

АО “Ульяновский научно-исследовательский институт
авиационной технологии и организации производства”

Базовая кафедра “Технологии заготовительно-
штамповочного производства” при УлГТУ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ
ДАВЛЕНИЕМ В ПРОГРАММЕ LS-DYNA®**

ТЕОРИЯ и СЕМИНАРЫ

**Материалы для подготовки курса лекций для повышения
квалификации специалистов по моделированию процессов ОМД**

Ульяновск
2017 г

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	4
1.1. Программа LS-Dyna	4
1.2. Методы расчета в LS-Dyna.....	6
1.3. Основы теории явного метода динамики.....	7
2. ВВЕДЕНИЕ В LS-DYNA.....	11
2.1. Структура программы LS-Dyna.....	11
2.2. Этапы проведения расчета.....	12
2.3. Структура файлов.....	13
2.4. Применение препроцессора ls-prepost.....	17
2.5. Единицы измерения.....	18
3. СОЗДАНИЕ СЕТОЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ.....	19
3.1. Требования.....	19
3.2. Методы создания конечно-элементных моделей.....	21
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛА.....	23
4.1. Модели материалов в LS-DYNA.....	23
4.2. Характеристики упруго-пластического материала.....	23
4.3. Модели материалов: металлы.....	28
4.4. Модели материалов: тепловые модели.....	31
4.5. Модели материалов: модели разрушения.....	31
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПОВ ЭЛЕМЕНТА.....	33
5.1. Обзор существующих типов элемента.....	33
5.2. Объемный элемент.....	34
5.3. Оболочечный элемент.....	36
5.4. Искажения Hourglass.....	41
6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЖЕНИЯ И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ.....	44
6.1. Определение нагружения.....	44
6.2. Определение начальной скорости.....	45
6.3. Определение узловых наборов.....	45
6.4. Типы ограничений.....	45

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ.....	47
7.1. Алгоритмы контактного взаимодействия.....	47
7.2. Типы контактов для процессов ОМД.....	48
8. НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТА.....	49
8.1. Шаг интегрирования.....	49
8.2. Настройка параметров решателя.....	49
8.3. Адаптивное разбиение.....	51
8.4. Варианты запуска файла на расчет.....	53
9. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ В LS-PREPOST.....	54
9.1. Визуализация результатов.....	54
9.2. Графики и таблицы.....	55
9.3. Секущие плоскости.....	57
9.4. Векторные результаты.....	58
9.5. Анимации.....	59
10. РЕКОМЕНДАЦИИ.....	61
10.1. Параметры для моделирования процессов ОМД.....	61
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	65
СЕМИНАРЫ.....	67
1. Сеточное моделирование в LS-Prepost.....	67
2. Осадка заготовки в 2D постановке.....	80
3. Идентификация параметров моделей материала.....	85
4. Вытяжка детали из листовой заготовки с адаптивным перестроением.....	88
5. Горячая штамповка (осадка) цилиндрической заготовки.....	101
6. Прокатка заготовки между цилиндрическими роликами.....	113

Автор данного курса не претендует на авторство материалов изложенном в данном пособии, а лишь собрал их для удобного предоставления материала в процессе чтения лекций.

LS-DYNA ®, LS-OPT ®, and LS-PrePost ® are trademarks of LSTC.

ГЛАВА 1

ВВЕДЕНИЕ

1.1. Программа LS-DYNA

1.1.1. Применение программы LS-DYNA

LS-DYNA - многоцелевая программа предназначенная для анализа нелинейного динамического отклика трехмерных неупругих структур. Полностью автоматизированный процесс решения контактных задач, а также множество функций по проверке получаемого решения позволяют успешно решать сложнейшие задачи удара, разрушения, формообразования и т.п [1].

1.1.2. История разработки

LS-DYNA берет свое начало от программы DYNA3D, разработанной доктором Джоном О. Холквистом (John O. Hallquist) в Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса в 1976 г. Программа предназначалась для моделирования воздействия ударной волны ядерной бомбы изменяемой мощности, сбрасываемой с малой высоты, разработкой которой занималась в то время Лаборатория. В то время еще не существовало программ трёхмерного моделирования для симуляции ударного воздействия. Несмотря на то, что проект бомбы изменяемой мощности был отменен, разработка программы DYNA3D продолжилась. Одновременно разрабатывалась двухмерная версия программы под названием DYNA2D [2].

Первая версия программы вышла в августе 1976 года.

В 1989 году по инициативе Министерства энергетики США с целью передачи правительственных наработок в промышленность было основано акционерное общество Livermore Software Technology Corporation (LSTC) для продолжения разработки программы DYNA3D в качестве

коммерческой версии под названием LS-DYNA3D. Позднее это название было сокращено до LS-DYNA [2].

С 1996 г. решатель LS-DYNA встроен в пакет программ ANSYS, где используется для решения задач динамического анализа.

1.1.3. Основные направления применения LS-DYNA

- нелинейная динамика, тепловые задачи, разрушение, развитие трещин, контакт;
- статика и квазистатика;
- эйлеровские свойства (Eulerian);
- произвольное Лагранж-эйлеровское поведение (Arbitrary Lagrangian-eulerian (ALE));
- акустика в реальном масштабе времени;
- многодисциплинарный анализ: прочность, теплофизика, акустика.

1.1.4. Основные приложения LS-DYNA

- оценка сопротивляемости удару [1];
- анализ безопасности пассажира;
- формование металла;
- резка металла;
- задачи о вылете лопатки турбинных двигателей;
- птицестойкость;
- расчет тонкостенных, жестяных контейнеров;
- производство автомобильных комплектующих;
- проникновение; формование стекла;
- пластики;
- биомедицинские приложения;
- взрывная нагрузка;
- анализ ячеистых, сотовых и тонкостенных кессонных конструкций;

- точечно-сварные, заклепочные и болтовые соединения;
- инженерный расчет изделий народного потребления;
- взаимодействие потоков жидкости и газа с конструкцией;
- моделирование землетрясений;
- расчет грузовых контейнеров.

1.2. Методы расчета в LS-DYNA

В LS-DYNA реализованы следующие методы [3]:

- явный метод конечных элементов с возможностью построения лагранжевой, эйлеровой и гибридной сетки;
- неявный (прямой с учетом разреженности матриц, итерационный - преопределенных сопряженных градиентов);
- многокомпонентная гидродинамика;
- бессеточный метод сглаженных частиц Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH);
- бессеточный метод, основанный на методе Галеркина Element Free Galerkin method (EFG).
- методы discrete element method (DEM), CESE, ICFD, EM и др.

Программа имеет встроенные процедуры автоматической перестройки и сглаживания конечно-элементной сетки при вырождении элементов, высокоэффективные алгоритмы решения контактных задач, широкий набор моделей материалов, возможности пользовательского программирования.

Для решения динамических задач многокомпонентной гидродинамики в LS-DYNA реализованы эйлеровые и произвольные лагранжево-эйлеровые сетки (Arbitrary Lagrangian-Eulerian), которые лежат в основе используемого для решения подобных задач метода - Multimaterial Eulerian Hydrodynamics (МЕН). Для решения динамических задач многокомпонентной гидродинамики может быть использован метод SPH.

Для решения нелинейных квазистатических и статических задач механики деформируемого тела может быть использован неявный решатель.

Новые методы расчета появившиеся в новом решателе ls971 R7: discrete element method (DEM), CESE, ICFD, EM.

Метод CESE используется для решения многих типов задач текучей среды, таких как движение детонационных волн, взаимодействие ударных и акустических волн, кавитационные явления в жидкости, возникновение сверхзвуковых струй жидкости и истечение химически реагирующих веществ. В программе LS-DYNA этот метод применяется для решения проблем взаимодействия текучей среды с конструкцией (FSI).

Метод ICFD предназначен для несжимаемой текучей среды, доступна также базовая модель турбулентности.

Метод EM предназначен для анализа задач электромагнетизма.

Решатели для решения химических задач и для описания стохастического (вероятностного) поведения частиц используются совместно с решателем для сжимаемой текучей среды. Каждый из решателей обеспечивает связывание с решателем задач механики, реализованным в программе LS-DYNA.

1.3. Основы теории явного метода динамики

LS-DYNA является нелинейным переходным динамическим конечно-элементным кодом с явным и неявным решателем.

1.3.1. Процедура расчета явного анализа

Явный метод работает когда присутствует ускорение.

При динамической задаче решается следующее уравнение [4]:

$$ma^n + cv^n + kd^n = f^n \quad (1.1)$$

где m - матрица масс, c - матрица демпфирования, k - матрица жесткости, a - ускорения, v - скорость, d - перемещение, n - временной шаг;

kd^n - внутренняя сила в конструкции.

Основная задача в определении перемещения d^{n+1} во времени t^{n+1} :

$$d^{n+1} = f(d^n, v^n, a^n, d^{n-1}, v^{n-1}, \dots) \quad (1.2)$$

Все термины известны во временном состоянии n и таким образом могут быть решены напрямую (явно).

В явном подходе внутренние и внешние силы суммируются в каждой узловой точке, и узловые ускорения вычисляются путем деления на массу узла (рис. 1.1). Решение продвигается путем интегрирования этого ускорения во времени [5]. Максимальный размер временного шага ограничен условием Куранта. Расчет, как правило, требует много относительно быстрых шагов по времени. Используя условие Куранта решение стабильно. Поскольку результат решения - это перемещение в узловых точках, временной шаг должен позволить вести расчет через элемент без пропуска узлов. Поэтому самый маленький элемент системы определяет временной шаг.



Рис. 1.1. Блок-схема для выполнения явного анализа [4]

Последовательность расчета явного анализа:

- в начальный момент времени ($t=0$) напряжения, скорости, ускорения равны нулю или соответствуют заданным граничным условиям в момент времени $t=0$;
- проходит временной шаг $n+1$;

- рассчитываются скорости и перемещения в момент времени $n+1/2$ для скорости и $n+1$ для перемещения;
- далее рассчитываются скорость деформации во время $n+1/2$ от скорости и матрицы B (матрица напряжение - перемещение);
- рассчитывается напряжение во время $n+1$ в зависимости от скорости деформации;
- далее рассчитываются внутренние силы во время $n+1$ в зависимости от напряжения и матрицы B ;
- после вычисляются внешние силы в момент времени $n+1$ и ускорения исходя из разницы сил и массы;
- после этого величина временного шага увеличивается на $n+1$ и цикл повторяется.

1.3.2. Временной шаг интегрирования

Приведенная процедура интегрирования уравнения движения является условно стабильной, поскольку обеспечивает получение результатов лишь при выполнении CFL-условий (Куранта-Фредри-КСА-Леви) [6]:

$$\Delta\tau < \Delta\tau_{\max} \quad (1.3)$$

Максимально допустимый шаг интегрирования $\Delta\tau_{\max}$ определяется как минимально допустимый у всех конечно-элементных моделей, которые могут деформироваться.

$$\Delta\tau_{\max} = \min(\Delta\tau_{\max i}) \quad (1.4)$$

CFL-условие требует, чтобы шаг интегрирования не превышал отрезок времени, за который волна проходит через элемент. Такая волна напряжений распространяется со скоростью звука c . Однако в общем случае точное значение $\Delta\tau_{\max}$ для отдельного элемента вычислить невозможно. Поэтому на практике используют оценку $\Delta\tau_{\max}$ вычисленную по приближенным формулам:

$$\Delta\tau_{\max} = L/c \quad (1.5)$$

где c – скорость звуковой волны в материале, L – характерный размер конечного элемента.

В зависимости от размерности задачи и формы конечного элемента скорость звуковой волны и характерный размер конечного элемента оцениваются различными зависимостями:

- для 2D задачи плоского деформирования состояния упругого тела:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-V^2)}}; \quad (1.6)$$

(скорость звука зависит от модуля Юнга, плотности, коэффициента Пуассона)

- для 3D задачи деформированного состояния упругого тела:

$$c = \sqrt{\frac{E(1-V)}{\rho(1-V)(1-2V)}}; \quad (1.7)$$

- характерный размер плоского четырех угольного элемента может быть вычислен так:

$$L = \frac{A}{\max(a_1, a_2, a_3, a_4)} \quad \text{или} \quad L = \frac{A}{\max(D_1, D_2)}; \quad (1.8)$$

где a_i – длина стороны конечного элемента, D_i – длина диагонали конечного элемента, A – площадь конечного элемента, E – модуль упругости, V - коэффициент Пуассона, ρ - плотность.

ГЛАВА 2

ВВЕДЕНИЕ В LS-DYNA

2.1. Структура программы LS-Dyna

Программа LS-DYNA содержит в своем составе модуль для подготовки исходных данных (preprocessor), модуль решения (solver) и модуль анализа результатов расчета (postprocessor). При стандартной установке открывается программа оболочка – LS-DYNA Program Manager (рис. 2.1), с помощью которой пользователь может вызывать пре-, постпроцессор и модуль решения [7].

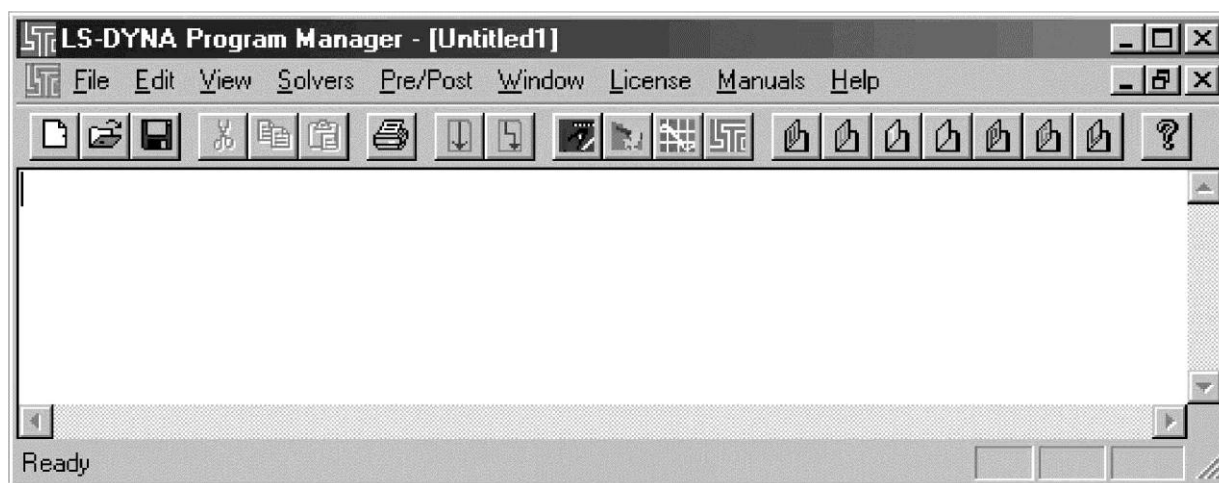


Рис. 2.1. Панель LS-DYNA program manager

С помощью меню или "горячих клавиш" осуществляется доступ к нужным модулям программы.

Особенностью LS-DYNA является то, что исходная информация о задаче передается от препроцессора к модулю решения в виде текстового файла. Это позволяет легко корректировать исходную информацию с помощью обычного текстового редактора. В текстовом виде также представлена информация о координатах узлов, элементах. Такая модель может быть подготовлена с помощью любого препроцессора, например LS-PREPOST [8, 9] или ANSYS [10].

Можно использовать и другие программы – оболочки, связывающие с LS-DYNA. Например, программа k-runner [1].

Текстовый файл для LS-DYNA (рис. 2.2.) обычно вводится в формате карт (ключевых слов), в котором вводятся команды и параметры для них. Карты пишутся в отдельных строках, каждая карта начинается с символа "*" в 1-й позиции строки. После карты может идти одна или несколько строк исходных данных. При наличии в строке нескольких параметров они записываются в отведенных им местах (каждый параметр отводится 10 позиций) или через запятые. Строки, содержащие в 1-й позиции символ "\$" являются комментариями и не учитываются при обработке файла.

```
*KEYWORD
*TITLE
$#                               title
LS-DYNA keyword deck by LS-PrePost
*CONTROL_ACCURACY
$#  osu   inn  pidosu  iacc
    1    4    0    0
```

Рис. 2.2. Пример k-файла

Порядок карт во входном файле для LS-DYNA значения не имеет. Важна лишь полнота данных.

2.2. Этапы проведения расчета

Выполнение процесса моделирования состоит из 3-х основных этапов:

1. препроцессорная подготовка;
2. решение задачи;
3. постпроцессорная обработка.

1. Препроцессорная подготовка включает в себя создание геометрической и конечно-элементной модели процесса, определение типов элемента, моделей материала, контактных параметров процесса, введение

ограничений и нагрузок, действующих на модель, определение времени расчета и всех других необходимых параметров для выполнения расчета.

2. Решение задачи позволяет запустить и контролировать процесс решения.

3. Постпроцессорная обработка позволяет в графическом виде получить результаты выполненного расчета путем построения графиков и создания анимации процесса и прочее.

При выполнении моделирования в качестве препроцессора и постпроцессора используется препостпроцессор LS-PREPOST (или любой другой), а при решении задачи используется решатель LS-DYNA.

2.3. Структура файлов

Ввод исходных данных с помощью ключевых слов создает гибкую, логически организованную и простую для понимания структурированную базу данных. Сходные понятия сгруппированы под одним и тем же ключевым словом. Например, ключевое слово *ELEMENT относится к таким конечным элементам, как объемные, балочные и оболочечные элементы, пружины, демпферы, и сосредоточенные массы [12].

Руководство пользователя программы LS-DYNA описывает в алфавитном порядке последовательно организованные разделы входных данных. Каждый раздел относится к определенной части исходных данных. Имеется раздел для переустановки параметров программы LS-DYNA; раздел материалов для ввода действующих постоянных; раздел уравнений состояния; раздел элементов, в котором задаются идентификаторы элементов и узловые связи; раздел для задания составных частей структуры, (конструкции) и т.д. [12].

Блок данных начинается с ключевого слова, за которым следуют относящиеся к нему исходные данные. Следующее ключевое слово, обнаруженное при считывании блока данных, определяет конец этого блока и начало нового. Признаком ключевого слова является символ * в первой колонке карты ввода. Знак доллара \$ в первой колонке предшествует комментарию и указывает на то, что данная строка ввода должна игнорироваться. Блочная организация данных не является обязательной для про-

граммы LS-DYNA, но это можно использовать для удобства пользователя, давая возможность группировать узлы и элементы. Можно расположить, к примеру, все задаваемые узлы под одним ключевым словом *NODE или вводить ключевое слово *NODE перед каждым отдельным узлом. Порядок ввода исходных данных произволен за исключением необязательного ключевого слова *END, которое указывает на окончание входного потока. При отсутствии слова *END завершение ввода происходит при обнаружении признака конца файла при считывании.

Рисунок 2.3 демонстрирует общие принципы организации ввода и связь различных объектов. На этом рисунке данные, объединены ключевым словом *ELEMENT, представляют собой следующее: идентификатор элемента EID, идентификатор части PID и идентификаторы узловых точек NID, которые определяют узлы N1, N2, N3 и N4. Идентификаторы узловой точки задаются в разделе *NODE, в котором каждый такой идентификатор должен быть указан только единожды. Составная часть структуры, заданная ключевым словом *PART, имеет уникальный идентификатор PID, идентификатор сечения SID, идентификатор материала или его определяющей модели MID, идентификатор уравнения состояния EOSID и идентификатор контроля искажений формы элемента hourglass HGID. Ключевое слово *SECTION определяет идентификатор сечения SID с указанием формулировки элемента, коэффициент сдвига SHRF, способ численного интегрирования NIP и т.д. Определяющие константы материалов задаются в разделе *MAT, в котором указываются соответствующие исходные данные для всех типов элементов, включая объемные, балочные, оболочечные, толстостенные оболочечные, ремни безопасности, пружины и демпферы. Уравнения состояния, которые используются только для указанных в разделе *MAT материалов для объемных элементов, приводятся в разделе *EOS. Так как многие элементы в программе LS-DYNA используют пониженное интегрирование, то могут появляться моды деформаций с нулевой энергией. Эти моды подавляются введением искусственной жесткости или вязкости, которые препятствуют появлению нежелательных форм деформаций. Такой контроль искажений типа песочных часов может быть выбран с помощью раздела *HOURLASS [12].

В процессе запуска на расчет, когда считываются исходные данные, выполняется проверка данных, поскольку эти данные должны быть, прежде всего, размещены в памяти в виде массивов и затем упорядочены. Исходные данные выводятся в файл D3HSP. Пользователю следует всегда проверять выходные файлы D3HSP или MESSAG на наличие в них слова “Error”.

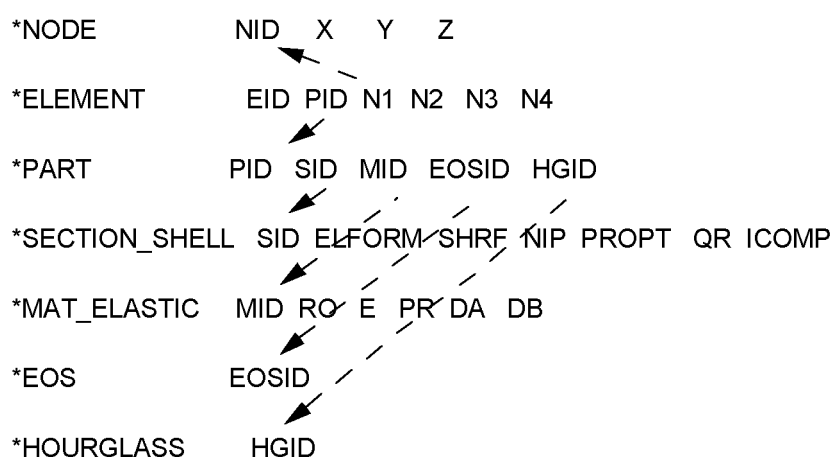


Рис. 2.3. Организация ввода с помощью ключевых слов [12]

Для лучшего понимания идеи использования ключевых слов ниже приводится краткий обзор некоторых основных ключевых слов [12].

Ключевое слово	Описание
*BOUNDARY	Эта карта применяется для различных методов определения нагружения, описания граничных состояний. Также существуют возможность узлового ограничения в секции *NODE
*CONSTRAINED	Используется для определения связанных степеней свободы. Для примера, узловые твердые тела, заклепки, сварные точки, линейные ограничения, и др.
*CONTACT	Задаёт способ обработки контактного взаимодействия между частями модели
*CONTROL	Опции доступные в секции *CONTROL устанавливают глобальные параметры, такие как время завершения, величина временного шага, тепловые настройки процесса и др.

*DAMPING	Определяет демпфирование глобально или для каждой части
*DATABASE	Это слово с комбинацией опций может быть использовано для контролирования выходных данных ASCII и бинарных файлов в LS-DYNA. Устанавливается частота записи выходных параметров.
*DEFINE	Эта секция используется для определения графиков (нагружения от времени, температуры и др.).
*ELEMENT	Определяются идентификаторы (части) и узлы для всех оболочечных, объемных и других элементов
*EOS	Эта секция читает параметры уравнения состояния. Уравнение состояния определяется, EOSID, указание в карте *PART
*HOURLASS	Определяет искажение и свойства объемной вязкости. Индикатор, HGID, на *HOURLASS карте относится к HGID на *PART карте
*INCLUDE	Делает входной файл легко сохраняемым, это ключевое слово позволяет входному файлу быть разделенным на подфайлы. Каждый подфайл может быть разделен еще на подфайлы и т.д. Эта опция удобна, если входные данные очень большие
*INITIAL	Определение начальных параметров модели, например, начальной скорости, температуры
*LOAD	Эта секция снабжает различными методами нагружения структуры с концентрированными точечными нагрузками, распределенными давлениями, инерционными нагрузками и тепловыми нагрузками
*MAT	Эта секция позволяет определять константы для всех материалов доступных в LS-DYNA, включая пружинные, демпферные и др. Индикатор материала, MID, на карте *PART
*NODE	Определяет узловые точки и их координаты
*PART	Связывает part ID с картами *SECTION,

	*MATERIAL, *EOS и *HOURLASS
*SECTION	Определение свойств поперечного сечения: тип и формулировка элемента, толщина и др.
*SET	Определение групп, узлов, наборов, сегментов

2.4. Применение препроцессора ls-prepost

Для создания моделей можно использовать бесплатный, для пользователей LS-DYNA, препостпроцессор LS-PREPOST (рис. 2.4).

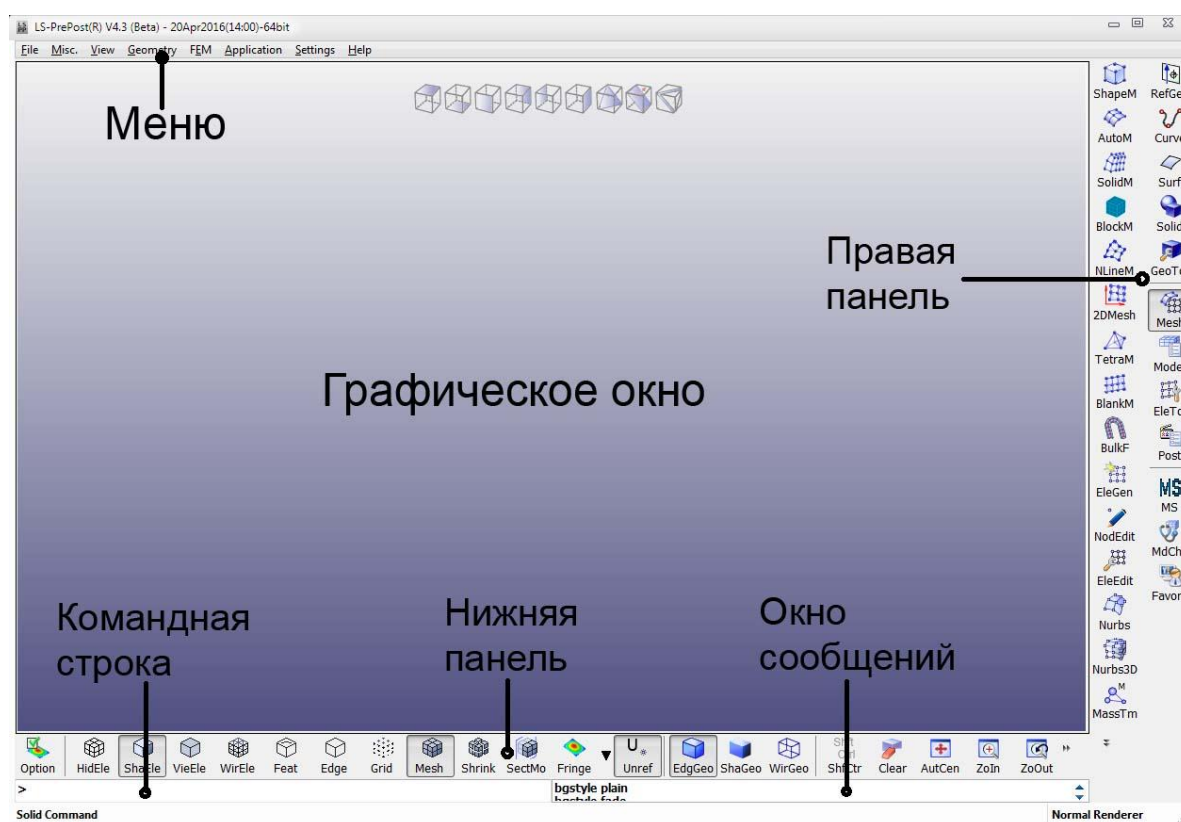


Рис. 2.4. Программа LS-PREPOST версии 4.3 и выше

Использование графического интерфейса LS-PREPOST пользователя является наиболее простым способом создания k-файла для LS-DYNA.

2.4.1. Возможности ls-prepost как препроцессора

LS-PREPOST позволяет выполнить большинство действий для создания конечно-элементной модели и k файла (построение справочной

геометрии, построение кривых, построение поверхностей, построение объемных тел, редактирование модели, нанесение сетки, создание элементов и др.

2.5. Единицы измерения

Для работы в программе LS-DYNA необходимо корректно задавать все используемые единицы измерений. Размерность каждой единицы должна быть соответственной и согласовываться с общими правилами [12]:

- [усилие] = [масса]*[ускорение];
- [ускорение] = [длина]/[время²].

Примеры некоторых из согласованных единиц измерений приведены в табл. 2.1, [13]

Таблица 2.1

Примеры согласованных единиц измерений

№	масса	длина	время	усилие	напряж.	плотн.	Мод. Юнга	Уск. св. пад.	Энергия
1	кг	м	с	Н	Па	7,83e+3	2,1e11	9,8	Дж
2	г	см	мкс	1e+7	Мбар	7,83	2,1	9,8e-10	Дж*е5
3	тонна	мм	с	Н	МПа	7,83e-9	2,1e5	9,8e3	Дж*е-3
4	кг	мм	мс	кН	ГПа	7,83e-6	2,1e2	9,8e-3	Дж

Система единиц измерений №1 соответствует системе СИ. В ряде случаев использовать ее не совсем удобно, например, при небольших размерах модели и при моделировании кратковременных процессов.

Система единиц измерений №2 обычно применяется в процессах длящихся очень малое время (мкс и мс), например, в процессах взрыва.

Система единиц измерений №3 наиболее удобна в процессах ОМД.

Система единиц измерений №4 удобна в процессах механообработки.

Семинар 1	Сеточное моделирование в LS-PREPOST
Семинар 2	Осадка заготовки в 2D постановке

СОЗДАНИЕ СЕТОЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

3.1. Требования

Одним из наиболее важных этапов в конечно-элементном анализе является построение сеточной модели из конечных элементов, т.е. разделение всей модели на маленькие кусочки (конечные элементы), связанные между собой в узлах [14].

В существующих препроцессорах имеется два основных метода построения сетки: построение произвольной сетки и построение упорядоченной сетки.

Произвольная сетка строится автоматически, при этом соседние элементы могут существенно отличаться по размерам. Упорядоченная сетка строится путем деления геометрических элементов на модели на некоторое число частей.

Очевидно, что чем меньше линейный размер конечного элемента, тем большее количество элементов в модели, при этом время вычисления экспоненциально возрастает, а ошибки анализа уменьшаются. Однако ошибки уменьшаются не до нуля, т.к. с увеличением числа элементов накапливаются ошибки округления.

Рекомендации при построении сетки конечных элементов:

- упорядоченная сетка более предпочтительна, чем произвольная (рис. 3.1)
- необходимо избегать треугольной сетки для оболочечных элементов. Эта форма жесткая и менее точная.
- необходимо избегать тетраэдрической формы для объемных элементов. Эта форма жесткая и менее точная.
- размеры элементов желательно иметь одинаковой формы;
- при возникновении искажения “типа песочных часов” используются полноинтегрированные элементы (если не помогает контроль параметров искажения);

- динамический расчет (в LS-DYNA) требует построения более точной сетки;
- при построении сетки правило: размеры соседних элементов не должны меняться более чем в 2 раза;
- для улучшения сетки (в процессе деформирования) может применяться адвективное перестроение или ALE метод.

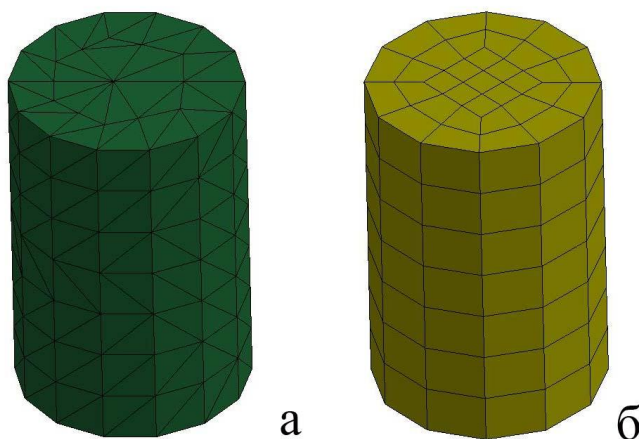


Рис. 3.1. Примеры конечно-элементных сеток [14]: а – произвольная, б – упорядоченная

Для уменьшения погрешности вычисления рекомендуется стремиться к использованию сетки в виде правильных многоугольников (квадрат, куб), приемлемым являются элементы с отношением сторон к 1:4.

Необходимо помнить, что МКЭ – приближенный метод, точность которого зависит от правильного выбора типов и размеров конечных элементов. Так, например, более частая сетка требуется там, где ожидается большой градиент деформаций или напряжений. В то же время более редкая сетка может применяться в зонах с более или менее постоянными деформациями или напряжениями, а также в областях не представляющих особого интереса [14].

Точность результатов анализа уменьшается, если размеры соседних элементов вблизи концентраторов напряжений существенно различны.

Приступая к конечно-элементному анализу, инженер должен понимать:

- к какой области относится данная задача;
- какая часть всей конструкции должна исследоваться подробнее;

- какое упрощение можно допустить в данной задаче.

Ошибки могут возникать на различных стадиях конечно-элементного анализа: при постановке задачи, построении модели, числовом решении.

Ошибки постановки задачи могут возникать, когда выбранный тип конечных элементов или их размер не соответствуют физическому поведению материала в конструкции. Источником ошибок также является некорректное задание граничных условий.

Ошибки построения модели возникают при замене реальной конструкции ограниченным числом конечных элементов (с учетом их форм и размеров).

Тип и количество элементов влияют на точность вычислений. Так, например, при вычислении силы, в случае нелинейного анализа, при небольшом числе конечных элементов их количество существенно влияет на величину вычисляемой силы. Однако при увеличении числа элементов результаты стабилизируются (рис. 3.2). Также размер элемента существенно влияет при моделировании процессов разрушения.

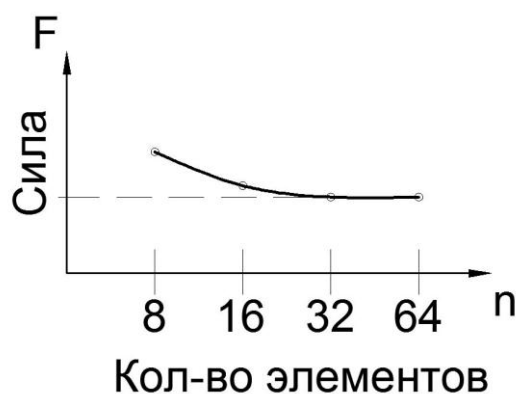


Рис. 3.2. Влияние количества элементов на точность расчета [14]

3.2. Методы создания конечно-элементных моделей

1. Создание конечно-элементной модели в программе LS-PREPOST
 - использование произвольной стеки;
 - использование упорядоченной сетки;

- создание геометрии с последующим нанесением конечно-элементной сетки (для сложных моделей);
 - непосредственное создание конечно-элементной сетки (для простых моделей).
2. Создание конечно-элементных моделей в программах hipermesh, ANSA и др.
 3. Создание конечно-элементных моделей в программе Ansys APDL Mechanical / LS-DYNA, Ansys Workbench LS-DYNA. Также в программе ANSYS можно создавать готовый k-файл. Если не удастся нанести качественную сетку в программе ls-prepost рекомендуется пользоваться предпроцессорной подготовкой в программе ANSYS.

ГЛАВА 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛА

4.1. Модели материалов в LS-DYNA

В LS-DYNA существует большое количество различных моделей металлов, наиболее применимые к процессам ОМД представлены в таблице 4.1.

Табл. 4.1

Модели материалов для процессов ОМД

Изотропные пластические	3, 15, 18, 24, 106
Анизотропные пластические	36, 37 – для листовой штамповки, 39 (с FLD)

4.2. Характеристика упруго-пластического материала

Для линейного материала напряжения пропорциональны деформациям, а его поведение описывается законом Гука [15]. Форма закона Гука имеет вид:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (4.1)$$

где σ - напряжение,

E - модуль Юнга,

ε - деформация.

Упругость представляет собой способность материала сохранять исходную форму после снятия нагрузки. Все материалы, поведение которых подчиняется закону Гука, являются упругими. В неупругом материале деформации после снятия нагрузки остаются. Наиболее распространенным видом неупругого поведения материала, является пластическое состояние.

В ряде случаев необходима оценка влияния скорости нагружения и температуры на поведение материала. Влияние скорости деформаций становится существенным для многих металлических материалов при высоких температурах. Для некоторых уравнений состояния значимость деформаций может существенно меняться в зависимости от скорости. В большинстве случаев анализ прочности проводится без учета скорости деформации.

4.2.1. Пластические материалы

Пластические деформации не исчезают после снятия нагрузки и, таким образом, являются остаточными. Характерно, что после появления пластических деформаций достаточно небольшого увеличения напряжений для существенного роста деформаций. Это явление называется текучестью, а соответствующее напряжение называется напряжением текучести (рис. 4.1).

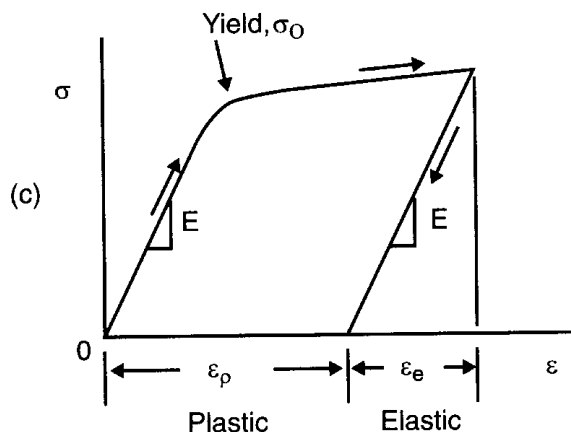


Рис. 4.1. График напряжение-деформация [15]

Существуют так называемые инженерные напряжения и соответствующие им инженерные деформации, а также истинные напряжения и деформации. Инженерные деформации иногда рассматриваются как «малые» деформации. В одноосном случае (рис. 4.2) инженерные напряжения и деформации определяются следующим образом:

$$\sigma_{\text{eng}} = P/A, \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_{\text{eng}} = \Delta L/L, \quad (4.3)$$

где σ_{eng} - инженерные напряжения,
 P - приложенная нагрузка,
 A - площадь поперечного сечения,
 ния,

ε_{eng} - инженерные деформации,
 ΔL - изменение длины,
 L - начальная длина.

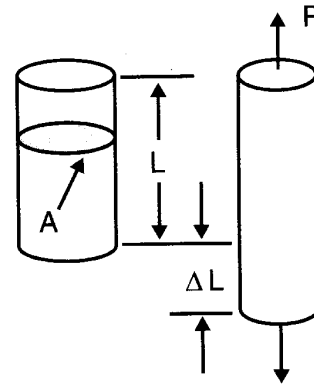


Рис. 4.2. Одноосное растяжение образца [15]

При работе с программой LS-DYNA требуется вводить значения напряжений и деформаций в виде истинных напряжений и деформаций. Для одномерного случая истинные деформации находятся по формуле:

$$\varepsilon_{\text{true}} = \ln(L/L_0), \quad (4.4)$$

где $\varepsilon_{\text{true}}$ - истинные деформации,
 L - текущее значение длины,
 L_0 - начальная длина.

Из этого соотношения видно, почему истинные деформации называются логарифмическими. Чтобы перейти от инженерных напряжений и деформаций к истинным, можно использовать следующие соотношения:

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{eng}}(1 + \varepsilon_{\text{eng}}), \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{eng}}), \quad (4.6)$$

где σ_{true} - истинные напряжения.

При малых деформациях значения инженерных и истинных параметров почти идентичны. Однако по мере возрастания деформаций эти значения расходятся.

Пластичность материала проявляется как его «текучесть». В одномерном случае текучесть возникает при достижении напряжениями величины предела текучести. Для более сложных напряженных состояний используется энергетический критерий формоизменения, часто называемый критерием Мизеса. После достижения начала пластичности напряжения должны возрастать, чтобы процесс пластического деформирования раз-

вивался (рис. 4.1). Такое возрастание напряжений называется упрочнением.

Для получения данных о пластичности материала используют кривую деформирования после одноосного растяжения [16, 17, 18].

Рекомендуется провести испытание образца, например, по растяжению и смоделировать данный процесс. Кривые с эксперимента и с моделирования должны совпадать.

Рекомендуемая последовательность: испытания на стандартный механический тест (по ГОСТ 1497-84) → преобразуем в истинную кривую → идентификация параметров моделей материала → закладываем параметры в выбранную модель материала → моделируем на стандартный механический тест → проверяем на совпадение результатов → при совпадении результатов используем параметры материала в рабочей модели (при несовпадении проверяем параметры модели материалы).

При построении истинной кривой от значения σ_B (в момент начала утонения шейки) проводят прямую под углом σ_B до значения $e_{np} = \ln\left(\frac{1}{1-\varphi}\right)$

Виды простых моделей материала:

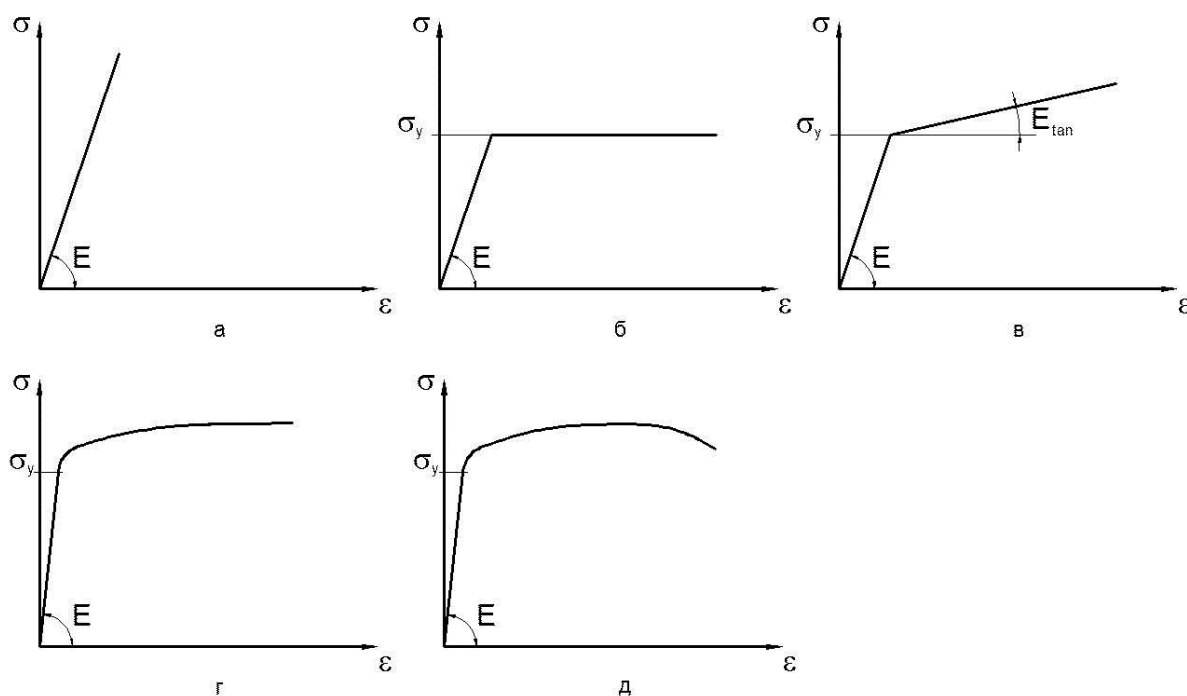


Рис. 4.8. Виды простых моделей материала: а – упругая модель $\sigma = E \cdot e$; б – упругая – идеально пластическая модель; в – упруго-пластическая (билинейная) модель, г – упруго-пластическая модель в степенном виде, д- упруго-пластическая кусочно-линейная модель

4.2.2. Методика определения параметров

1. Определение билинейной модели материала

Исходные данные:

- предел текучести материала σ_T ;
- предел временного сопротивления σ_B ;
- деформация соответствующая временному сопротивлению ε_B ;
- модуль Юнга E

Определение касательного модуля:

$$E_t = \frac{\sigma_B^{\log} - \sigma_T^{\log}}{e_B^{\log} - \sigma_B^{\log} / E} \quad (4.7)$$

Для расчета используем истинные (логарифмические) параметры (см. формулы 4.5-4.6).

Данные параметры (σ_T , E_t) используем в моделях материала MAT3 или MAT24. Данная модель материала является наименее точной из рассматриваемых.

2. Определение упруго-пластической модель материала в степенном виде

Исходные данные – график зависимости $\sigma = f(e)$ (после одноосного растяжения, в логарифмическом виде)

Модель материала определяется следующей формулой

$$\sigma = ke^n$$

где n – коэффициент упрочнения, k – коэффициент прочности.

Параметры (n , k) определяются при максимальном приближении к графику о одноосного растяжения, например, при помощи Excel.

Данные параметры используем в модели материала MAT18. Эта модель материала является достаточно точной для моделирования большинства процессов холодной ОМД.

3. Определение упруго-пластической кусочно-линейной модели

Исходные данные – график зависимости $\sigma = f(e)$ (после одноосного растяжения, в логарифмическом виде).

Данные параметры вводятся напрямую в программу в виде графика $\sigma = f(e)$.

Данные параметры в виде ссылки на кривую используем в модели материала MAT24. Данная модель материала является наиболее точной для большинства рассматриваемых процессов.

Кроме описанных существуют еще несколько подходов для идентификации параметров моделей материала:

- методика Рамберга-Осгуда [19, п. 9.8.4.1.2];
- методика Кирсанова [20];
- методика расчета параметров модели материала Джонсона-Кука [21, 22]
- методика расчета полилинейных моделей материала [23]

Семинар 3	Идентификация параметров моделей материала
-----------	--

4.3. Модели материалов: металлы

4.3.1. *MAT_ELASTIC (№1)

Линейно-упругая модель материала $\sigma = E \cdot e$, где E – модуль Юнга, e – деформация.

В карте определяются следующие параметры:

- RO - массовая плотность;
- E - модуль Юнга;
- PR - коэффициент Пуассона.

4.3.2. *MAT_PLASTIC_KINEMATIC (№3)

Модель используется для расчета изотропного и кинематического упрочнения пластичных материалов.

В карте определяются следующие параметры:

- RO - массовая плотность;
- E - модуль Юнга;
- PR - коэффициент Пуассона;
- SIGY - предел текучести;
- ETAN - касательный модуль.

Данная модель позволяет задать критерий разрушения (FS) на основе предельной пластической деформации.

Рекомендуется разрушающую предельную деформацию определять по следующей формуле:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right);$$

где ψ – относительное сужение шейки образца.

4.3.3. *MAT_POWER_LAW_PLASTICITY (№18)

Модель изотропной пластичности с упрочнение по степенному закону $\sigma = ke^n$.

В карте определяются следующие параметры:

- RO - массовая плотность;
- E - модуль Юнга;
- PR - коэффициент Пуассона;
- K - коэффициент прочности;
- n – экспонента упрочнения.

4.3.4. *MAT_RIGID (№20)

Части модели из этого материала считаются принадлежащими жесткому телу.

В карте определяются следующие параметры:

RO - массовая плотность;
E - модуль Юнга;
PR - коэффициент Пуассона;
CMO - опция ограничения на центр масс;
CON1 – ограничения на перемещение;
CON2 – ограничения на вращение.

4.3.5. *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (№24)

Кусочно-линейная модель материала позволяет задать упругопластический материал с произвольной зависимостью между напряжением и деформацией.

В карте определяются следующие параметры:

RO - массовая плотность;
E - модуль Юнга;
PR - коэффициент Пуассона;
SIGY - предел текучести;
ETAN - касательный модуль или LCSS -идентификатор задающей кривой или таблицы.

4.3.6. *MAT_ELASTIC_VISCOPLASTIC_THERMAL (№106)

Упруговязкопластическая модель материала с учетом тепловых эффектов. Позволяет задавать различные величины параметров в зависимости от температуры.

В карте определяются следующие параметры:

RO - массовая плотность;
E - модуль Юнга;
PR - коэффициент Пуассона;
SIGY – начальный предел текучести;
ALPHA - коэффициент теплового расширения;
QR, CR – параметры изотропного упрочнения;
LC - задающая кривая, определяющий необходимый параметр в виде функции температуры.

4.4. Модели материалов: тепловые модели

С помощью карт *MAT_THERMAL_ можно задавать теплофизические параметры материалов при совместном анализе (прочность + тепло).

На теплофизические свойства ссылаются с помощью идентифицирующего номера TMID определяемый в карте *PART.

4.4.1. *MAT_THERMAL_ISOTROPIC (№T1)

Модель позволяет задавать изотропные теплофизические свойства материала.

В карте определяются следующие параметры:

HC – теплоемкость,

TC - теплопроводность.

4.5. Модели материалов: модели разрушения

4.5.1. Модели разрушения тел

Модели разрушения в лагранжевом методе основаны на удалении элемента из расчета при достижении определенного установленного предельного параметра.

Варианты определения предельных параметров разрушения:

- предельный параметр по деформации – MAT3, MAT24;
- различные предельные параметры при разрушении (давления, главное напряжение, эквивалентные напряжения, главная деформация, деформация сдвига и т.п.) – MAT_EROSION;

При значительных пластических деформациях до разрушения рекомендуется использовать параметры разрушения по деформации.

При малых пластических деформациях до разрушения (хрупкий материал) рекомендуется использовать критерий по главным напряжениям.

Данные модели применяются при разделительных процессах ОМД, механообработке и при любых других процессах сопровождающиеся разрушением.

4.5.2. *MAT_ADD_EROSION

Опция ADD_EROSION позволяет ввести разрушение в модели не имеющие критериев разрушения.

В карте определяются следующие параметры:

EXCL - номер исключения;

SIGP1 - главное напряжение при разрушении;

EPSP1 - главная деформация при разрушении;

EFFEPS – максимальные эффективные деформации при разрушении.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПОВ ЭЛЕМЕНТОВ

5.1. Обзор существующих типов элементов

Для процессов деформирования и разрушения твердых тел используются полноинтегрированные элементы и с однотоочечным интегрированием [12]. Элементы низкого порядка (с однотоочечным интегрированием), используемые в LS-DYNA просты, эффективны и точны. Примеры конечных элементов представлены на рис. 5.1.

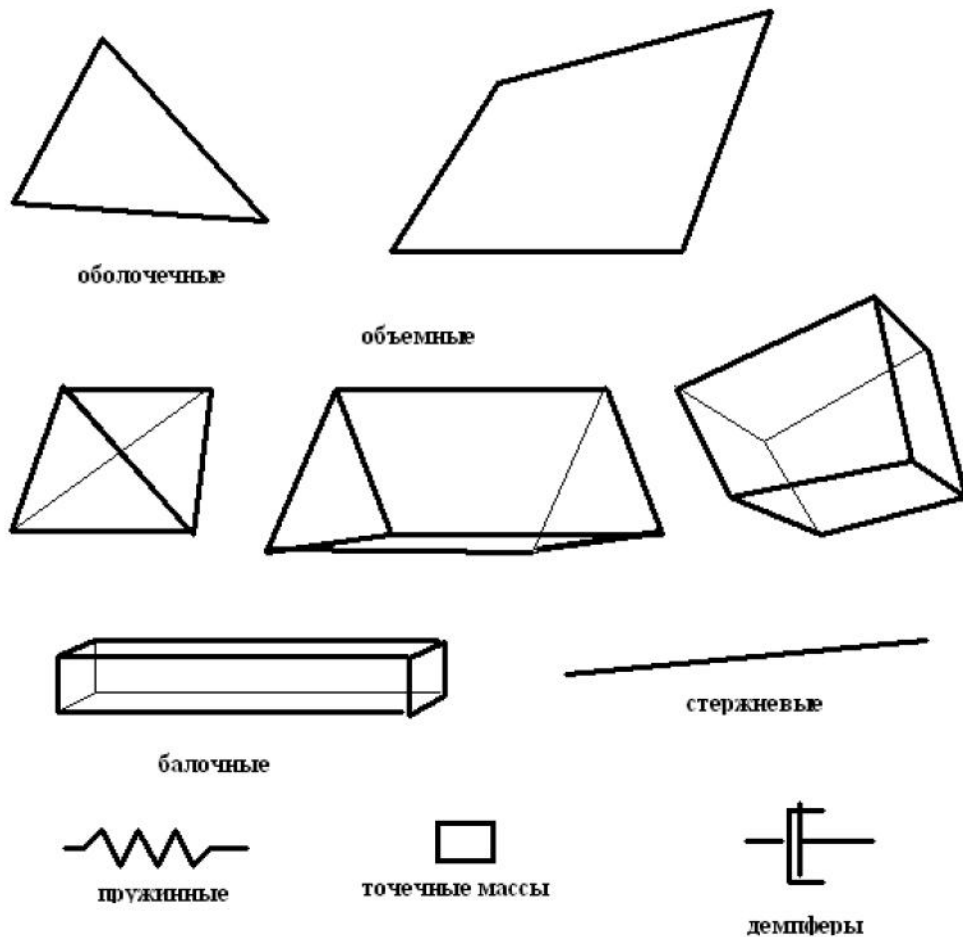


Рис. 5.1. Конечные элементы программы LS-DYNA [12]

Тип элемента характеризуется такими параметрами как формулировка конечного элемента, правило интегрирования, толщина элемента в узле и свойства поперечного сечения.

Типы элементов применяемые при ОМД:

*SECTION_SOLID – карта предназначена для определения свойств поперечного сечения для объемных элементов.

*SECTION_SHELL – карта предназначена для определения свойств поперечного сечения для оболочечных элементов

5.2. Объемный элемент [12]

Объемные (Solid) элементы – 3-х мерные конечные элементы, которые могут моделировать твердые тела и структуру без упрощения геометрии:

- не требуется никаких геометрических, конструктивных и других допущений;

- граничные условия обрабатываются более реалистично (по сравнению с shell или beam);

- конечно-элементная сетка выглядит как физическая система.

Минусы:

- дополнительное время на подготовку сетки;

- долгое время расчета;

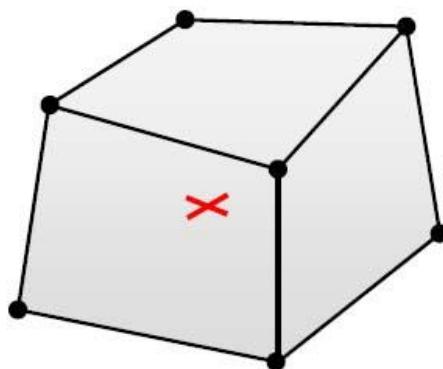
- низкая производительность для тонкостенных конструкций (проблемы заклинивания).

5.2.1. Объемные шестигранные элементы [24]

Наиболее применяемые формулировки solid элементов

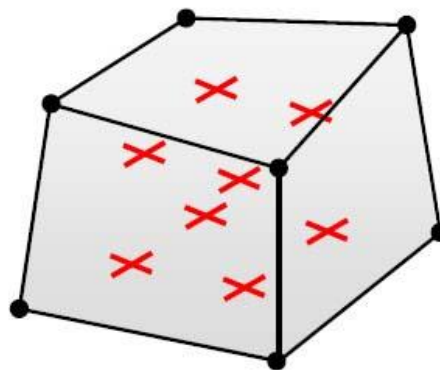
ELFORM = 1

- пониженное интегрирование;
- эффективный и точный;
- работает даже при больших деформациях;
- необходим контроль искажения “hourglass”.



ELFORM = 2

- полное интегрирование;
- медленнее чем ELFORM = 1;
- слишком жесткий во многих случаях (особенно при плохих пропорциях, блокировка сдвига);
- более нестабилен при больших деформациях.



Рекомендации:

- использовать формулировку с пониженным интегрированием №1 (по умолчанию) с определением контроля искажения hourglass;
- при сильных искажениях solid элементов использовать полноинтегрированную формулировку №2;
- при плохих пропорциях solid элементов использовать формулировки -1/-2

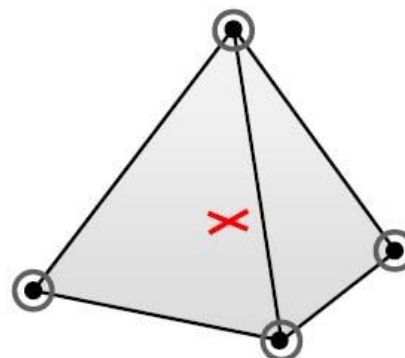
5.2.2. Объемные тетраэдральные элементы [24]

ELFORM = 13

- напряжение в одной точке с узловым средним давлением;
- смягченное объемное заклинивание;
- лучшая производительность чем ELFORM=10 если $\mu > 0$ (металлы, резины)
- реализована для материалов (1, 3, 6, 24, 27, 77, 81, 82, 91, 92, 106, 120, 123, 124, 128, 129, 181, 183, 224, 225, 244).

В этом элементе предотвращается объемное заклинивание путем определения узловых объемов и оценивая средние узловые давления в этих объемах.

Можно использовать в явных динамических



5.2.3. *SECTION_SOLID

Карта предназначена для определения свойств поперечного сечения для объемных элементов сплошной среды.

ELFORM – формулировка элемента

5.3. Оболочечный элемент [25]

5.3.1. Обзор shell формулировок

Часто в конструкции изделия используются тонколистовые детали. Например, кузов автомобиля. Для моделирования обшивки, элементов кузова и других тонколистовых конструкций используются shell элементы

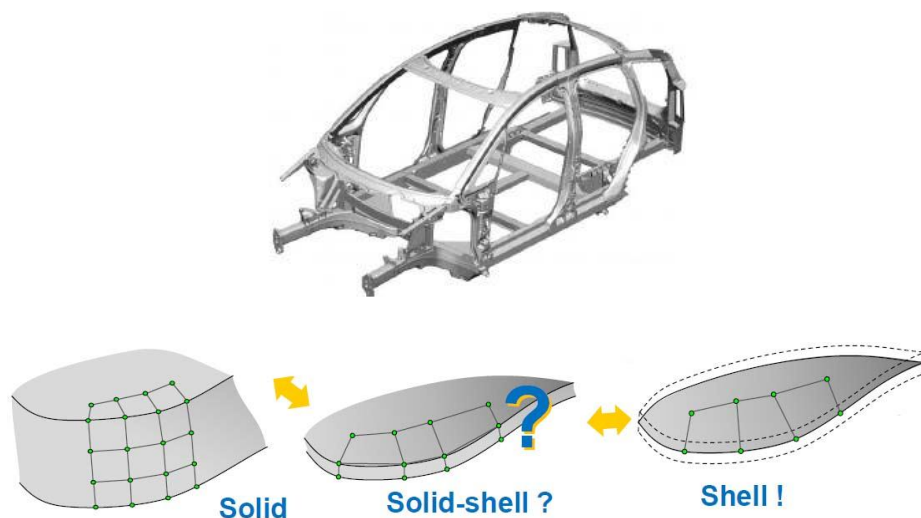


Рис. 5.2. Создание shell элементов [25]

При исследовании операций листовой штамповки, гибки вытяжки, где изменение толщины минимально, shell элементы более адекватно и правильно моделируют данный процесс. К примеру, получение складок на листовых деталях, проявление которых на shell элементах гораздо проще, реалистичнее и правильнее чем на solid элементах. Т.е. shell эле-

менты применяют там где это физически обосновано и соответствует реальному процессу или объекту.

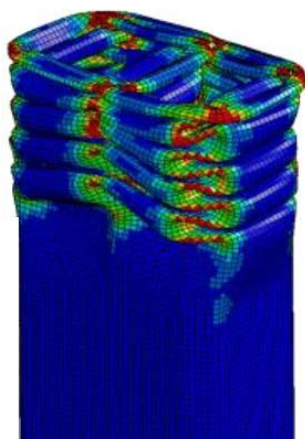


Рис. 5.3. Реалистичное деформирование shell элемента [25]

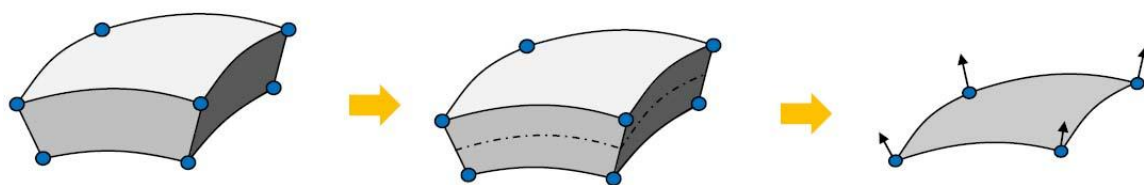
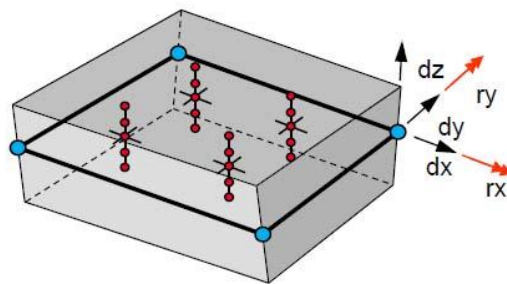


Рис. 5.4. Solid элемент → средняя поверхность в характерной плоскости → shell элемент [25]

<p>Belytschko-Tsay shell формулировка ELFORM = 2 (по умолчанию)</p> <ul style="list-style-type: none"> - очень эффективна; - интегрирование в 1 точке; - билинейная узловая интерполяция; - необходим контроль hourglass; - жесткость при изгибе (параметр BWC в карте *Control_shell) - имеет вращательную формулировку; - не применяется при ударе; - не используется в грубых сетках. 	
<p>Fully integrated shell element</p>	

ELFORM = 16

- интегрирование 2×2 ;
- билинейная узловая интерполяция;
- не нужен контроль hourglass (введена поправка на поперечное сдвиговое усилие);
- hourglass типа 8 добавляет жесткость при изгибе (может улучшить конвергенцию);
- наименее дорого из полноинтегрированных (2×2) элементов;
- в 2-3 раза дольше чем Belytschko-Tsay;
- рекомендуется для неявного анализа.



Интегрирование по толщине

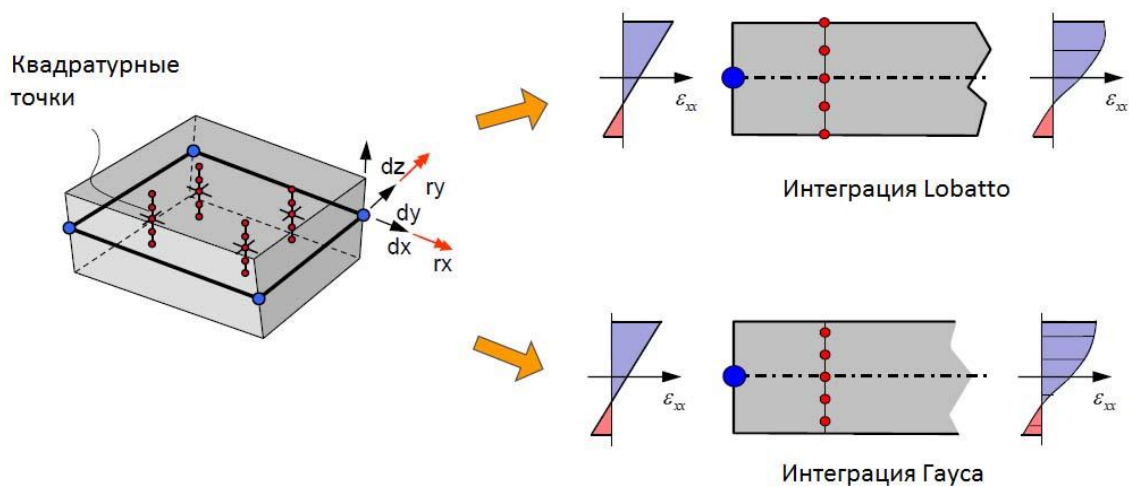


Рис. 5.5. Интегрирование по толщине [25]

Возможность изменения толщины оболочек (ISTUPD из карты

*Control_shell)

ISTUPD=1 - Деформации вызывают изменение толщины в элементах оболочки. Вариант важен при формовании листового металла

Жесткость при изгибе для Belytschko-Tsay shell (BWC из карты *Control_shell)

BWC=1 - добавлена жесткость при изгибе

Обновление напряжений (OSU) и Нумерация инвариантных узлов (INN)

OSU=1 – включает обновление напряжений

INN=3(4) – включает нумерация инвариантных узлов

5.3.2. *SECTION_SHELL

Карта предназначена для определения свойств поперечного сечения для оболочечных элементов.

ELFORM - формулировка элементов;

SHRF - корректирующий коэффициент сдвига, устанавливаем значение 0,83333;

NIP - число точек интегрирования по толщине;

T – толщина оболочечного элемента.

5.3.3. Интегрирование элемента

Для повышения эффективности и снижения вычислительных затрат в LS-DYNA преимущественно используются элементы первого порядка с однотоочечной схемой интегрирования по объему. Такая схема менее чувствительна к изменению начальной геометрии элемента, что является немаловажным в процессах с большими деформациями. Недостатком однотоочечной схемы интегрирования является возможность проявления нефизических деформационных мод с нулевой энергией (Hourglass modes). Программа содержит алгоритмы автоматического контроля и ограничения Hourglass modes, которые следует активизировать при использовании однотоочечной схемы [12].

Одноточечное интегрирование означает, что все параметры (давление, плотность, внутренняя энергия) внутри конечного элемента постоянны. Смещения, скорости и ускорения определяются в узлах. На основе билинейной аппроксимации скоростей внутри четырехугольного элемента определяются градиенты скоростей, по ним находятся изменение плотности и внутренней энергии на следующем временном такте для каждого элемента. Далее определяется давление, по которому однозначно определяются узловые силы в каждом элементе, затем узловые ускорения по которым находятся новые значения скоростей и смещений для следующего временного шага.

Полноинтегрированные элементы, означает, что параметры рассчитываются в узлах.

За число точек интегрирования по толщине для оболочечного элемента отвечает пункт NIP в карте *SECTION_SHELL.

Для любой формулировки оболочечного элемента может быть указано необходимое число точек интегрирования по толщине. Для упругого материала достаточно 2 точек (это значение по умолчанию), для материала, учитывающего пластичность – 5 точек и более.

Оболочечные элементы это 3D элементы, находящиеся в плоско-напряженном состоянии. Поэтому программа рассчитывает так, чтобы его составляющая, нормальная к срединной поверхности элемента, равнялась нулю. Точки интегрирования, как по плоскости, так и по толщине элемента располагаются по определенным правилам. На рис. 5.6. показан оболочечный элемент, имеющий одну точку интегрирования по плоскости (использующий редуцированное интегрирование) и несколько точек интегрирования по толщине.

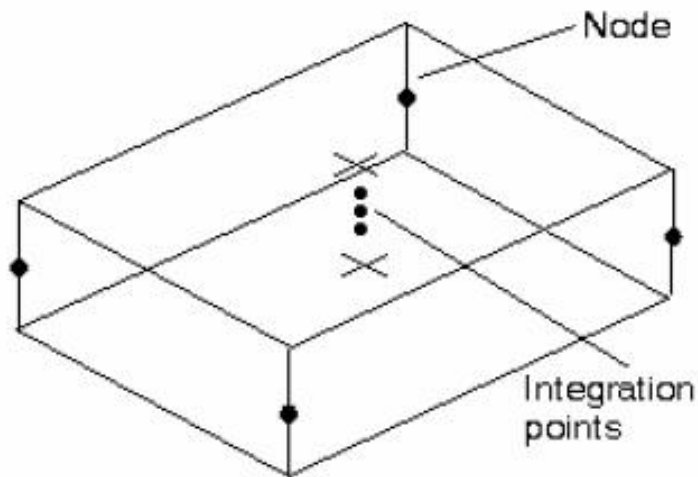


Рис. 5.6. Точки интегрирования [12]

5.4. Искажения Hourglass

Несмотря на надежность при больших деформациях и расширенные возможности экономии суммарного компьютерного времени, solid и shell элементы с единственной интегрированной точкой (сокращенные), которые используются в LS-DYNA, склонны к искажению. Эти искажения, обычно называемые hourglassing, имеют колебательную природу и стремятся иметь периоды значительно короче чем в случае общего структурного ответа (то есть, в результате получаются математические значения, которые физически невозможны).

В типичном случае они не сохраняют жесткость, что приводит к появлению зигзагообразной сетки известной как деформации hourglass. Появление hourglassing деформаций в процессе анализа может исказить результаты, и обязательно должны быть сведены к минимуму [12].

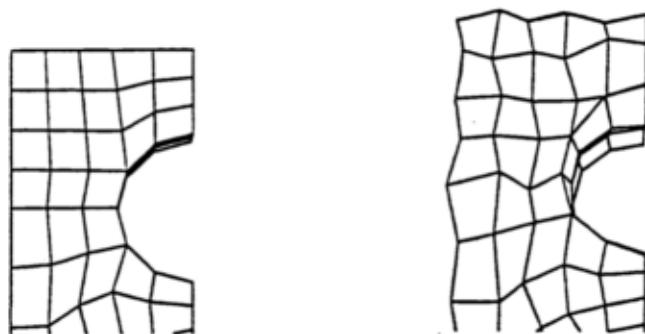


Рис. 5.8. Не деформированная и деформированная сетка с эффектом hourglass [12]

Для предотвращения искажения hourglassing используется контроль искажения.

5.4.1. *HOURLASS

Карта предназначена для подавления искажений формы элементов под воздействием искажения hourglass

ИHQ – тип контроля искажения;

QM – параметр контроля искажения.

В задачах деформирования твердых тел используется контроль по жесткости (ИHQ) №4 (5), параметр QM=0,03-0,1.

Подавление искажений формы элемента введением вязкости рекомендуется в расчетах деформирования при высоких скоростях. Подавление искажений введением жесткости является предпочтительным при более низких скоростях, особенно если число шагов решения велико.

Правильные методы моделирования в значительной степени предотвращают деформации hourglass. Основные принципы - это использование, однородной сетки, избегая концентрации нагрузок в единственной точке. Проявившись в одном элементе, hourglassing передается соседним, все точечные нагрузки распространяются на области нескольких, соседних узлов. В целом, упорядочивание общей сетки почти всегда значительно уменьшает эффект hourglassing.

Одним из методов управления hourglass деформациями является регулирование вязкости материала модели (model's bulk viscosity), используя карту *CONTROL_BULK_VISCOSITY.

Другое, обычно более приемлемое решение hourglassing проблем - использование полностью встроенной формулировки (fully integrated formulations) для оболоченных и объемных элементов. Эта элементная формулировка никогда не испытает hourglass деформаций. Однако, эти опции требуют больших затрат процессорного времени, чем другие элементные формулировки, и могут привести к излишней жесткости (блокировке) параметров модели, что, в ряде случаев, делает невозможным мо-

делирование таких процессов как обработка давлением, формообразование, и скручивание. Блокировка исправлена в оболоченных элементах за счет использования предполагаемых областей напряжения.

При выполнении динамического анализа с сокращенными интегрированными элементами, всегда важно определить насколько hourglass эффекты повлияли на полученные результаты. Так, общее основное правило - hourglass энергия не должна превышать 10% внутренней энергии (internal energy). Hourglass энергию можно сравнить с внутренней энергией при просмотре ASCII файлов GLSTAT и MATSUM. Чтобы быть уверенным, что результаты hourglass энергии будут отражены в этих файлах, в поле HGEN карты *CONTROL_ENERGY должно быть установлено значение 1.

ГЛАВА 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЖЕНИЯ И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

6.1. Определение нагружения [12]

После построения модели к ней необходимо приложить нагрузки, для этого необходимо определить график изменения нагрузки во времени.

Для определения нагрузки предварительно должны быть определены части (*PART) или наборы узлов (*SET_NODE).

6.1.1. *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION

Карта предназначена для определения для части, узла или набора узлов параметров движения (скорости, ускорения или смещения). Движение также можно задавать для твердых тел.

В карте определяются следующие параметры:

DOF – определение степени свободы по которой определяется движение,

VAD – определение перемещения/скорость/ускорения,

LCID – график движения,

SF – коэффициент масштабирования.

6.1.2. *LOAD_BODY_

Карта предназначена для определения объемных сил, обусловленных действием заданного ускорения или угловой скорости.

В карте определяются следующие параметры:

LCID – идентификатор задающей кривой;

SF – коэффициент масштабирования.

6.1.3. *DEFINE_CURVE

Карта определяет график изменения нагрузки во времени, A1 – данные по оси X (время), O1 - данные по оси Y (значения параметра).

График движения можно задать через функцию используя карту *Define_curve_function.

6.2. Определение начальной скорости

6.2.1. *INITIAL_VELOCITY_GENERATION

Карта предназначена для определения начальной линейной скорости в узлах с помощью идентификаторов узловых наборов.

В карте определяются следующие параметры:

VX, VY, VZ – значения начальной скорости по осям,

XC, YC, ZC – координаты оси вращения,

NX, NY, NZ – направляющие косинусы по осям.

С помощью карты *INITIAL_VELOCITY_RIGID_BODY можно определять начальную скорость твердых тел.

6.3. Определение узловых наборов

Карта *SET_NODE позволяет определять наборы узлов.

6.4. Типы ограничений [12]

Перед началом процесса получения решения, нужно приложить к модели необходимые ограничения.

Варианты определения ограничений:

1. *BOUNDARY_SPC;
2. *CONSTRAINED_GLOBAL.

Карта *BOUNDARY_SPC позволяет задавать однотоочечные ограничения для узловых точек.

Ограничения накладываается в параметре DOF (1-ограничение есть, 0 – ограничения нет).

Данное ограничение нельзя применять к узлам принадлежащим твердым телам и в расчетах на адвекцию, поскольку идентификаторы узлов могут изменяться во время адаптивного этапа.

В этом случае используют карту *CONSTRAINED_GLOBAL.

Карта *CONSTRAINED_GLOBAL позволяет задавать глобальную плоскость граничных условий-ограничений.

Параметры ограничения вводятся в параметрах TC (поступательное движение) и RC (вращательное движение).

Узлы в пределах допуска (который зависит от размера сетки) привязаны к глобальной плоскости.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

7.1. Алгоритмы контактного взаимодействия

Контактное взаимодействие является неотъемлемой частью многих задач с большими деформациями.

В LS-DYNA, контакт определяется идентификацией (через части, компоненты, наборы компонентов, и/или наборы узлов). Расположение проверяется в отношении проникновения slave (подчиненной) части через master (главную) часть. Поиск проникновений, с использованием различных алгоритмов, производится на каждом шаге расчета. В случае контакта, основанного на штрафе (penalty-based contact), усилия сопротивления проникновению пропорциональны глубине проникновения, так, что они, в конце концов, устраняют это проникновение. Другой контакт основан на ограничении (constrained-based contact). Твердые тела могут быть включены в любой контакт, основанный на штрафе. Для реалистичного распределения контактных усилий рекомендуется, чтобы сетка на твердом теле была такой же точной, как и сетка деформируемого тела [12].

Иногда удобно и эффективно определение одиночного контакта (single) в модели.

Рекомендуется избегать определения избыточных контактов.

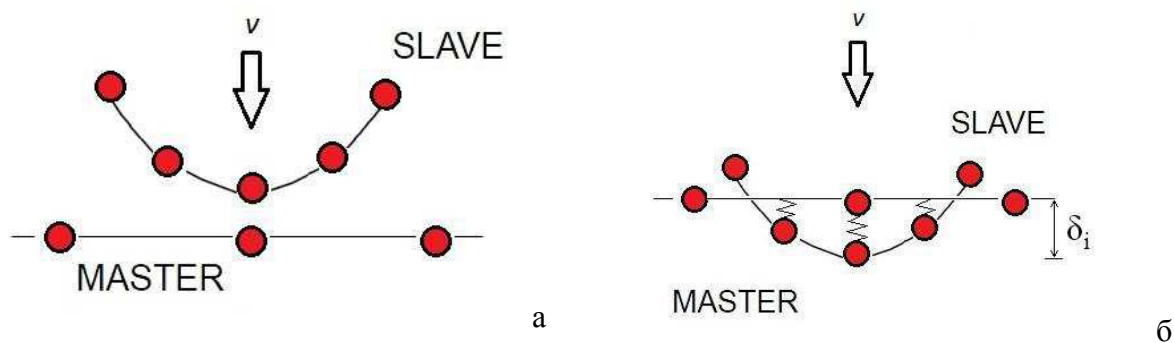


Рис. 7.1. Механика работы контакта штрафного типа: а – до проникновения, б – после проникновения, создание выталкивающего усилия $F_i = \delta_i k$

7.2. Типы контактов для процессов ОМД

Автоматический тип контакта в LS-DYNA определяется опцией AUTOMATIC в команде *CONTACT [12].

Для описания контакта при деформировании может применяться один из следующих контактов:

- *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE;
- *CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE.

Для штамповки листовых металлов (тип элемента shell), рекомендуется специальные формующие контакты:

- *CONTACT_FORMING_SURFACE_TO_SURFACE;
- *CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE.

При формующем контакте ориентация автоматическая. В общем случае опция ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE рекомендуется, когда проникновение мастер узлов через подчиненную поверхность применяется при адаптивном перестроении сетки.

Карты *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE и *CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACE применяются при контакте с разрушением элементов (например, в разделительных процессах ОМД) и имеют дополнительные 3 опции ISYM, EROSOP, IADJ, настраивающий данный контакт.

Основные параметры для карты контакта:

SSID, MSID – номера подчиненный и главной части/набора;

SSTYP, MSTYP – тип контактной области (часть, набор части/узлов и др.);

FS – статический коэффициент трения,

FD – динамический коэффициент трения,

VC – коэффициент вязкого трения, является необходимым для ограничения максимума силы трения;

VDC – коэффициент демпфирования контакта.

ГЛАВА 8

НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТА

8.1. Шаг интегрирования

Шаг интегрирования рассчитывается автоматически (ранее в главе 1). Для изменения временного шага используется карта *CONTROL_TIMESTEP и параметр DT2MS (со значением “минус”).

Для многих задач ОМД можно увеличивать величину временного шага в 5-10 раз. Разница при использовании масштабирования временного шага заключается в появлении осциллирующих воздействий и возможной потерей контакта.

*CONTROL_TIMESTEP

В карте определяются следующие параметры:

TSSFAC - коэффициент пересчета для исходного шага по времени;

DT2MS – величина временного шага.

8.2. Настройка параметров решателя

Настройка параметров включает в себя определение контрольных карт, сохранения выходных данных и т.п.

8.2.1. Контрольные карты

*CONTROL_ENERGY	Карта предназначена для обеспечения управляющих параметров для учета энергии.
*CONTROL_SOLUTION	Карта предназначена для определения типа анализа (структурный, тепловой)
*CONTROL_TERMINATION	Карта предназначена для установки времени завершения расчета
*CONTROL_TIMESTEP	Карта предназначена для определения вре-

	менного шага
CONTROL_CONTACT	Карта предназначена для определения дополнительных параметров контакта
*CONTROL_SHELL	Карта предназначена для определения дополнительных параметров оболочечных элементов
*CONTROL_THERMAL_NONLINEAR; *CONTROL_THERMAL_SOLVER; *CONTROL_THERMAL_TIMESTEP	Контрольные карты для настройки тепловых параметров процесса

***CONTROL_ENERGY**

Карта предназначена для обеспечения управляющих параметров для опций учета энергии.

В карте определяются следующие параметры:

HGEN - опция сохранения энергии искажений элементов по типу песочных часов

RWEN - опция сохранения диссипации энергии

SLNTEN - опция сохранения энергии по границе скольжения контактов

RYLEN - Опция сохранения рассеяния энергии с учетом затухания

***CONTROL_SOLUTION**

Карта предназначена для определения процедуры выполнения анализа, если выполняется только тепловой или связанный тепловой анализ.

В карте определяются следующие параметры:

SOLN – выбор прочностного/теплового расчета

***CONTROL_TERMINATION**

Карта предназначена для завершения выполнения задания.

В карте определяются следующие параметры:

ENDTIM – время завершения расчета

8.2.2. Карты вывода

***DATABASE_ASCII_OPTION**

Опции этой команды включают следующие файлы в формате ASCII:

GLSTAT	Глобальные данные, энергия всей модели
MATSUM	Энергия частей модели
RCFORC	Данные о усилиях на поверхности раздела
SECFORC	Усилия в поперечном сечении.
SLEOUT	Энергия на поверхности скольжения двух материалов.
SPCFORC	Усилия реакции для одноточечного ограничения (SPC)

***DATABASE_BINARY_OPTION**

Опции этого ключевого слова определяют выходные данные:

D3DUMP	Файлы рестарта, сохранение всей базы данных. Частота вывода задается в циклах
D3PLOT	Файла сохранения результатов рпсчета
INTFOR	Выходные данные о контактных границах

8.3. Адаптивное разбиение

При решении задач с высокой геометрической нелинейностью нередки ситуации, когда деформирование конструкции приводит к заметным искажениям сетки. В результате элементы могут стать слишком вытянутыми, имеющими острые углы или другие дефекты геометрии ("скручивание" -warping - для оболочечных элементов). Чтобы избежать связанных с этим вычислительных проблем, в пакете LS-DYNA используется специальная технология - динамическое перестроение сетки конечных элементов (remeshing) [7].

Основные подходы адаптированного перестроения:

1. H-адаптивное перестроение для shell элементов;
2. R-remeshing для solid элементов;
3. R-remeshing EFG для solid элементов с перестроением по методу Галеркина.

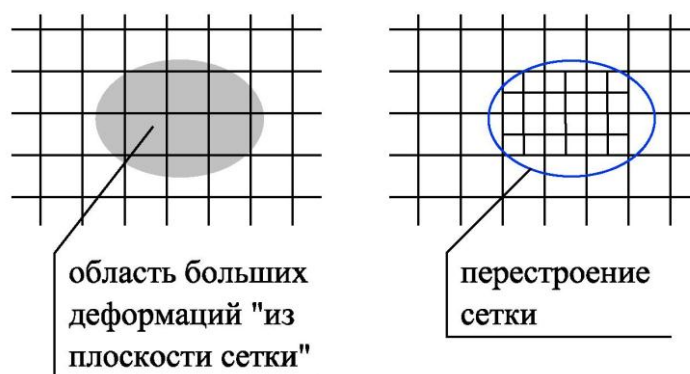


Рис. 8.1. Перестроение сетки в зоне больших деформаций [7]

Для большинства задач рекомендуется делать начальный анализ без адаптивного объединения. Если результаты начального анализа показывают высоко искаженную сетку и если решение кажется неправильным, то можно включить адаптивно перестроение. Адаптивное перестроение может также использоваться когда анализ ограничивается в LS-DYNA с “негативным объемом элемента” ошибкой [7].

8.3.1. *CONTROL_ADAPTIVE

Карта предназначена для активизации адаптивного перестроения сетки. Части модели, сетка которых перестраивается адаптивно, задаются картой *PART.

В карте определяются следующие параметры:

ADPFREQ - промежуток времени между адаптивными перестроениями сетки;

ADPTOL – величина допуска в градусах (при ADPOPT=1 или 2);

ADPOPT - опции адаптации;

MAXLVL - максимальное число уровней измельчения сетки.

8.4. Варианты запуска файла на расчет

После того как k-файл получен, его необходимо запустить на расчет.

Существует несколько методов запуска k-файла:

- I. Через LS-DYNA program manager;
- II. Запуск при помощи программы k-runner [11];
- III. При помощи bat-файла;
- IV. Запуск через программу ANSYS APDL Product launcher (при наличии лицензии ANSYS).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ В LS-PREPOST [9]

9.1. Визуализация результатов

Постпроцессорная обработка, следующая за стадиями препроцессорной подготовки и получения решения, позволяет обратиться к результатам решения и интерпретировать их нужным образом, используя набор команд и возможности интерфейса. Результаты решения (применительно к задачам инженерной механики) включают значения перемещений, напряжений, деформаций, энергии и др. Результатом работы программы может быть как графическое, так и табличное представление результатов. Графическое изображение можно вывести на монитор, преобразовать в файлы с различными расширениями (форматы BMP, JPEG и др.). Программа позволяет создать анимационные файлы, что позволяет наблюдать анимацию процесса. На стадии выполнения решения результаты сохраняются в базе данных. Кроме того, средства графического отображения информации включают векторное представление, эпюры по выбранному сечению и др. При векторном представлении используются отрезки со стрелками, чтобы показать как абсолютное значение, так и направление векторной величины, например, вектора перемещения [10].

Визуализация результатов осуществляется по иконкам **POST** →

Fricomp.

Основные закладки:

Stress – глобальные компоненты напряжений;

Ndv – узловые перемещения, скорости и ускорения;

Result – результирующие компоненты напряжений;

Strain – логарифмические компоненты деформации;

Misc – давление, температура, толщина оболочки, временной шаг, параметры *lode*, *triaxiality* и др.;

Infin – бесконечно малые деформации;

Green – деформации Green-St. Venant;

Almans – деформация Almans;

S.Rate – степень деформации;
Elastic – упругие деформации;
FLD – компоненты деформации FLD (forming limit diagram).

9.2. Графики и таблицы

Вывод графиков параметров от времени осуществляется по иконкам **POST** → **History**.

Global – энергетические и кинематические данные для полной модели;

Part – энергетические и кинематические данные для частей;

Nodal – кинематические данные (перемещения, скорости, ускорения) для узлов;

Element – данные напряжений и деформаций для элементов;

- *Value* – установить значение элемента мин/макс значения;

- *E-Type* – выбрать тип элемента;

- *E-Axes* – глобальные или локальные оси;

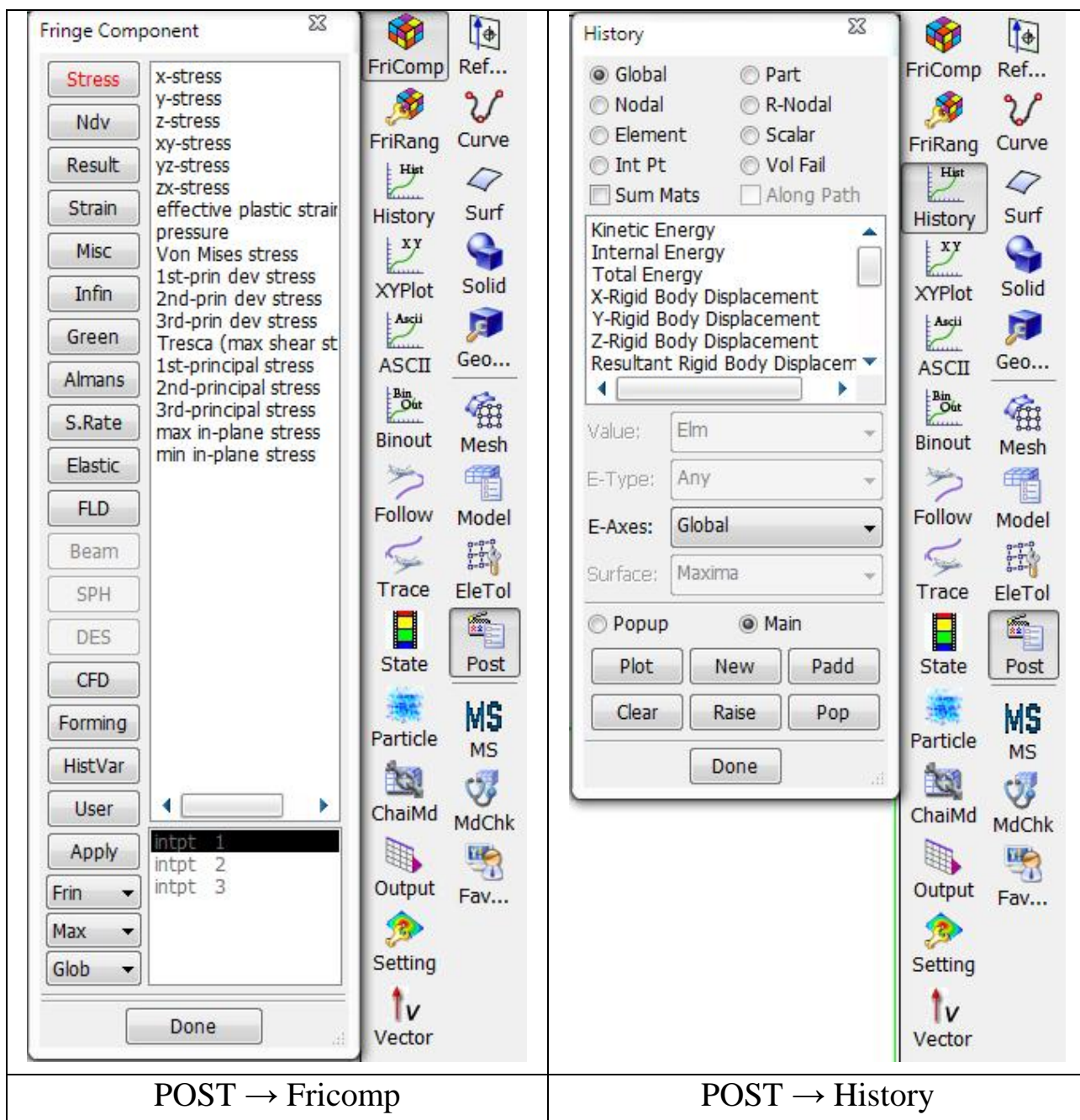
- *Surface* – выбрать расположение оболочки через толщину;

Int Pt – данные напряжений для элементов с интеграцией точек данных;

Scalar – вывод скалярных данных по предварительно определенному компоненту в *Fcomp*.

Вывод графиков из выходных файлов ASCII (American standart code for information interchange) с помощью кнопки **POST** → **ASCII**.

Выводятся данные которые были изначально указаны в картах *Database_option. Например, *glstat* – глобальные данные по энергии системы, *matsum* – данные энергии для выбранных частей, *rcforc* – данные по усилиям и т.п.



POST → Fricomp

POST → History

Рис. 9.1. Меню постпроцессорной обработки (Fricomp, History)

Сохранить данные в виде таблицы позволяют кнопки **POST** → **Output**. Сохранить табличные данные можно также после создания графика и используя кнопку *SAVE*.

Кнопка **POST** → **XY Plot** с расширением main позволяет разделить экран на отдельные части.

9.3. Секущие плоскости

Для создания секущей плоскости пользуются кнопками **Model** → **Section Plane**.

Могут быть выбраны различные опции определения секущей плоскости (базовая точка и направление нормали (по умолчанию), определение плоскости при помощи 3-х узлов, 2 узла и направление определяющей плоскости).

Секущей плоскостью может быть отсечена часть модели (*Off*, *Clip+*, *Clip-*).

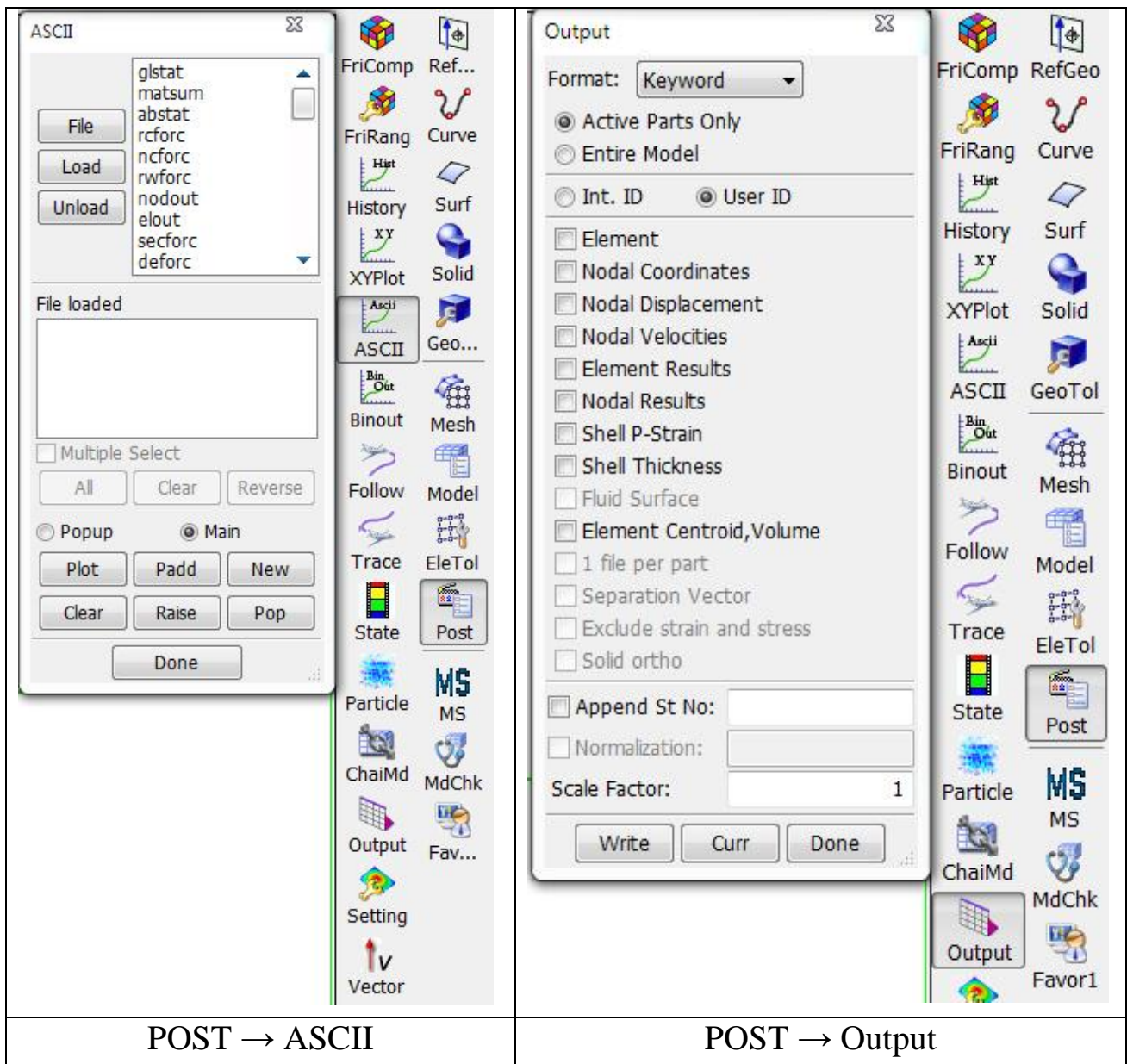


Рис. 9.2. Меню постпроцессорной обработки (ASCII, Output)

Еще одной особенностью является возможность строить эпюры на shell объектах с помощью опции “Line”.

Опция “Force” позволяет высчитывать и вычерчивать по сечению значения сил, моментов, площадей и др.

На сечении можно с помощью опции *Meas* измерять координаты, дистанции, углы, радиуса между узлами.

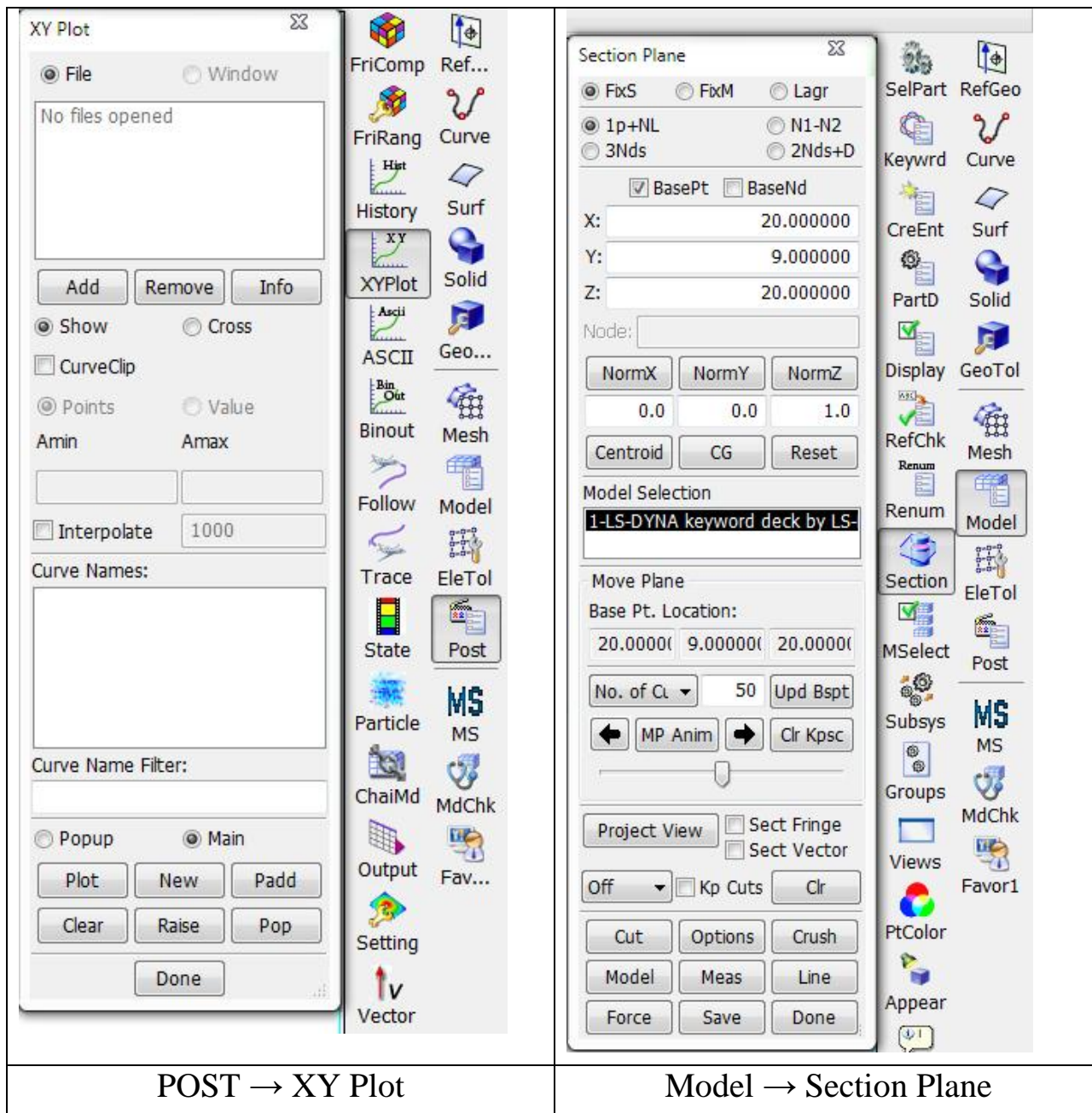


Рис. 9.3. Меню постпроцессорной обработки (XY Plot, Section Plane)

9.4. Векторные результаты

Создать векторы можно используя кнопки **POST** → **Vector**.

Векторы можно указать по таким параметрам как: нормали оболочек, перемещение, скорости, ускорение, главные напряжения и др.

9.5. Анимации

Для анимации процесса на нижней панели имеется кнопка **Anim**. Разобраться в работе панели Animate обычно сложности не вызывает.

Для определения точек отсчета или плоскости для последующей анимации пользуются кнопками **POST** → **Follow**.

Для определения пути узла используют кнопки **POST** → **Trace**.

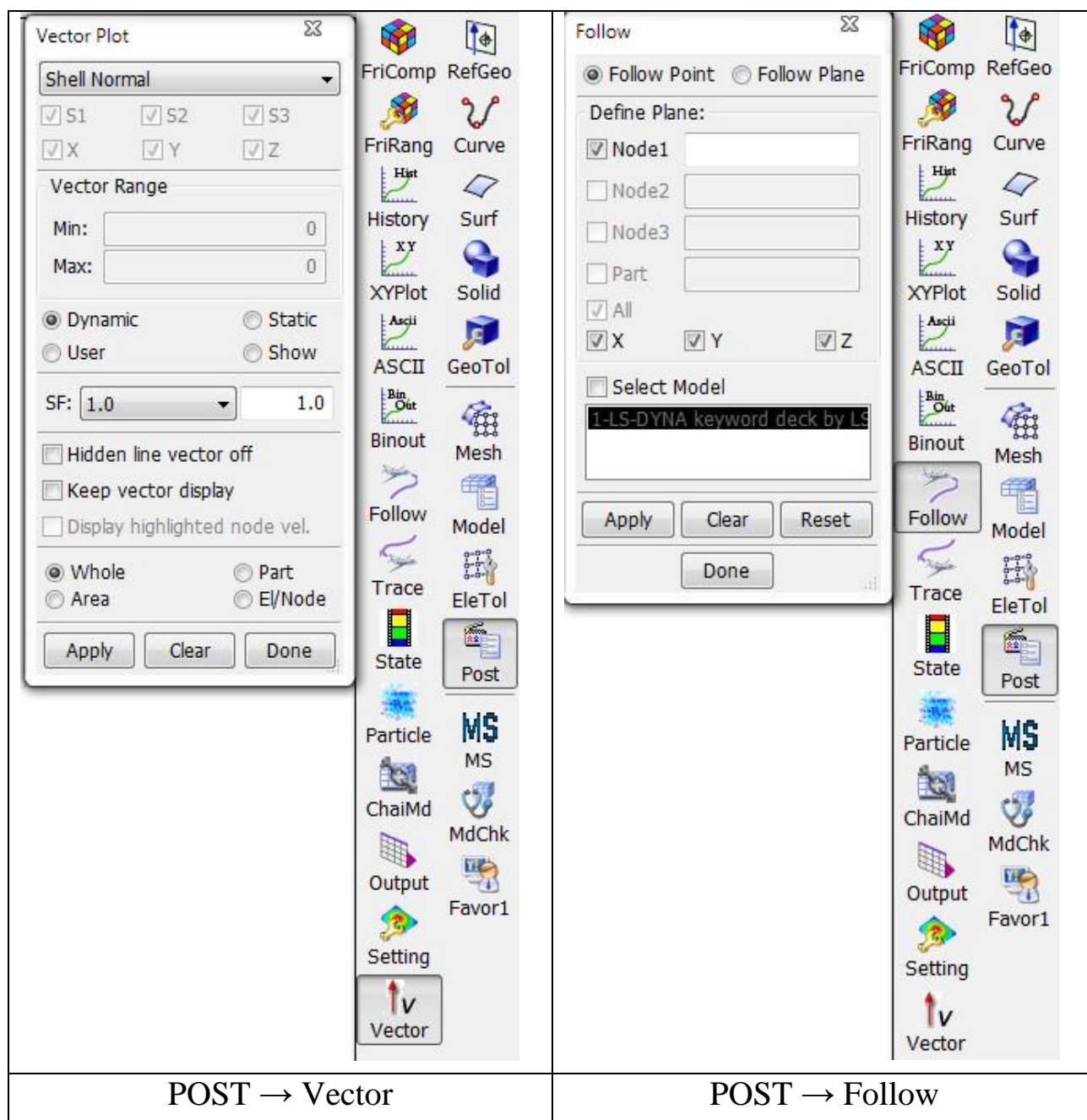
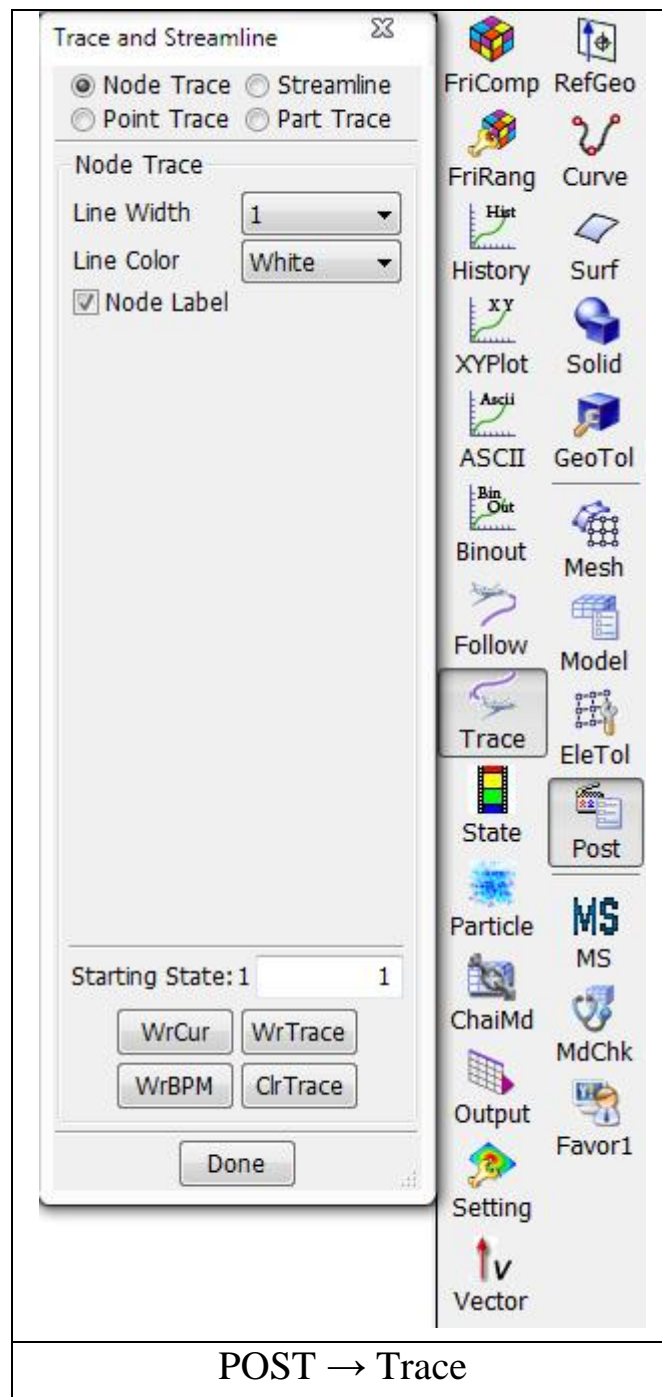


Рис. 9.4. Меню постпроцессорной обработки (Vector, Follow, Trace)



POST → Trace

Рис. 9.5. Меню постпроцессорной обработки (Trace)

Семинар 4	Вытяжка детали из листовой заготовки с адаптивным перестроением
Семинар 5	Горячая штамповка (осадка) цилиндрической заготовки
Семинар 6	Прокатка заготовки между цилиндрическими роликами

ГЛАВА 10

10.1. Параметры для моделирования процессов ОМД [27]

1. При явном моделировании процесса формообразования время выполнения может быть значительно уменьшено, используя mass scaling и/или искусственно высокую скорость инструмента. Оба этих метода вносят искусственные динамические эффекты, которые должны быть минимизированы. Единственный независимый параметр, описывающий искусственные динамические эффекты – это число явных временных шагов (циклов), принятых в миллиметрах движения инструмента.

2. Больше циклов (в миллиметрах) требуется когда формирующий процесс позволяет большему “несдержанному” движению листа. Когда лист сильно ограничен с деталями и основанием штампа требуется меньше циклов в миллиметрах. Для большинства моделирования, значение 100-1000 циклов в миллиметрах производит реальные результаты. Если возможно или когда проводите повторное моделирование, используйте два различных значения и сравните результаты, чтобы оценить чувствительность к искусственным динамическим эффектам.

3. Рекомендуется выбрать максимальную скорость инструмента 2.0 метра/сек, начинать и заканчивать моделирование с нулевой скоростью. Может использоваться простой профиль трапецевидной скорости как показано на рисунке. Используйте массовое масштабирование временного шага (параметр **dt2ms**), чтобы достигнуть требуемого числа циклов в миллиметрах согласно простой формуле:

$$\text{Time step size} = 1.0 / (\text{max tool velocity} * \text{cycles per millimeter})$$

Размер временного шага = 1/(максимальная скорость инструмента * цикл
в мм)

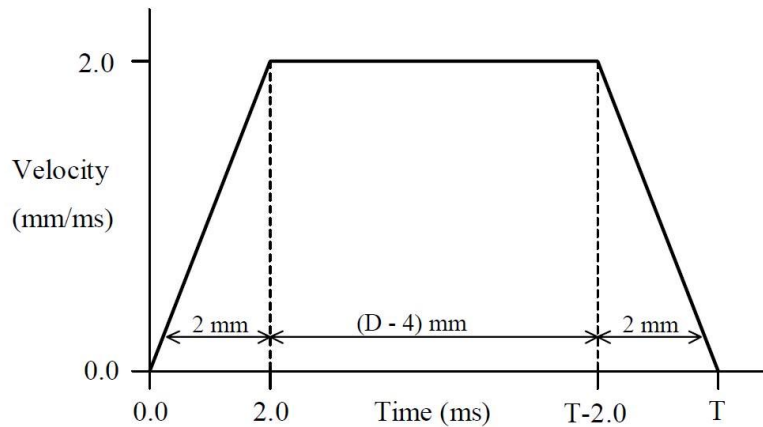


Рис. 10.1. Трапециевидный график нагружения инструмента

*SECTION_SHELL

1. Для анализа только процесса формообразования, по умолчанию рекомендуется тип оболочки #2.
2. Если будет выполнен анализ упругого пружинения после формования рекомендуется более долгий - тип оболочки #16 для обеих операций моделирования.
3. Число интеграционных точек по толщине **nip** также выбирается используя этот keyword. Три точки могут быть адекватны для анализа формования, но если будет выполнен анализ пружинения необходимо использовать 5 точек или лучше 7 точек.

*CONTROL_SHELL

4. Если некоторые треугольники необходимы, LS-DYNA автоматически применит более точную C0 оболочечную треугольную формулировку когда выбран флаг **itrist**.
5. Активизируйте изменение толщины оболочечного элемента, используя флаг **istupd**. Иначе элементы останутся постоянной толщины.
6. Если используете формулировку #2, активизируйте деформирующую жесткость используя параметр **bwc**.

*CONTROL_HOURLGLASS

7. Для металлоформовки рекомендуется контроль искажения Hourglass по жесткостному параметру. Выберите **ihq** или как тип 4 или 5.

Материалы

8. Несколько моделей материала доступны для неявного пружинения, включая типы 1, 3, 18, 24, 36 и 37.

Контакт

9. Рекомендуется основанное на “Штрафе” (Penalty-based) контактное взаимодействие для большинства процессов металлоформовки.

10. Рекомендуется тип контакта “forming-one-way”.

11. Рекомендуется поверхность, определенная с помощью части ID (**sstyp=mstyp=3**).

12. Если невозможно создать подобие инструмента, то подобие может быть создана используя отрицательную “master” толщину **mst**.

*CONTROL_CONTACT

10. Установите масштабный фактор “penalty” для всех сопряжений 0.010 используя **slsfac**.

11. Активизируйте подобие толщины для листа используя **shlthk**.

12. Рекомендуется пренебрегать толщиной в твердых инструментах.

13. Для моделирования формования рекомендуется установить 20 процентов от критического вязкого демпфирования (**vdc**) для устранения высокочастотных динамических эффектов.

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID

14. Движение инструмента определять используя

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID карту

15. Может быть задана скорость или перемещение. Контроль перемещения (**vad=2**) рекомендуется для неявного моделирования формовки, где большое время шага, так как управление смещением более точно для перемещения инструмента.

16. Движение инструмента (смещение или скорость) должно изменяться гладко во времени, начиная и заканчивая с нулевой скоростью.

17. Нет необходимости включать нулевую скорость “захват времени” в конце явного формулирующего моделирования перед процедурой пружинения.

Адаптирование

18. Адаптация сетки рекомендуется для автоматического разделения элементов и создания автоматической сетки в областях высокого искажения.

19. Избегайте треугольных элементов, особенно в критических областях.

20. Адаптация сетки каждые 2-4 мм при движении инструмента обычно достаточно (**adpfreq**).

21. Адаптивный допуск **adptol** выбирает допустимое изменение угла. Рекомендуется величина около 4.0 градусов.

22. Метод использует измерение этого угла и выбирается используя **adpopt**. Рекомендуется метод 2.

21. Максимальный угол усовершенствования выбирается с помощью **maxlvl**. Величины в 3-4 рекомендуются в зависимости от начального размера элемента.

22. Полная сетка может быть очищена на один или более уровней при старте моделирования используя параметр **ireflg**

23. Рекомендуемый метод однопроходный (**adpass=1**) с активным look-forward (**adpene > 0.0**). Параметр **adpene** указывает минимально допустимое разделение расстояния перед оценкой искривления инструмента.

24. Адаптивное усовершенствование **level** может быть изменено в некоторых регионах сетки используя адаптивное определение

*DEFINE_BOX_ADAPTIVE

Вывод

25. Особенный интерес для металлоформовочных приложений – бинарный график базы данных, включающий данные конечных деформаций, которые используются в предельных формовочных диаграммах. Включение деформаций в базу данных осуществляется используя

*DATABASE_EXTENT_BINARY флаг **strflg**.

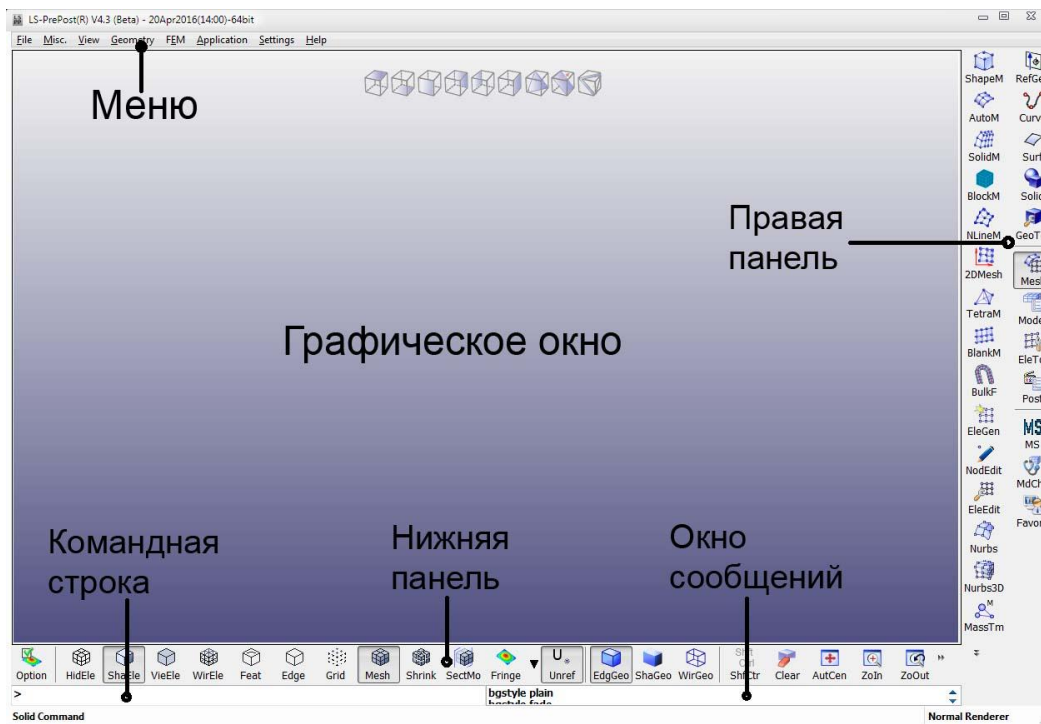
26. RCFORC и BNDOUT базы данных часто требуют, чтобы получить реакции сил через поверхность раздела и зазор к заданному движению.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. <http://www.dynaomd.ru/dyna.htm>
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/LS-DYNA>
3. Курненок А.В. Численное моделирование процессов резанию: учеб. Пособие. Часть 1 / А.В. Курненок, А.Ю. Шурыгин; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2017. – 184 с.
4. LS-DYNA analysis for structural mechanics. Predictive engineering.
5. Криворучко Д.В. Основы 3D-моделирования процессов механической обработки методом конечных элементов: учебное пособие/ Д.В. Криворучко, В.О. Залого, В.Г. Корбач.- Сумы: Изд-во СумДУ, 2009. – 208 с.
6. Илюшкин М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением (осадка цилиндрической заготовки): учебно-методическое пособие / М.В. Илюшкин. – Ульяновск: УлГУ, 2013. – 112 с.
7. Чернявский А.О. Метод конечных элементов. Основы практического применения.
8. Лекции по ANSYS/LS-DYNA и основам LS-PREPOST с примерами решения задач: курс лекций для студ. мех.-мат. фак. обучающихся по специальности 1-31 03 02 «Механика (по направлениям)». В 3 ч.
9. Introduction to LS-PrePost 4.0, Quanding Yan, Philip Ho, LSTC, 2014
10. Ansys/ls-dyna User`s Guide for Release 8.1.
11. [Http://lsdyna-tutorials.com/k-runner](http://lsdyna-tutorials.com/k-runner) - программа запуска к файлов в программе LS-DYNA.
12. LS-DYNA keyword user`s manual volume I, II.
13. <http://www.dynasupport.com/howtos/general/consistent-units> - согласованная система измерения
14. Ansys в руках инженера: Практическое руководство. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
15. Ray Browell, Dr. Guoyo Lin. The power of nonlinear materials capabilities. Ansys solutions 2000, volume 2, number 1.
16. Биргер И.А, Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: учебное пособие. – М.: Наука. 1986.

17. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическим деформациям. Краткие основы. – М.: Машгиз. 1949.
18. P. DuBois. Advanced Ls-Dyna training class. – LSTC. Oktober, 2002.
19. DOT/FAA/AR-MMPDS-01 Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS)
20. Кирсанов А.Р. Методика оценки повреждаемости ГТД на этапах его создания, изготовления и эксплуатации от поражающего воздействия птиц: дис. на соиск. учен. степ. КТН : спец. 05.22.14-Эксплуатация воздушного транспорта, 2016. - 205 с.
21. Соболев А.В., Радченко М.В. Использование модели пластичности Джонсона-Кука в численном моделировании бросковых испытаний контейнеров для транспортирования ОЯТ. Известия вузов. Ядерная энергетика, 2016 №3, стр. 82-93.
22. Муйземнек А.Ю. Описание поведения материалов в системах автоматизированного инженерного анализа: учебное пособие / А.Ю. Муйземнек. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2005. – 152 с.
23. Шмелев А.В., Кононов А.Г., Омелюсик А.В. Идентификация параметров полилинейных моделей металлов, применяемых при численном моделировании процессов пластического деформирования и разрушения конструкций. Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. Журнал 2016. №06. С. 1-17.
24. Review of solid element formulation in LS-DYNA. LS-DYNA Forum 2011.
25. Review of shell element formulations. Developer Forum 2013.
26. G. Maresca, P. P. Milella, G. Pino. A Critical review of triaxiality based failure criteria. – ANPA - Via V. Brancati, Roma. 1997.
27. Input parameters for metal forming simulation using LS-DYNA. Bradley N. Maker, Xinhai Zhu, LSTC, 2000.

1. Сеточное моделирование в LS-PREPOST



Графический интерфейс пользователя LS-PREPOST состоит из следующих частей:

- Верхнее раскрывающееся меню - данное меню находится вверху окна LS-PREPOST и содержит пункты для работы с файлами, выбора объектов, настройки интерфейса и прочие команды имеющие вспомогательный характер.
- Нижняя панель содержит кнопки быстрого управления отображением модели, выбора проекции и др.
- Правая панель содержит кнопки, соответствующие определенной закладке, для создания геометрии, конечно-элементной геометрии, создания, редактирования модели и т.д.
- Командная строка. В командной строке можно вводить текстовые команды LS-PREPOST.
- Окно сообщений. В нем можно просмотреть порядок ввода команд.

Верхнее раскрывающееся меню LS-PREPOST

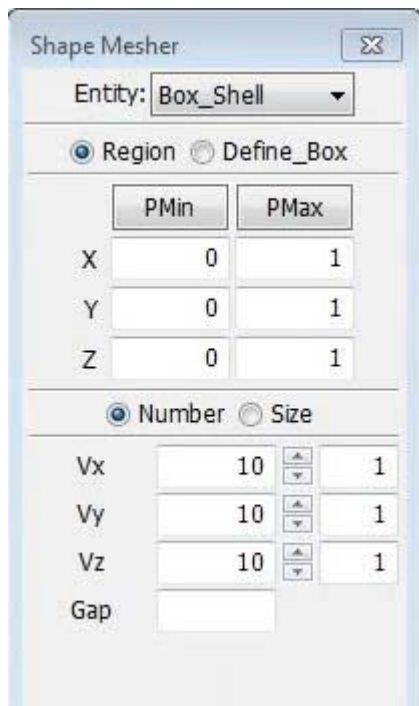
Верхнее выпадающее меню содержит команды для управления файлами, выбора элементов модели, отображения элементов модели и параметров. Оно состоит из следующих пунктов:

- File - в данном пункте меню содержатся команды для работы с файлами, такие как сохранение модели в файле, чтение ее из файла, выход из программы и другие.
- Misc. - в данном меню содержатся команды, позволяющие отобразить модель относительно плоскости, получить информацию о размере модели, изменить название модели и пр.
- View - команды данного меню позволяют выбирать компоненты модели, используемые в работе.
 - Background - с помощью команд данного меню можно управлять отображением модели.
- Geometry – создание и редактирование геометрии модели.
- FEM – создание и редактирование конечно-элементной геометрии модели.
- Applications - в данном пункте меню содержатся различные приложения с помощью которых можно создавать конкретные модели.
- Setting – различные настройчные параметры.
- Help - помощь

Построение оболочечных сеточных фигур

Шаг 1

Построение оболочечного короба
Правая панель **Mesh** → **ShapeM** →
Box_Shell



Вводятся координаты начального угла PMin X=Y=Z=0.

Вводятся координаты конечного угла PMax X=Y=Z=1.

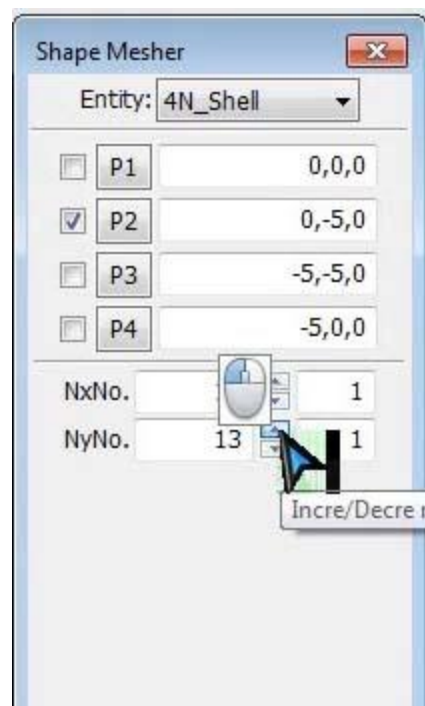
Вводится величина разбиения сторон короба Vx=10, Vy=10, Vz = 10

Нажать Create / Асепт

Шаг 2

Построение плоскости по 4-м точкам

Mesh → **ShapeM** → **4N_Shell**



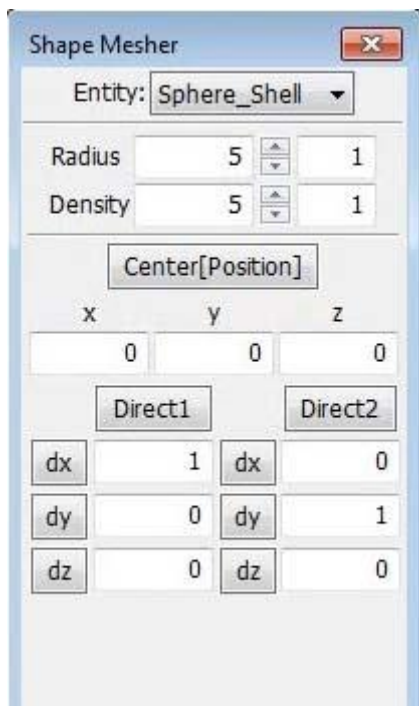
Вводятся координаты четырех точек P1=0,0,0 P2=0,-5,0 P3=-5,-5,0 P4=-5,0,0

Указывается число элементов по сторонам Nx=Ny=10

Нажать Create / Асепт

Шаг 3

Построение сферической оболочки
Mesh → **ShapeM** → **Sphere_Shell**



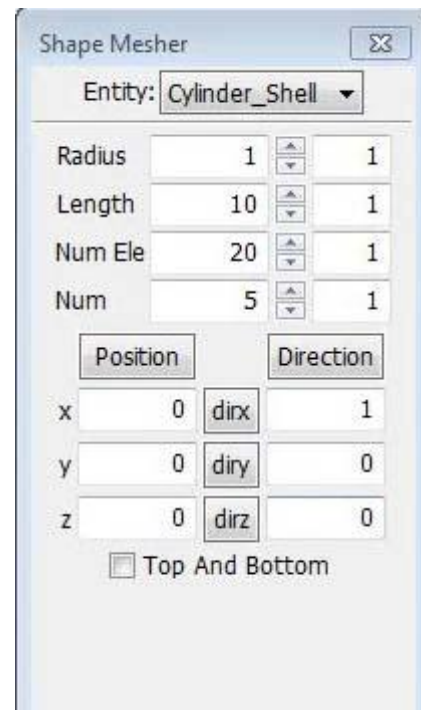
Вводится радиус и плотность разбиения. Radius=5, Density=5.

Вводятся координаты середины
 $X=Y=Z=0$

Нажать Create / Асепт

Шаг 4

Построение оболочечного цилиндра
Mesh → **ShapeM** → **Cylinder_Shell**



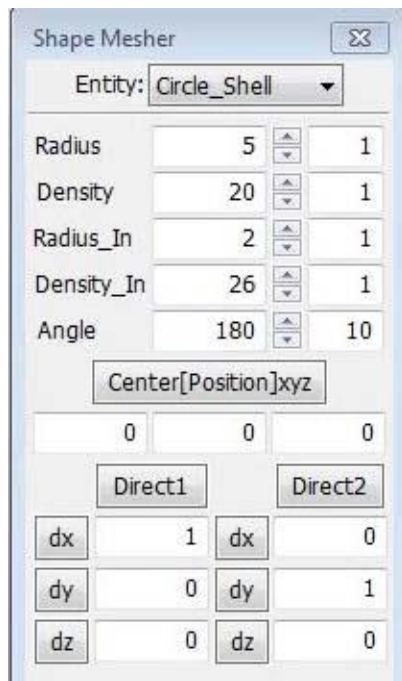
Вводятся радиус, длина, величина разбиения, координаты центра основания цилиндра. Radius=5, Length=10, Num Ele=20 Num=5
Dirx, diry, dirz – направления оси цилиндра

Шаг 5

Панель Меню | File - New

Построение круга

Mesh → **ShapeM** → **Circle_Shell**



Вводятся радиус, длина, величина разбиения, угол. Radius=5, Density=20, Radiu_In=2, Density_In=26

Нажать Create / Ассепт

Разбиение исходной или импортированной геометрии

Шаг 6

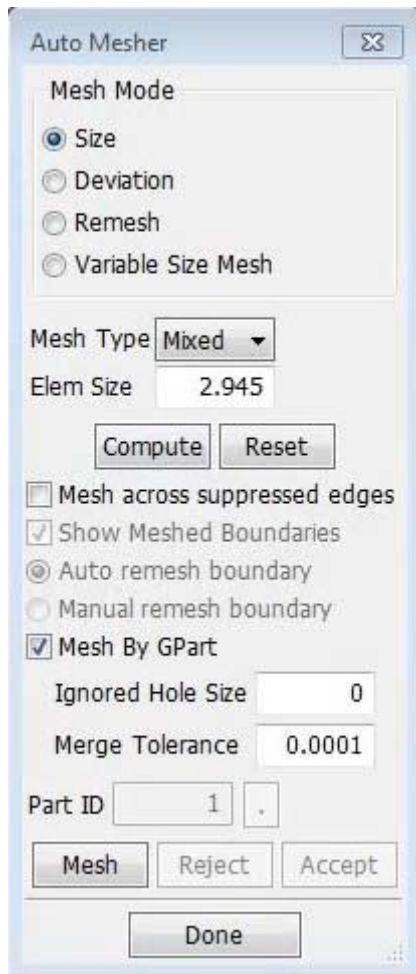
Панель Меню | File – New

Создать плоскость, правая панель:

Surf – Plane, нажать Apply

Mesh → **AutoM**

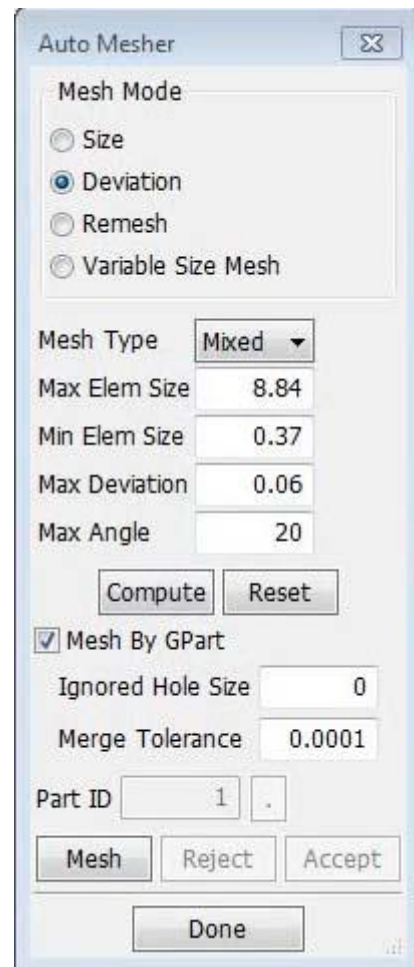
Разбиение плоскостей постоянным
размером



Выбираем Size, указываем Elem
Size=0.1, выбираем исходную плос-
кую геометрию (Д) (Д)

Шаг 7

Разбиение плоскостей переменным
размером



Однако таким способом можно разбивать относительно простую геометрию, для сложной геометрии рекомендуется использовать другую сеточную программу (Hypermesh, ansys/ls-dyna и др.).

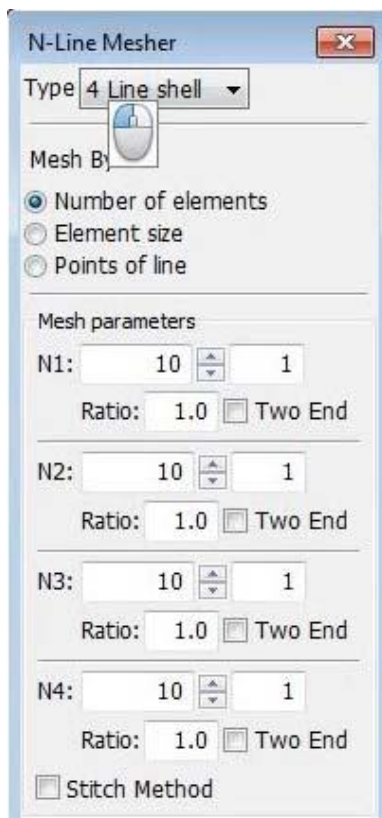
Шаг 8

Разбиение плоскостей точным разбиением

Панель Меню | File – New

Создать плоскость, правая панель: Surf – Plane, нажать Apply

Mesh → NLineM → 4 Line shell



Для исходной плоской геометрии указываем величины разбиения $N1=N2=N3=N4=10$, поочередно указываем линии

Нажать Mesh / Ассерт

Данным способом можно более качественно разбить геометрию, но времени требует значительно больше.

Необходимо разбивать каждую часть геометрии.

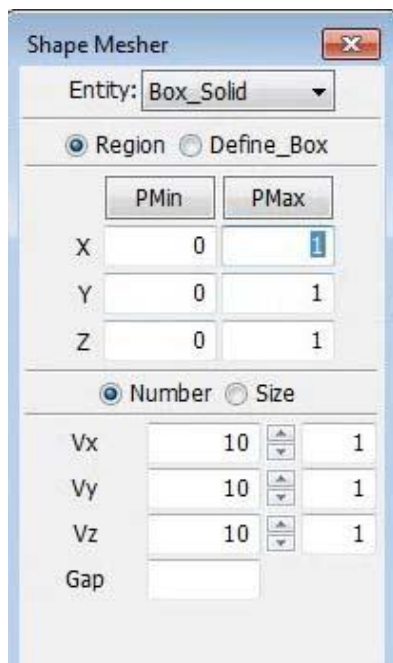
Построение объемных сеточных фигур

Шаг 9

Построение объемного короба

Панель Меню | File - New

Mesh → **ShapeM** → **Box_Solid**



Вводятся координаты начального угла PMin $X=Y=Z=0$.

Вводятся координаты конечного угла PMax $X=Y=Z=1$.

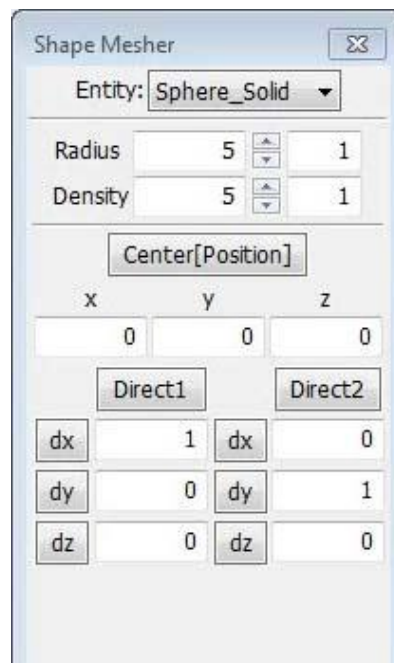
Вводится величина разбиения сторон короба $V_x=10, V_y=10, V_z=10$

Нажать Create / Ассепт

Шаг 10

Построение объемного шара

Mesh → **ShapeM** → **Sphere_Solid**



Вводится радиус и плотность разбиения. $Radius=5, Density=5$.

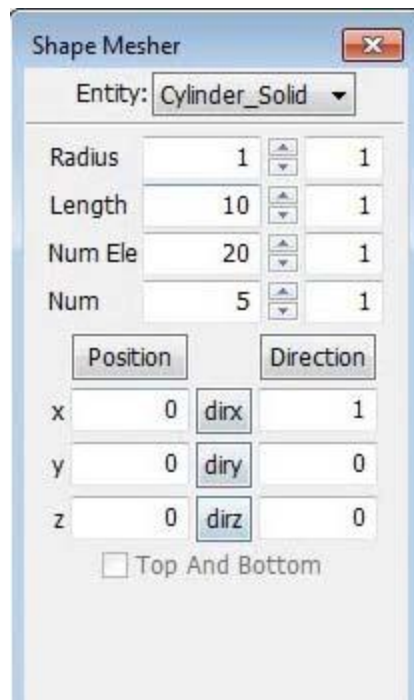
Вводятся координаты середины $X=Y=Z=0$

Нажать Create / Ассепт

Шаг 11

Построение объемного цилиндра

Mesh → **ShapeM** → **Cylinder_Solid**



Вводятся радиус, длина, величина разбиения, координаты центра основания цилиндра. Radius=1, Length=10, Num Ele=20 Num=5

Dirx, diry, dirz – направления оси цилиндра

Нажать Create / Ассепт

Нанесение объемной сетки на исходную или импортированную геометрию

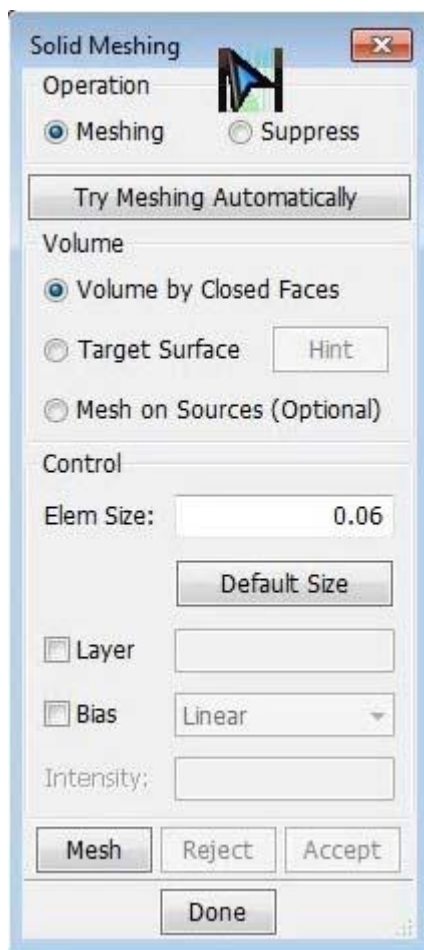
Шаг 12

Нанесение сетки на объемную геометрию

Панель Меню | File – New

Создать объемное тело, правая панель: Solid – Box, нажать Apply

Mesh → **SolidM**



Для исходной объемной геометрии указываем Elem Size

Нажать Try Meshing Automatically / Mesh / Accept

Хорошие восьми узловые правильные (кирпичные) элементы строятся только на простых фигурах

Тетраэдрная сетка (4-х узловые пирамиды) строится на любой твердотельной геометрии. Для их построения в Is-prepost сначала нужно построить оболочечную сетку на всей поверхности твердотельной геометрии

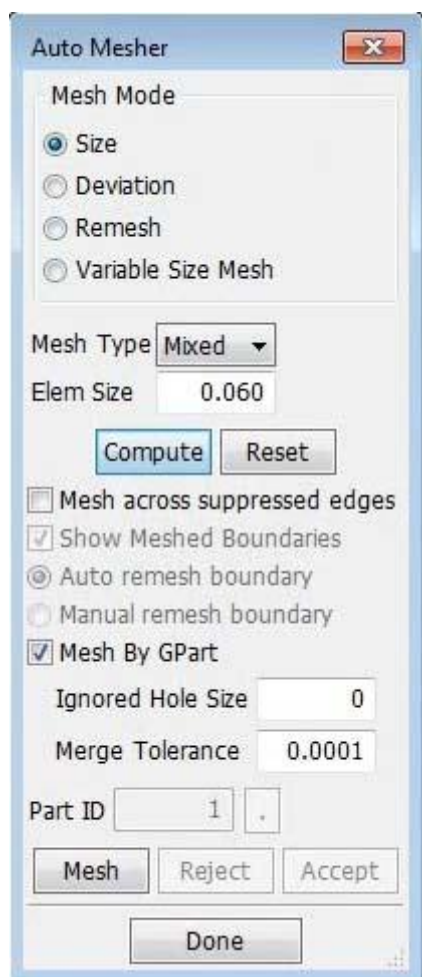
Шаг 13

Построение предварительной оболочечной сетки

Панель Меню | File – New

Создать объемное тело, правая панель: Solid – Box, нажать Apply

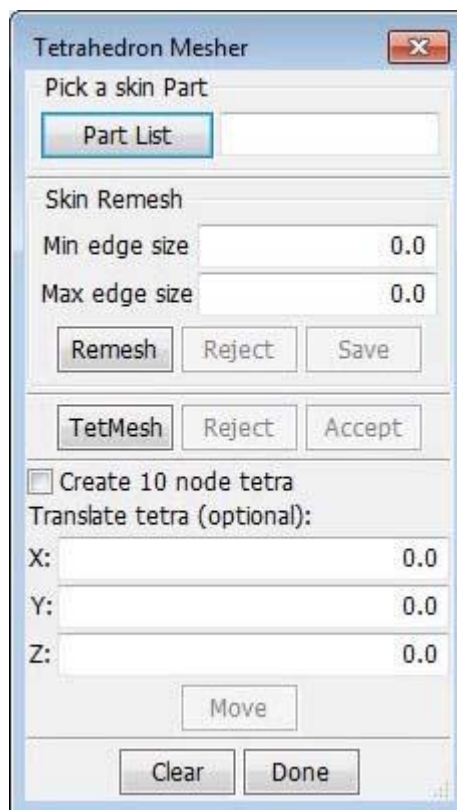
Mesh → AutoM



Выбираем Size, указываем Elem Size=0.1, выбираем поочередно плоскости объемной геометрии
Нажать Mesh / Accept

Шаг 14

Построение тетраэдрной сетки
Mesh → TetraM



С помощью TetMesh наносим тетраэдральную сетку. Указываем на оболочечную сетку

Нажать Tetmesh / Accept

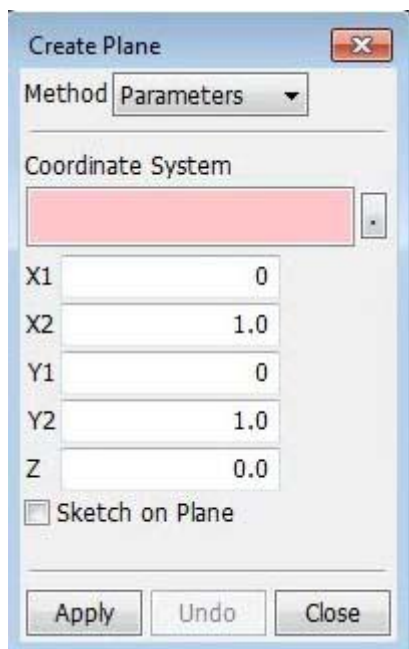
Сейчас присутствуют две сетки, при необходимости сетку на поверхности можно удалить

Нанесение объемной сетки на исходную или импортируемую геометрию более сложной формы.

Для нанесения сетки необходимо разбить геометрию на простые фигуры
Для этого строим плоскость, по которой будет проходить линия раздела

Шаг 15

Построение плоскости раздела



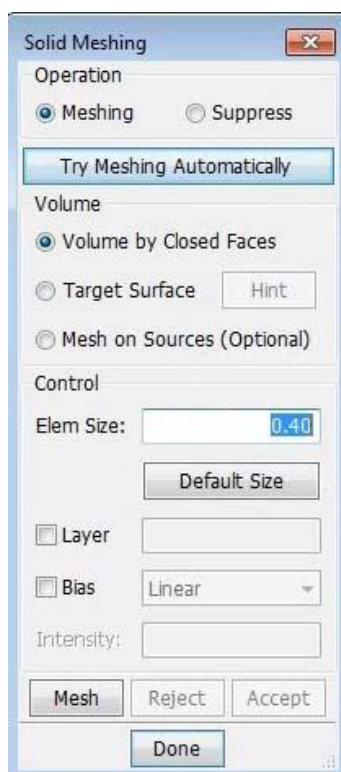
Шаг 16

Разделение объемной фигуры



Шаг 17

Нанесение объемной сетки



Выполнить следующие задания:

	Создать линию	Curve - Line
	Создать поверхность	Surf - Plane
	Создать объемное тела	Solid - Box
	Создать узлы	EleTol - NodEdit
	Создать элементы	EleTol - EleEdit
	Определить координаты узлов	EleTol - Measur
	Определить длину	EleTol - Measur
	Найти узел	EleTol - Find
	Показать узел (элемент)	EleTol - Ident
	Показать нормаль	EleTol -Normal
	Изменить нормаль	EleTol -Normal
	Создать shell пластину 10x10	Mesh - ShapeM
	Разделить элементы на 2 части	EleTol - DetEle
	Переместить одну часть относительно другой	EleTol - Transf
	Переместить обратно	EleTol - Transf
	Объединить узлы	EleTol - DupNod
	Создать shell пластину 10x10	Mesh - ShapeM
	Создать из нее solid часть	Mesh - EleGen
	Создать shell пластину 10x10	Mesh - ShapeM
	Используя окно Entity Greation: - создать ограничения; - определить сварные узлы; - сохранит историю; - загрузить сегмент; - создать набор узлов, частей, сегментов	Model - CreEnt

2. Осадка заготовки в 2D постановке

Создание карт

Стальная заготовка диаметром 100 мм и высотой 75 мм осаживается между двумя бойками диаметрами 150 мм и высотой 25 мм при скорости движения бойков 2 м/с (бойки принимаем абсолютно жесткими) - рис. 3.1. Определить напряжения и деформации в течение осадки.

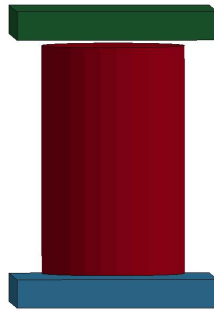


Рис. 3.1. Пример задачи

Учитывая осевую симметрию задачи, будем моделировать лишь сечение конструкции плоскостью, проходящей через ось симметрии. Рассмотрим вначале очень простую модель с малым количеством узлов и конечных элементов - для того, чтобы проиллюстрировать все этапы решения задачи с использованием лишь простейших средств (подготовка данных с помощью текстового редактора) [7].

Отличием, например от ANSYS при описании конструкции является использование понятия "часть" (PART): конструкция разделяется на части, каждая из которых состоит из элементов определенного типа с определенным набором параметров для них и определенным описанием материала. Таким образом, вместо того, чтобы записать "элемент №1 есть элемент типа 2, с набором параметров №4 и из материала №1; узлы этого элемента - 1 и 2", нужно будет записать: "часть №1 (Part 1) составляют элементы типа 2, с набором параметров №4 и из материала №1; элемент №1 принадлежит части 1, узлами его являются 1 и 2" [7].

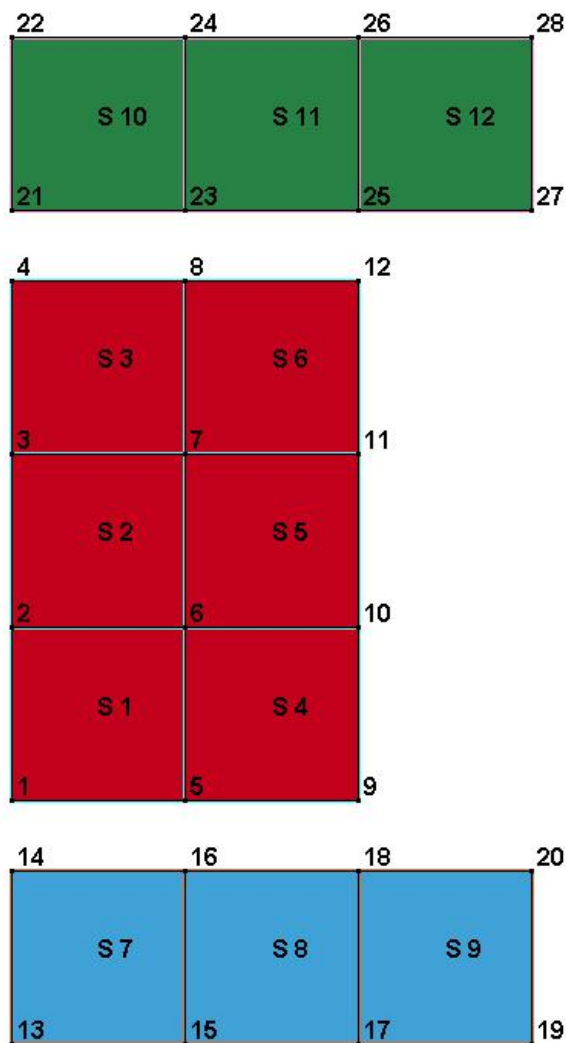


Рис. 3.2. Упрощенная осесимметричная конечно-элементная модель задачи осадки

Далее приведен пример простого k-файла – процесса осадки цилиндрической заготовки 2D.

Такой текстовый файл может быть подготовлен с помощью любого текстового редактора, сохраняющего текст без форматирования (Notepad; Wordpad или Word при выборе режима сохранения «Только текст»). Имя и расширение файла также могут быть любыми (традиционно для этих файлов используется расширение .k - от слова «keywords») [7].

Сетка конечных элементов, показанная на рис. 3.2, является очень грубой и использована лишь для сокращения размера входного файла. Для решения реальной задачи такая сетка непригодна. Для построения более мелкой сетки необходимо будет использовать препроцессор, поскольку «ручная» подготовка данных о координатах узлов и элементах

слишком трудоемка. Как указано выше, текстовый формат входного файла LS-DYNA позволяет использовать для подготовки данных практически любой препроцессор [7].

ПРИМЕР ПРОСТОГО К-ФАЙЛА – ПРОЦЕСС ОСАДКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ 2D

*KEYWORD		Начало кода
*SECTION_ SHELL	1,14,1,2,1,0,0,1 0,0,0,0,0,0,0	Определения типа элемента
*MAT_ PLASTIC _KINEMATIC	1,7800,2E11,0.3,250E6,940 E6,1 0	Определение модели материала заготовки
*MAT_RIGID	2,7800,2E11,0.3 1,7,7 0	Определение модели материала нижнего бойка
*MAT_RIGID	3,7800,2E11,0.3 1,6,7 0	Определение модели материала верхнего бойка
*PART	BLANK 1,1,1	Определение part заготовки
*PART	TOOL_LOW 2,1,2	Определение part нижнего бойка
*PART	TOOL_TOP 3,1,3	Определение part верхнего бойка
*NODE	1,0,0.025,0 2,0,0.05,0 3,0,0.075,0 4,0,0.1,0 5,0.025,0.025,0 6,0.025,0.05,0 7,0.025,0.075,0 8,0.025,0.1,0 9,0.05,0.025,0 10,0.05,0.05,0 11,0.05,0.075,0 12,0.05,0.1,0 13,0,0,0 14,0,0.025,0 15,0.025,0,0 16,0.025,0.025,0 17,0.05,0,0 18,0.05,0.025,0	Определение координаты узлов

	19,0.075,0,0 20,0.075,0.025,0 21,0,0.1,0 22,0,0.125,0 23,0.025,0.1,0 24,0.025,0.125,0 25,0.05,0.1,0 26,0.05,0.125,0 27,0.075,0.1,0 28,0.075,0.125,0	
*ELEMENT_ SHELL	1,1,5,6,2,1 2,1,6,7,3,2 3,1,7,8,4,3 4,1,9,10,6,5 5,1,10,11,7,6 6,1,11,12,8,7 7,2,15,16,14,13 8,2,17,18,16,15 9,2,19,20,18,17 10,3,23,24,22,21 11,3,25,26,24,23 12,3,27,28,26,25	Определение элементов (присвоение соответствующего номера части и номера узлов)
*CONTROL_ Timestep	0,0.9	Определение временного шага
*CONTROL_ TERMINATION	2E-2	Определение время окончания расчета
*DATABASE_BINARY_ D3PLOT	2E-3	Определение частоты вывода результатов расчета
*SET_PART_ LIST	1 1	Создание набора части №1
*SET_PART_ LIST	2 2	Создание набора части №2
*SET_PART_ LIST	3 3	Создание набора части №3
*DEFINE_ CURVE	1 0,0 0.005,-2 0.03,-2	Определение графика нагружения
*BOUNDARY_P REScribed_M OTION_ RIGID	3,2,0,1,1	Определение движение инструмента

*CONTACT_ 2D_ AUTOMATIC_S URFACE_TO_S URFACE_ID	1 1,2,,0.1 0	Определение контакта между заготовкой и нижним бойком
*CONTACT_ 2D_ AUTOMATIC_S URFACE_TO_S URFACE_ID	2 1,3,,0.1 0	Определение контакта между заготовкой и верхним бойком
*END		Окончание кода

3. Идентификация параметров моделей материала

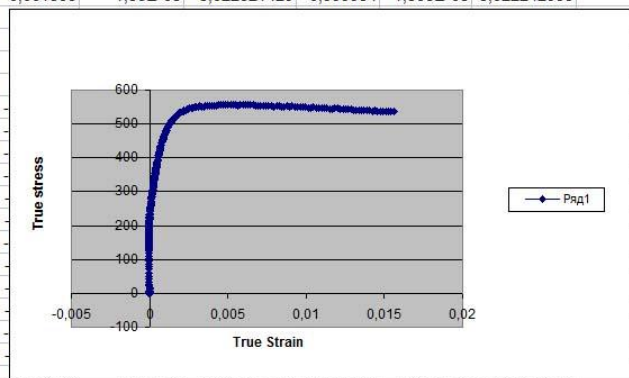
3.1. Методика построение кривой $\sigma = f(e)$ от исходной кривой растяжения $F = f(l)$

Построить график истинного напряжения от деформации в программе EXCEL по значениям после одноосного растяжения

Использовать формулы (4.2-4.6).

Задать график в модели материала MAT24

Time sec	Force kN	Stroke mm	Ext 1 mm	Engg Strain	Engg stress	1+E	True strain	Ture Stress	Effective plastic strain
0	0,007813	0	0	0,00E+00	0,558035714	1	0	0,558035714	-2,79018E-06
0,1	0,015625	0,005	7,81E-04	7,81E-06	1,116071429	1,000008	7,812E-06	1,116080148	2,23207E-06
0,2	0,007813	0,021	0,001563	1,56E-05	-0,558035714	1,000016	1,562E-05	-0,55804443	1,84151E-05
0,3	0,023438	0,038	0	0,00E+00	1,674107143	1	0	1,674107143	-8,37054E-06
0,4	0,007813	0,054	-7,81E-04	-7,81E-06	0,558035714	0,999992	-7,813E-06	0,558031355	-1,06027E-05
0,5	0,015625	0,071	7,81E-04	7,81E-06	1,116071429	1,000008	7,812E-06	1,116080148	2,23207E-06
0,6	0,023438	0,088	-2,34E-03	-2,34E-05	1,674107143	0,999977	-2,344E-05	1,674067906	-3,18081E-05
0,7	0,015625	0,104	-7,81E-04	-7,81E-06	1,116071429	0,999992	-7,813E-06	1,116062709	-1,33928E-05
0,8	0,039063	0,121	7,81E-04	7,81E-06	2,790178571	1,000008	7,812E-06	2,79020037	-6,13853E-06
0,9	0,039063	0,138	7,81E-04	7,81E-06	2,790178571	1,000008	7,812E-06	2,79020037	-6,13853E-06
1	0,039063	0,154	0	0,00E+00	2,790178571	1	0	2,790178571	-1,39509E-05
1,1	0,023438	0,171	-7,81E-04	-7,81E-06	1,674107143	0,999992	-7,813E-06	1,674094064	-1,6183E-05
1,2	0,070313	0,188	-0,001563	-1,56E-05	5,022321429	0,999984	-1,563E-05	5,022242955	-4,07363E-05
1,3	0,0625	0,204							-2,23214E-05
1,4	0,085938	0,221							-2,28797E-05
1,5	0,179688	0,238							-6,41741E-05
1,6	0,234375	0,254							-8,37054E-05
1,7	0,296875	0,271							-0,00012165
1,8	0,375	0,288							-0,000149552
1,9	0,476563	0,304							-0,000185823
2	0,601563	0,321							-0,000230466
2,1	0,6875	0,338							-0,000268968
2,2	0,828125	0,354							-0,000334811
2,3	0,992188	0,371							-0,000401212
2,4	1,09375	0,388							-0,000429673
2,5	1,203125	0,404							-0,000468734
2,6	1,351563	0,421							-0,000521745
2,7	1,4375	0,438							-0,000560245
2,8	1,539063	0,454							-0,000588707
2,9	1,609375	0,471							-0,000646958
3	1,6875	0,488	-3,91E-03	-3,91E-05	125,8483108	0,999961	-3,906E-05	125,8433949	-0,00066828
3,1	1,75	0,504	-2,34E-03	-2,34E-05	130,5093594	0,999977	-2,344E-05	130,5063006	-0,000675969
3,2	1,75	0,521	-0,003125	-3,13E-05	130,5093594	0,999969	-3,125E-05	130,505281	-0,000683777
3,3	1,789063	0,538	-0,004688	-4,69E-05	133,422552	0,999953	-4,688E-05	133,4162978	-0,000713958
3,4	1,789063	0,554	-3,91E-03	-3,91E-05	133,422552	0,999961	-3,906E-05	133,4173402	-0,00070615
3,5	1,804688	0,571	-0,004688	-4,69E-05	134,5878142	0,999953	-4,688E-05	134,5815054	-0,000719784
3,6	1,859375	0,588	-3,91E-03	-3,91E-05	138,6661943	0,999961	-3,906E-05	138,6607777	-0,000732367
3,7	1,851563	0,604	-3,91E-03	-3,91E-05	138,0836006	0,999961	-3,906E-05	138,0782067	-0,000729454

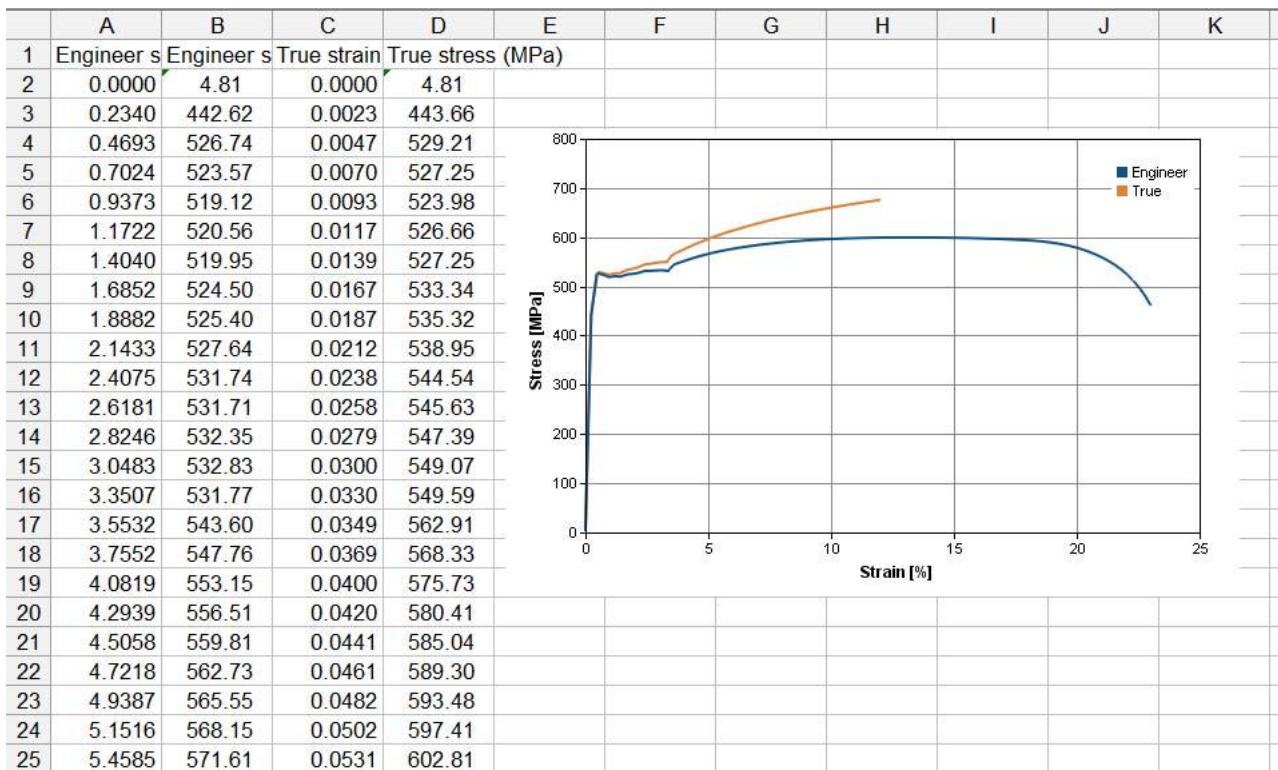


3.2. Методика определение параметров для модели материала степенного вида по кривой одноосного растяжения

1. Имеется график значений после одноосного растяжения металла:
 - график в виде рисунка напряжение от деформации (в инженерном и логарифмическом виде) (файл **strain_graph.png**)
 - табличные значения напряжение от деформации (в инженерном и логарифмическом виде) (файл **DOMEX500MC.xls**)
 - значения в истинных величинах представен до значения временного сопротивления (до момента образования шейки)

2. Определить параметры k и n

3. Использовать выбранные значения k и n в модели материала MAT18



3.3. Пример расчета модуля упрочнения (тангенсного модуля) E_t (ETAN) для модели материала MAT3 и MAT24.

Исходные данные для материала Сталь 3: Предел текучести $\sigma_T = 250$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 380$ МПа, предельная деформация $e_{pp} = 30\%$.

Переводим в истинные (логарифмические) значения:

$$\sigma_B^{\log} = \sigma_B^{\text{eng}} (1 + e_{pp}^{\text{eng}}) = 380(1+0,3)=494 \text{ МПа}; \quad \sigma_T^{\log} \approx \sigma_T^{\text{eng}} = 250 \text{ МПа};$$

$$e_{pp}^{\log} = \ln(1 + e_{pp}^{\text{eng}}) = \ln(1+0,3)=0,26;$$

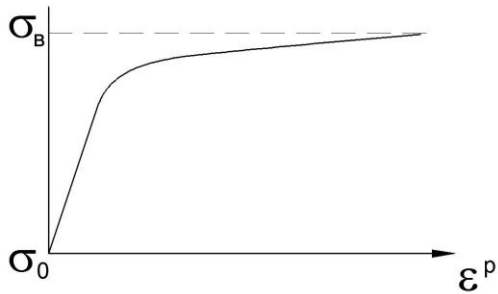
Тангенсный модуль:

$$E_t = (\sigma_B^{\log} - \sigma_T^{\log}) / (e_{pp}^{\log}) = (494-250)/0,26 = 940 \text{ МПа}.$$

3.4. Пример расчета параметров упрочнения для модели материала MAT106.

Исходные данные сталь 3 и АМВ

$$\sigma(\varepsilon_{eff}^p) = \sigma_0 + Q_{r1}(1 - \exp(-C_{r1}\varepsilon_{eff}^p))$$



$$Q_{r1} = \sigma_B^{\log} - \sigma_0$$

C_{r1} - регулирует наклон (переход) 2-х кривых

Сталь $Q_{r1}=1e8$ МПа, $C_{r1}=4$

АМВ (450 град.) $\sigma_0 = 15e6$ МПа, $Q_{r1}=31,5e6$ МПа, $C_{r1}=4$

4. Вытяжка детали из листовой заготовки с адаптивным перестроением

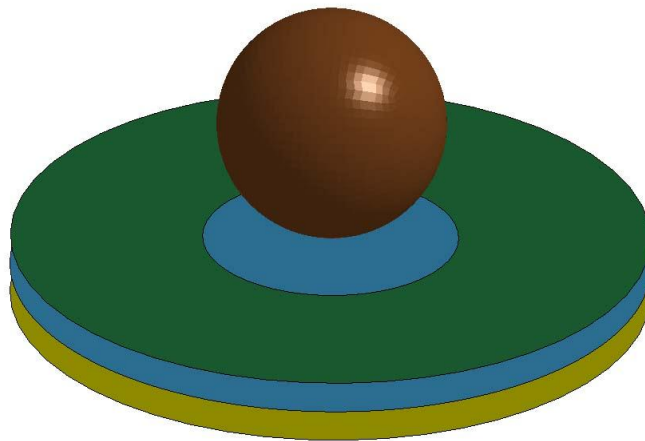
Рассмотрим создания адаптивного перестроения shell пластины:

- штамповка shell пластины без адаптации;
- штамповка shell пластины с адаптации;

Пример расчета процесса листовой штамповки - выдавливание шариком сферической лунки.

Учебный видеоролик https://youtu.be/h8hGmHelf_I

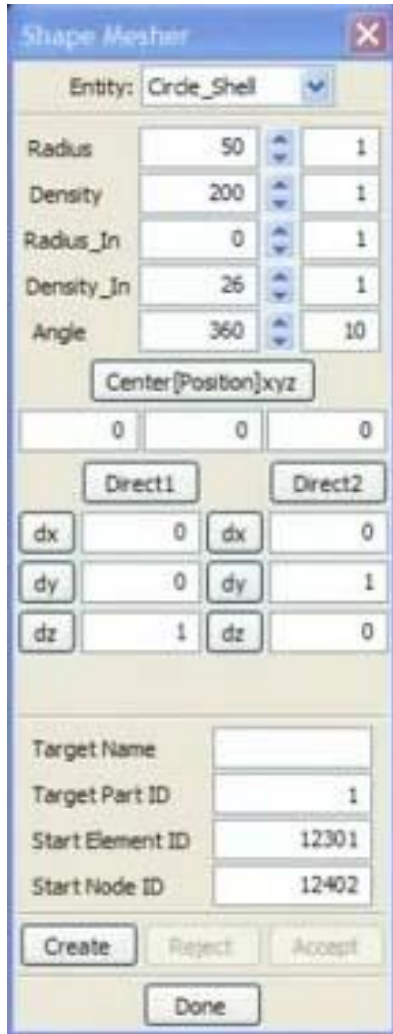
Пример расчета процесса листовой штамповки (выдавливание шариком сферической лунки)



Модель штамповки сферическим пуансоном представлена заготовкой, матрицей, прижимом и пуансоном. Диаметр заготовки 100 мм, толщина 1 мм. Диаметр пуансона 36 мм. Все части модели представлены оболочечными элементами. В процессе деформирования сначала прижимается прижим, затем опускается пуансон со скоростью 2 м/сек. Заготовки представлена упругопластической моделью, инструмент твердой моделью.

Шаг 1

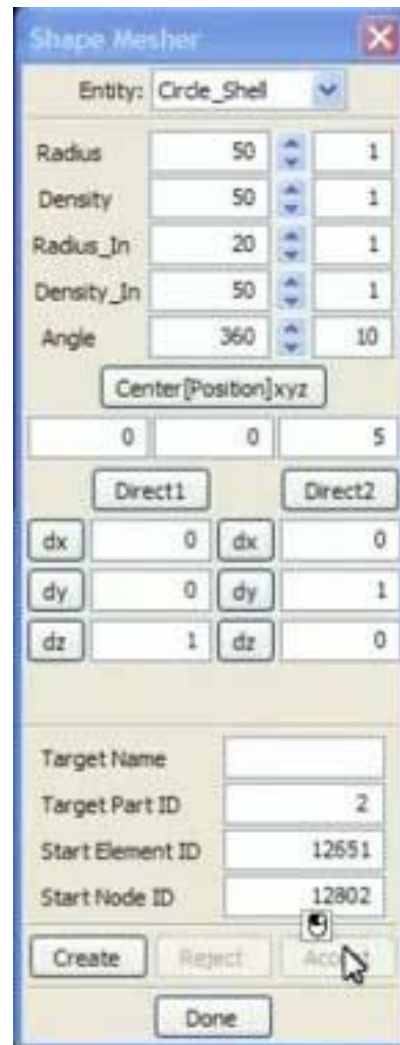
Построение модели заготовки



Заготовка диаметром 100 мм

Шаг 2

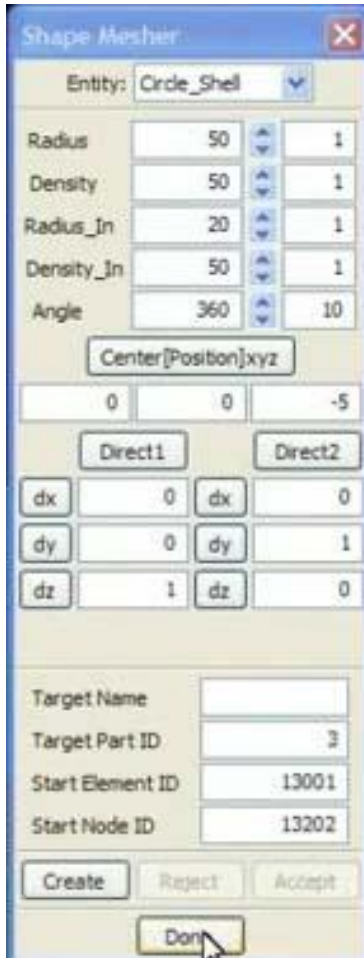
Построение верхней прижимной пластины



Смещение по оси Z на 5 мм

Шаг 3

Построение матрицы



Смещение по оси Z на -5 мм

Шаг 4

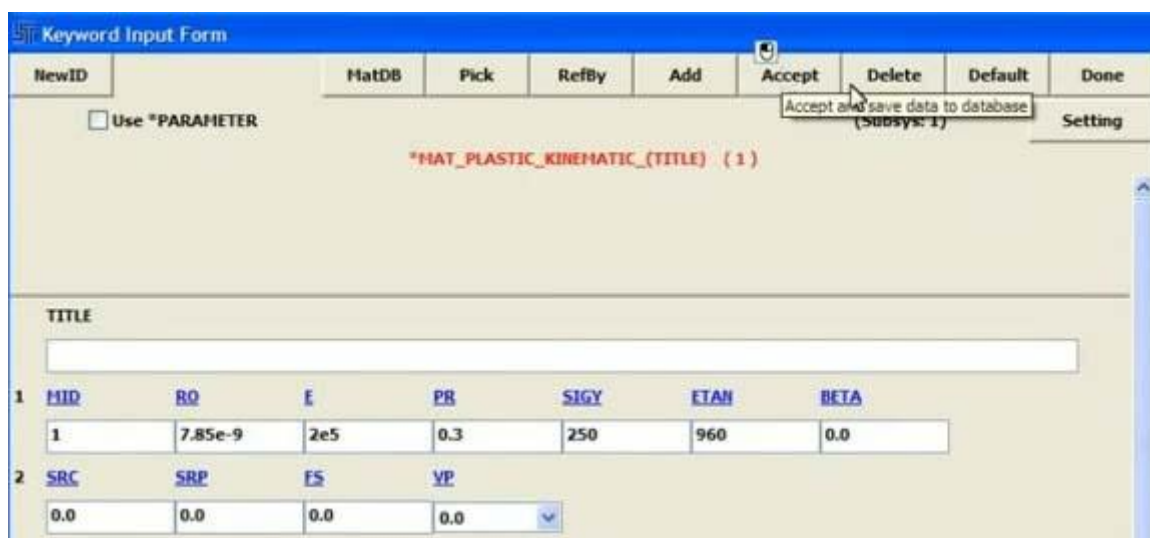
Построение пуансона



Смещение по оси Z на 25 мм

Шаг 5

Определение параметров материала



Шаг 6

Определение модели материала прижима

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for defining a material model. The title is '*MAT_RIGID_(TITLE) (1)'. The form includes a 'TITLE' field, a table for material properties, and a table for constraints.

1	MID	RO	E	PR	II	COUPLE	II	ALIAS
2		7.85e-9	2e5	0.3	0	0	0	

2	CMO	CON1	CON2
1.0	4	7	

3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Разрешить перемещение по Z

Шаг 7

Определение модели материала матрицы

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for defining a matrix material model. The title is '*MAT_RIGID_(TITLE) (2)'. The form includes a 'TITLE' field, a table for material properties, and a table for constraints.

1	MID	RO	E	PR	II	COUPLE	II	ALIAS
3		7.85e-9	2e5	0.3	0	0	0	

2	CMO	CON1	CON2
1.0	7	7	

3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Шаг 8

Определение модели материала пуансона

Keyword Input Form

MatDB Pick RefBy Add Accept Delete Default Done

Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

***MAT_RIGID_(TITLE) (2)**

TITLE

1	MID	R0	E	PR	II	COUPLE	MI	ALIAS
	4	7.85e-9	2e5	0.3	0	0	0	

2	CMO	CON1	CON2
	1.0	4	7

3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Шаг 9

Определение типа элемента

Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Sort/T1 Add Accept Delete Default Done

Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

***SECTION_SHELL_(TITLE) (0)**

TITLE

1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	OR/IRID	ICOMP	SETYP
	1	16	1.0	5	1	0	0	1

2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
	1	1	1	1	0.0	0.0	0.0	0

Толщина оболочки 1 мм

Шаг 10

Определение типа элемента2

1	SECID	ELFORM1	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
2	2	2	1.0	3	1	0	0	1
2	T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
1	1	1	1	1	0.0	0.0	0.0	0

Шаг 11

Определение части 1

1	TITLE							
circleshell								
2	PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADOPT	TMID
1	1	1	1	0	0	0	0	0

Заготовка – Part 1 – Элемент Shell 1 – Material 1

Шаг 12

Определение части 2

1	TITLE							
circleshell								
2	PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADOPT	TMID
2	2	2	2	0	0	0	0	0

Прижим – Part 2 – Элемент Shell 2 – Material 2

Шаг 13

Определение части 3

Keyword Input Form

Use *PARAMETER

*PART_(TITLE) (4)

1 TITLE
circleshell

2 PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADOPT THID
3 2 3 0 0 0 0 0

Accept and save data to database (subsys: 1)

Setting

- 1 circleshell
- 2 circleshell
- 3 circleshell
- 4 sphereshell

Матрица – Part 3 – Элемент Shell 2 – Material 3

Шаг 14

Определение части 4

Keyword Input Form

Use *PARAMETER

*PART_(TITLE) (4)

1 TITLE
sphereshell

2 PID SECID MID EOSID HGID GRAV ADOPT THID
4 2 4 0 0 0 0 0

Accept and save data to database (subsys: 1)

Setting

- 1 circleshell
- 2 circleshell
- 3 circleshell
- 4 sphereshell

Пуансон – Part 4 – Элемент Shell 2 – Material 4

Шаг 15

Определение контакта 1

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for defining a contact. The title bar reads 'Keyword Input Form'. The top menu includes 'NewID', 'Draw', 'Pick', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. A tooltip over the 'Accept' button says 'Accept changes: 1'. Below the menu, there is a checkbox for 'Use *PARAMETER' and a 'Setting' button. The main area contains the text '*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_(ID/TITLE/HPP)_(THERMAL) (1)'. Below this is a table with columns 'CID' and 'TITLE'. The 'CID' field contains the value '1'. There are checkboxes for 'MPP1' and 'MPP2'. Below these are several rows of input fields for parameters: 'IGNORE', 'BUCKET', 'LCBUCKET', 'NS2TRACK', 'UNITITER', 'PARMAX', 'UNUSED', 'CPARMB', 'UNUSED', 'CHKSEGS', 'PENSE', and 'GRPAILE'. The bottom section has two rows of parameters: Row 1: 'SSID', 'MSID', 'SSTYP', 'HSTYP', 'SBOXID', 'HBOXID', 'SPR', 'MPR'. Row 2: 'FS', 'FD', 'DC', 'VC', 'VDC', 'PENCHK', 'BI', 'DI'. The values for these parameters are: Row 1: SSID=1, MSID=2, SSTYP=3, HSTYP=3, SBOXID=, HBOXID=, SPR=0, MPR=0. Row 2: FS=0.2, FD=0.0, DC=0.0, VC=0.0, VDC=20, PENCHK=0, BI=0.0, DI=1.0E+20.

Заготовка - прижим

Шаг 16

Определение контакта 2

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for defining a contact. The title bar reads 'Keyword Input Form'. The top menu includes 'NewID', 'Draw', 'Pick', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. A tooltip over the 'Accept' button says 'Open pick interface to allow data to be picked directly from the model'. Below the menu, there is a checkbox for 'Use *PARAMETER' and a 'Setting' button. The main area contains the text '*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_(ID/TITLE/HPP)_(THERMAL) (2)'. Below this is a table with columns 'CID' and 'TITLE'. The 'CID' field contains the value '2'. There are checkboxes for 'MPP1' and 'MPP2'. Below these are several rows of input fields for parameters: 'IGNORE', 'BUCKET', 'LCBUCKET', 'NS2TRACK', 'UNITITER', 'PARMAX', 'UNUSED', 'CPARMB', 'UNUSED', 'CHKSEGS', 'PENSE', and 'GRPAILE'. The bottom section has two rows of parameters: Row 1: 'SSID', 'MSID', 'SSTYP', 'HSTYP', 'SBOXID', 'HBOXID', 'SPR', 'MPR'. Row 2: 'FS', 'FD', 'DC', 'VC', 'VDC', 'PENCHK', 'BI', 'DI'. The values for these parameters are: Row 1: SSID=1, MSID=3, SSTYP=3, HSTYP=3, SBOXID=, HBOXID=, SPR=0, MPR=0. Row 2: FS=0.2, FD=0.0, DC=0.0, VC=0.0, VDC=20, PENCHK=0, BI=0.0, DI=1.0E+20.

Заготовка – матрица

Шаг 17

Определение контакта 3

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for defining a contact. The title bar reads 'Keyword Input Form'. At the top, there are buttons for 'NewID', 'Draw', 'Pick', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. Below these, there is a checkbox for 'Use *PARAMETER' and '(Subsys: 1)'. The main title of the form is '*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE (ID/TITLE/MPP)_ (THERMAL) (3)'. Below this, there are fields for 'CID' (value: 3) and 'TITLE'. There are also checkboxes for 'MPP1' and 'MPP2'. A table of parameters is visible:

IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARMB
0	200		3	2	1.0005		0

Below this table, there are more parameters:

UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPAILE
	0	1.0	0

Then, there are two rows of parameters for surface definitions:

1	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	1	4	3	3			0	0

2	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.2	0.0	0.0	0.0	20	0	0.0	1.0E+20

Заготовка - пуансон

Шаг 18

Определение графика

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for defining a graph. The title bar reads 'Keyword Input Form'. At the top, there are buttons for 'NewID', 'Draw', 'RefBy', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. Below these, there is a checkbox for 'Use *PARAMETER' and '(Subsys: 1)'. The main title of the form is '*DEFINE_CURVE_(TITLE) (1)'. Below this, there is a field for 'TITLE'. There are also checkboxes for 'MPP1' and 'MPP2'. A table of parameters is visible:

1	LCID	SIDR	SFA	SFO	OFFA	OFFO	DATTYP
	1	0	1.0	1.0	0.0	0.0	0

Below this table, there is a section for 'Repeated Data by Button and List':

2	A1	O1
	0.020000	-2000.0000

At the bottom, there is a table with data points:

1	0.0000e+000	0.0000e+000
2	5.0000e-003	-2.0000e+003
3	2.0000e-002	-2.0000e+003

There is also a 'Data Pt. 3' section with a 'Load XYData' button and a table of actions:

Replace	Insert	Plot	Raise
Delete	Help	New	Padd

Определение графика движения пуансона:

Время = 0; 0.005; 0.02

Скорость = 0; -2000; -2000

Шаг 19

Определение графика прижима

1	LCID	SIDR	SFA	SFO	OFFA	OFFO	DATTYP
2		0	1.0	1.0	0.0	0.0	0

Repeated Data by Button and List

2	A1	O1
	0.020000	-7.8

Data Pt. 3

1	0.0000e+000	0.0000e+000
2	5.0000e-003	-7.8000e+000
3	2.0000e-002	-7.8000e+000

Buttons: Replace, Insert, Plot, Raise, Delete, Help, New, Padd

Определение графика движения прижима:

Время = 0; 0.005; 0.02

Перемещение = 0; -7.8; -7.8

Более правильно на прижим задавать давление.

Шаг 20

Определение движения на пуансоне

1	PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
4		3	0	1	1.0		1.0E+28	0.0

PID 4 – номер части пуансона;

DOF – движение по оси Z;

VAD=0 – флаг скорости;

LCID – кривая нагружения 1.

Шаг 21

Определение движения на прижиге

ID	TITLE	PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
2		3	2	2	2	1.0		1.0E+28	0.0

PID 2 – номер части прижима;

DOF – движение по оси Z;

VAD=2 – флаг перемещения;

LCID – кривая нагружения 2.

Шаг 22

Определение времени завершения

ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS
0.02	0	0.0	0.0	0.0

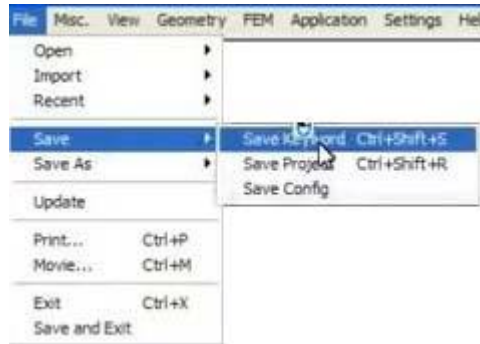
Шаг 23

Определение частоты записи выходных данных

DT	LCDT	BEAM	NPLTC	PSETID
0.001		0		

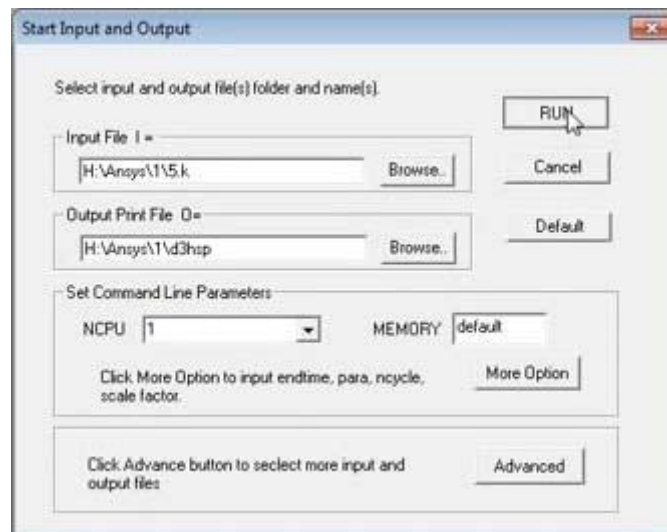
Шаг 24

Сохранение результатов



Шаг 25

Запуск на расчет



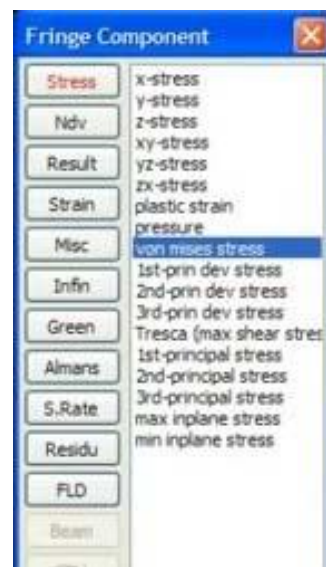
Шаг 26

Просмотр результатов по пластическим деформациям



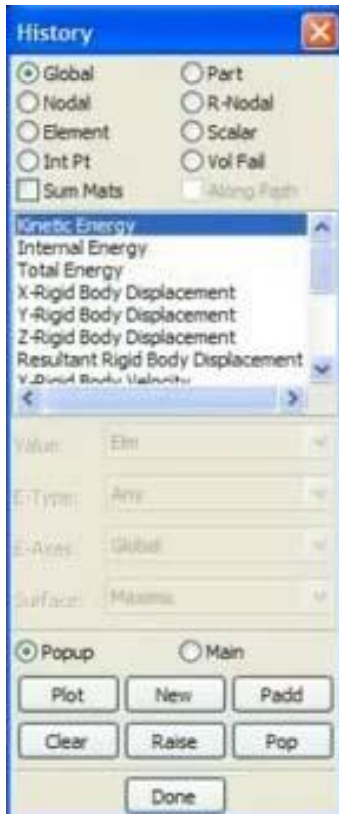
Шаг 27

Просмотр результатов по напряжениям



Шаг 28

Просмотр результатов кинетической энергии



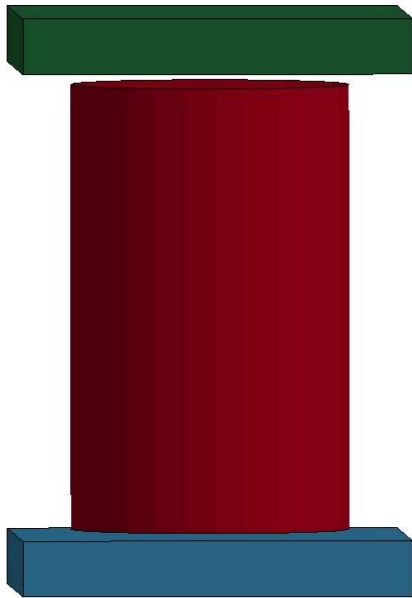
Шаг 29

Просмотр деформации для выбранного элемента



5. Горячая штамповка (осадка) цилиндрической заготовки

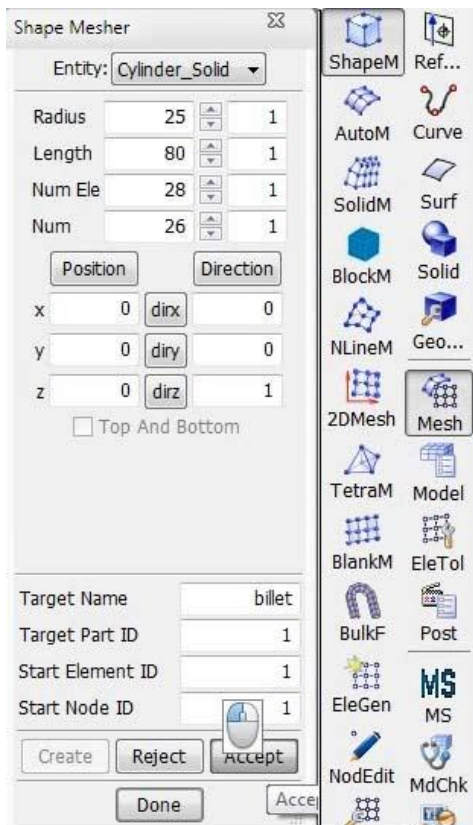
Моделирование процесса горячей штамповки (осадка цилиндрической заготовки). Учебный видеоролик <https://youtu.be/9mQL5QjVSz4>



Модель горячей осадки представлена цилиндрической заготовкой с размерами $\text{Ø}50 \times 80$ и двумя плитами-опорами $70 \times 70 \times 10$. Все части модели задаются solid элементами. Используется модель материала с учетом тепловых свойств. Задается исходная температура 850 C^0 на заготовке. В параметрах контакта учитывается тепловая передача. Нижняя опора закреплена. Верхняя опора перемещается со скоростью 2 м/сек .

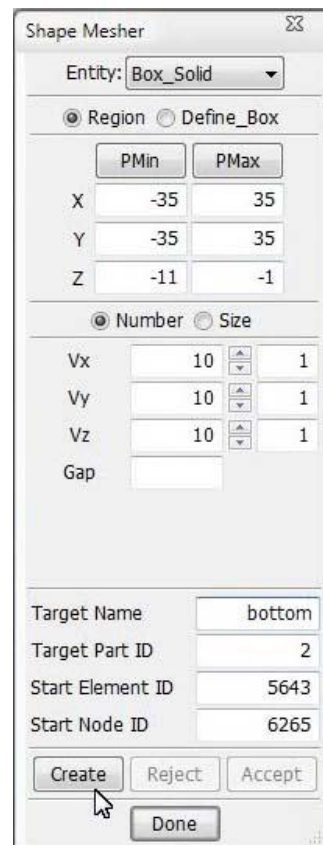
Шаг 1

Создание цилиндрической заготов



Шаг 2

Создание нижней опоры



Шаг 3

Создание верхней опоры

Shape Mesher

Entity:

Region Define_Box

	PMin	PMax
X	-35	35
Y	-35	35
Z	83	93

Number Size

Vx	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="1"/>
Vy	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="1"/>
Vz	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="1"/>
Gap	<input type="text"/>	

Target Name:

Target Part ID:

Start Element ID:

Start Node ID:

Шаг 4

Определение типа элемента

*SECTION_SOLID_(TITLE) (1)

TITLE

<u>SECID</u>	<u>ELFORM</u>	<u>AET</u>
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>

Шаг 5

Определение графика зависимости 1

*DEFINE_CURVE_(TITLE)

TITLE

<u>LCID</u>	<u>SIDR</u>	<u>SFA</u>	<u>SFO</u>	<u>OFFA</u>
11	0	1.0	1.0	0.

Repeated Data by Button and List

<u>A1</u>	<u>O1</u>
1000.0000	60000.000

```

1 0.0000e+000 2.0000e+005
2 3.0000e+002 2.0000e+005
3 1.0000e+003 6.0000e+004
    
```

Модуль Юнга от температуры

Шаг 6

Определение графика зависимости 2

*DEFINE_CURVE_(TITLE) (2)

TITLE

<u>LCID</u>	<u>SIDR</u>	<u>SFA</u>	<u>SFO</u>	<u>OFFA</u>
12	0	1.0000000	1.0000000	0.0

Repeated Data by Button and List

<u>A1</u>	<u>O1</u>
0.000	300.00000

```

1 0.0000e+000 3.0000e+002
2 7.0000e+002 2.4000e+002
3 8.0000e+002 1.7000e+002
4 9.0000e+002 1.0000e+002
5 1.0000e+003 5.0000e+001
6 1.1000e+003 3.0000e+001
    
```

Data Pt. 1

Replace

Delete

Предел текучести от температуры

Шаг 7

Принятая система измерения

	(a)	(b)	(c)
Единица длины	М	ММ	ММ
Единица времени	с	с	МС
Единица массы	кг	тонна	кг
Единица силы	НЬЮТОН	НЬЮТОН	КИЛОНЬЮТОН
Модуль Юнга для стали	210.0E+09	210.0E+03	210.0
Плотность стали	7.85E+03	7.85E-09	7.85E-06
Предел текучести мягкой стали	200.0E+06	200.0	0.200
Ускорение силы тяжести	9.81	9.81E+03	9.81E-03
Скорость, соответ. 30 милям в час	13.4	13.4E+03	13.4

Шаг 8

Определение материала заготовки

*MAT_ELASTIC_VISCOPLASTIC_THERMAL_(TITLE) (1)

TITLE
billet

1	<u>MID</u>	<u>RO</u>	<u>E</u>	<u>PR</u>	<u>SIGY</u>	<u>ALPHA</u>	<u>LCSS</u>
	1	7.850e-009	0.0	0.3000000	0.0	1.600e-005	0
2	<u>QR1</u>	<u>CR1</u>	<u>QR2</u>	<u>CR2</u>	<u>QX1</u>	<u>CX1</u>	<u>QX2</u>
	100.000000	4.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	<u>C</u>	<u>P</u>	<u>LCE</u>	<u>LCPR</u>	<u>LCSIGY</u>	<u>LCR</u>	<u>LCX</u>
	0.0	0.0	11	0	12	0	0

ALPHA – коэффициент линейного теплового расширения

QR1, CR1 – параметры изотропного упрочнения

LCE, LCSIGY – номера графиков модуля Юнга и предела текучести соответственно

Шаг 9

Определение материала опор

*MAT_ELASTIC_(TITLE) (1)

TITLE

<u>MID</u>	<u>RO</u>	<u>E</u>	<u>PR</u>	<u>DA</u>
2	7.850e-009	2.000e+005	0.3000000	0.0

Шаг 10

Определение тепловых свойств

*MAT_THERMAL_ISOTROPIC_(TITLE)

TITLE

<u>TMID</u>	<u>TRO</u>	<u>TGRLC</u>	<u>TGMULT</u>	<u>TLAT</u>
1	0.0	0.0	0.0	0.0
<u>HC</u>	<u>TC</u>			
4.600e+008	47.000000			

Определяем тепловые параметры заготовки

HC – теплоемкость

TC – теплопроводность

Шаг 11

Определение hourglass

*HOURGLASS_(TITLE) (1)

TITLE

HGID	IHQ	QM	IBQ	Q1	Q2	QB/VDC	QW
1	4	0.0500000	0	1.5000000	0.0600000	0.1000000	0.1000000

Шаг 12

Определяем часть 1

*PART_(TITLE) (3)

TITLE
billet

PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
1	1	1	0	1	0	0	1

Шаг 13

Определяем часть 2

*PART_(TITLE) (3)

TITLE
bottom

PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
2	1	2	0	1	0	0	1

Шаг 14

Определяем часть 3

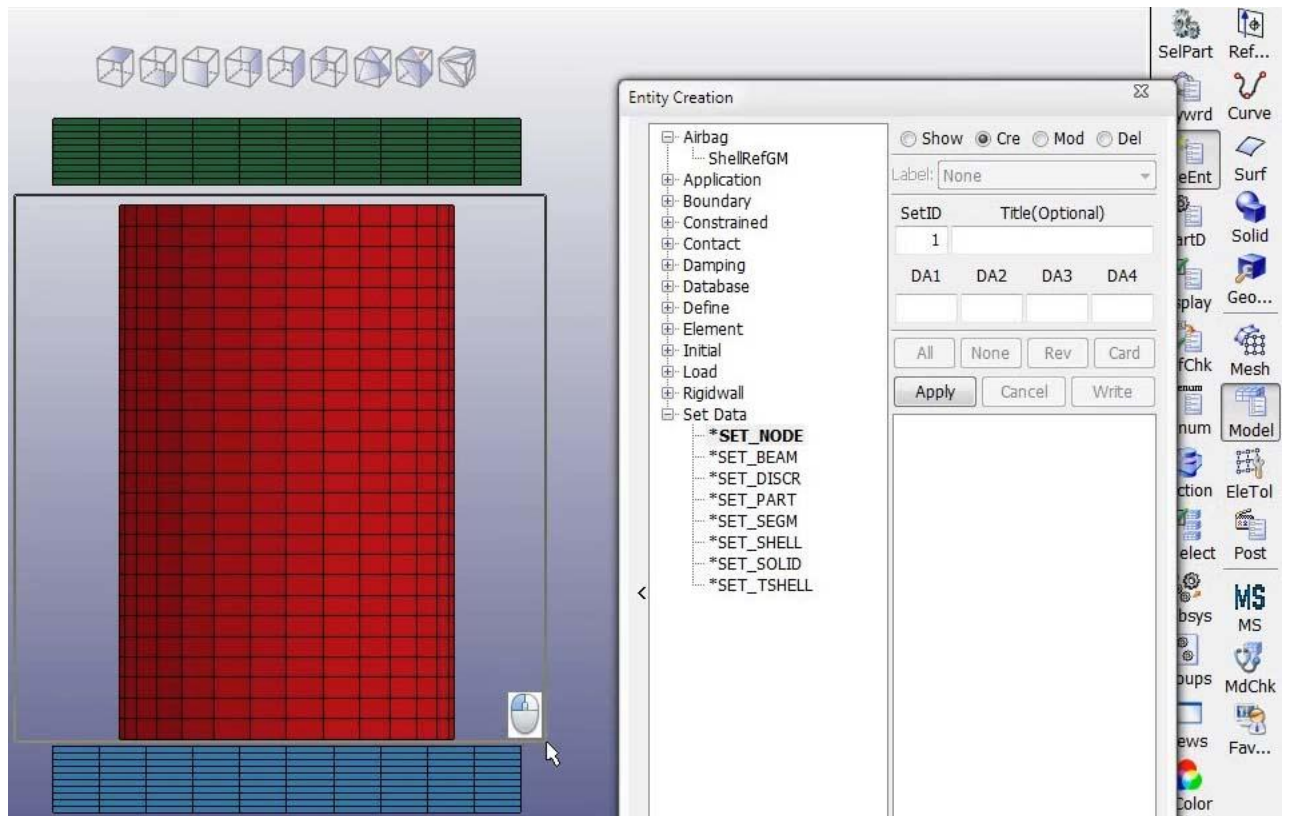
*PART_(TITLE) (3)

TITLE
top

PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
3	1	2	0	1	0	0	1

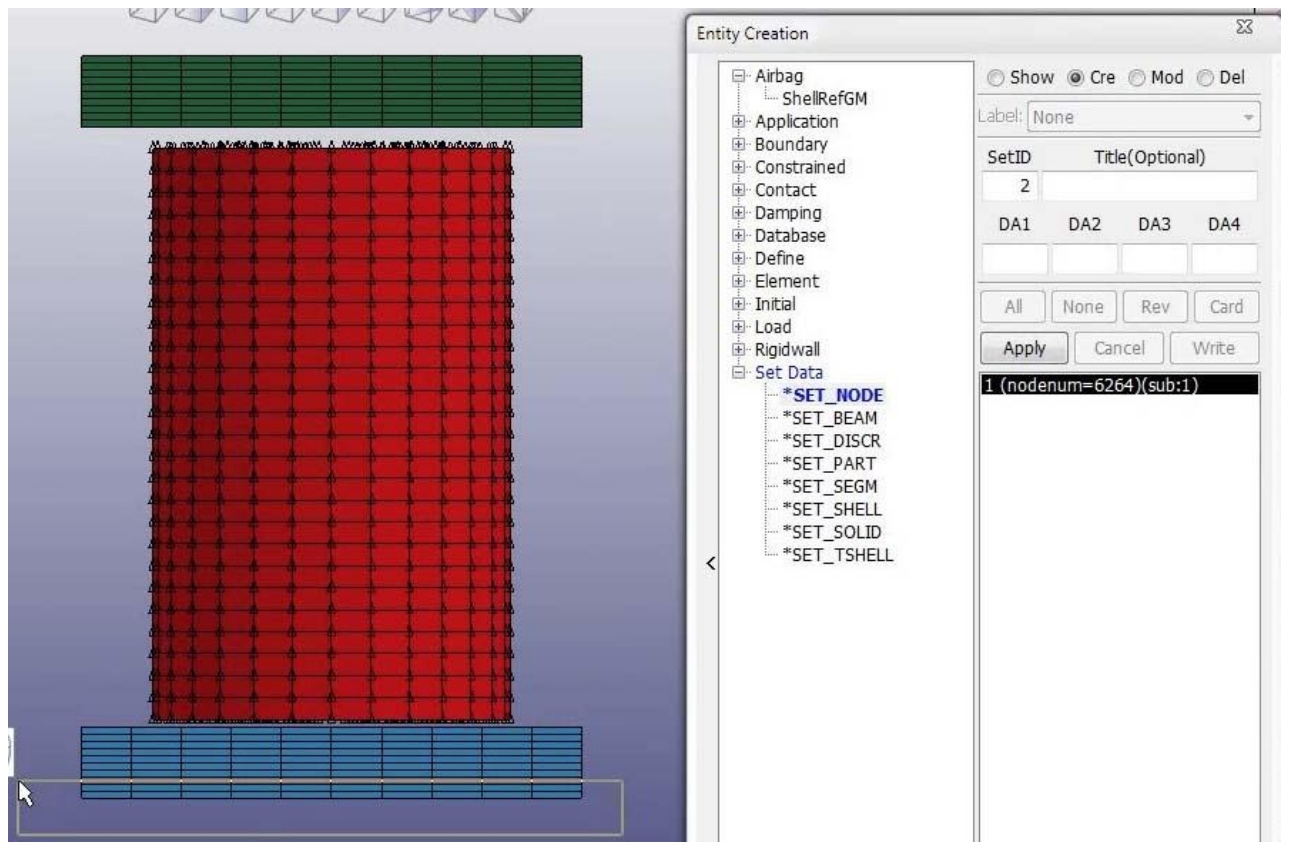
Шаг 15

Определяем узловой набор 1 (заготовка)



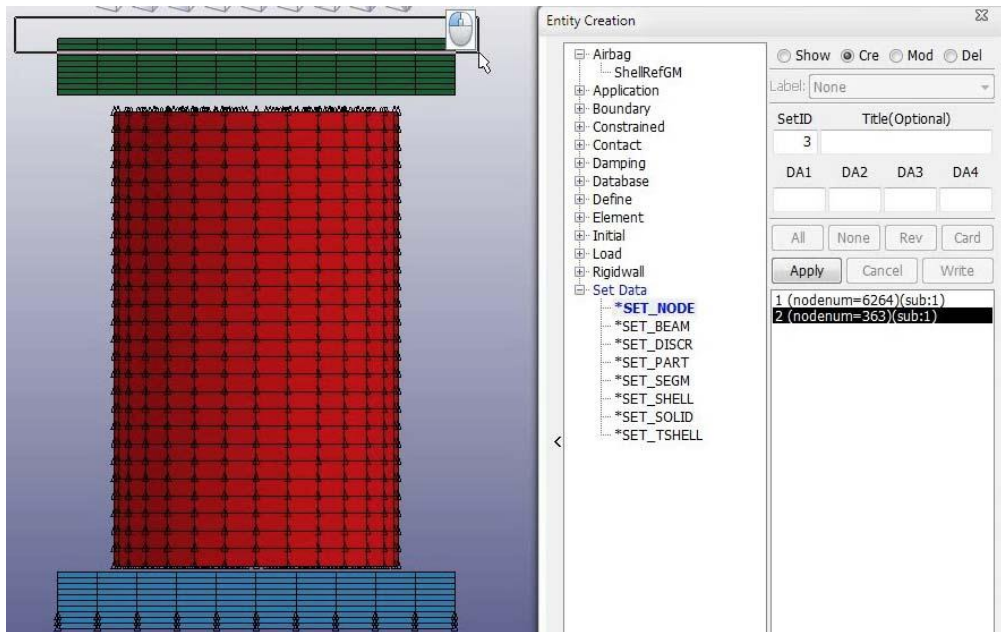
Шаг 16

Определяем узловой набор 2 (нижние узлы нижней опоры)



Шаг 17

Определяем узловой набор 3 (верхние узлы верхней опоры)



Шаг 18

Определение графика нагружения на верхнюю опору



Шаг 19

Определение нагрузки на верхнюю опору



Шаг 20

Полное ограничение узлового набора 2

Keyword Input Form

Use *Parameter (Subsys: 1 New_Subsystem_1)

*BOUNDARY_SPC_SET_(ID) (1)

ID	TITLE						
1							
<u>NSID</u>	<u>CID</u>	<u>DOFX</u>	<u>DOFY</u>	<u>DOFZ</u>	<u>DOFRX</u>	<u>DOFRY</u>	<u>DOFRZ</u>
2	0	1	1	1	1	1	1

Шаг 21

Ограничение узлового набора 3

*BOUNDARY_SPC_SET_(ID) (2)

ID	TITLE						
3							
<u>NSID</u>	<u>CID</u>	<u>DOFX</u>	<u>DOFY</u>	<u>DOFZ</u>	<u>DOFRX</u>	<u>DOFRY</u>	<u>DOFRZ</u>
3	0	1	1	0	1	1	1

(кроме оси Z)

Шаг 22

Определение контакта 1

CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)(THERMAL) (0)

CID	TITLE				
1					
<input type="checkbox"/> MPP1 <input type="checkbox"/> MPP2					
<u>IGNORE</u>	<u>BUCKET</u>	<u>LCBUCKET</u>	<u>NS2TRACK</u>	<u>INITITER</u>	<u>PARMAX</u>
0	200		3	2	1.0005
<u>UNUSED</u>	<u>CHKSEGS</u>	<u>PENSEF</u>	<u>GRPABLE</u>		
	0	1.0	0		
<u>SSID</u>	<u>MSID</u>	<u>SSTYP</u>	<u>MSTYP</u>	<u>SBOXID</u>	<u>MBOXID</u>
1	2	3	3		
<u>FS</u>	<u>FD</u>	<u>DC</u>	<u>VC</u>	<u>VDC</u>	<u>PENCHK</u>
0.2	0.0	0.0	0.0	20	0
<u>SFS</u>	<u>SFM</u>	<u>SST</u>	<u>MST</u>	<u>SFST</u>	<u>SFMT</u>
1.0	1.0			1.0	1.0
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal <input type="checkbox"/> T_Friction <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> AB <input type="checkbox"/> ABC <input type="checkbox"/> ABCD					
<u>CF</u>	<u>FRAD</u>	<u>HTC</u>	<u>GCRIT</u>	<u>GMAX</u>	<u>CD_FACT</u>
		47	0.002	10	0.5

HTC – теплопроводность; QCRIT – критический зазор для задания тепловой проводимости; GMAX – максимальное значение зазора при котором тепловой контакт отсутствует;

Шаг 23

Определение контакта 2

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)_(THERMAL)

<u>CID</u>	<u>TITLE</u>	<input type="checkbox"/> MPP1		<input type="checkbox"/> MPP2		
2						
<u>IGNORE</u>	<u>BUCKET</u>	<u>LCBUCKET</u>	<u>NS2TRACK</u>	<u>INITITER</u>	<u>PARMAX</u>	
0	200		3	2	1.0005	
<u>UNUSED</u>	<u>CHKSEGS</u>	<u>PENSF</u>	<u>GRPABLE</u>			
	0	1.0	0			
<u>SSID</u>	<u>MSID</u>	<u>SSTYP</u>	<u>MSTYP</u>	<u>SBOXID</u>	<u>MBOXID</u>	
1	3	3	3	0	0	
<u>FS</u>	<u>FD</u>	<u>DC</u>	<u>VC</u>	<u>VDC</u>	<u>PENCHK</u>	
0.2000000	0.0	0.0	0.0	20.000000	0	
<u>SFS</u>	<u>SFM</u>	<u>SST</u>	<u>MST</u>	<u>SFST</u>	<u>SFMT</u>	
1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal		<input type="checkbox"/> T_Friction	<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> AB	<input type="checkbox"/> ABC	<input type="checkbox"/> ABCD
<u>CF</u>	<u>FRAD</u>	<u>HTC</u>	<u>GCRIT</u>	<u>GMAX</u>	<u>CD_FACT</u>	
0.0	0.0	47.000000	0.0020000	10.0000000	0.5000000	

Шаг 24

Определение температуры

*INITIAL_TEMPERATURE_SET

<u>NSID</u>	<u>TEMP</u>	<u>LOC</u>
0	20.000000	0

Для всех неуказанных узлов

Шаг 25

Определение температуры заготовки

*INITIAL_TEMPERATURE_SET

<u>NSID</u>	<u>TEMP</u>	<u>LOC</u>
1	850	0

!Важно не перепутать последовательность определения температуры!

Шаг 26

Определение связного анализа

*CONTROL_SOLUTION			
<u>SOLN</u>	<u>NLQ</u>	<u>ISNAN</u>	<u>LCINT</u>
2		0	100

Шаг 27

Определение времени завершения

*CONTROL_TERMINATION				
<u>ENDTIM</u>	<u>ENDCYC</u>	<u>DTMIN</u>	<u>ENDENG</u>	<u>ENDMAS</u>
0.02	0	0.0	0.0	100000000.0

Шаг 28

Определение параметров теплового решателя

*CONTROL_THERMAL_SOLVER (0)					
<u>ATYPE</u>	<u>PType</u>	<u>SOLVER</u>	<u>CGTOL</u>	<u>GPT</u>	<u>EQHEAT</u>
1	2	1	1.0E-04	8	1.0

Шаг 29

Определение тепловых параметров для временного шага

*CONTROL_THERMAL_TIMESTEP (0)						
<u>TS</u>	<u>TIP</u>	<u>ITS</u>	<u>TMIN</u>	<u>TMAX</u>	<u>DTEMP</u>	<u>TSCP</u>
1	0	5e-4	5e-6	0.0025	15	0.5

Шаг 30

Определение выходных параметров ASCII

*DATABASE_OPTION (0)				
<input checked="" type="checkbox"/> GLSTAT	<u>DT</u>	<u>BINARY</u>	<u>LCUR</u>	<u>IOOPT</u>
	2e-5	0	0	1

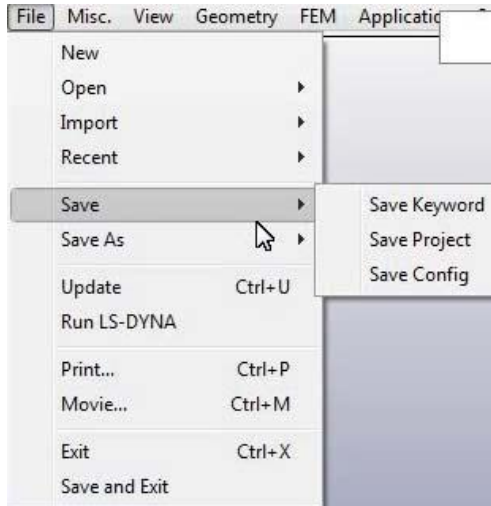
Шаг 31

Определение частоты записи выходных файлов

*DATABASE_BINARY_D3PLOT (1)					
<u>DT</u>	<u>LCDT</u>	<input checked="" type="checkbox"/> <u>BEAM</u>	<u>NPLTC</u>	<u>PSETID</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
0.0	0	0	100	0	

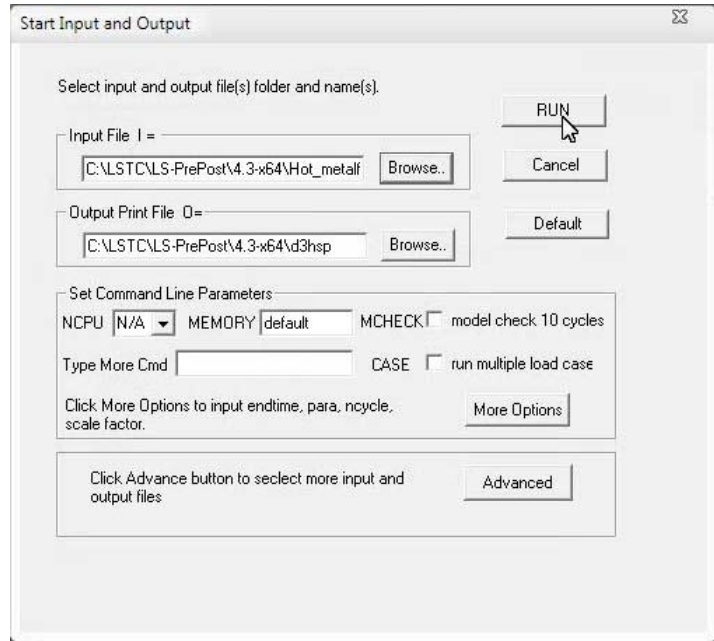
Шаг 32

Сохранение файла



Шаг 33

Запуск на расчет



Шаг 34

Вывод по пластическим деформациям



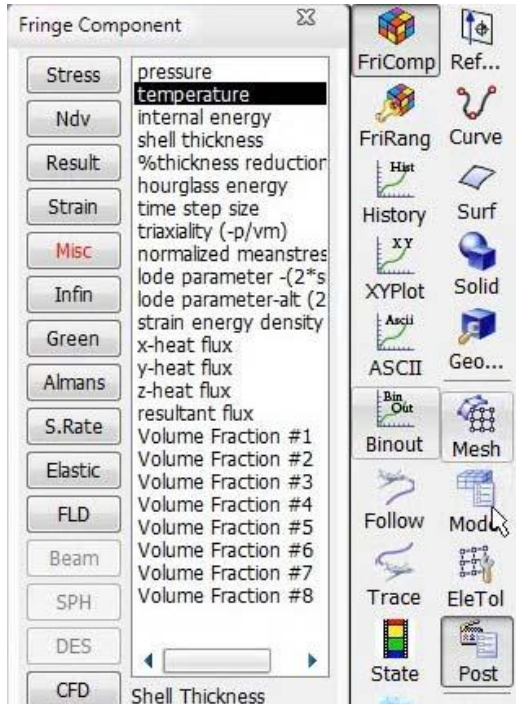
Шаг 35

Вывод по напряжению



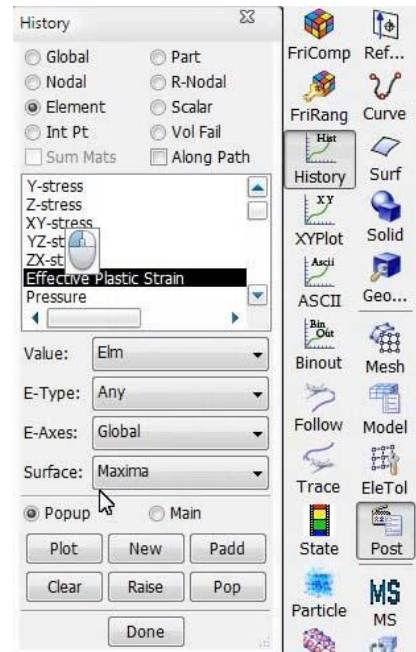
Шаг 36

Вывод по температуре



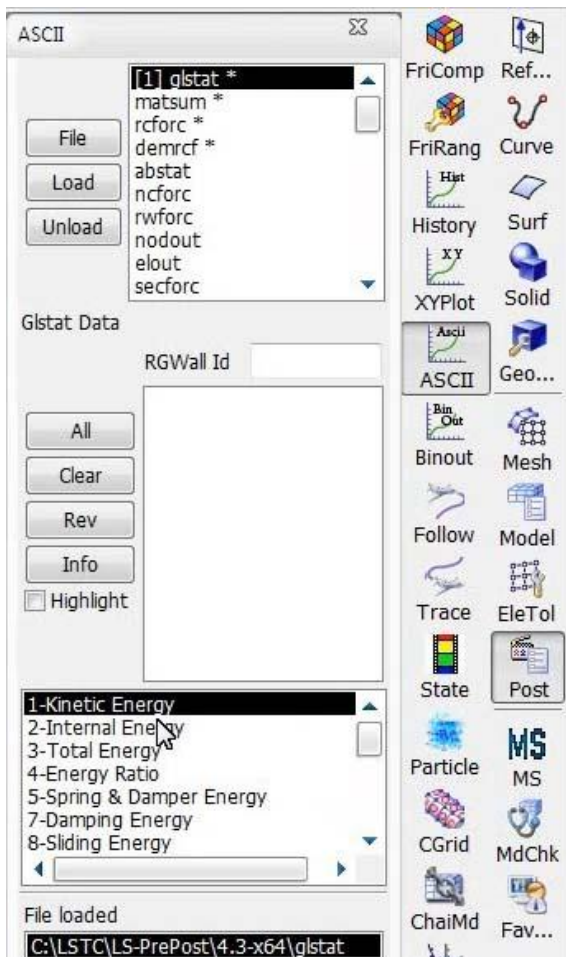
Шаг 37

Построение графиков выбранных элементов



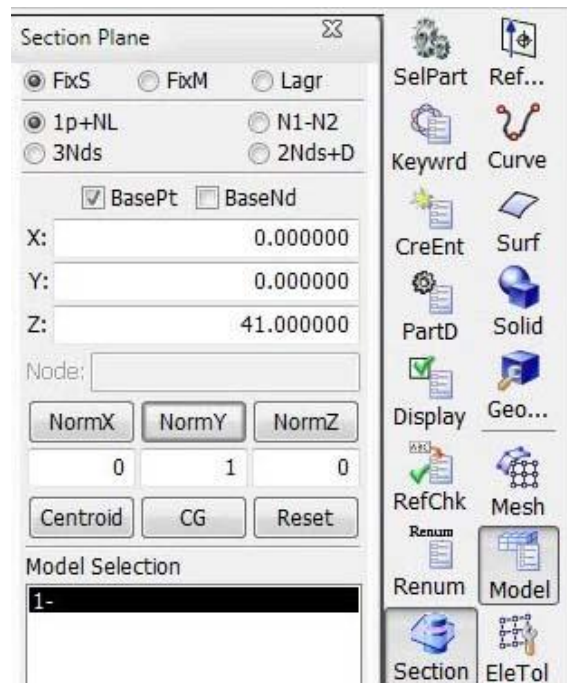
Шаг 38

Вывод графиков из ASCII файлов



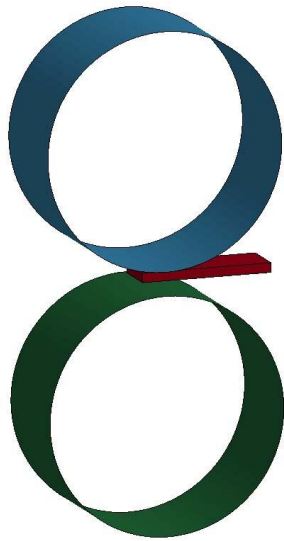
Шаг 39

Просмотр сечений



6. Прокатка заготовки между цилиндрическими роликами

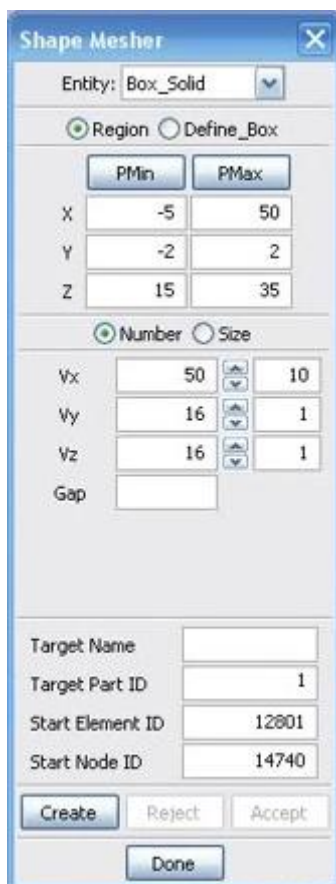
Учебный видеоролик <https://youtu.be/Td2xsoeGBpo>



Модель прокатки представлена двумя цилиндрическими роликами диаметром 100 мм и шириной 50 мм и заготовкой 55x20x4 мм. В исходном положении ролики разведены и заготовка продвинута вперед для контакта. В процессе прокатки ролики сводятся и одновременно задается вращение. Заготовка представлена упруго-пластической моделью, ролики твердой моделью.

Шаг 1

Создание конечно-элементной модели заготовки



Шаг 2

Создание конечно-элементной модели верхнего ролика



Диаметр 100 мм, ширина 50 мм.
Направление оси по z

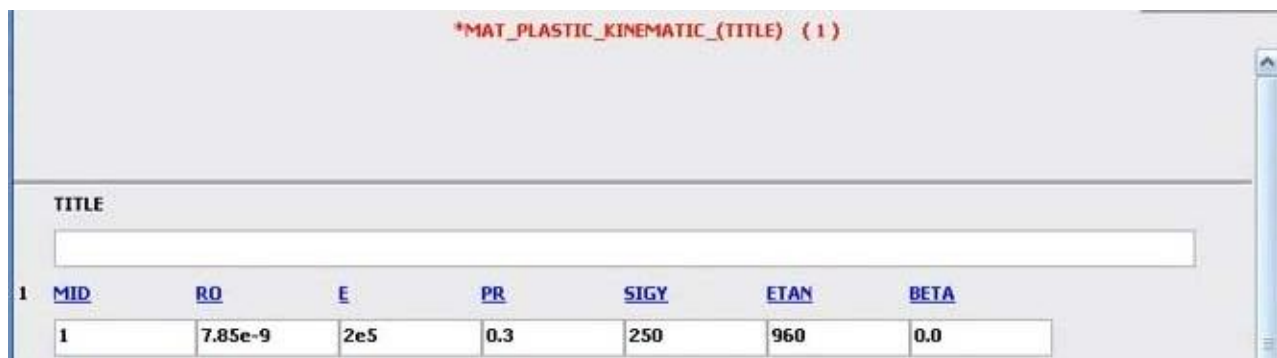
Шаг 3

Создание конечно-элементной модели нижнего ролика



Шаг 4

Определение модели материала заготовки



Шаг 5

Определение модели материала ролика 1

*MAT_RIGID_(TITLE) (0)

TITLE

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	2	7.85e-9	2e5	0.3	0	0	0	

2	CMO	CON1	CON2
	1	6	4

Шаг 6

Определение модели материала ролика 2

Keyword Input Form

NewID MatDB Pick RefBy Add Accept Delete Default Done

Use *PARAMETER (Subsys: 1) Settings

*MAT_RIGID_(TITLE) (2)

TITLE

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
	3	7.85e-9	2e5	0.3	0	0	0	

2	CMO	CON1	CON2
	1	6	4

Шаг 7

Определение типа элемента заготовки

*SECTION_SOLID_(TITLE) (0)

TITLE

1	SECID	ELFORM	AET
	1	1	0

Шаг 8

Определение типа элемента роликов

***SECTION_SHELL_(TITLE) (0)**

TITLE

1	SECID	ELFORM	SHRF	NIP	PROPT	QR/IRID	ICOMP	SETYP
	2	2	1.0	2	1	0	0	1

2	T1	I2	I3	I4	NLOC	MAREA	IDOF	EDGSET
	1	1	1	1	0.0	0.0	0.0	0

Толщина оболочки 1 мм

Шаг 9

Определение контроля искажения

***HOURGLASS_(TITLE) (0)**

TITLE

1	HGID	IHQ	QM	IBQ	Q1	Q2	QB/VDC	QW
	1	5	0.1	0	1.5	6.0E-02	0.1	0.1

Шаг 10

Определение части 1 (заготовка)

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

***PART_(TITLE) (3)**

TITLE

boxsolid

2	PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAY	ADPOPT	TMID
	1	1	1	0	1	0	0	0

1 boxsolid
2 cylindershell
3 cylindershell

Заготовка – Part 1 – Элемент Solid – Material 1

Шаг 11

Определение части 2 (верхний ролик)

NewID	Draw	RefBy	Pick	Add	Accept	Delete	Default	Done
	<input type="checkbox"/> Use *PARAMETER						(Subsys: 1)	Setting

*PART_(TITLE) (3)

1 TITLE
cylindershell

PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADOPT	TMID
2	2	2	0	0	0	0	0

1 boxsolid
2 cylindershell
3 cylindershell

Верхний ролик – Part 2 – Элемент Shell – Material 2

Шаг 12

Определение части 3 (нижний ролик)

NewID	Draw	RefBy	Pick	Add	Accept	Delete	Default	Done
	<input type="checkbox"/> Use *PARAMETER						(Subsys: 1)	Setting

*PART_(TITLE) (3)

1 TITLE
cylindershell

PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADOPT	TMID
3	2	3	0	0	0	0	0

1 boxsolid
2 cylindershell
3 cylindershell

Нижний ролик – Part 3 – Элемент Shell – Material 3

Шаг 13

Определение контакта заготовка - верхний ролик

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)_ (THERMAL) (1)

CID	TITLE
1	

MPP1 MPP2

IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARM8
0	200		3	2	1.0005		0

UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPABLE
	0	1.0	0

1	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	1	2	3	3			0	0

2	FS	FD	DC	YC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.2	0.0	0.0	0.0	20	0	0.0	1.0E+20

Шаг 14

Определение контакта заготовка - нижний ролик

*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_(ID/TITLE/MPP)_ (THERMAL) (1)

CID	TITLE
2	

MPP1 MPP2

IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARM8
0	200		3	2	1.0005		0

UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPABLE
	0	1.0	0

1	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	1	3	3	3			0	0

2	FS	FD	DC	YC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.2	0.0	0.0	0.0	20	0	0.0	1.0E+20

Шаг 15

Определение графика нагружения 1

*DEFINE_CURVE_(TITLE) (1)

TITLE

1 **LCID** **SIDR** **SFA** **SFO** **OFFA** **OFFO** **DATTYP**

1	0	1.0	1.0	0.0	0.0	0
---	---	-----	-----	-----	-----	---

Repeated Data by Button and List

2 **A1** **O1**

0.1	20
-----	----

1	0.0000e+000	0.0000e+000
2	1.0000e-002	2.0000e+001
3	1.0000e-001	2.0000e+001

Data Pt. 3 Load XYData

Replace	Insert	Plot	Raise
Delete	Help	New	Padd

График для вращения нижнего ролика

Время = 0; 0.01; 0.1

Угловая скорость = 0; 20; 20

Шаг 16

Определение графика нагружения 2

1 **LCID** **SIDR** **SFA** **SFO** **OFFA** **OFFO** **DATTYP**

2	0	1.0	1.0	0.0	0.0	0
---	---	-----	-----	-----	-----	---

Repeated Data by Button and List

2 **A1** **O1**

0.100000	-20.000000
----------	------------

1	0.0000e+000	0.0000e+000
2	1.0000e-002	-2.0000e+001
3	1.0000e-001	-2.0000e+001

Data Pt. 3 Load XYData

Replace	Insert	Plot	Raise
Delete	Help	New	Padd

График для вращения верхнего ролика

Время = 0; 0.01; 0.1

Угловая скорость = 0; -20; -20

Шаг 17

Определение графика нагружения 3

1 **LCID** **SIDR** **SFA** **SFO** **OFFA** **OFFO** **DATTYP**

3 0 1.0 1.0 0.0 0.0 0

Repeated Data by Button and List

2 **A1** **O1**

0.100000 3

1	0.0000e+000	0.0000e+000
2	1.0000e-002	3.0000e+000
3	1.0000e-001	3.0000e+000

Data Pt. 3 Load XYData

Replace	Insert	Plot	Raise
Delete	Help	New	Padd

График перемещения нижнего ролика

Время = 0; 0.01; 0.1

Перемещение = 0; 3; 3

Шаг 18

Определение графика нагружения 4

1 **LCID** **SIDR** **SFA** **SFO** **OFFA** **OFFO** **DATTYP**

4 0 1.0 1.0 0.0 0.0 0

Repeated Data by Button and List

2 **A1** **O1**

0.100000 -3.000000

1	0.0000e+000	0.0000e+000
2	1.0000e-002	-3.0000e+000
3	1.0000e-001	-3.0000e+000

Data Pt. 3 Load XYData

Replace	Insert	Plot	Raise
Delete	Help	New	Padd

График перемещения верхнего ролика

Время = 0; 0.01; 0.1

Перемещение = 0; -3; -3

Шаг 19

Определение карты нагружения 1

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_(ID) (0)

ID	TITLE

1 **PID** **DOF** **YAD** **LCID** **SE** **VID** **DEATH** **BIRTH**

3 7 0 1 1.0 1.0E+28 0.0

Шаг 20

Определение карты нагружения 2

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_(ID) (1)

ID	TITLE							
1	PID	DOF	YAD	LCID	SF	YID	DEATH	BIRTH
2	7	0	2	1.0		1.0E+28	0.0	

Шаг 21

Определение карты нагружения 3

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_(ID) (2)

ID	TITLE							
1	PID	DOF	YAD	LCID	SF	YID	DEATH	BIRTH
3	2	2	3	1.0		1.0E+28	0.0	

Шаг 22

Определение карты нагружения 4

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_(ID) (4)

ID	TITLE							
1	PID	DOF	YAD	LCID	SF	YID	DEATH	BIRTH
2	2	2	4	1.0		1.0E+28	0.0	

Шаг 23

Определение времени завершения

*CONTROL_TERMINATION (0)

1	ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS
	0.03	0	0.0	0.0	0.0

Шаг 24

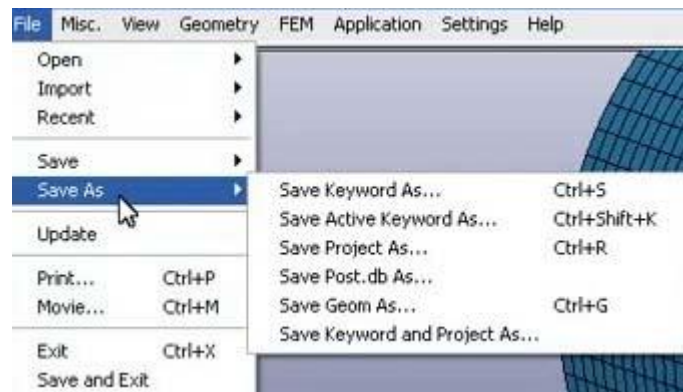
Определение частоты записи выходных файлов

*DATABASE_BINARY_D3PLOT (0)

1	DT	LCDI	BEAM	NPLTC	PSETID
	0.001		0		

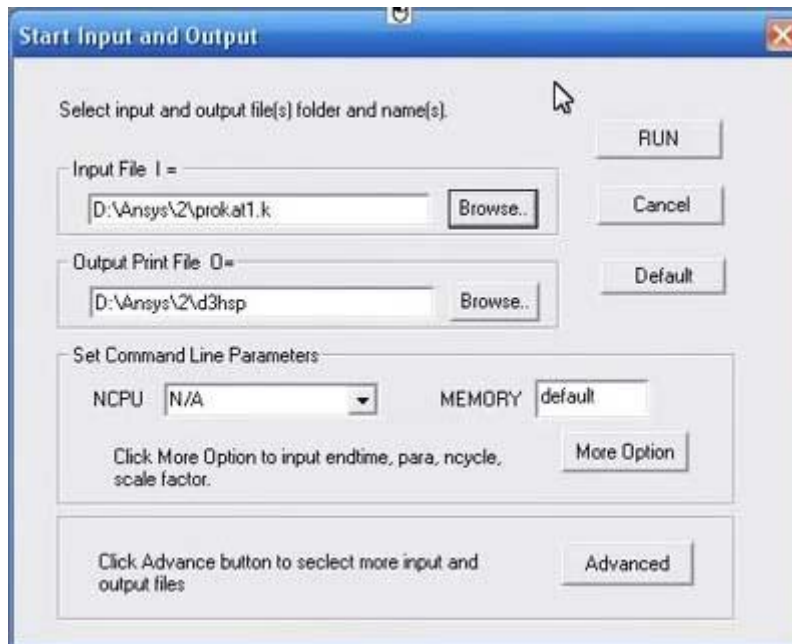
Шаг 25

Сохранение файла



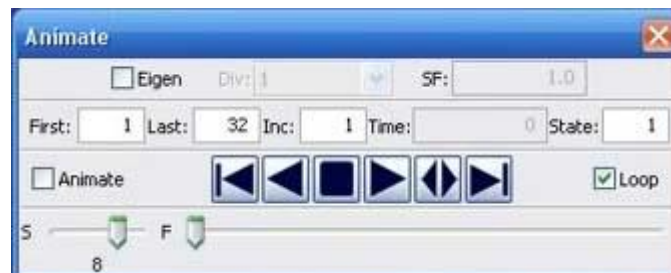
Шаг 26

Запуск на расчет



Шаг 27

Анимация процесса



Шаг 28

Просмотр по пластическим деформациям



Шаг 29

Просмотр по напряжениям



Шаг 30

Вывод по кинетической энергии



Шаг 31

Просмотр параметров по одному элементу



АО “Ульяновский НИАТ” - одно из ведущих предприятий России, которое более 30 лет разрабатывает и производит профилегибочное оборудование. При разработке технологических процессов используется средства компьютерного моделирования, имеет коммерческую лицензию программы LS-DYNA - <http://ulniat.ru>

Базовая кафедра “Технологии ЗПП” при УлГТУ проводит учебную и научную работу с технологиями обработки листовых материалов с использованием средств компьютерного моделирования процессов - <http://tzshp.ru>

Информационная поддержка **ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс»** - ANSYS, лицензирование, внедрение, консалтинг - <http://www.cadfem-cis.ru>

Составитель материалов курса лекций **Илюшкин Максим Валерьевич**, к.т.н., e-mail: fzbm@mail.ru

Опыт применения программы LS-DYNA более 10 лет. Шесть курсов обучения у инструкторов LSTC, Dynaform, Dynamore (Paul DuBios, Art Shapiro, M'hamed Souli, Inaki Caldichoury и др.).

Наши примеры моделирования (Youtube)	https://www.youtube.com/user/fzbm12/videos
Обучающие примеры в программе LS-DYNA (рус.)	http://tzshp.ru
Группа в контакте “Кафедра “ТЗПП” инженерный анализ ANSYS LS-DYNA”	https://vk.com/club130155677
Видеоуроки в LS-DYNA (анг.)	http://lsdyna-tutorials.com

ЗАО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс» - <http://www.cadfem-cis.ru>
ANSYS, лицензирование, внедрение, консалтинг
Филиал в ПФО: 443069, г. Самара, ул. Авроры, д. 110, корпус 1,
офис 406

ООО “ДайнаРу” <http://lsdyna.ru/>
Российский дистрибьютер программы LS-DYNA