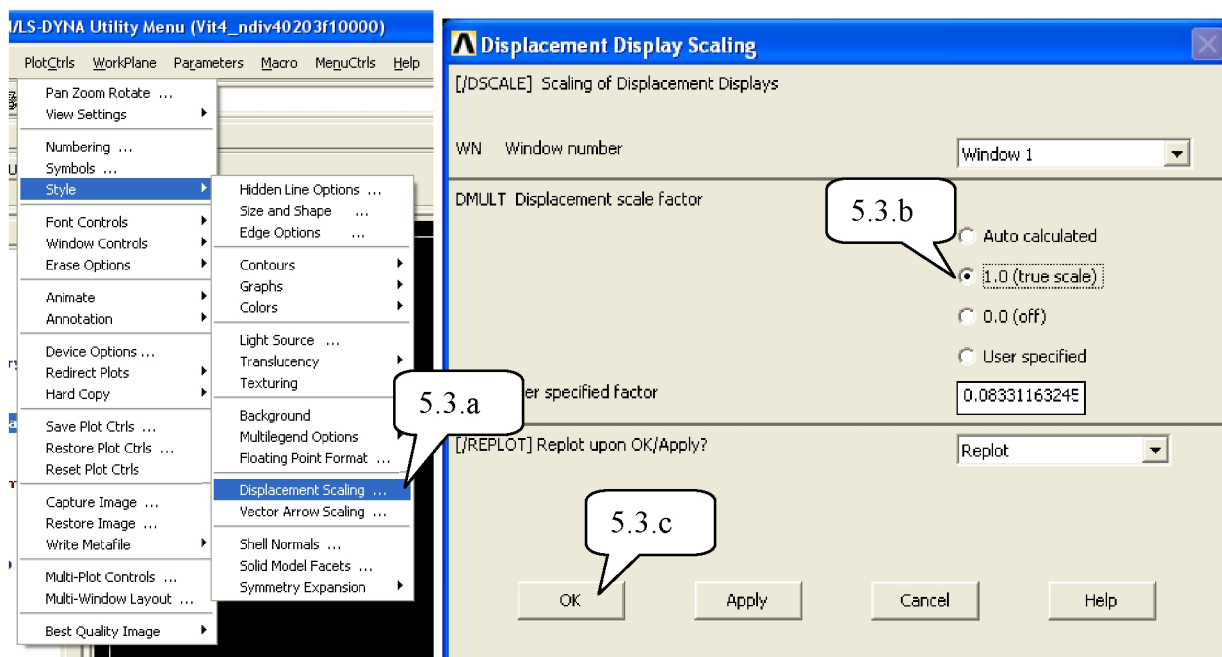
Для просмотра результатов необходимо установить величину истинных перемещений. Для установки величины истинных перемещений загрузить окно «Displacement Display Scaling» (рисунок 33).

**A.** Через Utility Menu ANSYS LS\_DYNA запустить окно «Displacement Display Scaling».

ANSYS LS\_DYNA Utility Menu → PlotCtrls → Style → Displacement Scaling ...

**B.** В окне «Displacement Display Scaling» в разделе «DMULT Displacement scale factor» поставить точки напротив «1.0 (true scale)».

**C.** Для подтверждения нажать «Ok».



**Рисунок 33 – Выбор масштаба отображения геометрии**

#### **5.4. ЗАГРУЗКА ВЫБРАННОГО ШАГА РАСЧЕТА**

Для просмотра результатов необходимо прочитать один из рассчитанных шагов загруженной расчетной базы. Загружать шаг выделением нужного шага из списка вручную.

Загрузить 100-й шаг (рисунок 34).

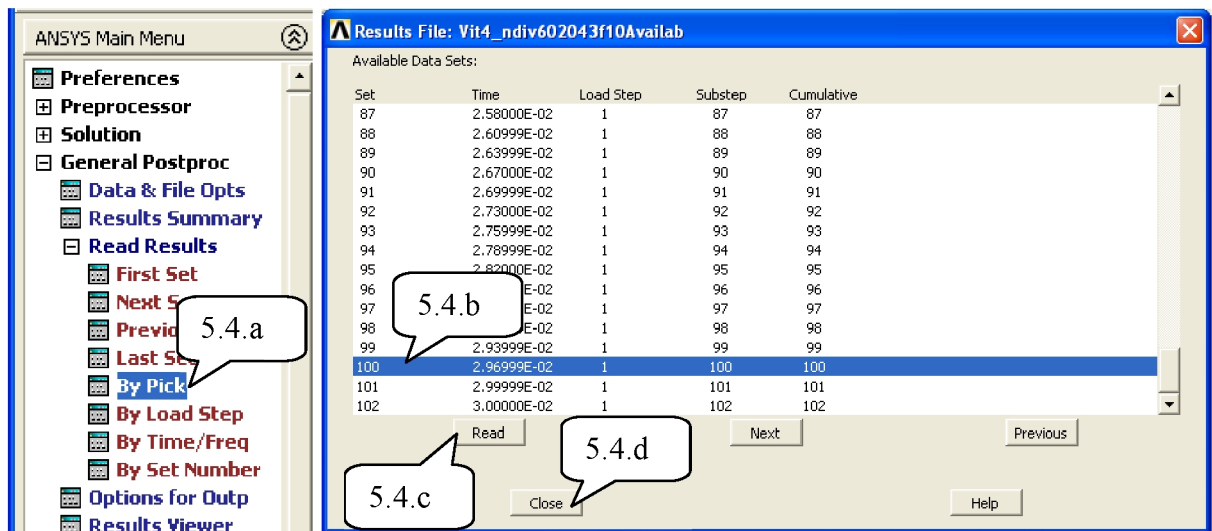
**A.** Для загрузки шага через ANSYS Main Menu запустить окно «Results File: Vit4».

ANSYS Main Menu → General Postproc → Read Results → By Pick

**B.** В окне «Results File: Vit4» выделить сотый шаг.

**C.** Для чтения выбранного шага нажать «Read».

**D.** Для закрытия окна «Results File: Vit4» нажать «Close».



**Рисунок 34 – Загрузка выбранного шага**

## 5.5. ОТОБРАЖЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

Для анализа результатов моделирования отобразить значения интенсивности напряжений и деформаций (рисунок 35).

### Отобразить значения напряжений

**А.** Через ANSYS Main Menu запустить окно «Contour Nodal Solution Data».

ANSYS Main Menu → General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solu

**В.** В окне «Contour Nodal Solution Data» выделить строку напряжений по Мизесу - «von Mises stress».

Окно «Contour Nodal Solution Data» → Nodal Solution → Stress → von Mises stress

**С.** Для подтверждения нажать «Ок».

### Отобразить значения деформаций

Выполнить пункты с **А** по **С**.

**Пункт В.** В окне «Contour Nodal Solution Data» выделить строку деформаций по Мизесу - «von Mises plastic strain».

Окно «Contour Nodal Solution Data» → Nodal Solution → Plastic Strain → von Mises plastic strain

Д. Для сравнения эпюры распределения интенсивности напряжений представлены в рабочем окне ANSYS.

Е. Для сравнения эпюры распределения интенсивности деформаций представлены в рабочем окне ANSYS.

Аналогичным образом осуществляется отображение эпюр распределения напряжений и деформаций по осям координат.

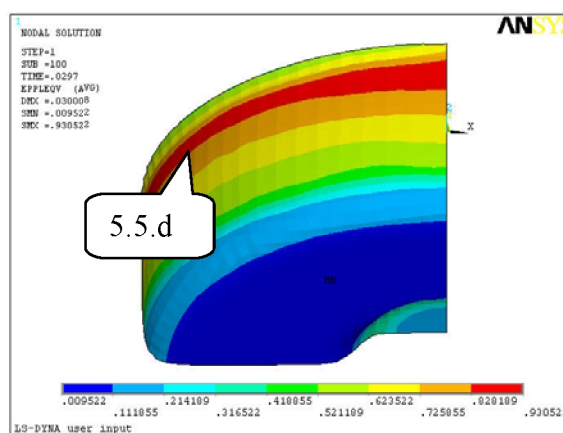
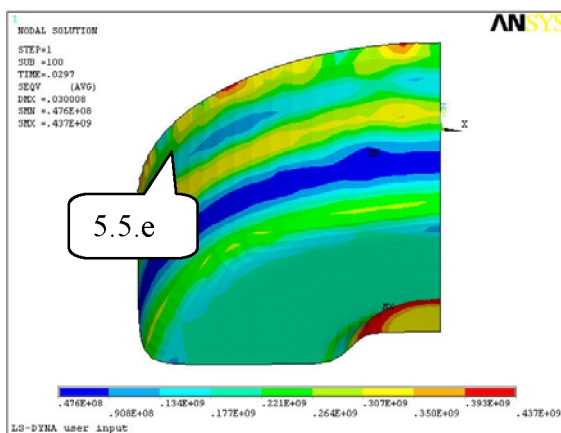
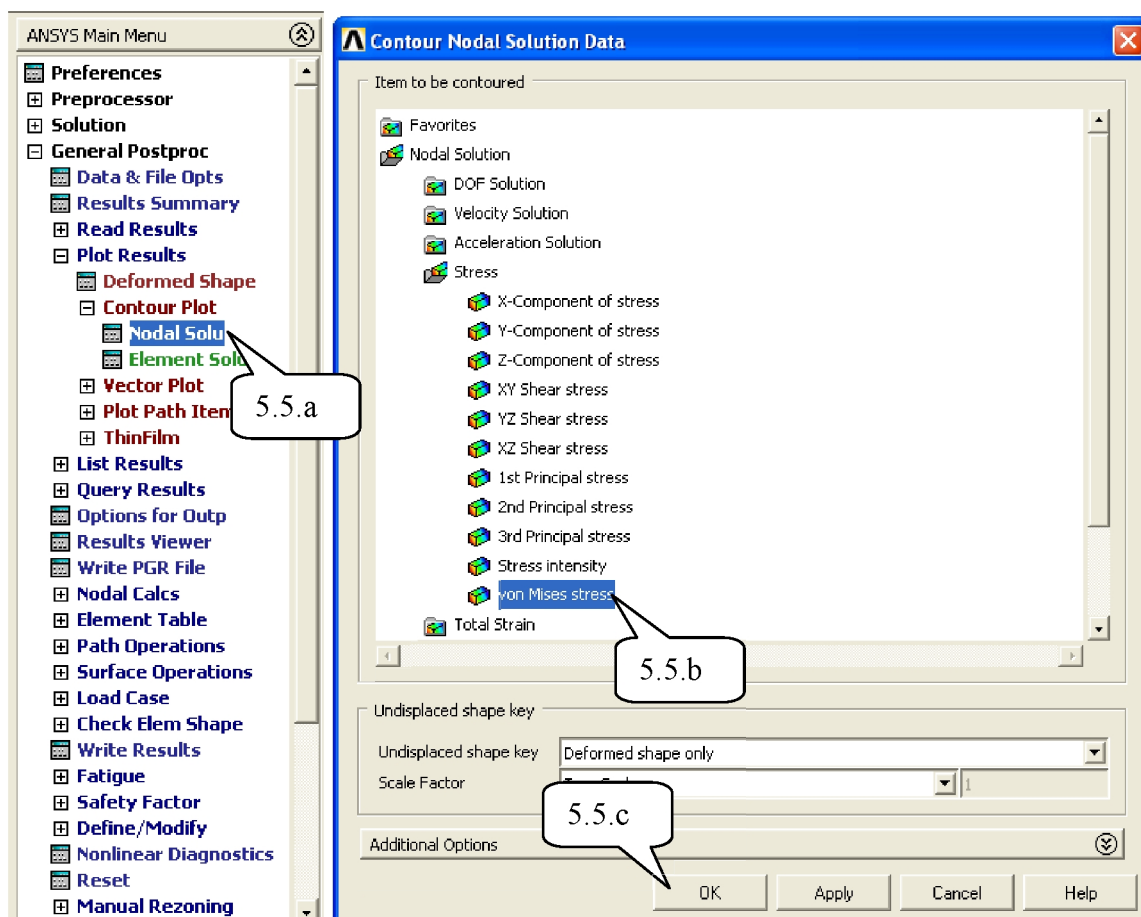


Рисунок 35 – Отображение значений напряжений и деформаций

Следует отметить, что расчет дает возможность для визуализации и анализа большего количества данных, и приведенные эпюры лишь часть из них.

## 5.6. ЗАВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

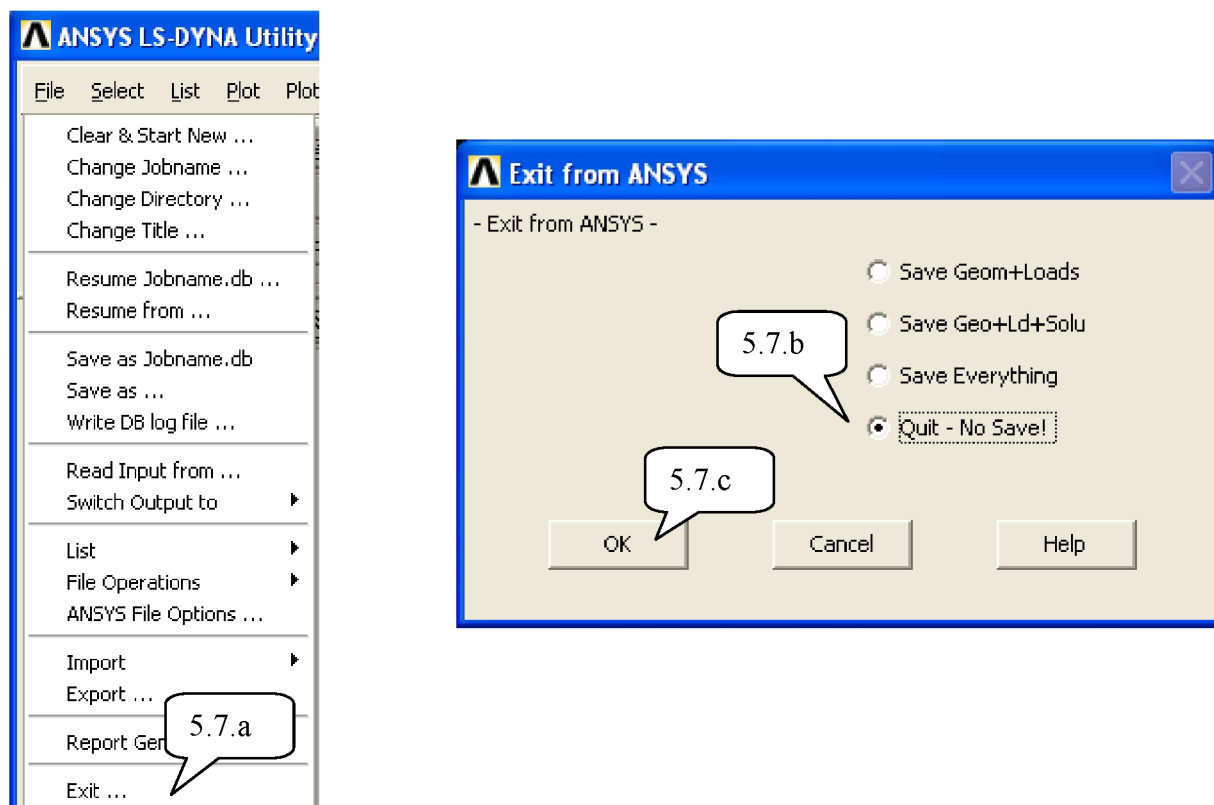
Выход из программы должен выполняться в следующей последовательности (рисунок 36):

**A.** Через Utility Menu ANSYS LS\_DYNA (или нажать на крест в правом верхнем углу окна ANSYS LS\_DYNA Utility Menu) запустить окно «Exit from ANSYS».

ANSYS LS\_DYNA Utility Menu → File → Exit ...

**B.** В появившемся окне «Exit from ANSYS» поставить точку напротив Quit - No Save! (в данном случае выходим из ANSYS без сохранения).

**C.** Для подтверждения и выхода из программы нажать «Ok».



**Рисунок 36 – Завершение работы в конечно-элементном комплексе ANSYS**

На этом этапе работа в конечно-элементном комплексе ANSYS завершена.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена методика анализа формоизменяющих операций листовой штамповки с использованием программного комплекса ANSYS\LS-DYNA.

Описаны особенности каждого этапа решения задачи, и показаны возможности программного комплекса в каждом из этапов.

Особое внимание уделено выбору моделей поведения деформируемого металла, которые наиболее полно раскрывают возможности анализа и корректны для операций штамповки из листа.

Показаны возможности постпроцессора программного комплекса для анализа полученных результатов и приведены его возможности.

Использование программного комплекса ANSYS\LS-DYNA показано на примере анализа операции осесимметричной вытяжки тонколистовой заготовки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера / А.Б.Каплун, Е.М.Морозов, М. А.Олферьева. - М.: Едиториал УРСС, 2003. - 272 с.
2. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов: пер. с англ. / Л.Сегерлинд. - М.: Мир, 1979. - 392 с.
3. Скрипачев, А.В. Инженерный анализ в листовой штамповке / А.В.Скрипачев. Тольят. гос. ун-т. - Тольятти, 2004. - 90 с.
4. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров / А.В.Чигарев, А.С.Кравчук, А.Ю.Смалюк. - М.: Машиностроение-1, 2004. - 512 с.
5. Басов, К.А. ANSYS в примерах и задачах / К.А.Басов. - М.: КомпьютерПресс, 2002. - 224 с.
6. Басов, К.А. ANSYS: справочник пользователя / К.А.Басов. - М.: ДМК Пресс, 2005. - 640 с.
7. Бреббия, К. Методы граничных элементов / К.Бреббия [и др.] - М.: Мир, 1987. - 524 с.
8. Норри, Д. Введение в метод конечных элементов / Д.Норри, Ж. де Фриз. - М.: Мир, 1981. - 304 с.
9. Матвеев, С.А. Возможности конечно-элементного анализа при решении технологических задач обработки металлов давлением // С.А.Матвеев, В.С.Мамутов, К.М.Иванов. Обработка металлов давлением. - 2002. - № 8. - С.23-28.
10. Бузлаев, Д. В. Современные методы компьютерного моделирования процессов листовой штамповки // Д.В.Бузлаев. САПР и графика. - 2002. - № 6. - С.25-30.