

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

Базовая кафедра “Технологии заготовительно-  
штамповочного производства” при УлГТУ

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

**ТЕОРИЯ и ПРАКТИКА**

**Методические материалы для повышения квалификации специали-  
стов по моделированию процессов обработки металлов (обработка  
давлением и механообработка)**

Ульяновск

2024 г

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ.....	5
1.1. Программа LS-Dyna .....	5
1.2. Методы расчета в LS-Dyna.....	7
1.3. Основы теории явного метода динамики.....	8
2. ВВЕДЕНИЕ В LS-DYNA.....	13
2.1. Структура программы LS-Dyna.....	13
2.2. Этапы проведения расчета.....	14
2.3. Структура файлов.....	15
2.4. Применение препроцессора ls-prepost.....	19
2.5. Единицы измерения.....	20
3. СОЗДАНИЕ СЕТОЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ.....	21
3.1. Требования.....	21
3.2. Методы создания конечно-элементных моделей.....	23
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛА.....	25
4.1. Модели материалов в LS-DYNA.....	25
4.2. Характеристики упруго-пластического материала.....	25
4.3. Методики идентификации параметров модел. материала	40
4.4. Валидация моделей.....	45
4.5. Определение упругого материала .....	47
4.6. Определение упруго-пластического материала.....	47
4.7. Определение твердого материала.....	66
4.8. Определение тепловых моделей материала.....	68
4.9. Модели накопления повреждения и разрушения.....	70
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПОВ ЭЛЕМЕНТА.....	76
5.1. Обзор существующих типов элемента.....	76
5.2. Объемный элемент.....	77
5.3. Оболочечный элемент.....	79
5.4. Искажения Hourglass.....	84
6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЖЕНИЯ И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ.....	87

6.1. Определение нагружения.....	87
6.2. Определение начальной скорости.....	88
6.3. Определение узловых наборов.....	88
6.4. Типы ограничений.....	88
6.5. Демпфирование.....	89
7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ.....	91
7.1. Алгоритмы контактного взаимодействия.....	91
7.2. Типы контактов для процессов металлообработки.....	92
8. НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТА.....	93
8.1. Шаг интегрирования.....	93
8.2. Настройка параметров решателя.....	93
8.3. Адаптивное разбиение.....	95
8.4. Варианты запуска файла на расчет.....	97
9. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ В LS-PREPOST.....	98
9.1. Визуализация результатов.....	98
9.2. Графики и таблицы.....	99
9.3. Секущие плоскости.....	101
9.4. Векторные результаты.....	102
9.5. Анимации.....	103
10. РЕКОМЕНДАЦИИ.....	105
10.1. Параметры для моделирования процессов ОМД.....	105
10.2. Параметры для моделирования разделительных операции	108
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	110
ПРАКТИКА.....	112
1. Осадка заготовки в 2D постановке.....	112
2. Сеточное моделирование в LS-Prepost.....	117
3. Осадка заготовки в 3D постановке (простая модель).....	129
4. Простая модель ударного взаимодействия в 2d постановке	132
5. Идентификация параметров моделей материала.....	135
6. Вытяжка детали из листовой заготовки с адаптивным перестроением.....	138

7. Горячая штамповка (осадка) цилиндрической заготовки.....	151
8. Прокатка заготовки между цилиндрическими роликами.....	163
9. Разделительная операция – процесс резки.....	175
Приложение 1: Темы для учебных заданий процессов обработки металлов для моделирования в LS-DYNA.....	180
Приложение 2: Учебный курс «Моделирование ударов и разрушения в программе LS-DYNA».....	185
Приложение 3: Учебный курс «Моделирование процессов обработки металлов в программе LS-DYNA».....	187
Приложение 4: Видеоуроки “Моделирование в программе LS-DYNA”.....	189

Составитель данного курса к.т.н. Илюшкин М.В.

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.

#### 1.1.2. 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 [2];
- 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 [28]:

- 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 (SPG, 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.

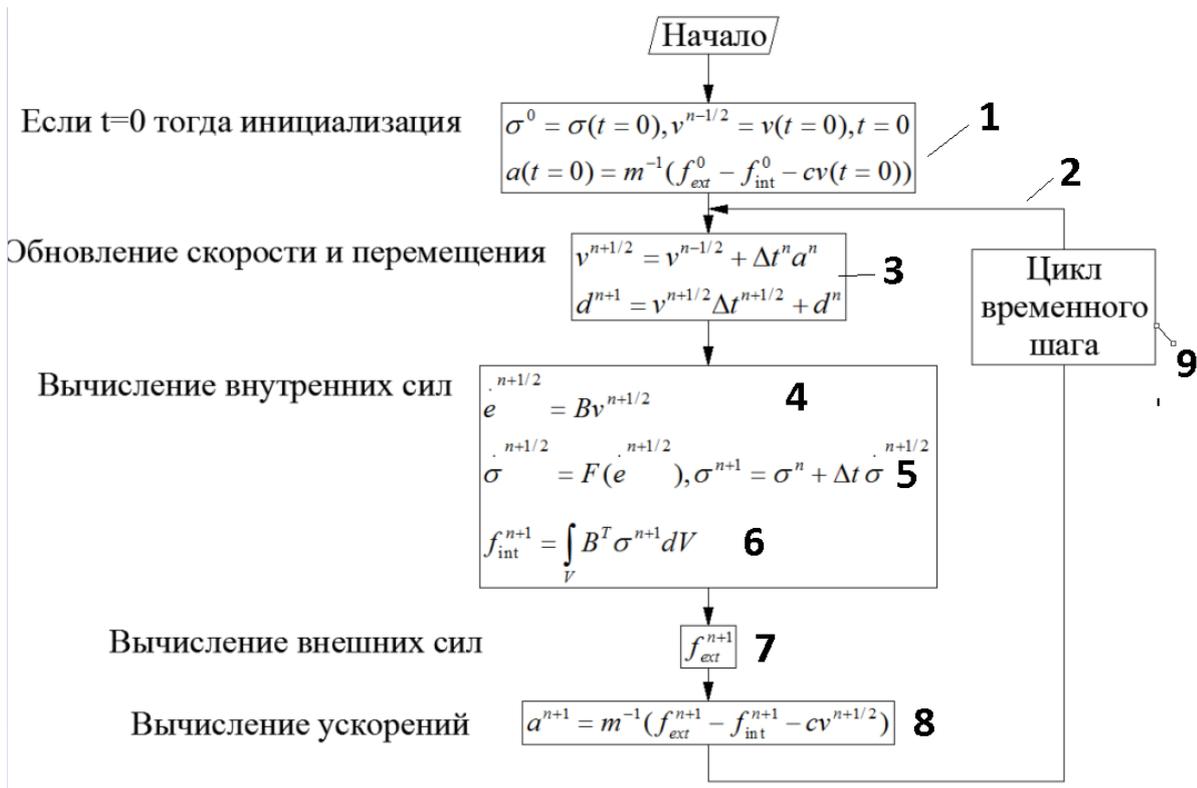


Рис. 1.1. Блок-схема для выполнения явного анализа [4]

Последовательность расчета явного анализа:

1. В начальный момент времени ( $t=0$ ) напряжения, скорости, ускорения равны нулю или соответствуют заданным граничным условиям в момент времени  $t=0$ ;
2. Проходит временной шаг  $n+1$ ;
3. Рассчитываются скорости и перемещения в момент времени  $n+1/2$  для скорости и  $n+1$  для перемещения;
4. Рассчитываются скорость деформации во время  $n+1/2$  от скорости и матрицы  $B$  (матрица напряжение - перемещение);

5. Рассчитывается напряжение во время  $n+1$  в зависимости от скорости деформации;
6. Рассчитываются внутренние силы во время  $n+1$  в зависимости от напряжения и матрицы  $B$ ;
7. Вычисляются внешние силы в момент времени  $n+1$ ;
8. Вычисляются ускорения исходя из разницы сил и массы;
9. Величина временного шага увеличивается на  $n+1$  и цикл повторяется.

### 1.3.2. Временной шаг интегрирования

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

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

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:

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

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

- для 3D задачи деформированного состояния упругого тела:

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

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

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

где  $a_i$  – длина стороны конечного элемента,  $D_i$  – длина диагонали конечного элемента,  $A$  – площадь конечного элемента,  $E$  – модуль упругости,  $\nu$  - коэффициент Пуассона,  $\rho$  - плотность.

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

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

### 1.3.3. Массовое масштабирование

Массовое масштабирование используется для уменьшения времени расчета и заключается во внесении искусственной массы. Например, для 4-х угольного элемента:

$$\Delta\tau = \frac{L}{c}, \quad c = \frac{L}{\Delta\tau} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}},$$

$$\Delta\tau = TSSFAC \frac{L}{\sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}}$$

Массовое скалирование очень полезно и позволяет напрямую увеличить временной шаг.

Варианты использования:

1. Увеличить плотность материала. Можно использовать не для динамического моделирования (т.е. там, где эффекты инерции незначительные);

2. Непосредственно ввести величину временного шага (отрицательная величина DT2MS на карте \*Control\_timestep). Отрицательное значение позволяет увеличить массу мелких и жестких элементов.

Таким образом, добавляются искусственные силы инерции. Это означает, что нужно использовать их с осторожностью.

Для задач ударов и краш-тестов рекомендуется, чтобы добавочная масса не превышала 5% от массы системы или 10% от массы любой части. Но по опыту работы для задач обработки материалов давлением временной шаг можно увеличивать кратно (в 10-20 раз), что связано с относительно малыми скоростями деформирования в данных процессах.

Добавочная масса может быть отслежена в \*Database\_ASCII. G1stat для все модели и Matsum для отдельных частей.

Для включения вывода добавленной массы установить в \*Database\_extent\_binary параметр STSST=3 и MSSCL=2 (или 1).

При расчете в LS-DYNA будет использована наименьшая величина временного шага (соответствует наименьшему элементу).

## 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].

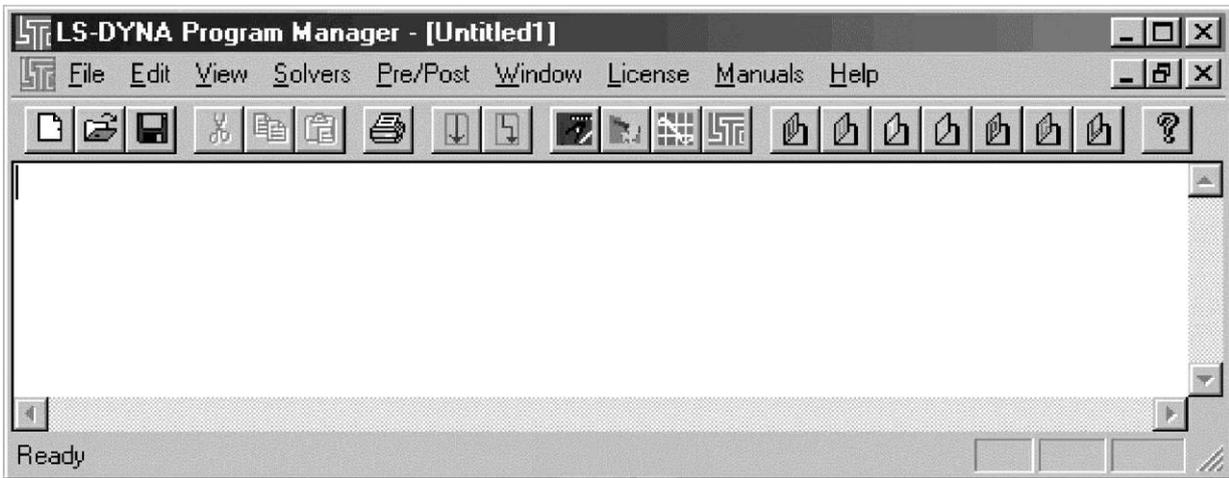


Рис. 2.1. Панель LS-DYNA program manager

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 к-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 [28].

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. [28].

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 программы 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 [28].

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. Исход-

ные данные выводятся в файл D3HSP. Пользователю следует всегда проверять выходные файлы D3HSP или MESSAG на наличие в них слова “Error”.

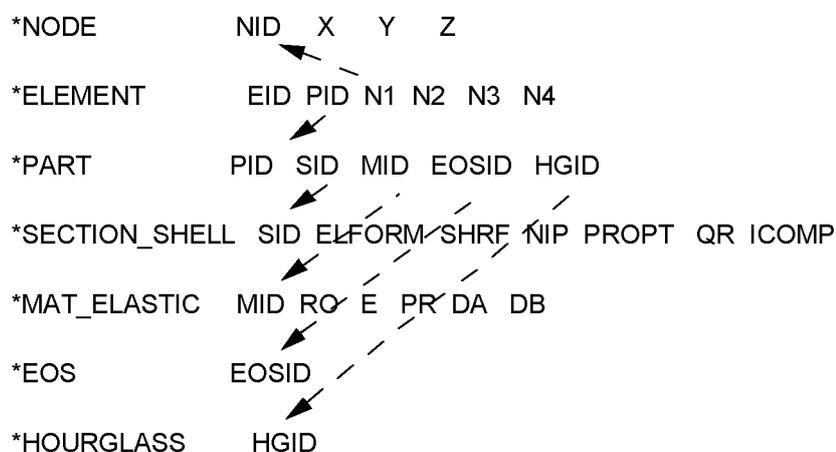


Рис. 2.3. Организация ввода с помощью ключевых слов [28]

Для лучшего понимания идеи использования ключевых слов ниже приводится краткий обзор некоторых основных ключевых слов [28].

Ключевое слово	Описание
<b>*BOUNDARY</b>	Эта карта применяется для различных методов определения нагружения, описания граничных состояний. Также существуют возможность узлового ограничения в секции <b>*NODE</b>
<b>*CONSTRAINED</b>	Используется для определения связанных степеней свободы. Для примера, узловые твердые тела, заклепки, сварные точки, линейные ограничения, и др.
<b>*CONTACT</b>	Задаёт способ обработки контактного взаимодействия между частями модели
<b>*CONTROL</b>	Опции доступные в секции <b>*CONTROL</b> устанавливают глобальные параметры, такие как время завершения, величина временного шага, тепловые настройки процесса и др.
<b>*DAMPING</b>	Определяет демпфирование глобально или для каждой части
<b>*DATABASE</b>	Это слово с комбинацией опций может быть ис-

	пользовано 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.

## 2.4. Применение препроцессора ls-prepost

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

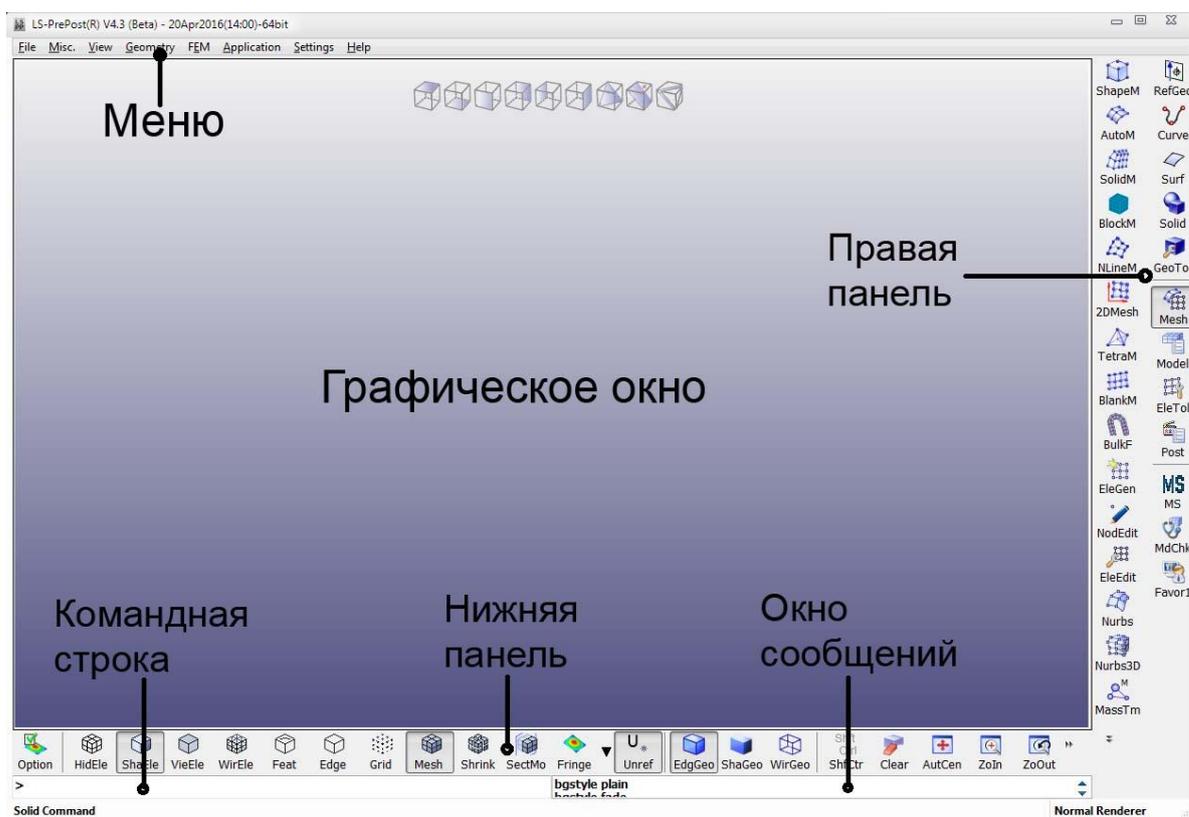


Рис. 2.4. Программа LS-PREPOST версии 4.3 и выше

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 [28]:

- [усилие] = [масса]\*[ускорение];
- [ускорение] = [длина]/[время<sup>2</sup>].

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 2	Сеточное моделирование в LS-PREPOST
Семинар 3	Осадка заготовки в 3D постановке (простая модель)
Семинар 4	Простая модель ударного взаимодействия в 2d постановке

## ГЛАВА 3

### 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:

- сетка должна быть разумной (адекватной)
- упорядоченная сетка более предпочтительна, чем произвольная (рис. 3.1)
- необходимо избегать по возможности треугольной сетки для оболочечных элементов. Не более 10%.
- необходимо избегать тетраэдрической формы для объемных элементов. Не более 10%.
- 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.

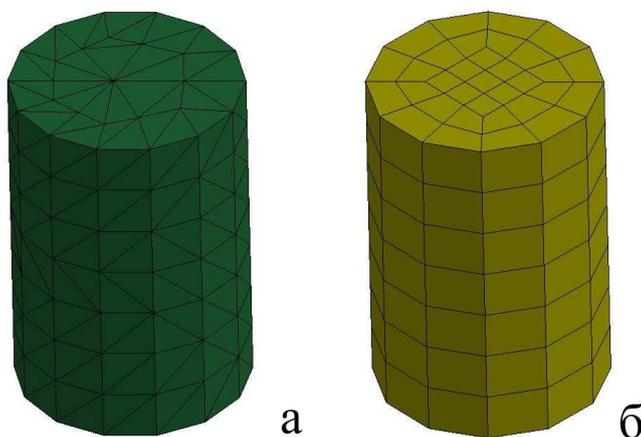


Рис. 3.1. Примеры конечно-элементных сеток [14]: а – произвольная, б – упорядоченная

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). Solid, shell, beam.

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.

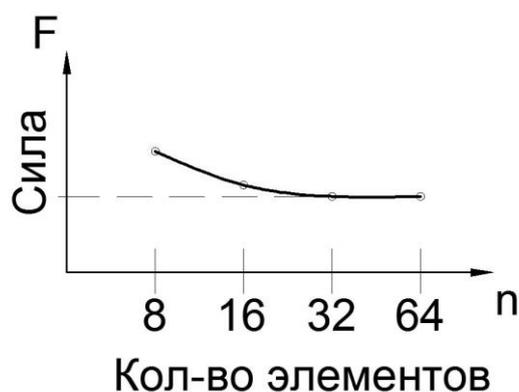


Рис. 3.2. Влияние количества элементов на точность расчета [14]

### 3.2. Способы 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. Импорт КЭМ из других программ hipermesh, ANSA, Nastran и др.
  3. Создание k-файла в программе Ansys Mechanical, Ansys Workbench или в любой другой программе поддерживающей создание карт ls-dyna.

## 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 металлообработки представлены в таблице 4.1.

Табл. 4.1

Модели материалов для процессов металлообработки

Изотропные пластические	3, 15, 18, 24, 106
Твердые (rigid)	20
Анизотропные пластические	36, 37 – для листовой штамповки, 39 (с FLD)
Тепловые	T1

#### 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  $\sigma$  - напряжение,

$E$  - модуль Юнга,

$\varepsilon$  - 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 распростра-

ненным видом неупругого поведение материала, является **пластическое состояние** (описываемое кривой упрочнения).

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. При небольших скоростях удара (до 5-10 м/сек) анализ можно проводить 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).

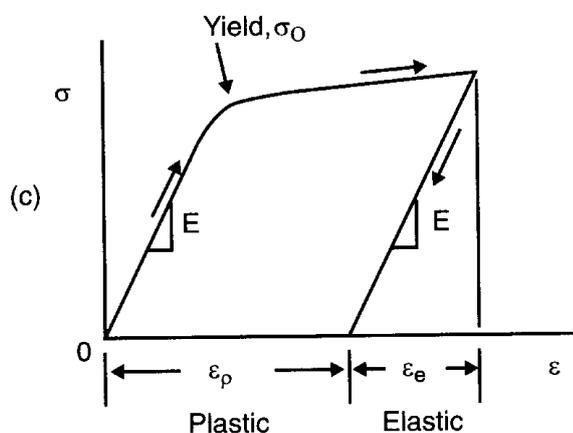


Рис. 4.1. График напряжение-деформация [15]

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  $\sigma_{\text{eng}}$  - инженерные напряжения,  
 $P$  - приложенная нагрузка,  
 $A$  - площадь поперечного сечения,  
 ния,

$\varepsilon_{\text{eng}}$  - инженерные деформации,  
 $\Delta L$  - изменение длины,  
 $L$  - начальная длина.

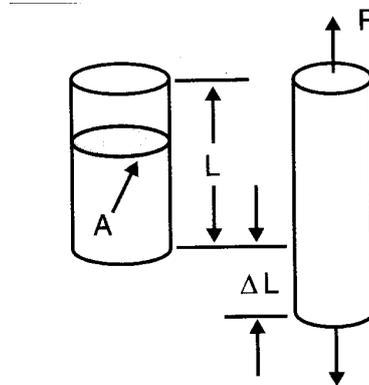


Рис. 4.2. Одноосное растяжение образца [15]

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  $\sigma_{\text{true}}$  - 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 «текущность». В одномерном случае текущность 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 развивался (рис. 4.1). Такое возрастание напряжений называется упрочнением.

Для получения данных о пластичности материала (в простом случае) 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 материала). Это особенно актуально при моделировании процессов разрушения.*

---

Виды простых моделей материала:

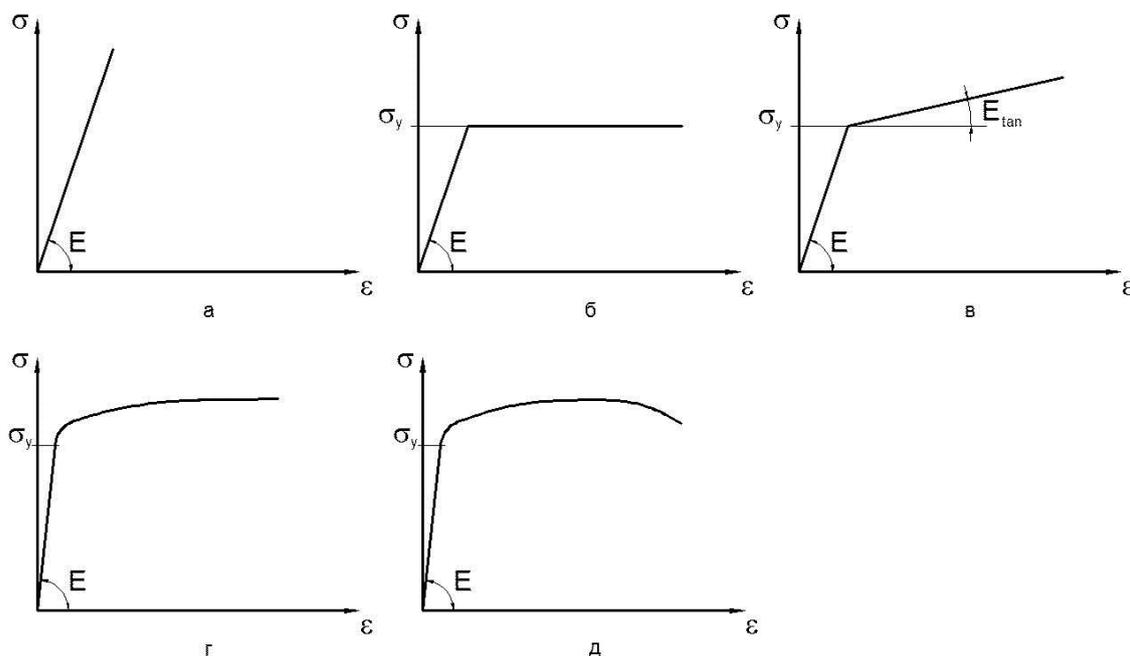


Рис. 4.3. Виды простых моделей материала: а – упругая модель  $\sigma = E \cdot \epsilon$ ; б – упругая – идеально пластическая модель; в – упруго-пластическая (билинейная) модель, г – упруго-пластическая модель в степенном виде, д- упруго-пластическая кусочно-линейная модель

## 4.2.2. Испытание на растяжение, сжатие, диаграммы испытаний

Для оценки механических свойств широко используются статические испытания, которые проводятся с применением разных схем напряженного состояния в образце. К основным разновидностям статических испытаний относятся испытания на растяжение, сжатие, изгиб и кручение.

Испытание на одноосное растяжение – наиболее распространенный вид испытаний для оценки свойств металлов и сплавов – сравнительно легко подвергаются анализу, позволяют по результатам одного опыта определять сразу несколько важных механических характеристик материалов, являющихся критерием его качества необходимых для конструкторских расчетов.

Методы испытания на растяжение стандартизованы. Имеются отдельные стандарты на испытания при комнатной температуре (ГОСТ 1497-84).

Для проведения испытаний на растяжение (ГОСТ 1497-84) используются образцы круглого или прямоугольного сечения (рис. 4.4б). Для испытания листовых материалов используются плоские образцы (рис. 4.4в).

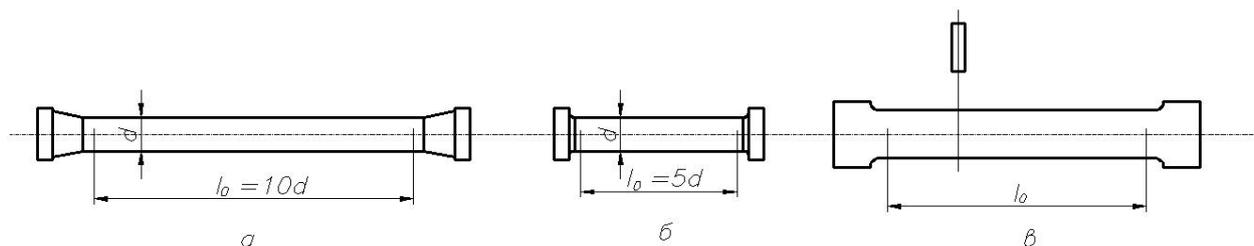


Рис. 4.4. Размеры образцов для испытания на растяжения

Наиболее ценные сведения при изучении характера деформируемости каждого материала можно получить из диаграмм испытания образцов. По данным, полученным из опытной диаграммы, строят диаграмму растяжения.

Диаграммой растяжения называется график, показывающий функциональную зависимость между нагрузкой и деформацией при статическом растяжении образца до его разрыва.

На рис. 4.5 показан вид диаграммы растяжения малоуглеродистой стали в координатах:

Нагрузка  $F(t) = f$  (абсолютное удлинение  $\Delta l(t)$ )

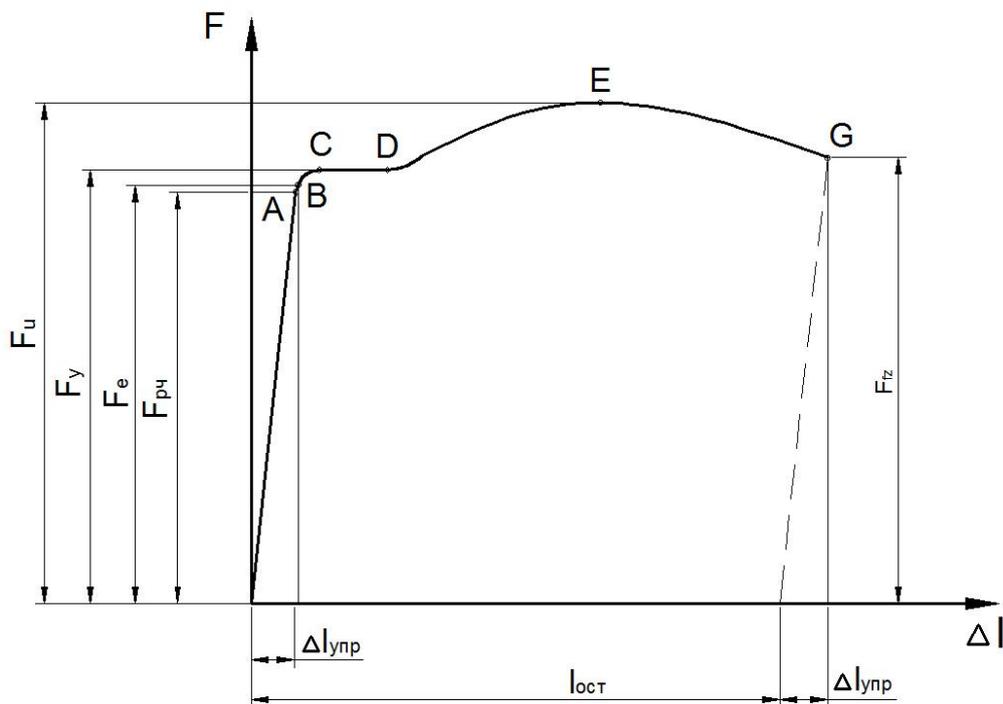


Рис. 4.6. Диаграмма растяжения пластичного материала

На диаграмме растяжения OABCDEG показаны 7 характерных точек, соответствующих определенному уровню нагрузки и ограничивающих 6 различных зон деформирования:

OA – зона пропорциональности (линейной упругости);

AB – зона нелинейной упругости;

BC – зона упругопластических деформаций;

CD – зона текучести (пластических деформаций);

DE – зона упрочнения;

EG – зона закритических деформаций.

Прямолинейный участок OA диаграммы соответствует состоянию материала образца описываемому законом Гука; наклон прямой OA к оси абсцисс характеризует жесткость материала. В пределах закона Гука тангенс угла наклона прямой  $F = f(\Delta l)$  к оси  $\Delta l$  определяется величиной E:

$$\operatorname{tg} \alpha = F / \Delta l = E$$

Точка А соответствует его пределу пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$ , т.е. наибольшему напряжению, до которого материал следует закону Гука, которое определяется как отношение силы, при котором эта пропорциональность еще не нарушается, к начальной площади поперечного сечения образца:

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{F_{\text{пц}}}{A_0}.$$

На участке ОВ материал ведет себя упруго.

На участке CD, называемом площадкой текучести, происходит значительное удлинение образца при почти постоянном уровне нагрузки, когда  $\Delta F \cong 0$ . Такое состояние материала называется текучестью.

Ордината точки С на диаграмме соответствует пределу текучести  $\sigma_y$  материала образца. Под пределом текучести понимается то напряжение при котором происходит рост деформаций без заметного увеличения нагрузки и определяется как отношение силы, соответствующей точки С к начальной площади поперечного сечения образца

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0}.$$

У материалов, не имеющих на диаграмме явно выраженной площадки текучести, принимают условный предел текучести  $\sigma_{y,0.2}$ , при котором остаточное удлинение образца  $\Delta l$  достигает 0,2%.

На участке DE после выхода на поверхность большей части дефектов кристаллической решетки материал самоупрочняется. Указанный участок диаграммы называется зоной упрочнения. При подходе к т. Е деформации начинают локализоваться в области наиболее слабого сечения, где зарождается шейка образца.

Точка Е на диаграмме характеризует наибольшей ординатой, соответствующей пределу прочности или временного сопротивления материала  $\sigma_u$ , т.е. отношению максимальной силы, которую способен выдержать образец, к его начальной площади поперечного сечения

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0}$$

На участке EG заканчивается формирование шейки. В точке G происходит разрыв образца. Его размеры восстанавливаются на величину

упругой деформации. У многих материалов разрушение происходит без заметного образования шейки. Сила, соответствующая точке G, называется разрушающей силой  $F_{fr}$ , а напряжение – истинным сопротивлением разрыву (истинным пределом прочности).

Разрушающие напряжение делятся на условные и истинные:

$$\sigma_{fr}^c = \frac{F_{fr}}{A_0} - \text{условное}; \quad \sigma_{fr}^{tr} = \frac{F_{fr}}{A_1} - \text{истинное},$$

где  $F_{fr}$  - разрушающая нагрузка;  $A_1$  - площадь поперечного сечения образца в месте разрыва.

Так как первоначальная площадь  $A_0$  приблизительно в два раза превышает площадь разрыва  $A_1$ , а разрушающая нагрузка  $F_{fr}$  составляет приблизительно 80% от наибольшей нагрузки  $F_u$ , то

$$\sigma_{fr}^c < \sigma_u; \quad \sigma_{fr}^{tr} > \sigma_u.$$

Например, для низкоуглеродистой стали Ст3  $\sigma_u = 380$  МПа,  $\sigma_{fr}^{tr} = 800 \dots 1000$  МПа.

Пределы пропорциональности и упругости характеризуют упругие свойства материала. Пределы текучести и прочности являются характеристиками прочности материала. Пластичность материала оценивают относительными остаточными деформациями накопленными образцом до его разрушения: относительным остаточным удлинением:

$$\varepsilon_r = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%;$$

и относительным остаточным сужением  $\psi$  площади сечения образца при разрыве

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100\%;$$

где  $l_0$  и  $A_0$  - начальная длина и площадь сечения образца;  $l_1$  и  $A_1$  - длина и площадь сечения образца, измеренные после его разрушения.

Сложенные части разорванного образца из пластичного материала длиннее исходного на величину остаточной деформации. Упругая часть деформации при разрушении образца исчезает.

Повторное нагружение разгруженного образца позволяет получить укороченную диаграмму, являющуюся продолжением начального участка полной диаграммы. Линия повторного нагружения практически совпадает с линией разгрузки. Аналогичная картина наблюдается при разгрузке и повторном нагружении образца для любой точки.

Укороченная диаграмма характерна для образцов, изготовленных из материала в результате холодной обработки (ковки, штамповки, вытяжки) и получившего деформационное или механическое упрочнение или наклеп (упрочнение материала). Модуль упругости материала при этом практически не изменится, точки А и В на укороченной диаграмме окажутся намного выше, площадка текучести исчезнет. Это означает, что при наклепе повышаются прочностные свойства металла, но снижаются свойства пластичности и он станет ближе к хрупким материалам у которых диаграмма испытания очень короткая, так как образцы разрушаются при весьма малых остаточных деформациях [15].

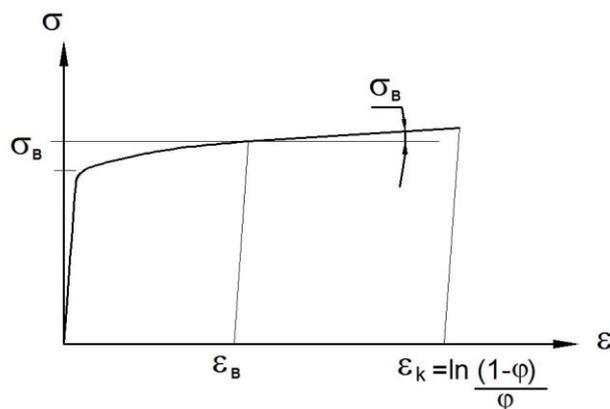
Наклеп наблюдается не у всех материалов и металлов, например, свинец, олово и др. Явление наклепа широко используется в технике, например, упрочнение деталей, подвергая их при изготовлении пластическому деформированию.

В зависимости от характеристик пластичности материалы подразделяют на пластичные и хрупкие. К хрупким относят материалы с малым относительным остаточным удлинением при разрыве ( $\epsilon_r < 2...5\%$ ), например чугун, бетон, стекло. Диаграмма растяжения хрупких материалов, например чугуна, не имеет площадки текучести. Для хрупких материалов при испытании на растяжение определяется в основном только пределом прочности  $\sigma_u$ . Образец из хрупких материалов разрушаются без образования шейки и зон сдвига.

Деление материалов на пластичные и хрупкие вообще условно, так как их механические свойства зависят от состояния, обусловленные условиями эксплуатации. Пластичные материалы при низких температурах разрушаются хрупко, а хрупкие при высоких давлениях проявляют пластичные свойства.

---

*Во многих случаях не важно иметь точные данные при утонении, и мы можем просто нарисовать прямую от начала образования шейки до точки разрушения.*



---

Пластические свойства металлов (в отличие от упругих свойств) можно изменять путем сплавления и термообработки. Так предел текучести железа подобными методами можно повысить в 50 раз.

Если первоначально растянуть пластичный материал за предел текучести, а потом разгрузив сжать его, то наблюдается понижение величины предела текучести. Такое явление, называемое эффектом Баушингера, связано с анизотропным упрочнением, т.е. упрочнением, зависящим от направления нагружения.

Уменьшение предела текучести при сжатии в точности равно превышению исходного предела текучести при растяжении. Эффект Баушингера имеет место в металлах при смене знака нагружения. Учет эффекта Баушингера важен при расчетах циклических нагрузок. Имеют место два основных типа упрочнения: изотропное и кинематическое. При изотропном упрочнении абсолютные величины предела текучести при сжатии и растяжения всегда равны.

---

*Параметры  $\sigma_B$  и  $\delta$  для большинства материалов не являются предельными характеристиками. При  $\sigma = \sigma_B$  начинается образовываться шейка. У пластичных материалов при растяжении образуется шейка. В момент начала местного сужения сила достигает своего максимального значения и при развитии сосредоточенной деформации убывает. Поэтому у пластичных материалов  $\sigma_B$  соответствует переходу от равномерной деформации к сосредоточенной.*

---

---

$\sigma_K = F_K / S_{\text{кон}}$  - величина приближения из-за неравномерного распределения напряжений в шейке.

Величина  $\delta$  значительно меньше сосредоточенной  $e_K$

Истинная деформация разрушения  $e_K$  определяется по формуле

$$e_K = \ln\left(\frac{1}{1-\varphi}\right)$$

В случае отсутствия точных данных по данному параметру значение  $e_K$  (для пластичных металлов) примерно соответствует значению  $3\delta$ .

---

Изотропное упрочнение рекомендуется использовать при учете конечных деформаций (больших истинных деформаций, превосходящих в металлах 5-10 %) в случае пропорционального нагружения. Кинематическое упрочнение следует использовать в случае непропорционального или циклического нагружения, когда истинные деформации относительно малы (менее 5-10% для металлов).

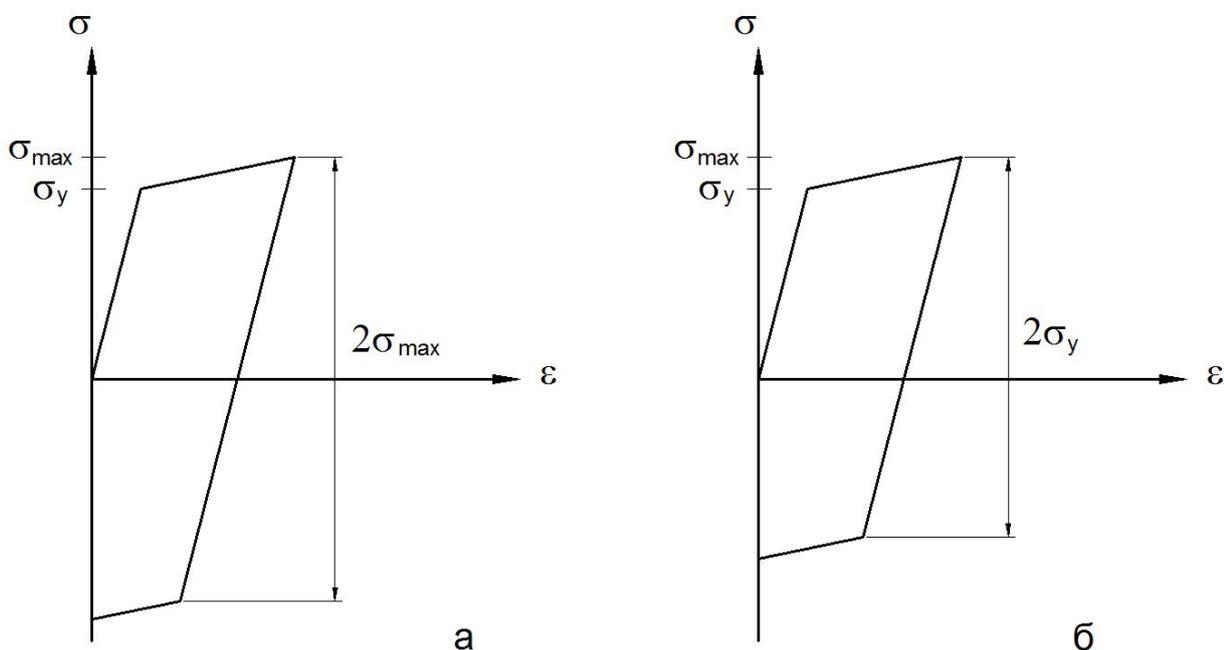


Рис. 4.7. Графики упрочнения: а – изотропное, б - кинематическое

При использовании билинейной модели материала величина  $\sigma_T$  принимается равной пределу текучести  $\sigma_{0,2}$ , модуль упрочнения рассчитывается по формуле:

$$E_t = \frac{\sigma_B - \sigma_{0.2}}{\delta} - \text{где } \delta \text{ соответствует параметру } \sigma_B.$$

Разрушающая (предельная) деформация:

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

---

*Одноосные испытания позволяют получить:*

- *предел упругости и текучести, которые характеризуют сопротивление малым пластическим деформациям;*
  - *предел прочности  $\sigma_B$  - характеризует сопротивление значительным пластическим деформациям и разрушению;*
  - *конечная точка истинной диаграммы  $\sigma_k$  - характеризует сопротивление разрушению;*
  - *относительное удлинение образца  $\delta$ , сужение шейки  $\varphi$ , которые характеризует пластичность.*
- 

#### **4.2.3. Обработка экспериментальных данных и построение кривых деформирования для оценки упруго-пластических свойств материалов [20]**

После статистических и динамических испытаний на одноосное растяжение получают кривые деформирования.

В момент начала местного сужения образца сила достигает своего максимального значения и при развитии сосредоточенной деформации убывает. Поэтому у пластичных металлов  $\sigma_B$  не характеризует сопротивление разрушению и соответствует лишь моменту перехода от равномерной к сосредоточенной деформации.

При обработке экспериментальных данных связь между условной относительной деформацией  $\varepsilon_0$  и истинной (логарифмической) деформацией  $\varepsilon$  оценивается по соотношению:

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_0),$$

$$\text{где } \varepsilon_0 = \Delta L / L_0$$

Действительная площадь сечения образца при растяжении определялась из условия, что пластическое течение происходит при неизменном объеме, тогда

$$\sigma = \sigma_0[1 + \varepsilon_0],$$

где  $\sigma$  - истинное напряжение,  $\sigma_0$  - условное напряжение.

В этом случае зависимость истинного напряжения  $\sigma$  от логарифмической деформации  $\varepsilon$  называется действительной диаграммой деформирования. Для одноосного растяжения истинная диаграмма располагается выше инженерной (рис. 4.9). Коэффициент наклона диаграммы на упругом участке при одноосном растяжении равен модулю Юнга.

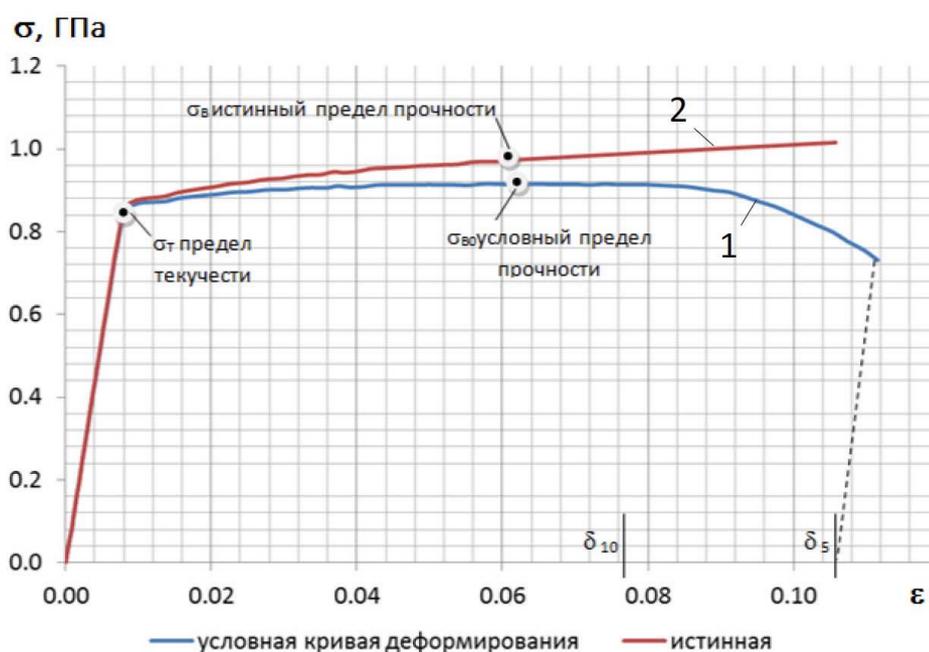


Рис. 4.9. Диаграмма деформирования при одноосном растяжении: 1 – условная кривая деформирования; 2 – действительная кривая деформирования [20]

Определение свойств деформирования материала целесообразно проводить путем разделения истинной деформации на упругую и пластическую составляющие:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{px} + \varepsilon_{ex}, \quad \varepsilon_{px} = \varepsilon_x - \frac{\sigma_x}{E}$$

Результатом “усадки” упругой деформации (рис 4.10.) является зависимость напряжения от пластической деформации (кривая упрочнения). Истинные напряжения при одноосном растяжении и пластическая деформация эквивалентны соответственно интенсивности напряжений и эффективной пластической деформации.

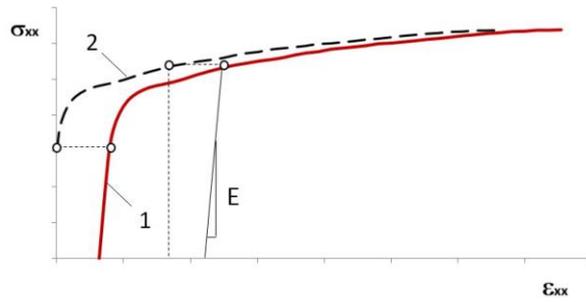


Рис. 4.10. Схема “усадки” упругих деформаций, принятая для разработки модели: 1 – действительная кривая деформирования; 2 – кривая упрочнения

В результате обработки экспериментальных данных при одноосном разрыве образца получены следующие данные (рис. 4.11.):

- инженерная кривая деформирования, определяемая из испытаний;
- истинная кривая деформирования;
- кривая упрочнения. Кривая упрочнения задает напряжение текучести как функцию эквивалентной пластической деформации. Эта кривая и задается в программе.

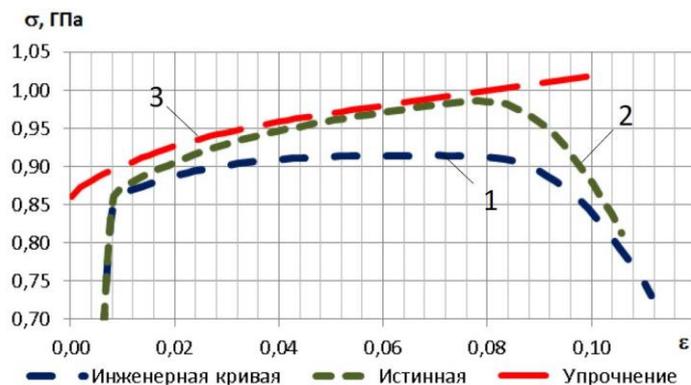


Рис. 4.11. Стадия обработки экспериментальных данных при одноосном разрыве образца: 1 – условная кривая деформирования, 2 – действительная кривая деформирования; 3 – кривая упрочнения

До критической точки на стадии равномерного деформирования образца экспериментальные и расчетные инженерные кривые деформирования совпадают.

Кривая упрочнения после локализации деформаций определяется итерационным путем до совпадения расчетной кривой с экспериментом. Кривая упрочнения монотонно возрастает на всем диапазоне деформации образца.

Из анализа процесса разрушения следует, что в зависимости от свойств материала необходимы различные способы нагружения для определения всех его механических свойств.

Для хрупких материалов растяжение является слишком жестким нагружением и для определения механических свойств этих материалов в пластической области требуются более мягкие испытания (с малым участком растягивающих деформаций или вовсе без участка растягивающих напряжений) – сжатие цилиндров является одним их наиболее мягких испытаний.

В результате сжатия цилиндрического образца, по сравнению с одноосным растяжением. Вместо удлинения происходит укорочение, вместо сужения сечения – его увеличение, поэтому естественно, что истинные напряжения при сжатии меньше инженерных. Пределы упругости и текучести хорошо совпадают с соответствующими пределами при растяжении. Однако переход к разрушению при сжатии принципиально отличается:

- пластичные материалы не удается разрушить при сжатии, т.к. они сплющиваются;
- у хрупких материалов типа цемента, силикатов и др. разрушение при сжатии происходит путем отрыва.

Тангенс угла наклона диаграммы при сжатии аналогичен испытаниям на растяжение – является модулем упругости материала.

Кручение образца является одним из важных методов испытания металлов в пластической области. Кручение является наиболее надежным способом измерения сопротивления срезам. При этом виде испытаний пластическая деформация происходит практически равномерно по длине образца, форма которого остается цилиндрической в течение всего процесса.

#### **4.2.4. Учет влияния эффекта скорости деформации**

Эффекты скорости деформации в моделях материалов могут учитываться с помощью формулы Купера-Саймондса – степенного закона зависимости предела текучести от скорости деформации или определе-

нием семейства кривых упрочнения для каждой скорости деформации. В модели Купера-Саймондса динамический предел текучести пересчитывается из статических значений с коэффициентом  $1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{c} \right)^{1/p}$ , где  $c$  – эталонная скорость эффективной деформации, при которой предел текучести удваивается;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость эффективной деформации.

Чтобы предотвратить появление паразитного шума, для оценки пластической вязкости используют скорость эквивалентной пластической деформации вместо скорости эффективной деформации.

Но наилучший результат возможен, когда для каждой скорости деформации вводятся таблицы с данными кривых упрочнения полученными экспериментально (рис. 4.12.).

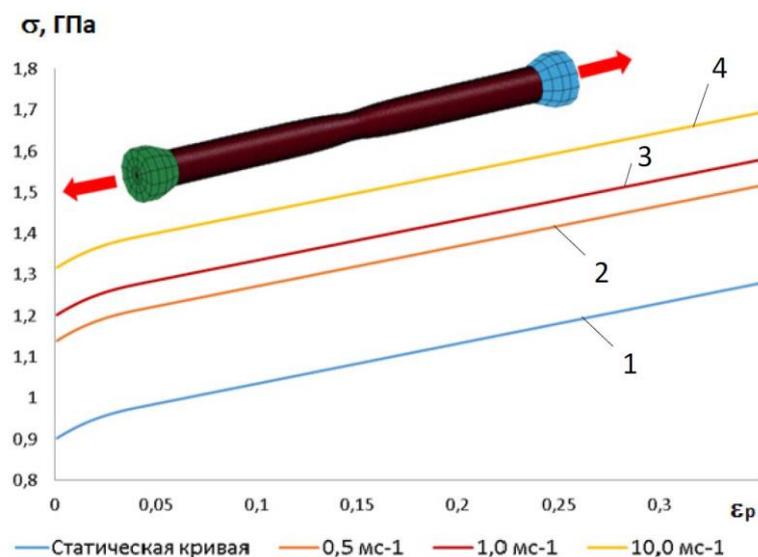


Рис. 4.12. Кривые упрочнения материала от скорости деформации

### 4.3. Методики идентификации параметров моделей материала

#### 4.3.1. Определение билинейной модели материала

Исходные данные:

- предел текучести материала  $\sigma_T$ ;
- предел временного сопротивления  $\sigma_B$ ;
- деформация соответствующая временному сопротивлению  $\varepsilon_B$ ;

- 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 ( $\sigma_t$ ,  $E_t$ ) используем в моделях материала MAT3 или MAT24. Данная модель материала является наименее точной из рассматриваемых. Точность еще ниже если учитывается разрушение.

#### **4.3.2. 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.

#### **4.3.3. 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. Активно применяется в краш-тестах

#### 4.3.4. Методика из диссертации Кирсанова [20]

1. После механического теста у нас есть:

- напряжение текучести  $\sigma_T$
- напряжения прочности  $\sigma_B$
- деформация разрушения  $e_K$

2. Подставляем данные в формулу

$$\sigma = \sigma_{B0} \left( \frac{e\varepsilon}{n} \right)^n$$

3. Определяем параметр упрочнения  $n$  (например, минимизацией функции в Excel).

4. Определяем значения  $\sigma$  от деформации  $e$  при значении деформации от 0 до  $e_K$

5. Заносим данные значения в модель материала (например, в табличном виде в Mat 24).

#### 4.3.5. Методика расчета полилинейных моделей материала [23] с учетом шейкообразования

1 точка – соответствует пределу текучести

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_T$$

$$\sigma_1 = \sigma_T$$

2 точка – соответствует временному сопротивлению (при пересчете в истинные величины)

$$\varepsilon_2 = \ln \left( 1 + \delta_B - \frac{\sigma_B}{E} \right)$$

$$\sigma_2 = \sigma_B (1 + \delta_B)$$

где  $\sigma_B$  - временное сопротивление;

$E$  – модель Юнга;

$\delta_B$  - инженерные деформации, соответствующие временному сопротивлению

3 точка – соответствует параметру разрушения

Вариант определения параметров по геометрическим замерам шейки образца после разрушения.

Для круглых образцов:

$$\varepsilon_3 = \ln\left(\frac{1}{1-\psi} - \frac{\sigma_3}{E}\right)$$

$$\sigma_3 = \ln\left(\frac{P_k}{\pi r_1^2 \left(1 + \frac{r_1}{4R}\right)}\right)$$

где  $P_k$  – величина нагрузки в момент нагружения;

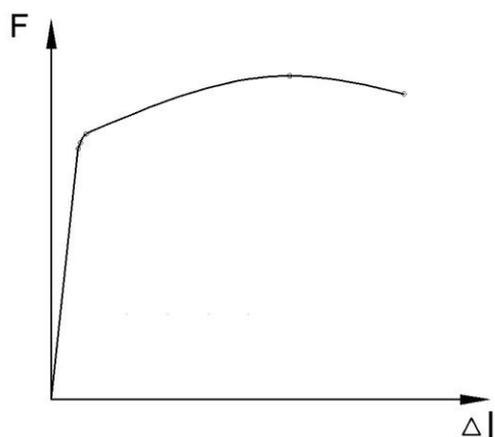
$r_1$  – радиус наименьшего поперечного сечения шейки;

$R$  – радиус кривизны контура шейки в точке наименьшего сопротивления;

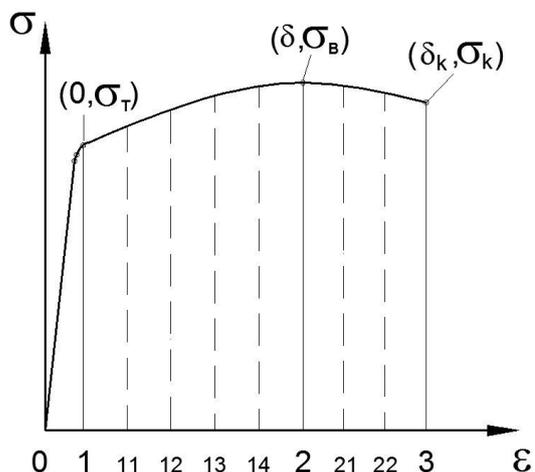
$\psi$  - параметр отображения сужения шейки.

Использование данной методики для построения аппроксимирующей кривой деформирования соответствующая экспериментальной кривой

Имеется кривая деформирования материала



Преобразуем в кривую напряжение-деформация (инженерный вид)



На этой кривой отмечаем 3 основные точки соответствующие:

- точку текучести;
- точке временного сопротивления;
- точке разрушения.

И несколько дополнительных точек (11, 12, 13, 14, 21, 22).

Определяем значения этих точек в истинном виде в пластической области (без упругих деформаций).

$$\varepsilon_1 = 0 \quad \sigma_1 = \sigma_T$$

$$\varepsilon_2 = \ln(1 + \delta_B) \quad \sigma_2 = \sigma_B(1 + \delta_B)$$

$$\varepsilon_3 = \ln\left(\frac{1}{1 - \psi}\right) \quad \sigma_3 = \ln\left(\frac{P_k}{\pi r_1^2 \left(1 + \frac{r_1}{4R}\right)}\right)$$

Промежуточные точки 11-14 находим по формуле

$$\varepsilon_{1n} = \ln(1 + \delta_{1n}) \quad \sigma_{1n} = \sigma_{1n}(1 + \delta_{1n})$$

где  $\delta_{1n}, \sigma_{1n}$  - значения точки в промежутке от  $\sigma_T$  до  $\sigma_B$

Создаем таблицу значений

$$\varepsilon_1 \quad \sigma_1 / \varepsilon_{11} \quad \sigma_{11} / \varepsilon_{12} \quad \sigma_{12} / \varepsilon_{13} \quad \sigma_{13} / \varepsilon_{14} \quad \sigma_{14} / \varepsilon_2 \quad \sigma_2 / \varepsilon_{21} \quad \sigma_{21} / \varepsilon_3 \quad \sigma_3$$

Эту таблицу значений заносим в программу и используем в МАТ24.

#### 4.3.6. Методика Рамберга-Осгуда [19, п. 9.8.4.1.2]

Параметры определяются на основе коэффициента Рамберга-Осгуда (источник DOT/FAA/AR-MMPPS-01 Metallic Materials Properties Development (MMPDS)).

$$e_p = 0,002 \left( \frac{f}{f_{02}} \right)^n$$

где  $f$  – напряжение

$f_{02}$  – предел текучести при 0,2% деформации

$e_p$  – пластическая деформация

$n$  – параметр Рамберга-Осгуда

После расчета параметра  $n$  определяется величина пластической деформации от напряжения (где напряжение равно  $\sigma_i = \frac{\sigma \cdot i}{100}$ ),  $i=1...100$

#### 4.3.7. методика расчета параметров модели материала Джонсона-Кука [21, 22]

См. ссылки 21,22

Семинар 5	Идентификация параметров моделей материала
-----------	--

#### 4.4. Валидация моделей

Для подтверждения адекватности проведенного моделирования необходимо проведения валидации, т.е. подтверждение выполненного моделирования и практики. Результаты должны повторять с определенной точностью практические результаты.

Валидацию проводят на тестовых испытаниях, на установках близких к моделируемому процессу. Например, для валидации процессов вытяжки можно пользоваться пресс Эриксона. Испытание на изгиб – испытание на изгиб на элемент двойной толщины. Краш-тесты – испытание на удар.

Последовательность действий:

В начале проводится практическое испытание на тестовом штампе (например, Пресс Эриксона), рис. 4.28. Далее проводится моделирование этого же процесса. И проводят сравнение результатов. Результаты должны совпадать. Если результаты не совпадают, то параметры которые были применены при моделировании неверные (считается что практические результаты у нас достоверные). В этом случае корректируем параметры моделирования и повторяем моделирование процесса снова. И снова сравниваем результаты с практикой. Это делаем до тех пор, пока результаты не будут сходными с определенной точностью

Далее мы спользуем полученные при моделировании параметры для моделирования основного процесса (модель материала, размер сетки, параметры нагружения). Например, процесса вытяжки.

В качестве испытательного оборудования можно использовать приборы с регулируемым давлением. Соответственно результаты практики и моделирования должны совпадать.

Рекомендуется проводить также верификацию и калибровку численного моделирования.

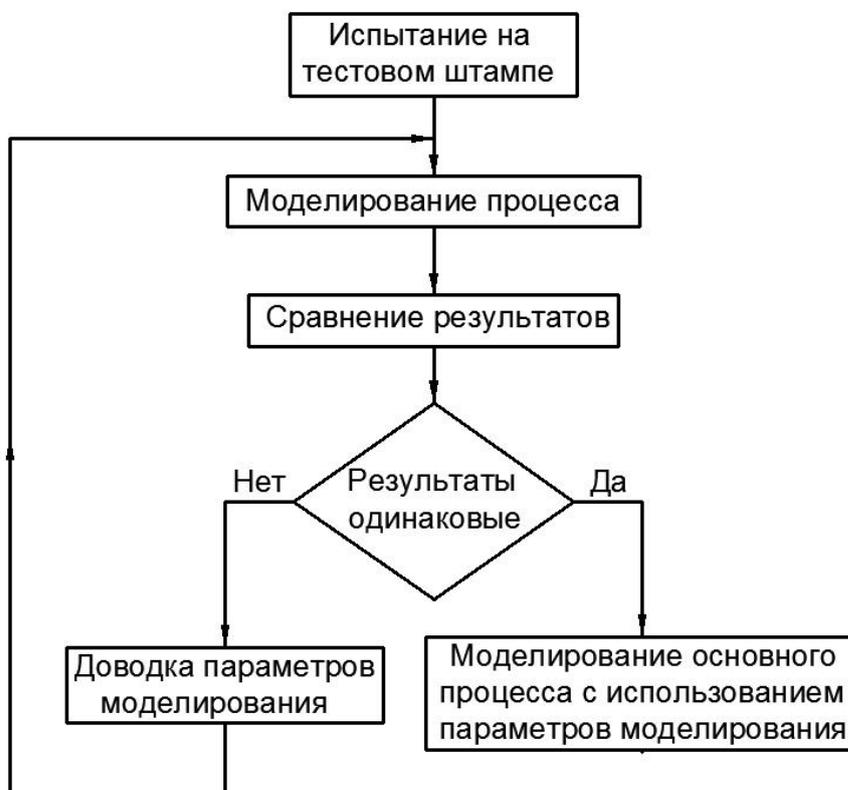


Рис.4.28. Валидация моделей

## 4.5. Определение упругого материала [28]

### 4.6.1. \*MAT\_ELASTIC (№1)

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

Это материал типа 1 – упругий изотропный материал, который используется для балочных, оболочечных и объемных элементов программы LS-DYNA.

Карта

Переменная	MID	RO	E	PR	DA	DB	K	
Тип	I	F	F	F	F	F	F	
По умолчанию	нет	нет	нет	нет	0.0	0.0	0.0	

Переменная	Описание
MID	Идентификатор материала в виде уникального номера
RO	Массовая плотность
E	Модуль Юнга
PR	Коэффициент Пуассона

## 4.6. Определение упруго-пластического материала [28]

Для определения пластического материала могут использоваться различные материалы:

### 4.6.1. \*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC (№3)

Модель используется для расчета изотропного и кинематического упрочнения пластичных материалов.

**Формат карты**

Карта 1

Переменная	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	BETA	
Тип	I	F	F	F	F	F	F	
По умолчанию	нет	нет	нет	нет	нет	0.0	0.0	

Карта 2

Переменная	SRC	SRP	FS	VP				
Тип	F	F	F	F				
По умолчанию	Не исп.	Не исп.	Не исп.	0.0				

Переменная	Описание
MID	Идентификатор материала в виде уникального номера
RO	Массовая плотность
E	Модуль Юнга
PR	Коэффициент Пуассона
SIGY	Предел текучести
ETAN	Касательный модуль (рис. 4.29)
BETA	Параметр упрочнения $0 < \beta < 1$
SRC	Параметр скорости деформации C для модели Купера-Саймондса
SRP	Параметр скорости деформации P для модели Купера-Саймондса
FS	Деформация разрушения для разрушаемых элементов
VP	Формулировка эффектов скорости деформации

Для учета влияния скорости деформации используется модель Купера-Саймондса (Cowper-Symonds), в которой предел текучести умножается на коэффициент  $1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{1/P}$

$$1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{1/P}$$

где  $\varepsilon$  - скорость деформации

Кинематическое, изотропное или совместное кинематическое и изотропное упрочнение может быть задано с помощью варьирования пара-

метра  $\beta$  от 0 до 1. Если параметр  $\beta$  равен 0 или 1 получаем, соответственно, кинематическое или изотропное упрочнение.

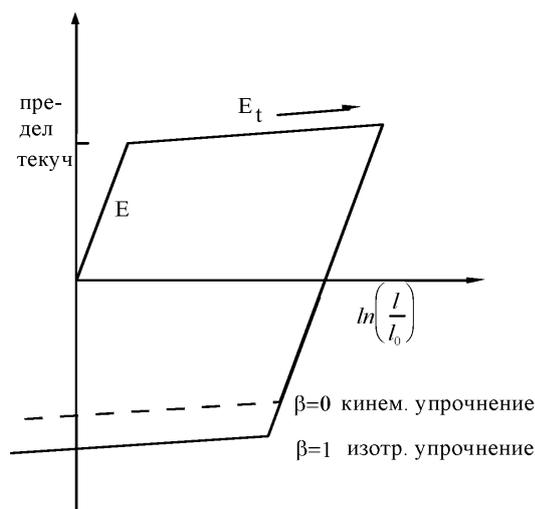


Рис. 4.29. Уругопластический режим с кинематическим и изотропным упрочнением, где  $l_0$  и  $l$  – длина недеформированного и деформированного образца, подвергнутого одноосному растяжению.  $E_t$  - модуль упрочнения

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

Рекомендуется разрушающую предельную деформацию определять по следующей формуле:

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

где  $\psi$  – относительное сужение шейки образца.

#### 4.6.2. \*MAT\_JOHNSON\_COOK (№15)

Это материал типа 15. Модель пластичности Джонсона/Кука, зависящая от деформации и температуры, иногда используется в задачах, в которых скорости деформации изменяются в большом диапазоне, а адиабатический рост температуры из-за нагрева при пластической деформации вызывает снижение прочности материала. При использовании объемных элементов данная модель нуждается в уравнении состояния.

Карта 1

Переменная	MID	RO	G	E	PR	DTF	VP	
------------	-----	----	---	---	----	-----	----	--

Тип	I	F	F	F	F	F	F	
По умолчанию	нет	нет	нет	нет	нет	0.0	0.0	

### Карта 2

Переменная	A	B	N	C	M	TM	TR	EPSO
Тип	F	F	F	F	F	F	F	F
По умолчанию	нет	0.0	0.0	0.0	нет	нет	нет	нет

### Карта 3

Переменная	CP	PC	SPAL	IT	D1	D2	D3	D4
Тип	F	F	F	F	F	F	F	F
По умолчанию	нет	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

### Карта 4

Переменная	D5							
Тип	F							
По умолчанию	0.0							

Переменная	Описание
MID	Идентификатор материала
RO	Массовая плотность
G	Модуль сдвига
E	Модуль Юнга
PR	Коэффициент Пуассона
DTF	Минимальный размер шага по времени для автоматического удаления элементов (оболочечных элементов)
VP	Формулировка с учетом эффектов скорости деформаций
A, B, N, C, M	См. уравнения ниже
TM	Температура плавления
TR	Комнатная температура
EPSO	Эффективная скорость пластической деформации
CP	Удельная теплоемкость
SPALL	Тип откола

	= 0 по умолчанию принимается значение параметра 2.0
	= 1 $p \geq p_{\min}$
	= 2 $\sigma_{\max} \geq -p_{\min}$ элемент откалывается, при этом никогда не допускается растяжение, когда $p < 0$
	= 3 $p < -p_{\min}$ элемент откалывается, при этом никогда не допускается растяжение, когда $p < 0$
IT	Опция итераций по пластической деформации
D1-D5	Параметры разрушения, см. уравнения ниже

Выражение Джонсона-Кука для напряжения текучести имеет вид:

$$\sigma_y = \left( A + B \bar{\varepsilon}^n \right) \left( 1 + c \ln \dot{\varepsilon}^* \right) \left( 1 - T^{*m} \right),$$

где А, В, С, n и m - входные константы

$\bar{\varepsilon}^p$  - эффективная пластическая деформация,

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0}$$

$\dot{\varepsilon}_0$  - скорость эффективной пластической деформации, для

$$\dot{\varepsilon}_0 = 1s^{-1}$$

$T^*$  - гомологическая температура,  $\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$

Константы для разных материалов представлены в работе [21].

Деформация при разрушении задается соотношением

$$\varepsilon^f = \left[ D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^* \right] \left[ 1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^* \right] \left[ 1 + D_5 T^* \right]$$

где  $\sigma^*$  - отношение давления к эффективному напряжению

$$\sigma^* = \frac{P}{\sigma_{eff}}$$

Разрушение происходит, когда параметр повреждения достигает значения 1.

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^p}{\varepsilon^f}$$

### 4.6.3. \*MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY (№18)

Модель изотропной пластичности с упрочнение по степенному закону (с наличием зависимости от скорости деформации).

Карта 1

Переменная	MID	RO	E	PR	K	N	SRC	SRP
Тип	I	F	F	F	F	F	F	F
По умолчанию	нет	нет	нет	нет	нет	нет	0.0	0.0

Карта 2

Переменная	SIGY	VP						
Тип	F	F						
По умолчанию	0.0	0.0						

Переменная	Описание
MID	Идентификатор материала
RO	Массовая плотность
E	Модуль Юнга
PR	Коэффициент Пуассона
K	Коэффициент прочности
N	Экспонента упрочнения
SRC	Параметр скорости деформации C
SRP	Параметр скорости деформации P
SIGY	Дополнительный входной параметр для задания начального предела текучести $\sigma_y$ . В общем случае этот параметр необязателен, а предел текучести рассчитывается, как описано ниже: $<0.02 \quad \varepsilon_{ym} = SIGY$ $>0.02$ см. ниже
VP	Формулировка зависимости от скорости деформации: $=0.0$ : пересчет предела текучести (по умолчанию); $=1.0$ : упругопластическая формулировка.

Данная модель описывает упругопластическое поведение материала с изотропным упрочнением. Предел текучести  $\sigma_y$  есть функция пластической деформации, и подчиняется уравнению:

$$\sigma_y = k \varepsilon^n = k (\varepsilon_{yp} + \bar{\varepsilon}^p)^n$$

где  $\varepsilon_{yp}$  - упругая деформация, соответствующая пределу текучести, а  $\bar{\varepsilon}^p$  - эффективная пластическая деформация (логарифмическая). Если параметр SIGY задан равным нулю, то деформация, соответствующая пределу текучести, определяется приравниванием правых частей уравнения линейного нагружения и уравнения деформационного упрочнения:

$$\begin{aligned} \sigma &= E\varepsilon \\ \sigma &= k\varepsilon^n, \end{aligned}$$

что дает упругую деформацию в пределе текучести в виде соотношения:

$$\varepsilon_{yp} = \left( \frac{E}{k} \right)^{\left[ \frac{1}{n-1} \right]}$$

Если предел текучести SIGY не равен нулю и больше 0.02, то используется формула:

$$\varepsilon_{yp} = \left( \frac{\sigma_y}{k} \right)^{\left[ \frac{1}{n} \right]}$$

Скорость деформации учитывается с помощью модели Купера и Саймондса, в которой напряжение текучести умножается на коэффициент

$$1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p},$$

где  $\dot{\varepsilon}$  - скорость деформации.

Полностью упругопластическая формулировка является дополнительной и включает в себя формулировку Купера и Саймондса внутри поверхности текучести. Такой расчет требует больше времени, но улучшение результатов может быть значительным.

#### 4.6.4. \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY (№24)

Кусочно-линейная модель материала позволяет задать упругопластический материал с произвольной зависимостью между напряжением и деформацией (и произвольной зависимостью от скорости деформации). Кроме того, можно задать критерий разрушения либо на основе пластической деформации, либо на основе минимального шага по времени.

Карта 1

Переменная	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
Тип	I	F	F	F	F	F	F	F
По умолчанию	нет	нет	нет	нет	нет	0.0	10E+2	0

Карта 2

Переменная	C	P	LCSS	LCSR	VP			
Тип	F	F	F	F	F			
По умолчанию	0	0	0	0	0			

Карта 3

Переменная	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
Тип	F	F	F	F	F	F	F	F
По умолчанию	0	0	0	0	0	0	0	0

Карта 4

Переменная	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
Тип	F	F	F	F	F	F	F	F
По умолчанию	0	0	0	0	0	0	0	0

Перемен.	Описание
MID	Идентификатор материала
RO	Массовая плотность
E	Модуль Юнга
PR	Коэффициент Пуассона
SIGY	Предел текучести

ETAN	Касательный модуль, который игнорируется, если $LCSS > 0$
FAIL	Критерий разрушения: $<0.0$ : разрушение определяется с помощью заданной пользователем процедуры; $= 0.0$ : разрушение не учитывается; $>0.0$ : пластическая деформация до разрушения.
TDEL	Минимальный размер шага по времени для автоматического исключения элемента из рассмотрения
C	Параметр скорости деформации C (см. формулы ниже)
P	Параметр скорости деформации P (см. формулы ниже)
LCSS	Идентификатор задающей кривой или таблицы. Идентификатор задающей кривой, определяющей зависимость между эффективным напряжением и эффективной пластической деформацией.
LCSR	Идентификатор задающей кривой, определяющей влияние скорости деформации на предел текучести
VP	Формулировка влияния скорости деформации: $= -1.0$ : модель Купера-Саймондса, использующая компоненты девиатора тензора скоростей деформации вместо полной скорости деформации $= 0.0$ : изменение значения предела текучести (по умолчанию) $= 1.0$ : вязкопластическая формулировка
EPS1-EPS8	Значения эффективной пластической деформации (если задана переменная SIGY, их вводить не обязательно). Необходимо задать не менее 2-х значений. Первое значение должно быть равно нулю в соответствии с начальным пределом текучести.
ES1-ES8	Значения предела текучести, соответствующие значениям переменных EPS1 - EPS8

Если определен касательный модуль ЕТАN, напряженно-деформированное состояние можно описать с помощью кривой билинейной зависимости между напряжением и деформацией. Вместо нее можно задать кривую, с помощью переменных (EPS1,ES1) - (EPS8,ES8); однако если недостаточно 8 точек, можно ввести кривую зависимости между эффективным напряжением и эффективной пластической деформацией (LCSS). Во всех случаях затраты приблизительно одинаковы. Самый общий подход – это задать таблицу (LCSS) (см. примечания ниже).

Имеются три возможности для учета влияния скорости деформации.

I. Влияние скорости деформации можно учесть с помощью модели Купера-Саймондса (Cowper-Symonds), в которой предел текучести пересчитывается с коэффициентом

$$1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p},$$

где  $\dot{\varepsilon}$  - скорость деформации,  $\dot{\varepsilon} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}}$ . Если VP=-1, вместо скоростей деформации берутся компоненты девиатора тензора скоростей деформации. Если используется вязкопластическая формулировка, т.е. VP=1.0, и SIGY > 0, то динамический предел упругости определяется суммой статического напряжения  $\sigma_y^s(\varepsilon_{eff}^p)$  которое обычно вводится задающей кривой, и начального предела текучести SIGY, умноженного на коэффициент Купера-Саймондса:

$$\sigma_y(\varepsilon_{eff}^p, \dot{\varepsilon}_{eff}^p) = \sigma_y^s(\varepsilon_{eff}^p) + SIGY \times \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^p}{C} \right)^{1/p}.$$

Здесь учитывается скорость пластической деформации. Если SIGY=0, то используется следующее уравнение:

$$\sigma_y(\varepsilon_{eff}^p, \dot{\varepsilon}_{eff}^p) = \sigma_y^s(\varepsilon_{eff}^p) \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^p}{C} \right)^{1/p} \right],$$

где статическое напряжение  $\sigma_y^s(\varepsilon_{eff}^p)$  должно определяться задающей кривой. Если вязкопластическая формулировка не используется, то всегда берется это уравнение.

#### 4.6.5. \*MAT\_3-PARAMETER\_BARLAT (№36)

Это материал типа 36. Модель была разработана Барлатом и Лайэном для моделирования анизотропных материалов в условиях плоского напряженного состояния. Анизотропию можно задавать с помощью параметров Ланкфорда.

Карта 1

Переменная	MID	RO	E	PR	HR	PI	P2	ITER
Тип	I	F	F	F	F	F	F	F

Карта 2

Переменная	M	R00	R45	R90	LCID	EO	SPI	
Тип	F	F	F	F	I	F	F	

Карта 3

Перемен.	АОРТ							
Тип	F							

Карта 4

Перемен.				A1	A2	A3		
Тип				F	F	F		

Карта 5

Перемен.	V1	V2	V3	D1	D2	D3	BETA	
Тип	F	F	F	F	F	F	F	

Перемен.	Описание
MID	Идентификатор материала
RO	Массовая плотность

E	Модуль Юнга E
PR	Коэффициент Пуассона $\nu$
HR	Закон упрочнения: = 1.0: линейный (по умолчанию) = 2.0: экспоненциальный = 3.0: вводится задающей кривой
P1	Параметр материала: HR = 1.0: касательный модуль HR = 2.0: k – коэффициент прочности для экспоненциального закона упрочнения
P2	Параметр материала: HR = 1.0: предел прочности HR = 2.0: экспоненциальный коэффициент n
ITER	Ограничение по количеству итераций для ускорения расчета
M	m – экспонента поверхности текучести Барлата
R00	R <sub>00</sub> – параметр Ланкфорда, определяемый в эксперименте
R45	R <sub>45</sub> – параметр Ланкфорда, определяемый в эксперименте
R90	R <sub>90</sub> – параметр Ланкфорда, определяемый в эксперименте
LCID	Идентификатор задающей кривой для закона упрочнения (HR=3)
E0	$\epsilon_0$ - значение деформации для определения начального предела текучести для экспоненциального закона упрочнения (по умолчанию = 0.0)
SPI	spi, если E0 = 0 (по умолчанию = 0.0) = 0.0: $\epsilon_0 = (E/k)^{1/(n-1)}$ <0.02: $\epsilon_0 = spi$ > 0.02: $\epsilon_0 = (spi/k)^{1/(n-1)}$
AOPT	Оси материала =0.0: локально ортотропный материал с осями, заданными узлами 1, 2 и 4 в элементе (см. *DEFINE_COORDINATE_NODES) =2.0: глобально ортотропный материал, оси в котором

	определяются векторами, описанными в замечаниях ниже (аналогично заданию по ключевому слову *DEFINE_COORDINATE_VECTOR) =3.0: локально ортотропный материал, оси в котором задаются поворотом осей в материале вокруг нормали элемента на угол BETA с линией в плоскости элемента, определенной произведением вектора <b>v</b> и нормали элемента
XP YP ZP	Координаты точки <b>p</b> для АОПТ = 1
A1 A2 A3	Компоненты вектора <b>a</b> для АОПТ = 2
VI V2 V3	Компоненты вектора <b>v</b> для АОПТ = 3
D1 D2 D3	Компоненты вектора <b>d</b> для АОПТ = 2
BETA	Угол BETA в градусах для АОПТ = 3; может быть заменен значением, заданным при определении элементов, см. *ELEMENT_SHELL_BETA

Критерий текучести  $\Phi$  для плоского напряженного состояния в случае анизотропии определяется формулой:

$$\Phi = a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|2K_2|^m = 2\sigma_Y^m$$

где  $\sigma_Y$  - предел текучести, а  $K_{i=1,2}$  задаются соотношениями

$$K_1 = \frac{\sigma_x + h\sigma_y}{2}$$

$$K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - h\sigma_y}{2}\right)^2 + p^2 \tau_{xy}^2}$$

Константы анизотропного материала  $a$ ,  $c$ ,  $h$ ,  $p$  выражаются через параметры  $R_{00}$ ,  $R_{45}$  и  $R_{90}$ :

$$a = 2 - 2 \sqrt{\frac{R_{00}}{I + R_{00}} \frac{R_{90}}{I + R_{90}}} \quad c = 2 - a$$

$$h = \sqrt{\frac{R_{00}}{I + R_{00}} \frac{I + R_{90}}{R_{90}}}$$

Параметр анизотропии  $p$  вычисляется неявно. В соответствии с моделью Барлата и Лайэна значение  $R$  - отношение деформаций по ширине

к деформациям по толщине - для произвольного угла  $\phi$  можно рассчитать по формуле:

$$R_\phi = \frac{2m\sigma_Y^m}{\left(\frac{\partial\Phi}{\partial\sigma_x} + \frac{\partial\Phi}{\partial\sigma_y}\right)\sigma_\phi} - 1,$$

где  $\sigma_\phi$  - одноосное напряжение при растяжении в направлении  $\phi$ . Это выражение можно использовать для получения значения  $p$  с помощью итераций. Пусть  $\phi=45^\circ$ . Определим функцию  $g$  в виде:

$$g(p) = \frac{2m\sigma_Y^m}{\left(\frac{\partial\Phi}{\partial\sigma_x} + \frac{\partial\Phi}{\partial\sigma_y}\right)\sigma_\phi} - 1 - R_{45}.$$

Значение  $p$  находится с помощью итераций.

Для материалов с гранецентрированной кубической структурой рекомендуется использовать  $m=8$ . Для материалов с объемноцентрированной кубической структурой можно использовать  $m=6$ . Предел текучести можно выразить через  $k$  и  $n$ :

$$\sigma_y = k\varepsilon^n = k\left(\varepsilon_{yp} + \bar{\varepsilon}^p\right)^n,$$

где  $\varepsilon_{yp}$  - упругая деформация, соответствующая пределу текучести, а  $\bar{\varepsilon}^p$  - эффективная пластическая деформация (логарифмическая). Если  $SIGY=0$ , деформация, соответствующая пределу текучести, находится как общее решение уравнения линейно упругого нагружения и уравнения упрочнения деформации

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\sigma = k\varepsilon^n,$$

что дает упругую деформацию, соответствующую пределу текучести в виде:

$$\varepsilon_{yp} = \left(\frac{E}{k}\right)^{\left[\frac{1}{n-1}\right]}.$$

Если  $SIGY \neq 0$  и больше 0.02, то:

$$\varepsilon_{yp} = \left(\frac{\sigma_y}{k}\right)^{\left[\frac{1}{n}\right]}.$$

#### 4.6.6. \*MAT\_TRANSVERSELY\_ANISOTROPIC\_ELASTIC\_PLASTIC (№37)

Это материал типа 37, предназначен для моделирования поведения анизотропных материалов в процессе листовой штамповки. В модели учитывается только поперечная анизотропия. Дополнительно можно использовать задающую кривую, определяющую произвольную зависимость между напряжением и эффективной пластической деформацией. Эта модель пластичности является итерационной и может использоваться только для оболочечных элементов.

Карта 1

<i>Переменная</i>	<i>MID</i>	<i>RO</i>	<i>E</i>	<i>PR</i>	<i>SIGY</i>	<i>ETAN</i>	<i>R</i>	<i>HLCI</i>
<i>Тип</i>	<i>I</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>F</i>

Перемен.	Описание
MID	Идентификатор материала
RO	Массовая плотность
E	Модуль Юнга
PR	Коэффициент Пуассона
SIGY	Предел текучести
ETAN	Модуль пластического упрочнения
R	Параметр анизотропного упрочнения
HLCID	Идентификатор задающей кривой, определяющей зависимость между эффективным пределом текучести и эффективной пластической деформацией

Рассмотрим декартову систему координат, оси которой параллельны трем плоскостям симметрии в случае анизотропного поведения. Для них функция текучести, предложенная Хиллом [21], может быть записана в виде:

$$F(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 - I = 0,$$

где  $\sigma_{y1}, \sigma_{y2}, \sigma_{y3}$  - пределы текучести при растяжении, а  $\sigma_{y12}, \sigma_{y23}, \sigma_{y31}$  пределы текучести при сдвиге. Константы F, G, H, L, M, N связаны с пределом текучести формулами:

$$2L = \frac{1}{\sigma_{23}^2}$$

$$2M = \frac{1}{\sigma_{y31}^2}$$

$$2N = \frac{1}{\sigma_{y12}^2}$$

$$2F = \frac{1}{\sigma_{y2}^2} + \frac{1}{\sigma_{y3}^2} - \frac{1}{\sigma_{y1}^2}$$

$$2G = \frac{1}{\sigma_{y3}^2} + \frac{1}{\sigma_{y1}^2} - \frac{1}{\sigma_{y2}^2}$$

$$2H = \frac{1}{\sigma_{y1}^2} + \frac{1}{\sigma_{y2}^2} - \frac{1}{\sigma_{y3}^2}$$

$$F = G = H = \frac{1}{2\sigma_y^2} \quad \text{и} \quad L = M = N = \frac{3}{2\sigma_y^2},$$

Если положить

получим модель пластичности Мизеса для изотропного случая.

Для случая поперечной анизотропии, когда в плоскости  $x_1-x_2$  свойства не меняются, справедливы следующие соотношения:

$$2F = 2G = \frac{1}{\sigma_{y3}^2}$$

$$2H = \frac{2}{\sigma_y^2} - \frac{1}{\sigma_{y3}^2},$$

$$N = \frac{2}{\sigma_y^2} - \frac{1}{2\sigma_{y3}^2}$$

полученные в предположении, что  $\sigma_{y1} = \sigma_{y2} = \sigma_y$

$$K = \frac{\sigma_y}{\sigma_{y3}};$$

Если положить  $\sigma_{y3}$  то критерий текучести принимает вид:

$$F(\sigma) = \sigma_e = \sigma_y,$$

$$F(\sigma) \equiv \left[ \sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + K^2 \sigma_{33}^2 - K^2 \sigma_{33} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) - (2 - K^2) \sigma_{11} \sigma_{22} + 2L \sigma_y^2 (\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) + 2 \left( 2 - \frac{1}{2} K^2 \right) \sigma_{12}^2 \right]^{1/2}$$

где

Вектор скорости пластической деформации направлен по нормали к поверхности текучести, и тогда  $\varepsilon_{ij}$  находится по формуле:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}.$$

Теперь рассмотрим случай плоского напряженного состояния, при котором  $\sigma_{33} = 0$ . Определим входной параметр анизотропии  $R$ , как отношение скоростей пластических деформаций в плоскости и из плоскости

$$R = \frac{\dot{\varepsilon}_{22}^p}{\dot{\varepsilon}_{33}^p}.$$

Из этого следует, что

$$R = \frac{2}{K^2} - 1.$$

В предположении плоского напряженного состояния и с использованием полученной формулы для  $R$ , функцию текучести можно записать в следующем виде:

$$F(\sigma) = \left[ \sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 - \frac{2R}{R+1} \sigma_{11} \sigma_{22} + 2 \frac{2R+1}{R+1} \sigma_{12}^2 \right]^{1/2}.$$

Необходимо отметить несколько отличий этой модели от других моделей пластичности для оболочечных элементов, таких как, например, MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY. Во-первых, функция текучести для плоского напряженного состояния не содержит компонентов поперечного сдвигового напряжения, которые пересчитываются с учетом упругости, и, во-вторых, эта модель всегда является полностью итерационной. Следовательно, можно ожидать, что результаты, полученные для изотропного случая, когда  $R=1.0$ , и результаты другой изотропной модели будут отличаться, но обычно эти отличия несущественны

#### 4.6.7. \*MAT\_ELASTIC\_VISCOPLASTIC\_THERMAL (№106)

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

Карта 1

Переменная	MID	RO	E	PR	SIGY	ALPHA	LCSS	
Тип	I	F	F	F	F	F	F	

Карта 2

Переменная	QR1	CR1	QR2	CR2	QX1	CXI	QX2	CX2
Тип	F	F	F	F	F	F	F	F

Карта 3

Переменная	VK	VM	LCE	LCPR	LC SIGY	LCR	LCX	LC ALPH
Тип	F	F	F	F	F	F	F	F

Перемен.	Описание
MID	Идентификатор материала
RO	Массовая плотность
E	Модуль Юнга
PR	Коэффициент Пуассона
SIGY	Начальный предел текучести
LCSS	Идентификатор задающей кривой. Кривая определяет эффективную пластическую деформацию в зависимости от эффективного напряжения. При применении этой опции карта 2 игнорируется.
ALPHA	Коэффициент теплового расширения
QR1	Параметр изотропного упрочнения $Q_{r1}$
CR1	Параметр изотропного упрочнения $C_{r1}$
QR2	Параметр изотропного упрочнения $Q_{r2}$
CR2	Параметр изотропного упрочнения $C_{r2}$
QX1	Параметр кинематического упрочнения $Q_{\chi1}$
CXI	Параметр кинематического упрочнения $C_{\chi1}$
QX2	Параметр кинематического упрочнения $Q_{\chi2}$
CX2	Параметр кинематического упрочнения $C_{\chi2}$
VK	Параметр вязкого материала $V_k$
VM	Параметр вязкого материала $V_m$
LCE	Задающая кривая, определяющая модуль Юнга в виде

	функции температуры. Переменная E на карте 1 игнорируется при использовании этой опции.
LCPR	Задающая кривая, определяющая коэффициент Пуассона в виде функции температуры. Переменная PR на карте 1 игнорируется при использовании этой опции.
LCSIGY	Задающая кривая, определяющая начальный предел текучести в виде функции температуры. Переменная SIGY на карте 1 игнорируется при использовании этой опции.
LCR	Задающая кривая для пересчета параметров изотропного упрочнения QR1 и QR2 или напряжения, определяемого задающей кривой LCSS в виде функции температуры.
LCX	Задающая кривая для пересчета параметров изотропного упрочнения QX1 и QX2 в виде функции температуры.
LCALPH	Задающая кривая, определяющая коэффициент теплового расширения в виде функции температуры. ALPHA на карте 1 игнорируется при использовании этой опции.

Одноосная кривая напряжения-деформации имеет вид:

$$\sigma(\varepsilon_{eff}^p, \dot{\varepsilon}_{eff}^p) = \sigma_0 + Q_{r1}(1 - \exp(-C_{r1}\varepsilon_{eff}^p)) + Q_{r2}(1 - \exp(-C_{r2}\varepsilon_{eff}^p)) + Q_{\chi1}(1 - \exp(-C_{\chi1}\varepsilon_{eff}^p)) + Q_{\chi2}(1 - \exp(-C_{\chi2}\varepsilon_{eff}^p)) + V_k \dot{\varepsilon}_{eff}^p V_m$$

Скорость деформации учитывается моделью Купера-Саймондса, в которой предел текучести пересчитывается с помощью следующего коэффициента:

$$1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^p}{C} \right)^{1/p}$$

Чтобы использовать это соотношение, для вязкоупругих констант  $V_k$  и  $V_m$  задаются следующие значения:

$$V_k = \sigma \left( \frac{1}{C} \right)^{1/p}$$

$$V_m = \frac{1}{p}$$

## 4.7. Определение твердого материала

### 4.7.1. \*MAT\_RIGID (№20)

Части модели из этого материала считаются принадлежащими жесткому телу. Можно присоединить поверхность типа VDA, чтобы моделировать геометрию, например, для оснастки в приложениях по листовой штамповке металла. Кроме того, можно дополнительно задать глобальные и локальные ограничения на центр масс.

Карта 1

Переменная	MID	RO	E	PR	N	COUPL	M	ALIAS
						E		
Тип	I	F	F	F	F	F	F	C
Умолчение	нет	нет	нет	нет	0	0	0	пусто

Карта 2

Переменная	CMO	CON1	CON2					
Тип	F	F	F					
Умолчение	0	0	0					

Формат дополнительной карты для выходного потока (Должна присутствовать, но может быть оставлена пустой).

Карта 3

Переменная	LCO или	A2	A3	VI	V2	V3		
Тип	F	F	F	F	F	F		
Умолчение	0	0	0	0	0	0		

Перемен.	Описание
MID	Идентификатор материала
RO	Массовая плотность
E	Модуль Юнга
PR	Коэффициент Пуассона
N	Флаг-признак связи с модулем MADYMO3D (не CAL3D), переменная n
COUPLE	Опция связывания
m	Флаг-признак связи с модулем MADYMO/CAL3D

ALIAS	Другое имя поверхности типа VDA
смо	<p>Опция ограничения на центр масс СМО:</p> <p>=1.0: ограничения накладываются в глобальных направлениях,</p> <p>= 0.0: нет ограничений,</p> <p>= -1.0: ограничения накладываются в локальных направлениях (ограничение однотоочечного типа SPC).</p>
CON1	<p>Первый параметр ограничения:</p> <p>Если СМО=+1.0, то задается глобальное ограничение на поступательное движение:</p> <p>=0: нет ограничений,</p> <p>=1: ограничение на перемещение по оси x,</p> <p>=2: ограничение на перемещение по оси y,</p> <p>=3: ограничение на перемещение по оси z,</p> <p>=4: ограничение на перемещение по осям x и y,</p> <p>=5: ограничение на перемещение по осям y и z,</p> <p>=6: ограничение на перемещение по осям z и x,</p> <p>=7: ограничение на перемещение по осям x, y и z.</p> <p>Если СМО=-1.0, то задается идентификатор локальной системы координат. См. *DEFINE_ COORDINATE_OPTION: Данная координатная система фиксирована во времени</p>
CON2	<p>Второй параметр ограничения:</p> <p>Если СМО=+1.0, то задается глобальное ограничение на вращательное движение:</p> <p>=0: нет ограничений, (далее аналогично)</p> <p>Если СМО=-1.0, то задается локальное однотоочечное ограничение (SPC)</p> <p>=000000 нет ограничений (далее аналогично),</p>
LCO	Номер локальной системы координат для выходного потока данных. См.*DEFINE_ COORDINATE_OPTION.
A1-V3	Задаются два вектора <b>a</b> и <b>v</b> , фиксированных на жестком теле, которые используются для подпрограмм вывода и

Жесткий материал типа 20 является удобным средством превращения одной или более частей модели, состоящих из балочных, оболочечных или объемных элементов, в жесткое тело. Аппроксимация деформируемого тела жестким телом – это один из предпочтительных способов моделирования во многих реальных приложениях. Например, в задачах формовки листового металла оснастка может быть точно и корректно представлена как жесткое тело. На ранних этапах проектирования систем безопасности можно также считать жестким тело пассажира. При обработке элементов жесткие элементы пропускаются, при этом не выделяется память для хранения значений переменных во времени; следовательно, использование жесткого материала очень эффективно.

Модуль Юнга,  $E$  и коэффициент Пуассона используются для определения параметров границы скольжения, если жесткое тело участвует в задании контакта. Для таких констант следует задавать реалистичные значения, так как нереалистичные значения могут усугубить численные проблемы при обработке контактного взаимодействия.

Направления ограничений, накладываемых на жесткие материалы (параметр СМО равен +1 или -1), фиксированы, то есть не изменяются во времени. Чтобы накладывать на жесткое тело ограничение, направление которого изменялось бы при вращении жесткого тела, используется ключевое слово `*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_LOCAL`.

#### **4.8. Определение тепловых моделей материала [28]**

##### ***\*MAT\_THERMAL***

С помощью карт `*MAT_THERMAL_` можно задавать теплофизические параметры материалов при совместном прочность/тепло анализе и при чисто тепловом анализе (см. `*CONTROL_SOLUTION`). Теплофизические параметры должны задаваться для всех объемных и оболочечных

элементов. Для балочных или дискретных элементов такие параметры задавать не нужно, т. к. эти элементы не учитываются на тепловой стадии расчета. Однако теплофизические параметры манекена будут присутствовать для этих элементов в файле D3HSP.

На теплофизические свойства ссылаются с помощью идентифицирующего номера TMID, который никак не связан с номерами других материалов MID, заданными в других картах \*MAT\_.... В одном расчете номера TMID и MID могут совпадать. Эти номера (TMID и MID) связаны через карту \*PART.

### **\*MAT\_THERMAL\_ISOTROPIC**

Это материал с теплофизическими свойствами типа 1. Модель позволяет задавать изотропные теплофизические свойства материала.

Карта 1

Переменная	TMID	TRO	TGRLC	TGMULT				
Тип	I	F	F	F				

Карта 2

Переменная	HC	TC						
Тип	F	F						

Перемен.	Описание
TMID	Идентификатор материала
TRO	Плотность материала: = 0.0: по умолчанию используется плотность конструкционного материала
TGRLC	Номер задающей кривой для скорости теплообразования (см. *DEFINE_CURVE): > 0: функция от времени, = 0: используется постоянный коэффициент TGMULT, < 0: функция от температуры
TGMULT	Коэффициент скорости теплообразования:

	= 0.0: теплообразования нет
НС	Теплоемкость
ТС	Теплопроводность

#### 4.9. Модели накопления повреждения и разрушение материала

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;
- различные предельные параметры при разрушении (давления, главное напряжение, эквивалентные напряжения, главная деформация, деформация сдвига и т.п.) – MAT\_EROSION;
- накопление повреждения с последующим разрушением – MAT15;
- сложные модели разрушения – MAT123, Gurson Mat120, модель Gissmo и др.

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.

В некоторых материалах, например, Mat 3, Mat 15 параметры разрушения задаются непосредственно в карте материала.

##### 4.9.1. \*MAT\_ADD\_EROSION

Опция ADD\_EROSION позволяет ввести разрушение в эти модели, хотя эта опция может быть использована в моделях материала с другим критерием разрушения/разрыва. Каждый из введенных здесь критериев применяется независимо, и как только какой-то из них выполняется, элемент исключается из расчета.

Карта 1

Переменная	MID	EXCL						
Тип	I	F						
По умолчанию	нет	нет						

Карта 2

Переменная	PFAI	SIGP1	SIGV	EPSP	EPSSH	SIGTH	IMPULS	
Тип	F	F	F	F	F	F	F	
По умолчанию	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	

Перемен.	Описание
MID	Идентификатор материала, для которого задается критерий разрушения
EXCL	Номер исключения. Если какие-то константы разрушения полагаются равными этому числу, то будет происходить обход соответствующих критериев разрушения (что снижает затраты на применение модели материала с разрушением). Например, чтобы исключить растяжение какого-то материала, в качестве значения этой переменной пользователь должен задать какое-то необычное число, например, 1234, задать $P_{\min}$ равным 0.0, а все остальные константы равными 1234. По умолчанию значение этого пара метра равно 0.0, что исключает из рассмотрения все критерии, в которых константы заданы равными 0.0 или оставлены пробелами при вводе
PFAIL	Давление разрушения $P_{\min}$
SIGP1	Главное напряжение при разрушении $\sigma_{\max}$
SIGVM	Эквивалентное напряжение при разрушении $\bar{\sigma}_{\max}$
EPSP1	Главная деформация при разрушении $\epsilon_{\max}$
EPSSH	Деформация сдвига при разрушении $\gamma_{\max}$
SIGTH	Пороговое напряжение $\sigma_0$
IMPULS	Разрушающий импульс напряжений $K_f$

Критерии разрушения:

1.  $P \leq P_{min}$ , где  $P$  – давление (положительное при сжатии),  $P_{min}$  – давление разрушения

2.  $\sigma_1 \geq \sigma_{max}$ , где  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение,  $\sigma_{max}$  – главное напряжение при разрушении

3.  $\sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \geq \bar{\sigma}_{max}$ , где  $\sigma'_{ij}$  – компоненты девиатора тензора напряжений,  $\bar{\sigma}_{max}$  – эквивалентное напряжение при разрушении.

4.  $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_{max}$ , где  $\varepsilon_1$  – максимальная главная деформация,  $\varepsilon_{max}$  – главная деформация при разрушении.

5.  $\gamma_1 \geq \gamma_{max}$ , где  $\gamma_1$  – сдвиговая деформация,  $\gamma_{max}$  – сдвиговая деформация при разрушении

6. Критерий Тулера-Бучера

$$\int_0^t [\max(0, \sigma_1 - \sigma_0)]^2 dt \geq K_f,$$

где  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение,  $\sigma_0$  – заданное пороговое напряжение,  $\sigma_1 \geq \sigma_0 \geq 0$ ,  $K_f$  – разрушающий импульс напряжений. Напряжения, значения которых ниже заданных пороговых, слишком малы, чтобы вызвать разрушение даже в результате очень длительного нагружения.

Использование параметров разрушения GISSMO в данной карте позволяет учесть многокомпонентное напряженное состояние и задать сложное разрушение материала (в данном методическом пособии не описано).

#### **4.9.2. \*MAT\_MODIFIED\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY**

Это тип материала 123. Можно задать упругопластический материал с произвольной зависимостью «напряжение-деформация» и произвольной зависимостью от скорости деформации. Данная модель материала аналогична модели MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY, но в

ней отсутствует набор критериев разрушения. Разрушение происходит при достижении значения эффективной пластической деформации, пластического утонения, величины основной компоненты главной плоской деформации или минимального шага по времени.

В данной карте присутствует опция “RATE” для учета зависимости скорости пластического разрушения. Опция “RTCL” используется для активации RTCL разрушения.

Карта 5 требуется, если только активна опция RATE или RTCL

Карта 5

Переменная	LCTSR	EPSO	TRIAХ					
Тип	F	F	F					

Пере- мен.	Описание
—	—
LCTSR	Кривая нагрузки, которая определяет thinning деформацию разрушения в зависимости от скорости пластической деформации
EPSO	EPSO параметр для RTCL разрушения. =0: (по умолчанию) RTCL разрушение не активно; >0: RTCL разрушение активно
TRIAХ	RTCL разрушение трехосный предел. =0: (по умолчанию) нет ограничений >0: Повреждения не накапливаются когда трехосность превышает TRIAХ.

Опция RTCL разрушения используется для разрушения элемента, когда функция разрушения превышает 1. В течении каждого цикла решения, если приращение пластической деформации больше нуля, приращение RTCL разрушения вычисляется как:

$$\Delta f_{\text{damage}} = \frac{1}{\varepsilon_0} f \left( \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}} \right)_{\text{RTCL}} d\bar{\varepsilon}^p$$

где

$$f\left(\frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}}\right)_{\text{RTCL}} = \begin{cases} 0 & \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}} \leq -\frac{1}{3} \\ 2 \frac{1 + \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}} \sqrt{12 - 27\left(\frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}}\right)^2}}{3 \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}} + \sqrt{12 - 27\left(\frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}}\right)^2}} & \frac{1}{3} < \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}} < \frac{1}{3} \\ \frac{1}{1.65} \exp\left(\frac{3\sigma_H}{2\bar{\sigma}}\right) & \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}} \geq \frac{1}{3} \end{cases}$$

и

$\varepsilon_0$  - одноосное напряжение слома / критическое напряжение разрушения

$\sigma_H$  - гидростатическое напряжение

$\bar{\sigma}$  - эффективное напряжение

$d\varepsilon^{-p}$  - приращение эффективной пластической деформации

Приращения суммируются в течении времени и элемент удаляется когда  $f_{\text{damage}} \geq 1$ . Для  $0 < f_{\text{damage}} < 1$ , сила элемента не будет ухудшена.

Значение  $f_{\text{damage}}$  сохранена в переменной истории #9 и может быть показана через d3plot файлы, если число дополнительных переменных истории  $\geq 9$  в карте \*DATABASE\_EXTENT\_BINARY.

Дополнительный параметр TRIAX может использоваться, чтобы предотвратить чрезмерный рост повреждений RTCL и эрозию элементов для элементов плохой формы, которые могли бы показать нереалистично высокие значения для трехосности (triaxiality). Трехосность  $\frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}}$  хранится в переменной истории #11.

Параметр EPSMAJ по сравнению с основными главными деформациями в следующих смыслах:

- Для оболочек это максимальное собственное значение тензора в плоскости деформации, которое увеличивается приращением деформации.
- Для объемных элементов она рассчитывается как максимальное собственное значение к логарифмическому тензору деформаций

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \ln(\mathbf{F}^T \mathbf{F}),$$

где  $\mathbf{F}$  – глобальный градиент деформации. В сумме оба типа элемента используют естественную меру деформации для определения раз-

рушения главные деформации, вычисленные таким образом, выводятся в истории переменной #7.

Чтобы получить представление о вероятности разрушения индикатор  $D$  рассчитывается внутри:

$$D = \max \left( \frac{\bar{\varepsilon}^p}{\text{FAIL}}, \frac{-\varepsilon_3}{\text{EPSTHIN}}, \frac{\varepsilon_I}{\text{EPSMAJ}} \right)$$

и сохраняется в истории переменной #10.  $D$  в диапазоне от 0 (без изменений) до 1 (разрушение).  $\bar{\varepsilon}^p, -\varepsilon_3, \varepsilon_I$  - текущие значения эффективной пластической деформации, деформации утонения (thinning) и главной в плоскости деформации.

### ***4.9.3. Модель разрушения GISSMO***

Данная модель разрушения включается в карте

\*MAT\_ADD\_EROSION и позволяет учесть такие параметры как:

- деформацию разрушения в зависимости от напряженного состояния (триаксилити) и параметра Лоде;
- регуляризационную кривую, которая позволяет обеспечивать адекватное удаление элемента независимо от его размера;
- накопление повреждения с учетом разрушения.

Поскольку данная модель сложна, в данном пособии она подробно не представлена.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПОВ ЭЛЕМЕНТОВ

5.1. Обзор существующих типов элементов

Для процессов деформирования и разрушения твердых тел используются полноинтегрированные элементы и с однотоочечным интегрированием [28]. Элементы низкого порядка (с однотоочечным интегрированием), используемые в LS-DYNA просты, эффективны и точны. Примеры конечных элементов представлены на рис. 5.1.

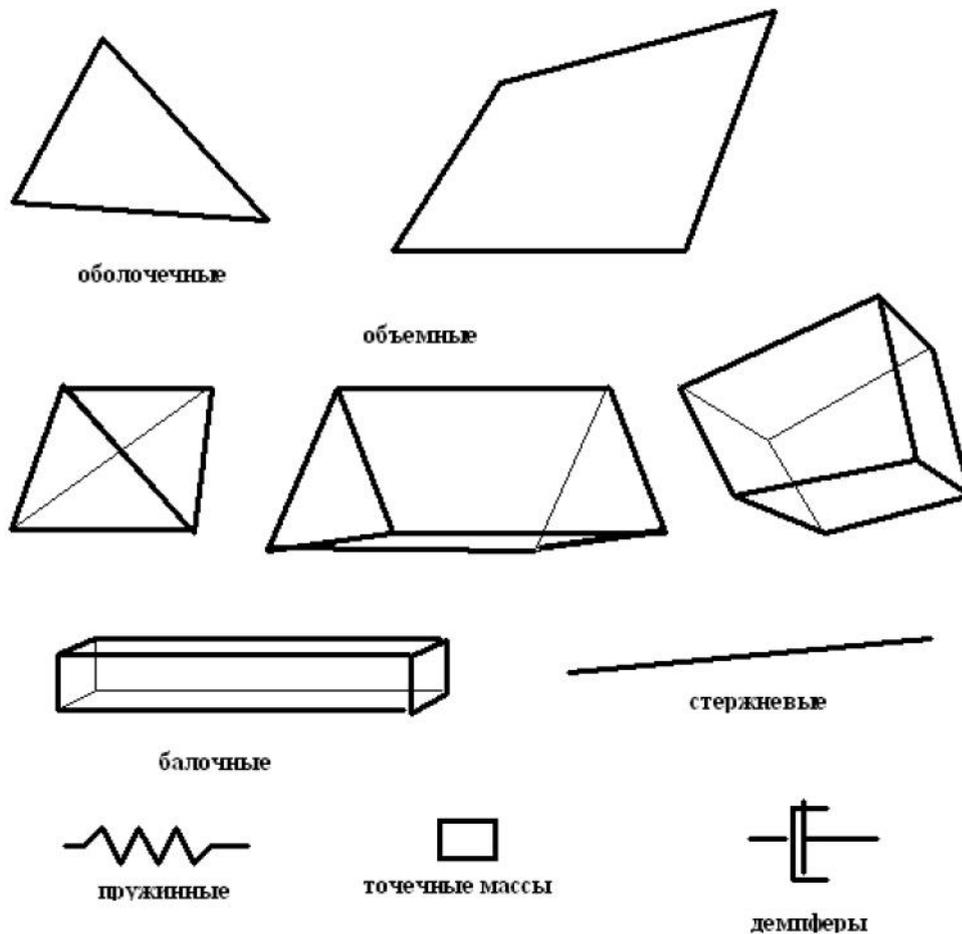


Рис. 5.1. Конечные элементы программы LS-DYNA [28]

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

Типы элементов применяемые при металлообработке:

\*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 [28]

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:

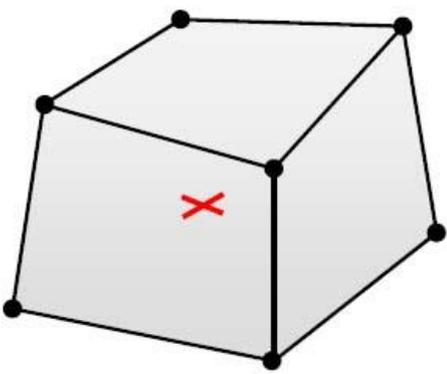
- дополнительное время на подготовку сетки;

- долгое время расчета;

- низкая производительность для тонкостенных конструкций (проблемы заклинивания).

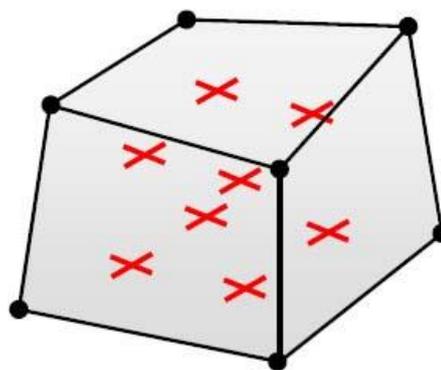
### 5.2.1. Объемные шестигранные элементы [24]

Наиболее применяемые формулировки solid элементов

<p>ELFORM = 1</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- пониженное интегрирование;</li><li>- эффективный и точный;</li><li>- работает даже при больших деформациях;</li><li>- необходим контроль искажения “hourglass”.</li></ul>	
---	--

### 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

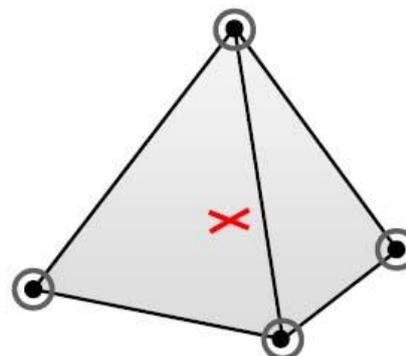
### 5.2.2. Объемные тетраэдральные элементы [24]

#### 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

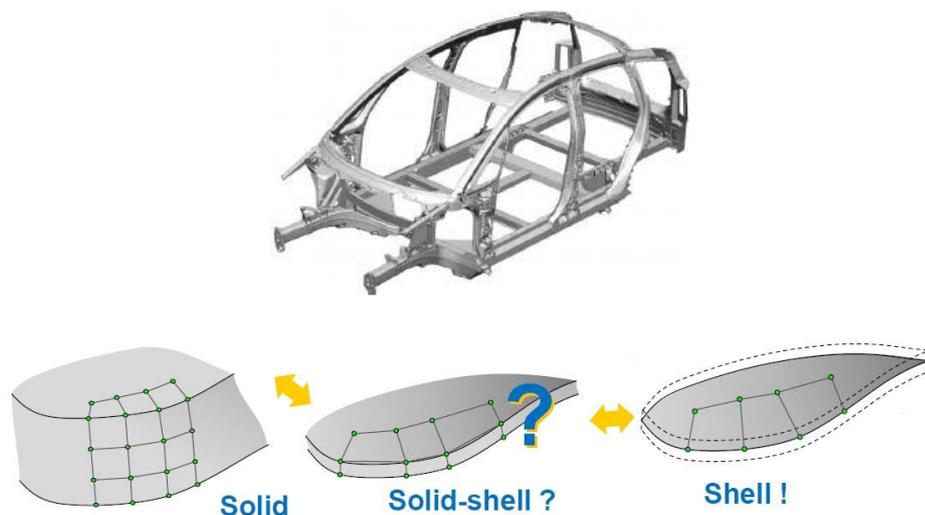


Рис. 5.2. Создание shell элементов [25]

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.

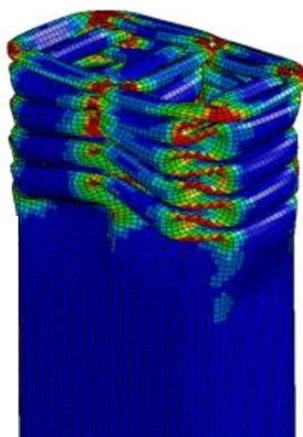


Рис. 5.3. Реалистичное деформирование shell элемента [25]

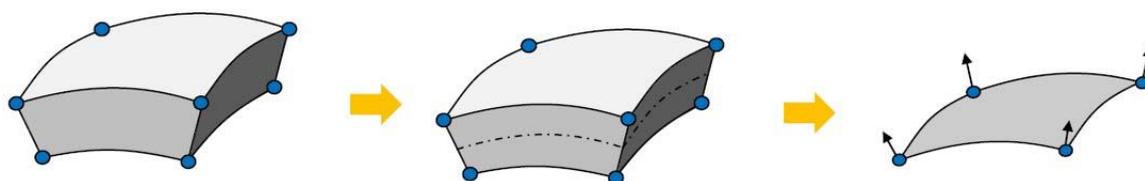
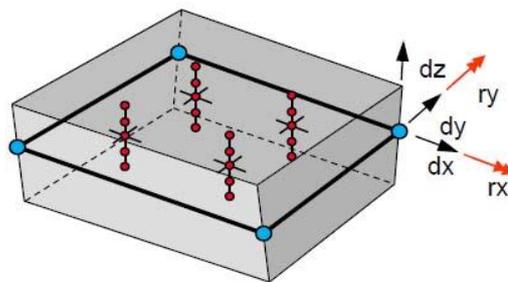


Рис. 5.4. Solid элемент → средняя поверхность в характерной плоскости → shell элемент [25]

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

## ELFORM = 16

- интегрирование  $2 \times 2$ ;
- 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 ( $2 \times 2$ ) элементов;
- в 2-3 раза дольше чем Belytschko-Tsay;
- рекомендуется для неявного анализа.



## Интегрирование по толщине

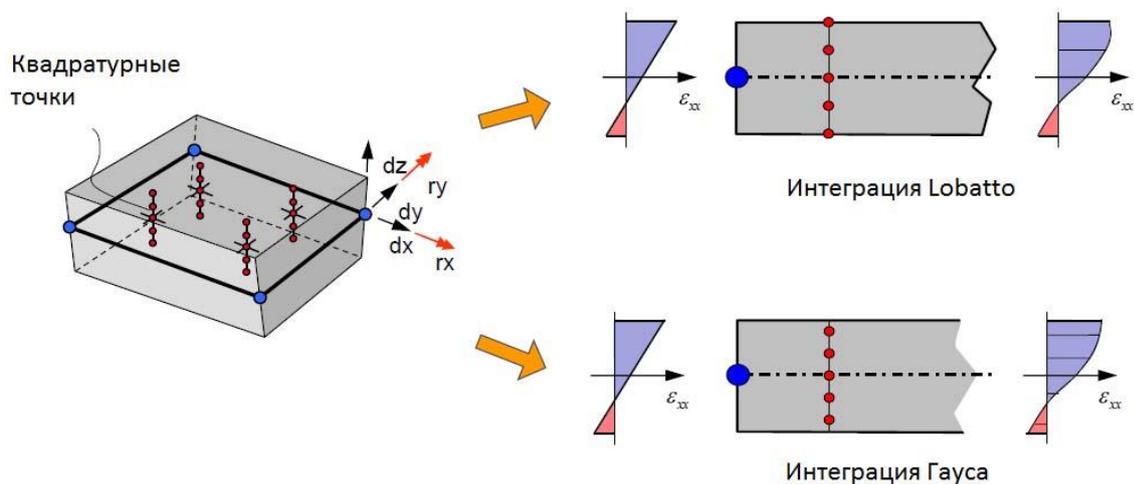


Рис. 5.5. Интегрирование по толщине [25]

## 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 [28].

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.

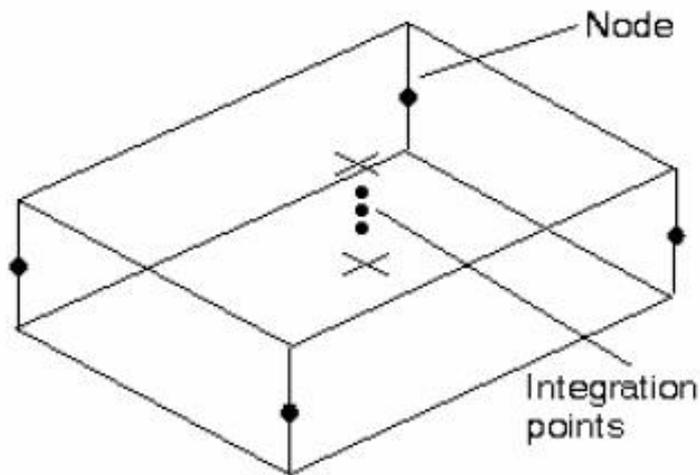


Рис. 5.6. Точки интегрирования [28]

#### 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 стремят 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 [28].

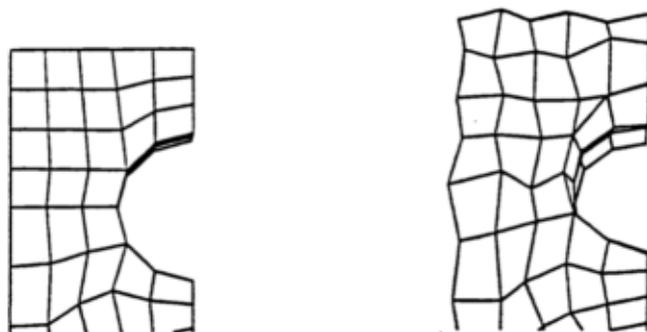


Рис. 5.8. Не деформированная и деформированная сетка с эффектом hourglass [28]

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.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЖЕНИЯ И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

#### 6.1. Определение нагружения [28]

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 [28]**

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 одноточечные ограничения для узловых точек.

Ограничения накладываются 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.

## 6.5. Демпфирование

Демпфирование применяется для минимизации нереалистических бесконечных колебаний конструкции, возникших после приложения кратковременных нагрузок [28].

Карта \*DAMPING\_GLOBAL позволяет задавать узловое демпфирование (затухание), взвешенное по массе.

Демпфирование определяется параметром VALDMP. Вектор усилий, обусловленный демпфированием, определяется следующей формулой:

$$F_{damp}^n = D_s m v$$

Наилучшее значение для постоянной демпфирования обычно выбирается на основе критического коэффициента демпфирования для низшей частоты системы, представляющей интерес. Поэтому рекомендуется принимать значение

$$D_s = 2\varpi_{\min}$$

при этом  $\varpi_{\min}$  собственная частота, в радианах за единицу времени (пример расчета в книге [1], стр.85).

Энергия, рассеиваемая при демпфировании, взвешенной по массе, хранится как энергия демпфирования системы в файле GLSTAT формата ASCII.

Карта \*DAMPING\_GLOBAL\_STIFFNESS позволяет задавать коэффициент затухания Релея посредством идентификации части.

Рекомендованные значения 0,01-0,25.

Матрица демпфирования задается соотношением

$$C = \alpha M + \beta K ,$$

В общем случае демпфирование, пропорциональное жесткости, является эффективным для высоких частот и действует в направлении, ортогональном к перемещению твердого тела. Демпфирование, пропорциональное массе, наиболее эффективно для низких частот и препятствует движению твердого тела.

Энергия, рассеиваемая при релейском демпфировании, вычисляется только в том случае, когда флаг-признак RYLEN в контрольной карте \*CONTROL\_ENERGY задан равным 2. Эта энергия аккумулируется, как внутренняя энергия элемента, и включается в баланс энергии. В файле GLSTAT эта энергия суммируется с внутренней энергией.

Таким образом, В Is-dyna имеется два варианта демпфирования:

$\alpha$  - демпфирование (узловое демпфирование, взвешенное по массе) эффективно гасит низкие частоты, для его определения необходимо выбрать все части.

$\beta$  - демпфирование применяется для каждой части отдельно и эффективно гасит высокие частоты.

## 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 [28].

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

Рекомендуется избегать определения избыточных контактов.

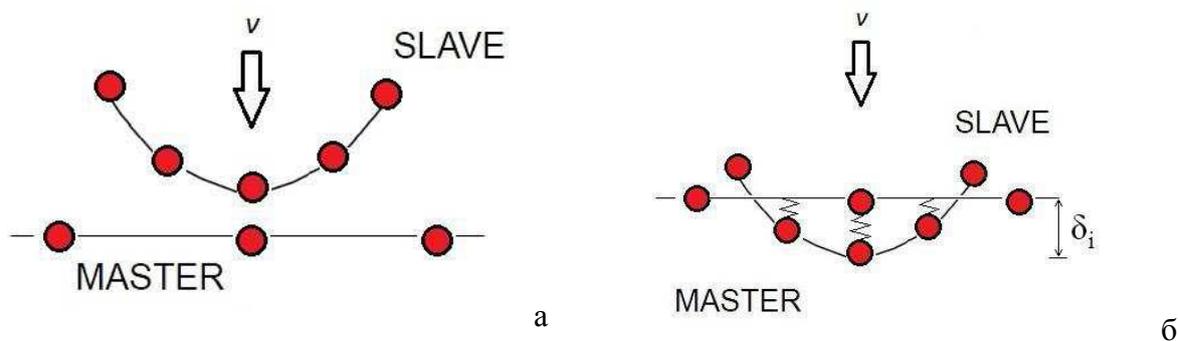


Рис. 7.1. Механика работы контакта штрафного типа: а – до проникновения, б – после проникновения, создание выталкивающего усилия  $F_i = \delta_i k$

## 7.2. Типы контактов для процессов металлообработки

Автоматический тип контакта в LS-DYNA определяется опцией AUTOMATIC в команде \*CONTACT [28].

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 формулирующие контакты:

- \*CONTACT\_FORMING\_SURFACE\_TO\_SURFACE;
- \*CONTACT\_FORMING\_ONE\_WAY\_SURFACE\_TO\_SURFACE.

При формулирующем 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 металлообработки 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.

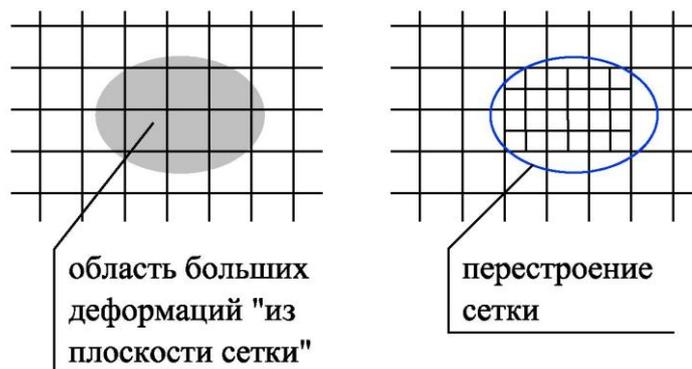


Рис. 8.1. Перестроение сетки в зоне больших деформаций [7]

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;

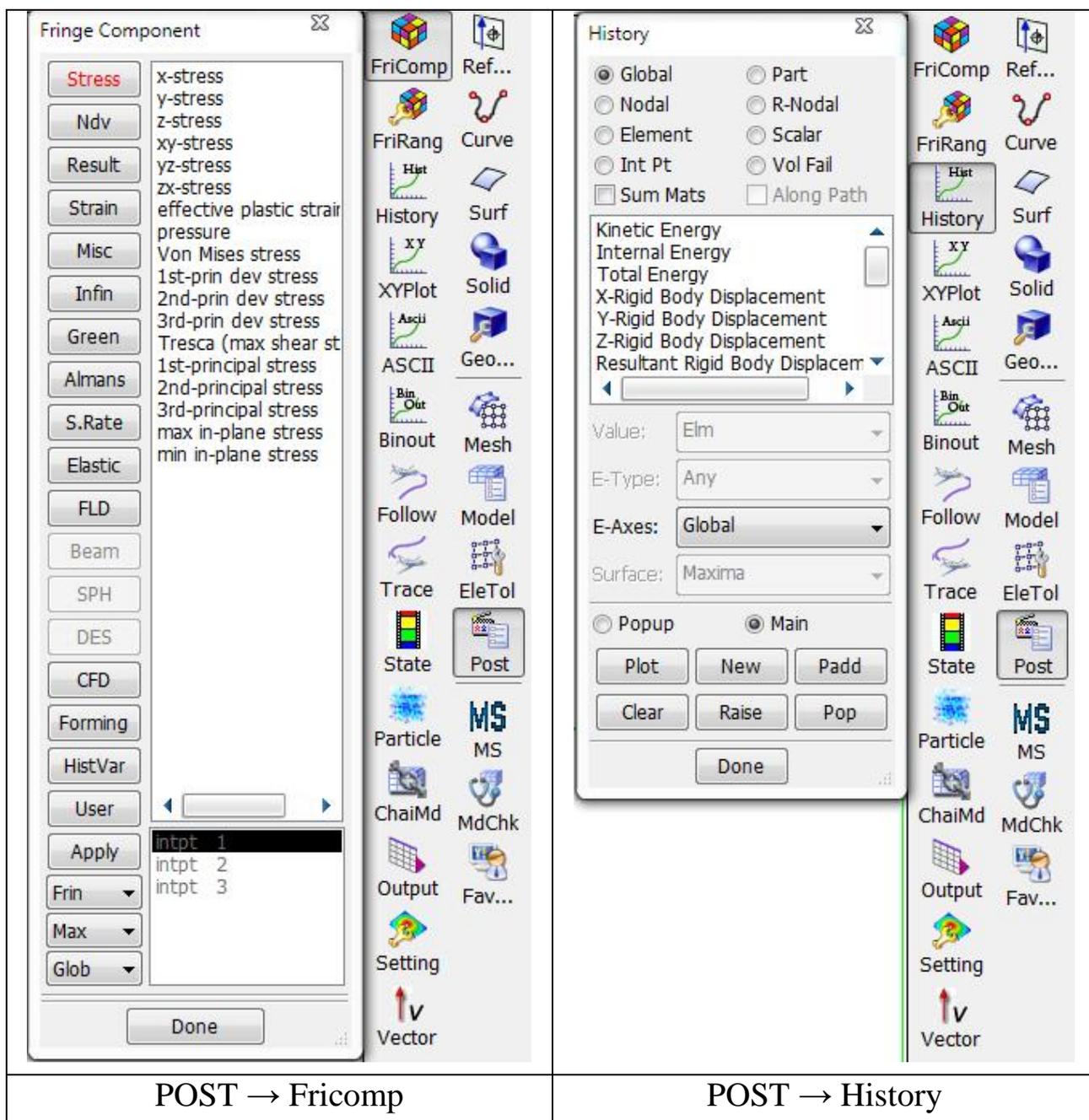
- *Surface* – выбрать расположение оболочки через толщину;

*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-*).

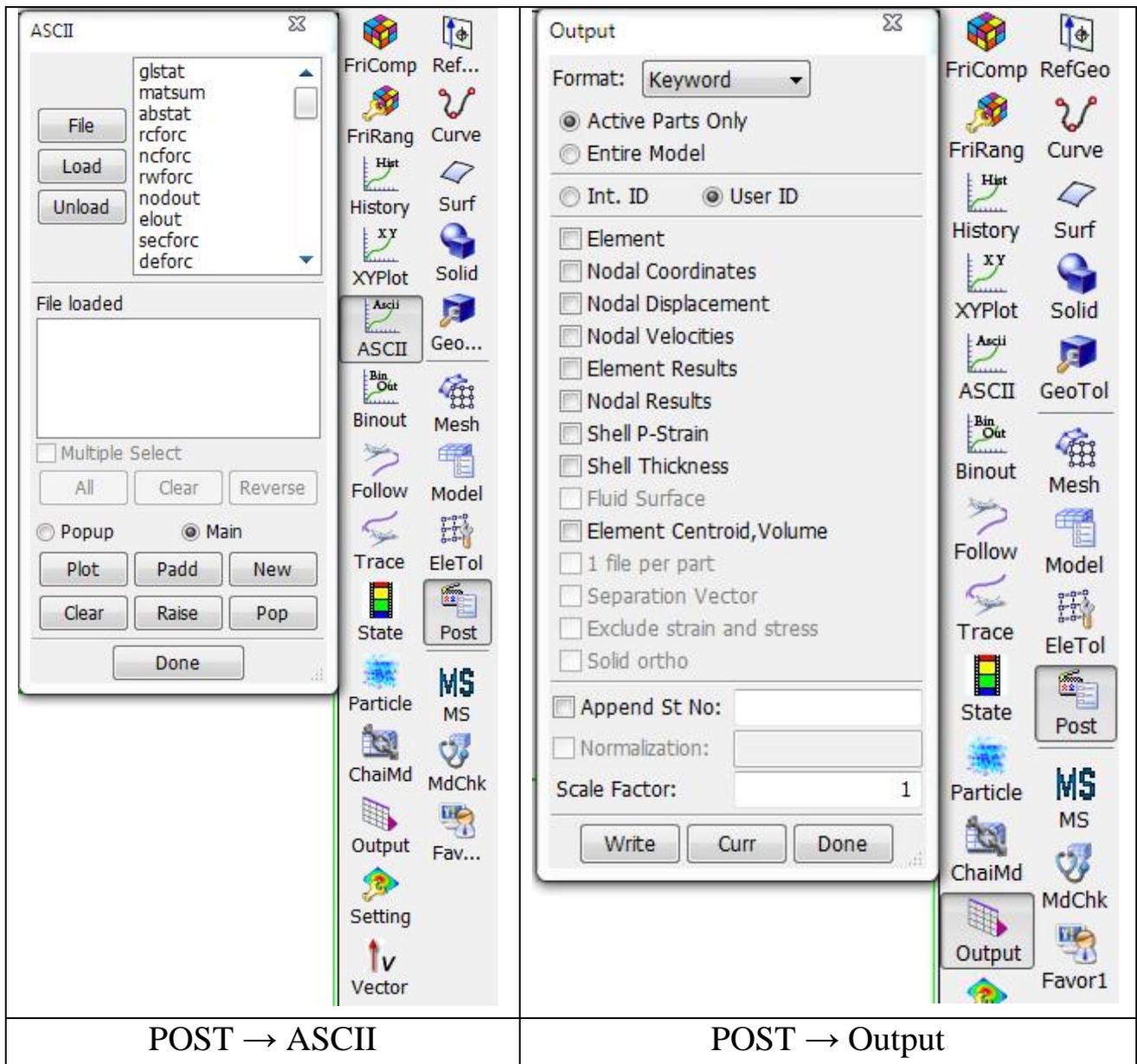


Рис. 9.2. Меню постпроцессорной обработки (ASCII, Output)

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.

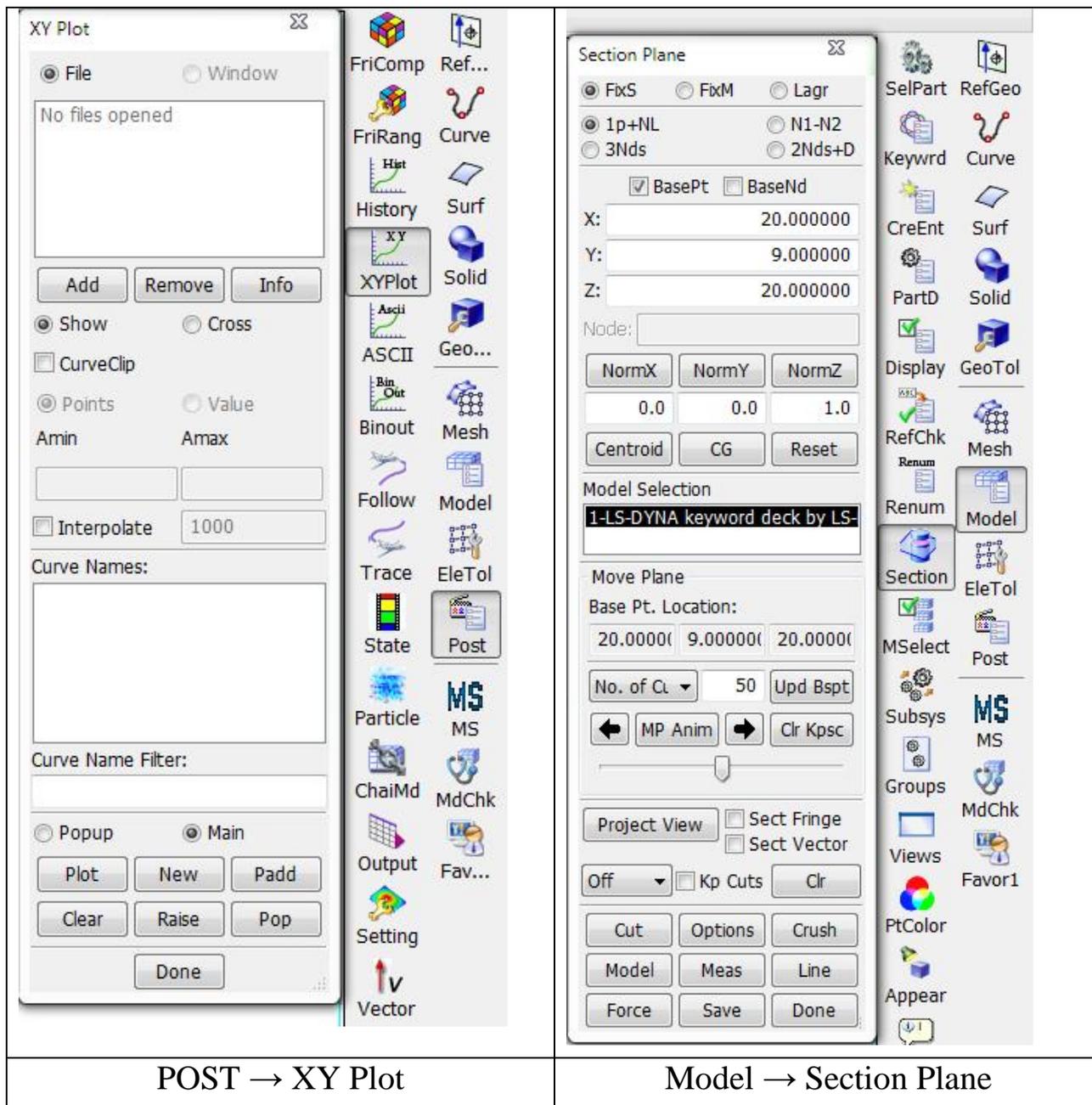


Рис. 9.3. Меню постпроцессорной обработки (XY Plot, Section Plane)

## 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**.

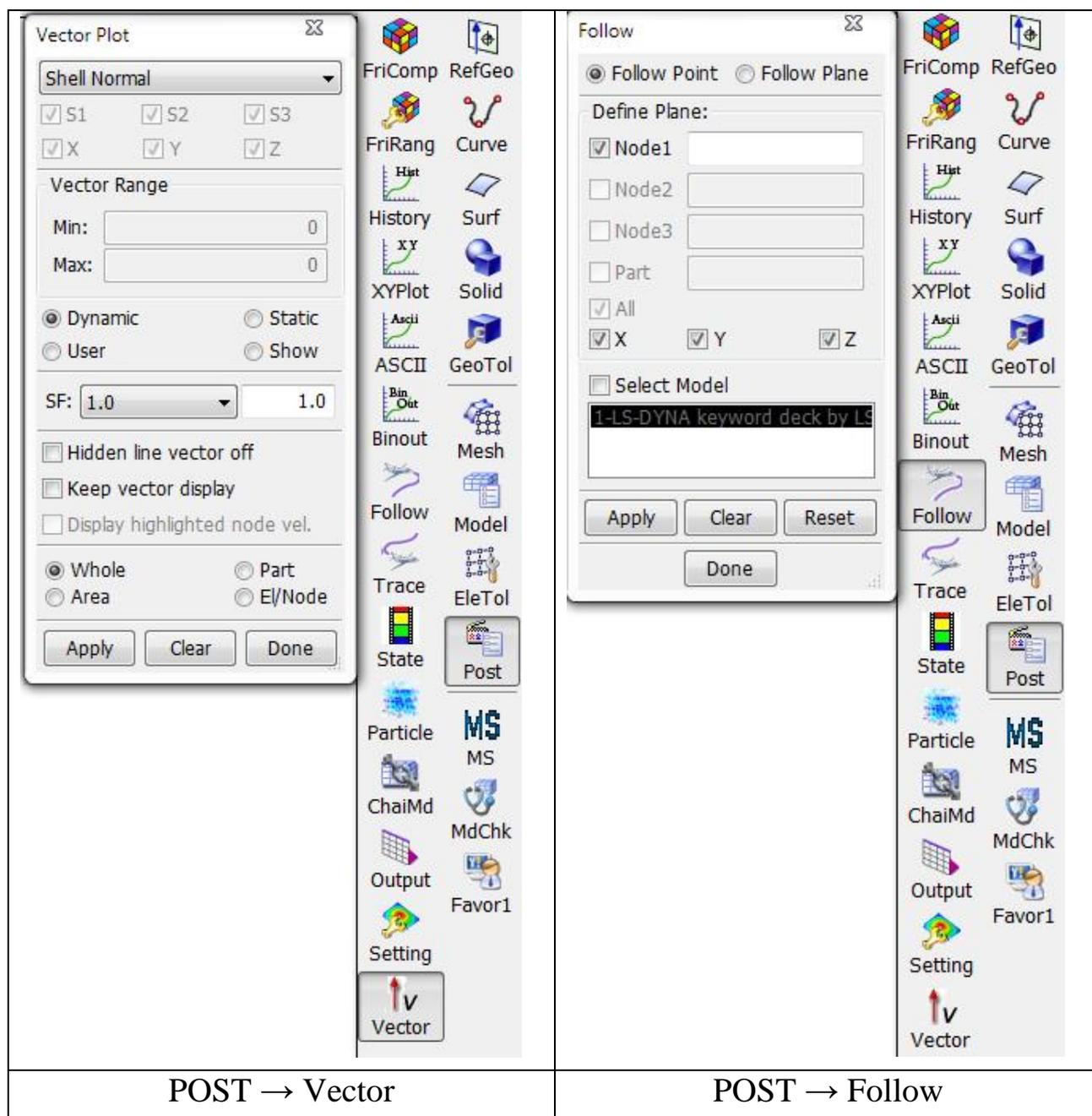
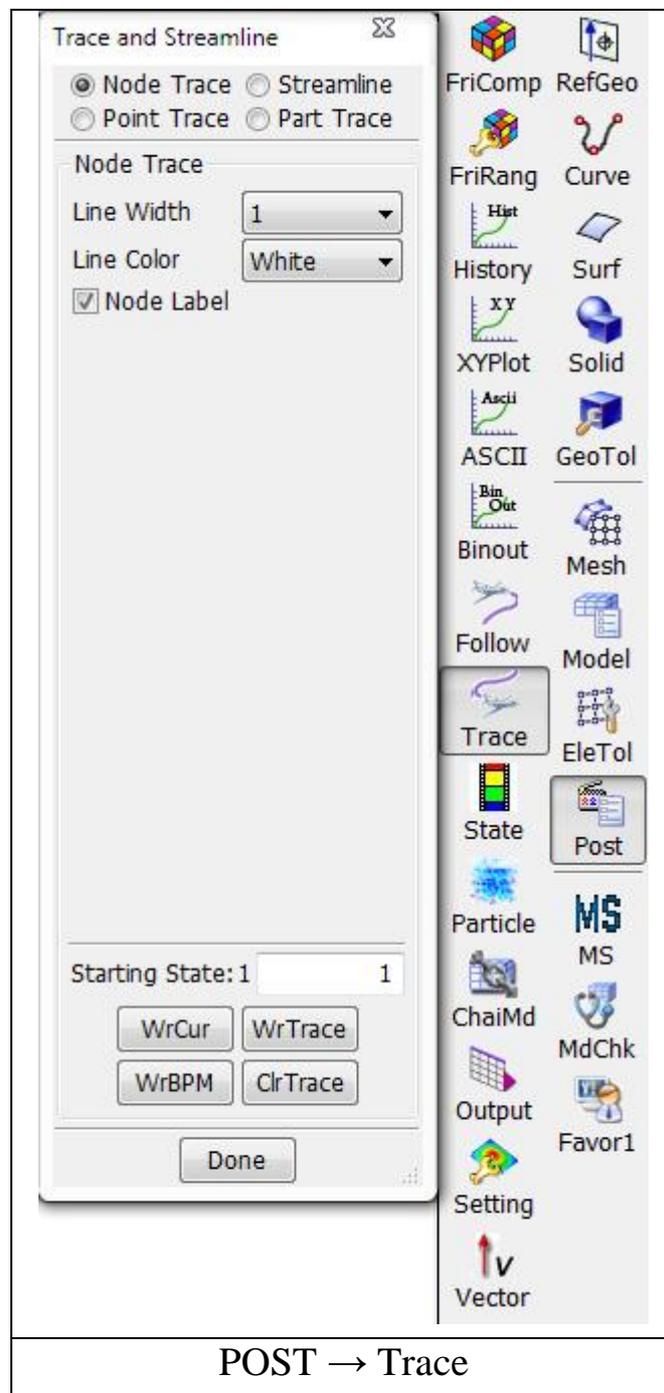


Рис. 9.4. Меню постпроцессорной обработки (Vector, Follow, Trace)



POST → Trace

Рис. 9.5. Меню постпроцессорной обработки (Trace)

Семинар 6	Вытяжка детали из листовой заготовки с адаптивным перестроением
Семинар 7	Горячая штамповка (осадка) цилиндрической заготовки
Семинар 8	Прокатка заготовки между цилиндрическими роликами
Семинар 9	Разделительная операция – процесс резки

## РЕКОМЕНДАЦИИ

### 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.
2. Рекомендуется выбрать максимальную скорость инструмента 2-5 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**) увеличенный в 10-20 раз.

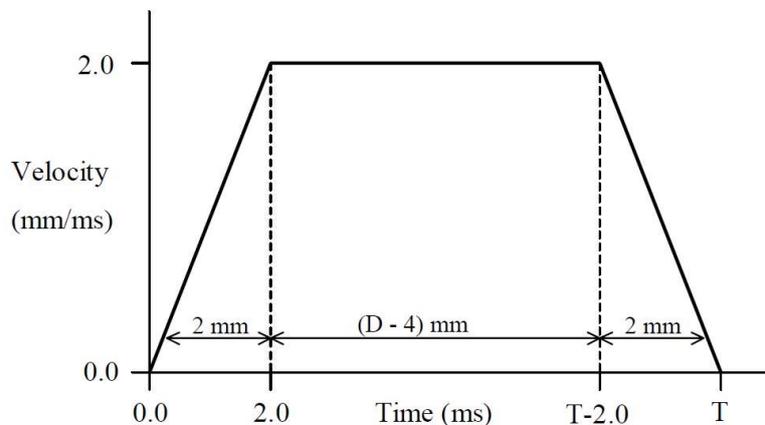


Рис. 10.1. Трапецевидный график нагружения инструмента

#### Карта \*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 эту карту. Три точки могут быть адекватны для анализа формирования, но если будет выполнен анализ пружинения необходимо использовать 5 точек или лучше 7 точек.

### Карта \*CONTROL\_SHELL

4. Если некоторые треугольные элементы присутствуют в конечно-элементной сетке, 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**.

### Карта \*CONTROL\_HOURLASS

7. Для металлоформовки рекомендуется контроль искажения Hourglass по жесткостному параметру. Выберите **ihq** или как тип 4 или 5 с параметром QM=0,05-0,1.

### 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. Для моделирования листовой штамповки 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**.

### Карта \*CONTROL\_CONTACT

10. Установите масштабный фактор “penalty” для всех сопряжений 0.010 используя **slsfac**.
11. Активизируйте подобие толщины для листа используя **shlthk**.
12. Рекомендуются пренебрегать толщиной в твердых инструментах.
13. Для моделирования формования рекомендуется установить 20 процентов от критического вязкого демпфирования (**vdc**) для устранения высокочастотных динамических эффектов.

### Карта \*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. LS-PREPOST позволяет строить плавные графики.
17. Нет необходимости включать нулевую скорость “захват времени” в конце явного формующего 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. Применяйте 200-400 циклов адаптации за время расчета (интервал адаптации **adpfreq**). Следите чтобы элементы не имели значительного деформирования между циклами адаптациями
21. Адаптивный допуск **adptol** выбирает допустимое изменение угла. Рекомендуется величина 4-20 градусов.
22. Метод использует измерение этого угла и выбирается используя **adpropt**. 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

### **Выходная информация**

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.

## **10.2. Параметры для моделирования разделительных операции ОМД и мехобработки**

- использовать объемные конечные элементы для инструмента;
- использовать по возможности одинаковые сеточные размеры инструмента и заготовки;
- использовать скорость движения резца до 5 м/сек;
- использовать сложные модели материала, например, MAT15 – материал Джонсона-Кука;
- использовать контакт ERODING\_NODES\_TO\_SURFACE;
- установить параметры контакта Eroding: **isym, erosop, iadj** к 1;
- создать самоконтакт для контакта отхода с заготовкой;

- использовать в зоне предполагаемого разрушения размеры элементов меньшей величины;
- установить параметр **d1** равным предельной пластической деформации материала (при отсутствии точных данных) для модели Джонсона-Кука;
- установить параметр **sigp1** (главные напряжения разрушения) в \*MAT\_ADD\_ERODING для низкопластичных, хрупких материалов;
- установить меньший параметр контактной жесткости **slsfac** в \*Control\_contact при нереалистичном удалении элементов;
- установить больший параметр **qm** в \*Hourglass при значительном искажении элементов по типу HOURGLASS;
- использовать количество элементов по толщине отхода не менее 3-5;
- при плохом качестве модели использует методы SPH и SPG.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. <http://www.dynacrash.ru>
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/LS-DYNA>
3. Курненок А.В. Численное моделирование процессов резания: 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.
28. LS-DYNA Руководство пользователя. Часть 1.2. 2007 г. Версия 971. LSTC. Перевод выполнен ООО “Стрела” под редакцией Б.Г. Рубцова.

# ПРАКТИКА

Скачать учебные файлы можно с сайта <https://dynacrash.ru>

## Семинар 1. 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.

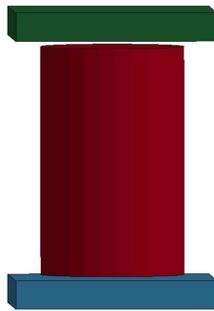


Рис. 3.1. Пример задачи

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].

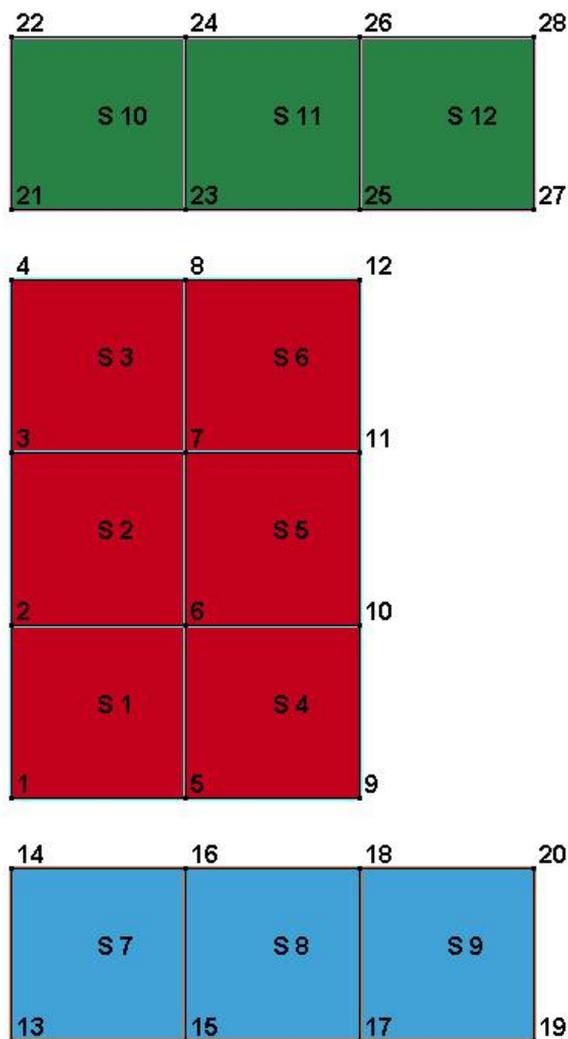


Рис. 3.2. Упрощенная конечно-элементная модель задачи осадки

Далее приведен пример простого k-файла – процесс 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 0,0,0,0,0,0,0,0	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

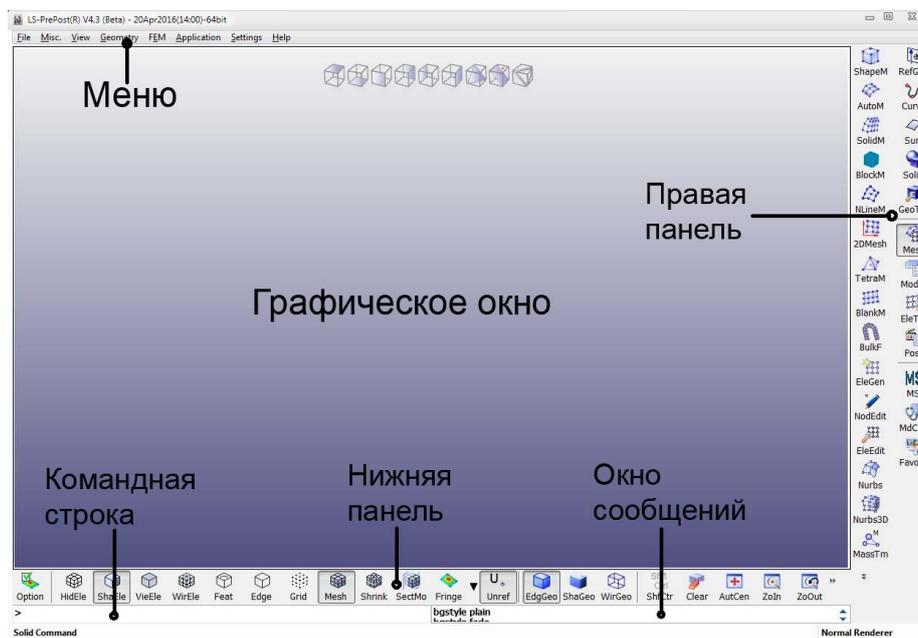
*CONTACT_ 2D_ AUTOMATIC_S URFACE_TO_S URFACE_ID	1 1,2,,0.1 0	Определение контакта между заготовкой и нижним бойком
*CONTACT_ 2D_ AUTOMATIC_S URFACE_TO_S URFACE_ID	2 1,3,,0.1 0	Определение контакта между заготовкой и верхним бойком
*END		Окончание кода

Файлы:

расчетная модель - primer6.k

<https://dynacrash.ru/Workshop/Ex1.zip>

# Семинар 2. 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 фай-

лами, 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.
- Geovetry – 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

Скачать программу можно с сайта

<http://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/lsprepost/4.5/>

Управление моделью в графическом окне используются следующие кнопки:

Вращение: Shift + Левая кнопка мыши

Перемещение: Shift + Средняя кнопка мыши

Масштабирование: Shift + Правая кнопка мыши / колесико.

Для настройки панелей:

- Меню – View – Toolbar – Text and Icon (Right)
- Меню – View – Toolbar – Text and Icon (Bottom)
- Меню – View – Toolbar – Toolbar Font – 10

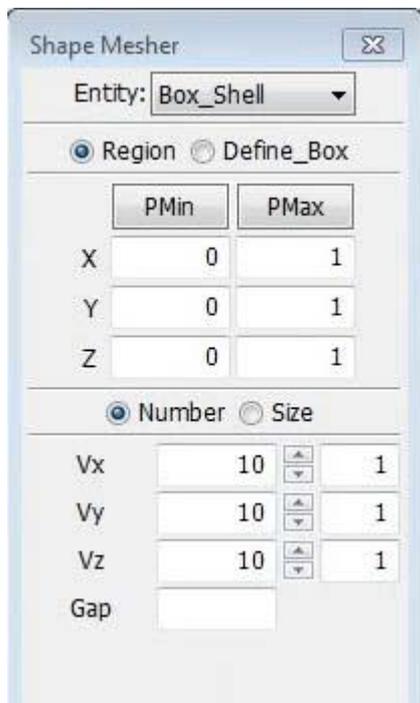
Для настройка окна:

- Нижняя панель – Option – ISO View (галочка)
- Нижняя панель – Option – Anim Player (галочка)

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.

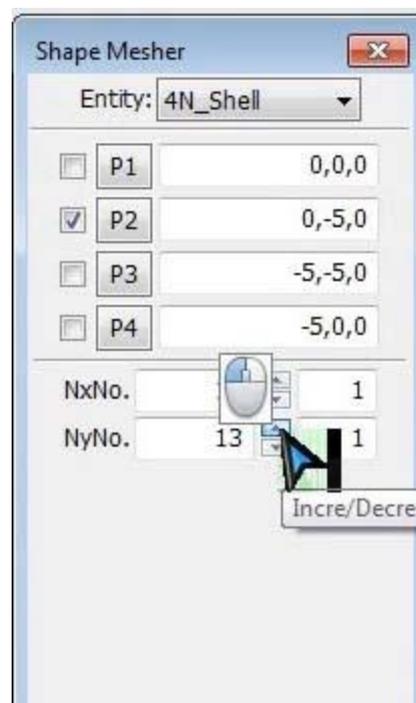
Вводится величина разбиения сторон короба Vx=10, Vy=10, Vz = 10

Нажать Create / Асепт

Шаг 2

Построение плоскости по 4-м точкам

**Mesh** → **ShapeM** → **4N\_Shell**



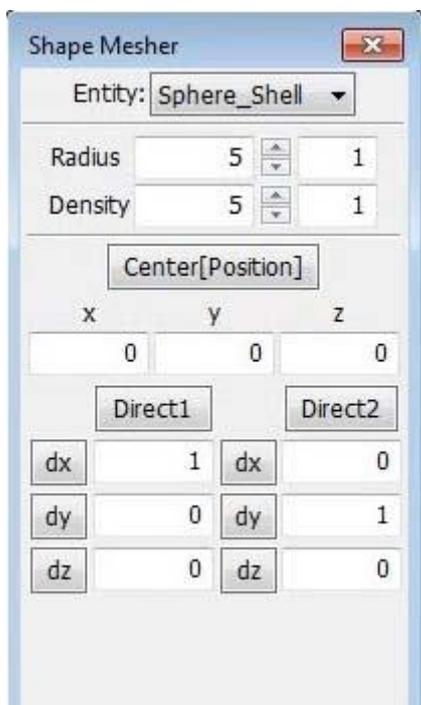
Вводятся координаты четырех точек P1=0,0,0 P2=0,-5,0 P3=-5,-5,0 P4=-5,0,0

Указывается число элементов по сторонам Nx=Ny=10

Нажать Create / Асепт

### Шаг 3

Построение сферической оболочки  
**Mesh** → **ShapeM** → **Sphere\_Shell**



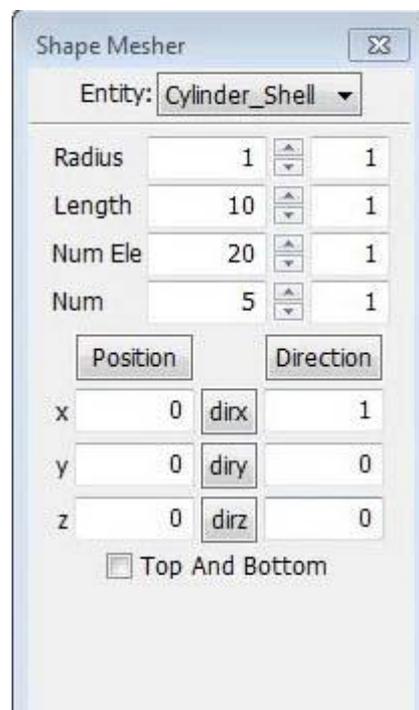
Вводится радиус и плотность разбиения. Radius=5, Density=5.

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

Замечание:

Дерево панелей вверху слева.

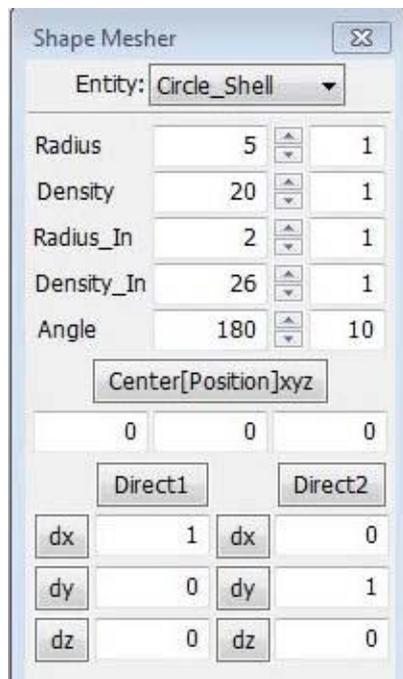
Можно показать, скрыть, удалить нужные части

## Шаг 5

Панель Меню | File – New, далее Yes, далее No

Построение круга

**Mesh → ShapeM → Circle\_Shell**



Вводятся радиус, длина, величина разбиения, угол. Radius=5, Density=20, Radius\_In=2, Density\_In=26

Нажать Create / Ассепт

## Разбиение исходной или импортированной геометрии

### Шаг 6

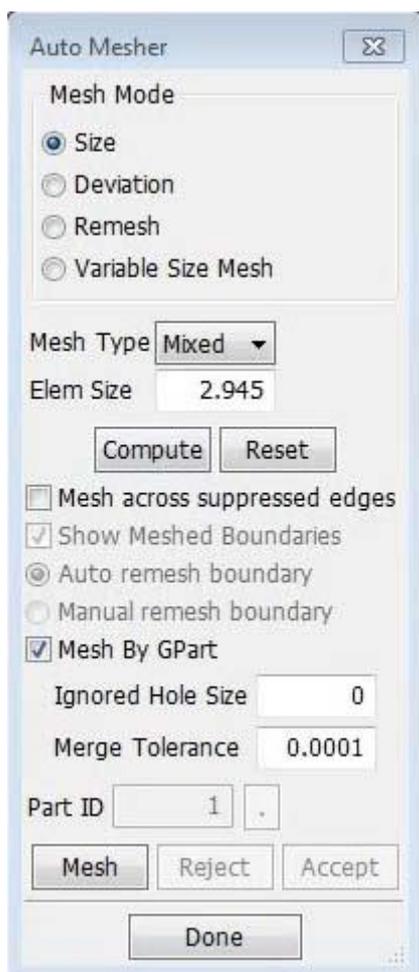
Панель Меню | File – New/Yes/No

Создать плоскость, правая панель:

Surf – Plane, нажать Apply, close

**Mesh** → **AutoM**

Разбиение плоскостей постоянным  
размером



Выбираем Size, указываем Elem  
Size=0.1, выбираем исходную плос-  
кую геометрию, Mesh, Ассепт

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

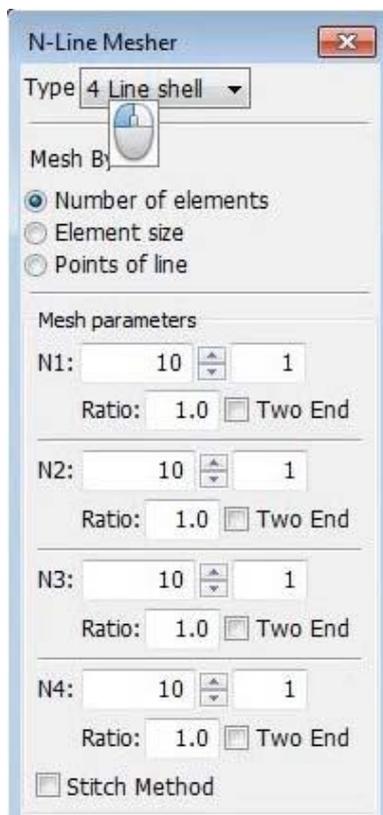
## Шаг 8

### Разбиение плоскостей точным разбиением

Панель Меню | File – New/Yes/No

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

**Mesh** → **NLineM** → **4 Line shell**



Для исходной плоской геометрии указываем величины разбиения  $N1=N2=N3=N4=10$ , поочередно указываем граничные линии плоскости  
Нажать Mesh It / Асцепт / Done

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

Необходимо разбивать каждую часть геометрии.

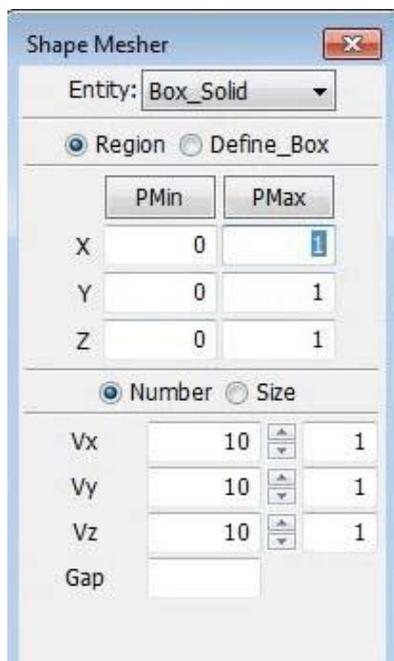
## Построение объемных сеточных фигур

### Шаг 9

Построение объемного короба

Панель Меню | File – New/ Yes/No

**Mesh → ShapeM → Box\_Solid**



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

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

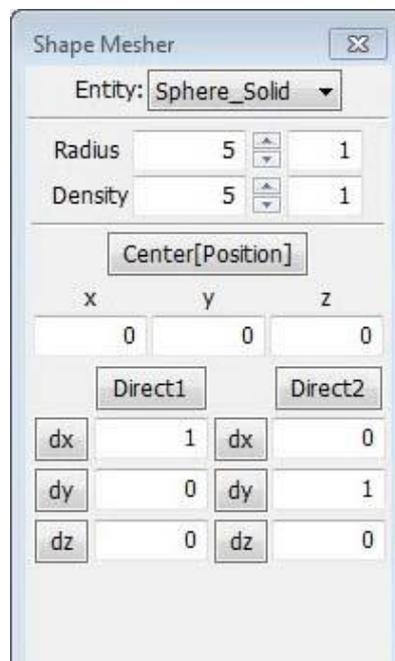
Вводится величина разбиения сторон короба  $V_x=10, V_y=10, V_z = 10$

Нажать Create / Асепт

### Шаг 10

Построение объемного шара

**Mesh → ShapeM → Sphere\_Solid**



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

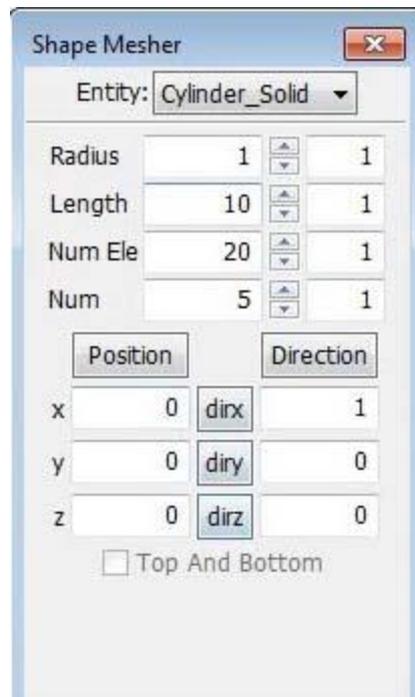
Вводятся координаты середины  $X=Y=Z=0$

Нажать Create / Асепт / Done

## 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 / Асcept / Done

Замечание:

Дерево панелей вверху слева.

Можно показать, скрыть, удалить нужные части

## Нанесение объемной сетки на исходную или импортированную геометрию

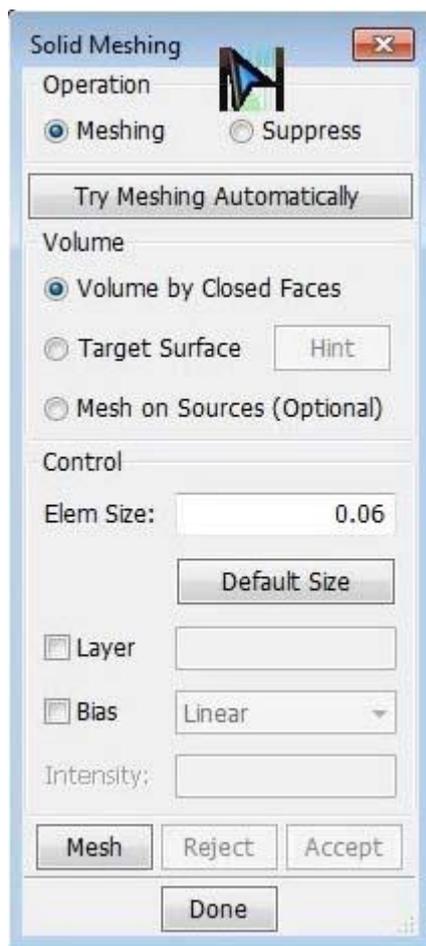
Шаг 12

Нанесение сетки на объемную геометрию

Панель Меню | File – New / Yes/No

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

**Mesh** → **SolidM**



Для исходной объемной геометрии указываем Elem Size

Нажать Try Meshing Automatically / Accept / Done

Скройте исходную геометрию в дереве панелей.

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

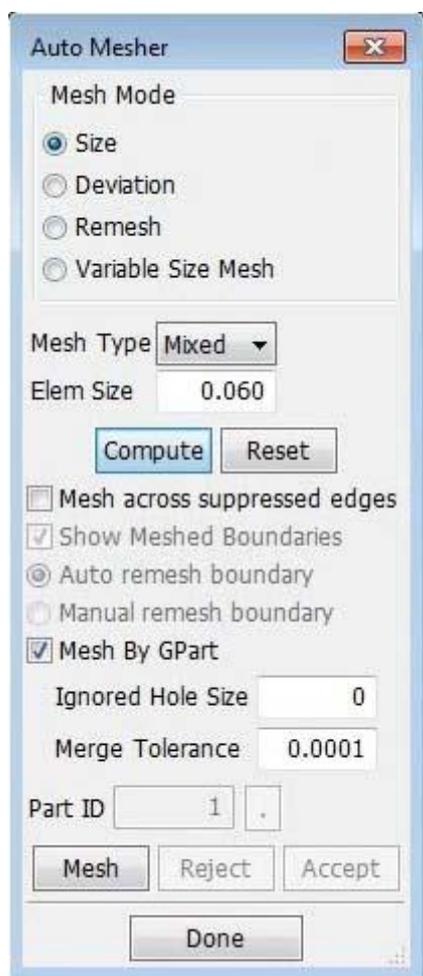
### Шаг 13

Построение предварительной оболочечной сетки

Панель Меню | File – New / Yes/No

Создать объемное тело, правая панель: Solid – Vox, нажать Apply, Close

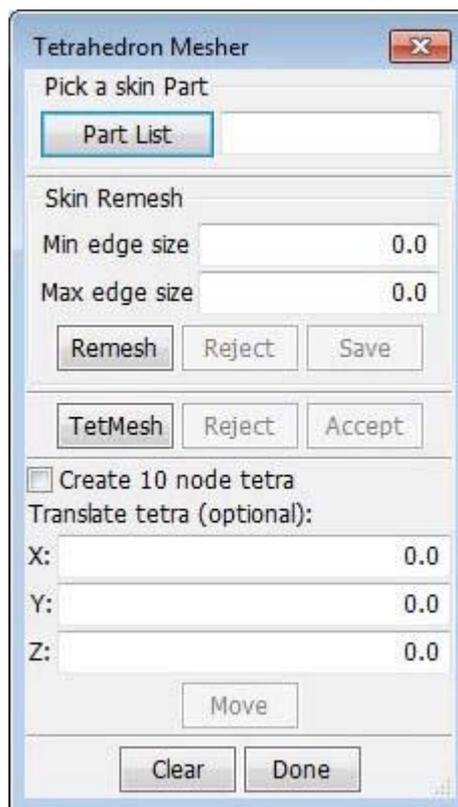
**Mesh → AutoM**



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 / Done

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

Скройте исходную сетку в дереве панелей.

Выполнить следующие задания

	Создать линию	Curve - Line
	Координаты узлов	EleTol - Measur
	Длина	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: - ограничения; - определение сварных узлов; - сохранение истории; - нагрузки на сегмент; - создание набор узлов, частей, сегментов	Model - CreEnt

<https://dynacrash.ru/Workshop/Ex2.zip>

## Семинар 3. Осадка заготовки в 3D постановке

№		
1	Построение заготовки в виде объемного куба	<p><b>Mesh</b> → <b>ShapeM</b> → <b>Box_Solid</b></p> <p>Вводятся координаты начального угла PMin  <math>X = 20; Y = 20; Z = 2.</math></p> <p>Вводятся координаты конечного угла PMax  <math>X = 80; Y = 80; Z = 62.</math></p> <p>Вводится величина разбиения сторон короба  <math>V_x = 5, V_y = 5, V_z = 5</math></p> <p>Нажать Create / Асепт</p>
2	Построение нижней плоскости (матрицы) по 4-м точкам	<p><b>Mesh</b> → <b>ShapeM</b> → <b>4N_Shell</b></p> <p>Вводятся координаты четырех точек  <math>P1 = 0,0,0 \quad P2 = 100,0,0 \quad P3 = 100,100,0 \quad P4 = 0,100,0</math></p> <p>Указывается число элементов по сторонам  <math>N_x=N_y=10</math></p> <p>Нажать Create / Асепт</p>
3	Построение верхней плоскости (пуансона) по 4-м точкам	<p><b>Mesh</b> → <b>ShapeM</b> → <b>4N_Shell</b></p> <p>Вводятся координаты четырех точек  <math>P1 = 0,0,65 \quad P2 = 100,0,65 \quad P3 = 100,100,65</math>  <math>P4 = 0,100,65</math></p> <p>Указывается число элементов по сторонам  <math>N_x=N_y=10</math></p> <p>Нажать Create / Асепт</p>
4	Определение модели материала заготовки	<p><b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Mat_plastic_kinematic (003)</b></p> <p><math>R0=7.85e-9, E=2e5, PR=0.3, SIGY=250, ETAN=940</math></p> <p>Нажать Асепт / Done</p>
5	Определение модели материала нижней плоскости	<p><b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Mat_rigid (20)</b></p> <p>Нажать New</p> <p><math>R0=7.85e-9, E=2e5, PR=0.3, CM0=1, CON1=7, CON2=7</math></p> <p>Нажать Асепт</p>

6	Определение модели материала верхней плоскости	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Mat_rigid (20)</b> Нажать New R0=7.85e-9, E=2e5, PR=0.3, CM0=1, CON1=4, CON2=7 Нажать Accept / Done
7	Определение типа элемента заготовки	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Section_solid</b> ELFORM=1 Нажать Accept / Done
8	Определение типа элемента плоскостей	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Section_shell</b> T1=T2=T3=T4=1 Нажать Accept / Done
9	Определение части 1 (заготовка)	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Part</b> Выбрать справа номер 1 Написать название <b>blank</b> Присвоить SECID = 1 MID = 1 Нажать Accept
10	Определение части 2 (нижняя плоскость) - матрицы	Выбрать справа номер 2 Написать название <b>niz</b> Присвоить SECID = 2 MID = 2 Нажать Accept
11	Определение части 3 (верхняя плоскость) - пуансон	Выбрать справа номер 3 Написать название <b>verh</b> Присвоить SECID = 2 MID = 3 Нажать Accept / Done
12	Определение графика нагрузки	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Define_curve</b> (A, O) = (0, 0); (0.05, 2000); (1, 2000) Использовать "Insert"
13	Определение карты нагружения (движение верхней пластины)	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Boundary_Prescribed_motion_rigid</b> PID = 2, DOF = 3, VAD = 0, LCID = 1, SF = -1 Accept / Done
14	Определение	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Contact_automat-</b>

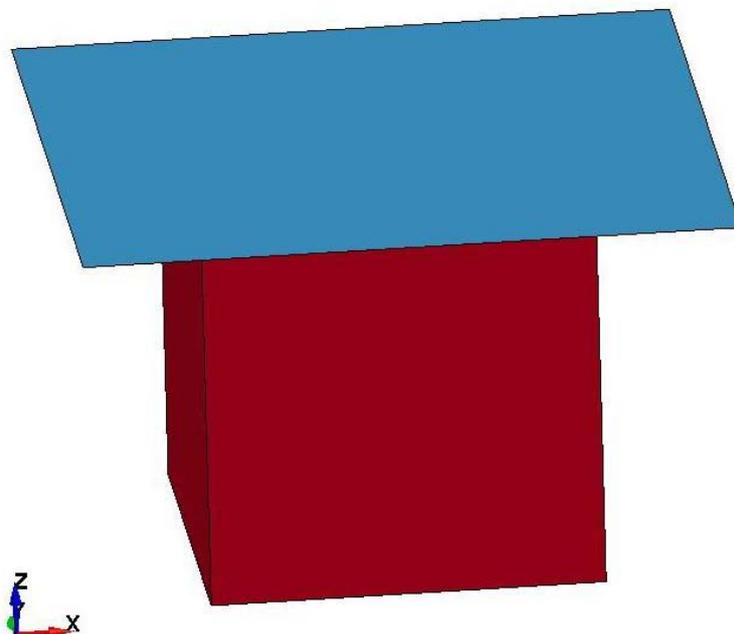
	контакта заготовка – нижняя плоскость	<b>ic_surface_to_surface</b> SSTYP = MSTYP = 3, SSID = 1, MSID = 2, FS=0.1 Accept
15	Определение контакта заготовка – верхняя плоскость	<b>Model → Keywrd → *Contact_ automatic_surface_to_surface</b> Нажать New SSTYP = MSTYP = 3, SSID = 1, MSID = 3, FS=0.1 Accept / Done
16	Определение время завершения	<b>Model → Keywrd → *Control_ termination</b> ENDTIM=0.03 Accept / Done
17	Определение частоты записи выходных файлов	<b>Model → Keywrd → *Database_ binary_d3plot</b> NPLTC = 5 Accept / Done
18	Сохранение на расчет	<b>File → Save</b>
19	Запуск на расчет	Запуск через k-runner
20	Загрузка файлов	<b>File → Open → LSDYNA binary plot</b> Загрузка файлов d3plot
21	Анимация процесса	<b>Нижнее меню → Anim</b>
22	Просмотр по пластическим деформациям	<b>Post → FriComp → Stress → Effective plastic srtain</b>
23	Просмотр по напряжениям	<b>Post → FriComp → Stress → Von Mises stress</b>

Файлы:

расчетная модель - kub.k

<https://dynacrash.ru/Workshop/Ex3.zip>

## Семинар 4. Простая модель ударного взаимодействия в 3D постановке жестким ударником



Применяется следующая согласованная система единиц измерения: тонны, мм, сек (п.3, таблица 2.1)

№		
1	Построение заготовки в виде объемного куба	<b>Mesh → ShapeM → Box_Solid</b> Вводятся координаты начального угла PMin $X = 20; Y = 20; Z = 2.$ Вводятся координаты конечного угла PMax $X = 80; Y = 80; Z = 62.$ Вводится величина разбиения сторон короба $V_x = 5, V_y = 5, V_z = 5$ Нажать Create / Асепт
2	Построение ударника в виде пластины по 4-м точкам	<b>Mesh → ShapeM → 4N_Shell</b> Вводятся координаты четырех точек $P1 = 0,0,65 \quad P2 = 100,0,65 \quad P3 = 100,100,65$ $P4 = 0,100,65$ Указывается число элементов по сторонам

		Nx=Ny=10 Нажать Create / Accept
3	Определение модели материала заготовки	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Mat_plastic_kinematic (003)</b> R0=7.85e-9, E=2e5, PR=0.3, SIGY=250, ETAN=940 Нажать Accept / Done
4	Определение модели материала ударника	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Mat_rigid (20)</b> Нажать New R0=7.85e-9, E=2e5, PR=0.3, CM0=1, CON1=4, CON2=7 Нажать Accept / Done
5	Определение типа элемента заготовки	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Section_solid</b> ELFORM=1 Нажать Accept / Done
6	Определение типа элемента плоскостей	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Section_shell</b> T1=T2=T3=T4=5 Нажать Accept / Done
7	Определение части 1 (заготовка)	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Part</b> Выбрать справа номер 1 Написать название <b>blank</b> Присвоить SECID = 1 MID = 1 Нажать Accept
8	Определение части 2 (ударник)	Выбрать справа номер 2 Написать название <b>striker</b> Присвоить SECID = 2 MID = 2 Нажать Accept
9	Определение контакта заготовка – ударник	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Contact_automatic_single_surface</b> SSTYP = 5 Accept / Done
10	Определение время завершения	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Control_termination</b> ENDTIM=0.0001 Accept / Done

11	Определение частоты записи выходных файлов	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Database_binary_d3plot</b> NPLTC = 10 Accept / Done
12	Определение начальной скорости	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Initial_velocity_generation</b> STYP = 2, PID = 2, VZ = -2.5e5
13	Закрепляем низ заготовки	<b>Model</b> → <b>CreEnt</b> → <b>Boundary</b> → <b>Spc</b> → <b>Cre</b> Указываем узлы по низу заготовки (выбираем Area в окне Sel. Nodes). Apply / Done
14	Сохранение на расчет	<b>File</b> → <b>Save</b> → <b>Save keywords</b> Вводим название striker.k
15	Запуск на расчет	Запуск через k-runner
16	Загрузка файлов	<b>File</b> → <b>Open</b> → <b>LSDYNA binary plot</b> Загрузка файлов d3plot
17	Анимация процесса	<b>Нижнее меню</b> → <b>Anim</b>
18	Просмотр по пластическим деформациям	<b>Post</b> → <b>FriComp</b> → <b>Stress</b> → <b>Effective plastic srtain</b>
19	Просмотр по напряжениям	<b>Post</b> → <b>FriComp</b> → <b>Stress</b> → <b>Von Mises stress</b>
20	Просмотр графика кинетической энергии	<b>Post</b> → <b>Histiry</b> → <b>Clobal</b> → <b>Kinetic Energy</b>
21	Просмотр скорости движения ударника	<b>Post</b> → <b>Histiry</b> → <b>Nodal</b> → <b>Z-velocity</b>

Файлы:

расчетная модель - striker.k

<https://dynacrash.ru/Workshop/Ex4.zip>

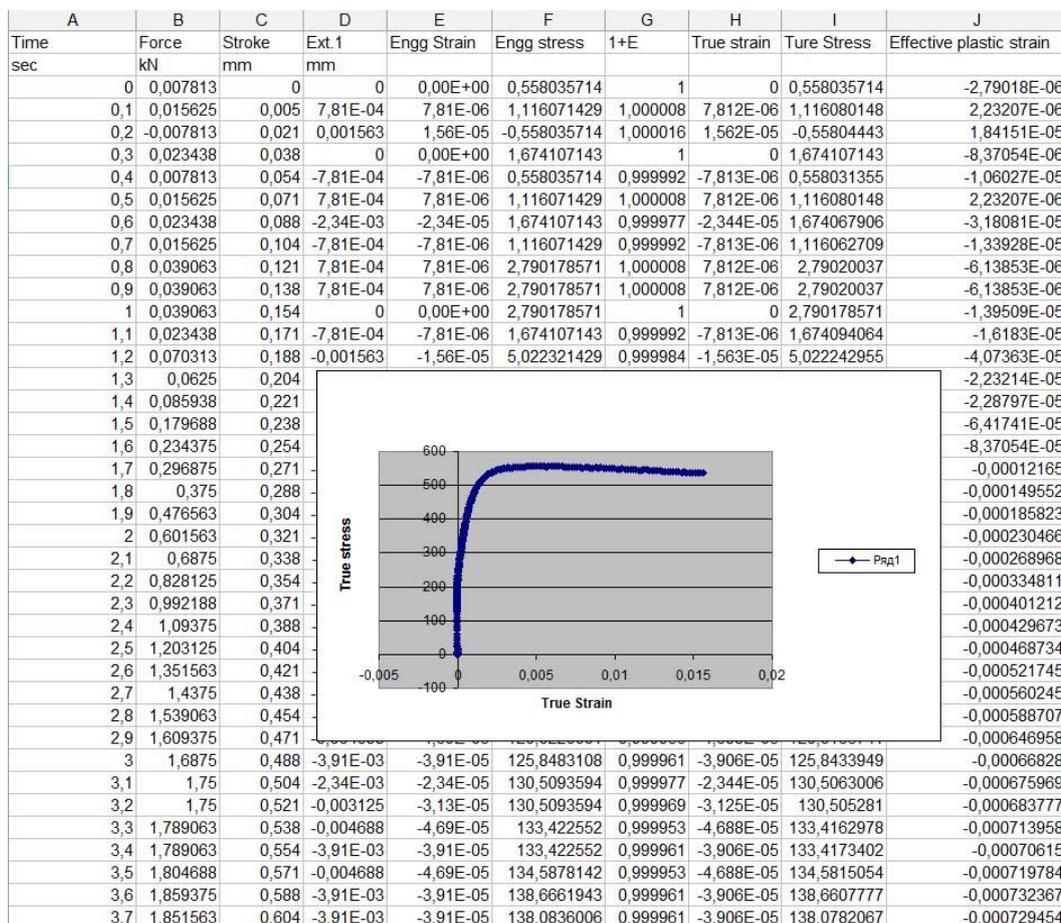
# Семинар 5. Идентификация параметров моделей материала

## 4.1. 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



## 4.2. 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 представлено до значения временного сопротивления (до момента образования шейки)

2. В Excel строим график зависимости истинных напряжений от деформаций:

- выбираем значения в 2 столбцах;
- строим график – Точечная диаграмма со значениями, соединенными сглаживающими линиями.

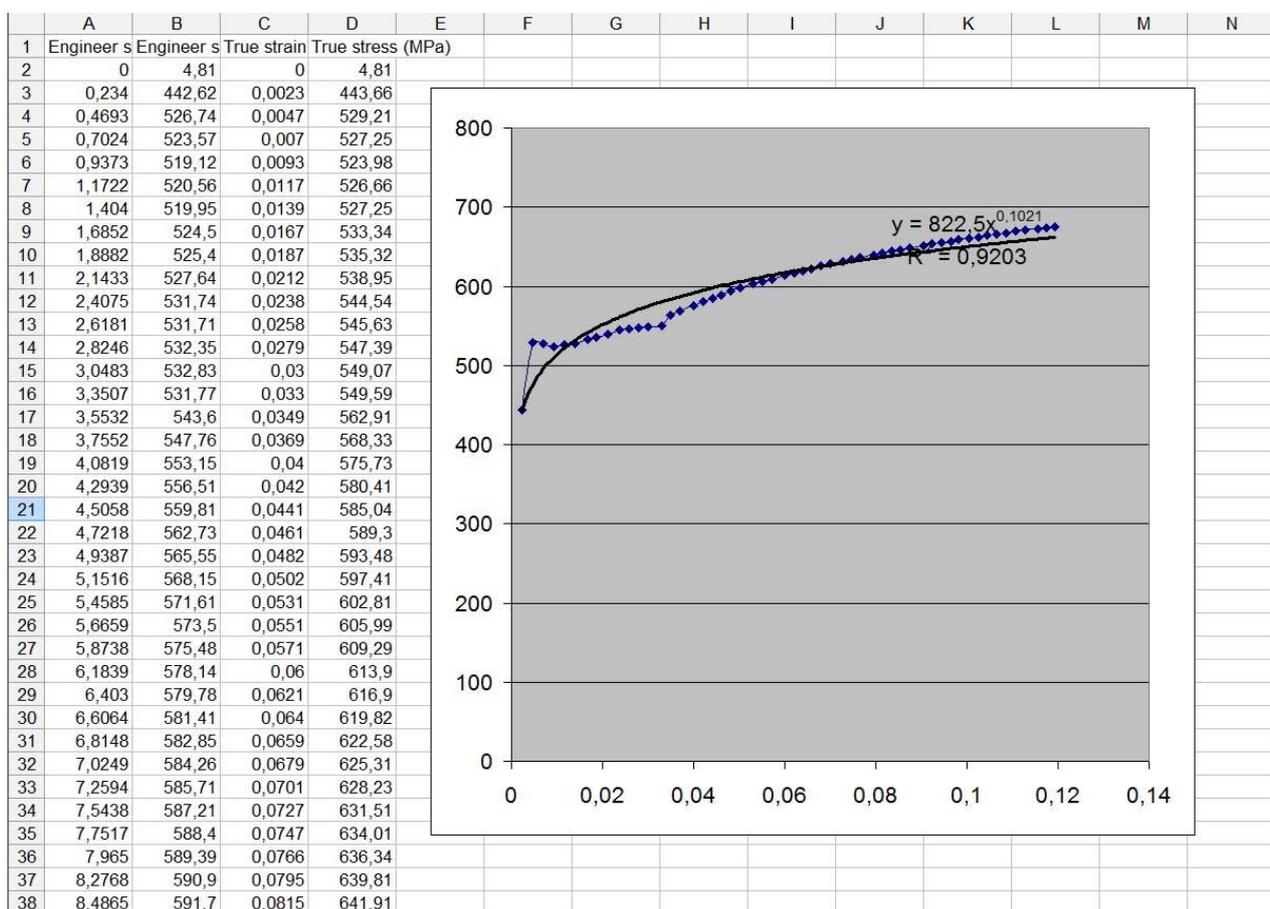
3. В Excel строим степенную линию тренда

4. Для линии тренда показываем уравнение на диаграмме (уравнение

$$\text{вида } \sigma = ke^n)$$

5. Записываем параметры k и n

6. Используем выбранные значения k и n в модели материала MAT18



### 4.3. 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:

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

<https://dynacrash.ru/Workshop/Ex5.zip>

## Семинар 6. Вытяжка детали из листовой заготовки с адаптивным перестроением

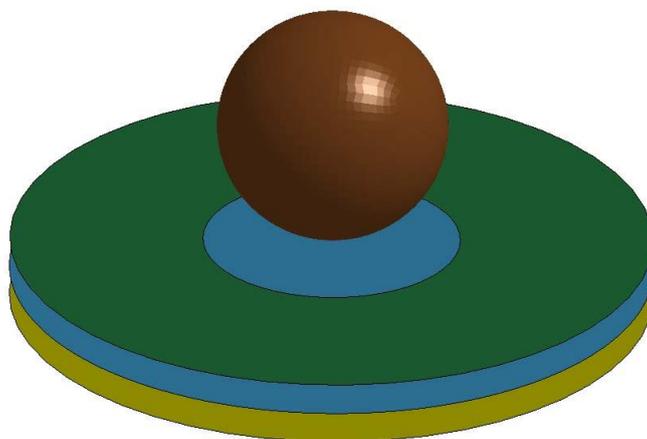
Рассмотрим создания адаптивного перестроения shell пластины:

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

Пример расчета процесса листовой штамповки - выдавливание шариком сферической лунки.

Учебный видеоурок [https://youtu.be/h8hGmHelF\\_I](https://youtu.be/h8hGmHelF_I)

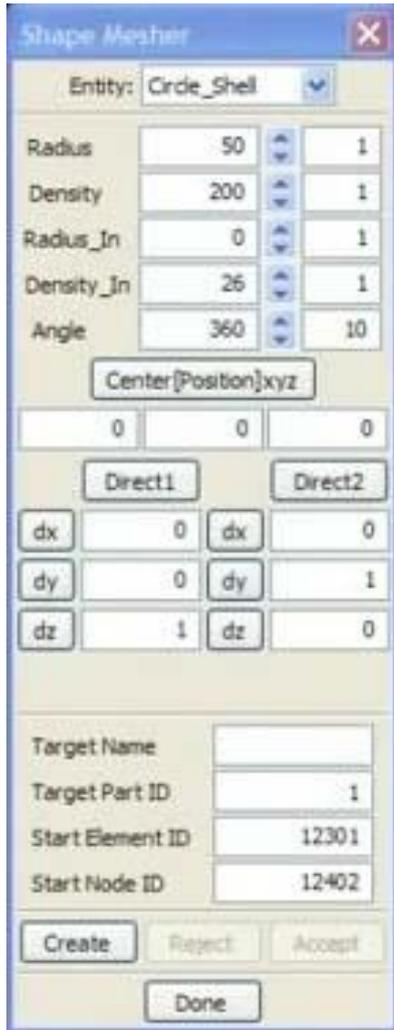
Пример расчета процесса листовой штамповки (выдавливание шариком сферической лунки)



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

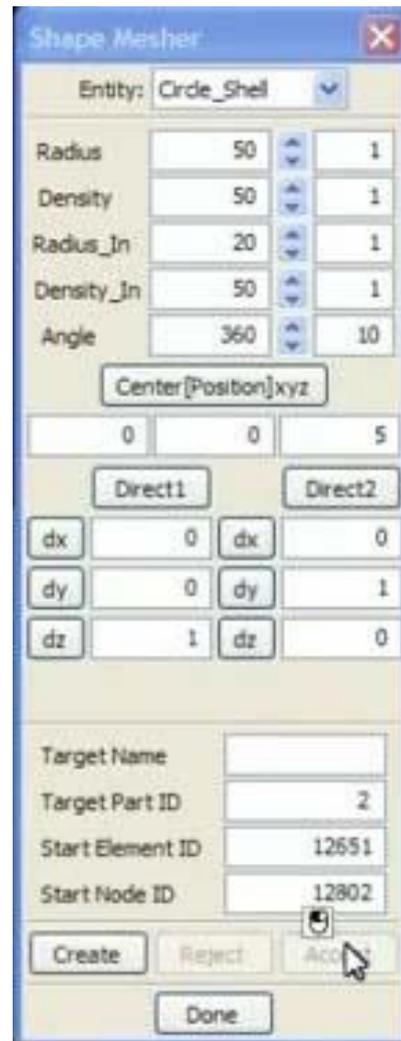
Построение модели заготовки



Заготовка диаметром 100 мм

## Шаг 2

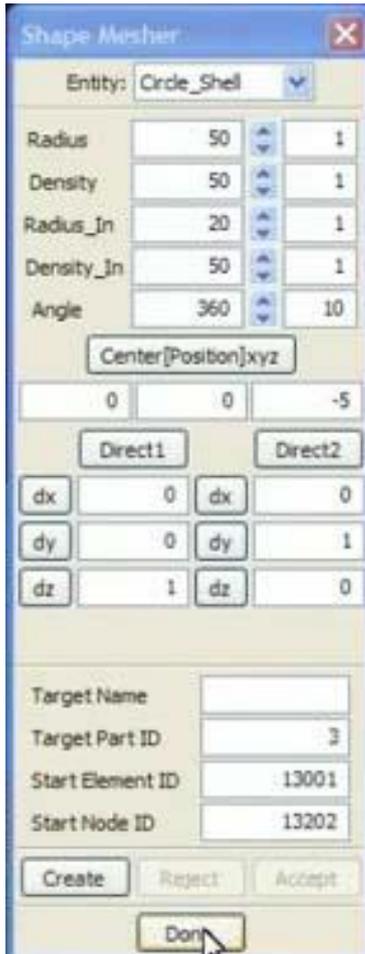
Построение верхней прижимной пластины



Смещение по оси Z на 5 мм

### Шаг 3

#### Построение матрицы



Смещение по оси Z на -5 мм

### Шаг 4

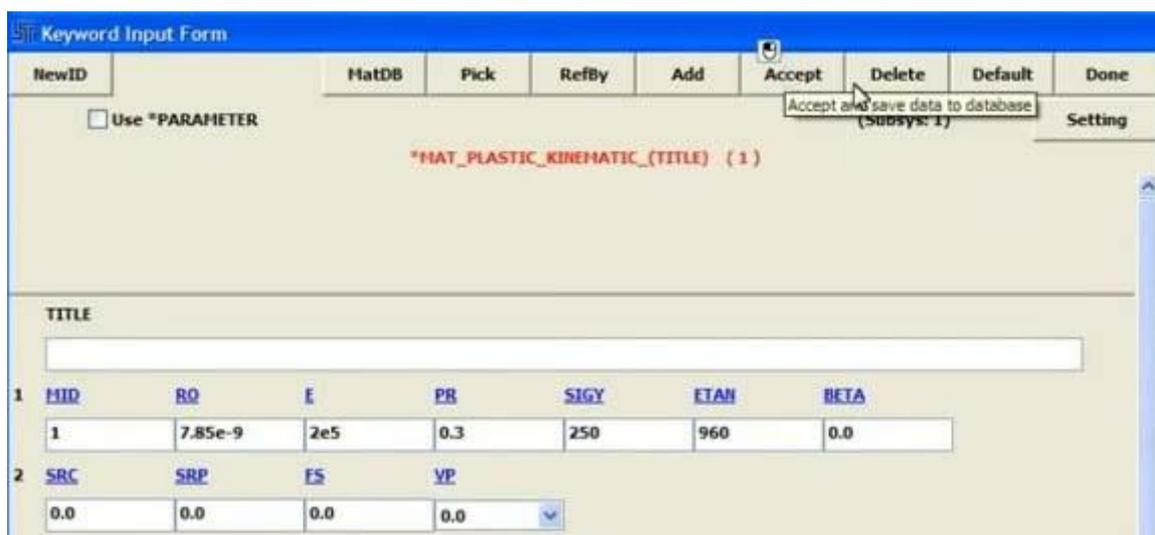
#### Построение пуансона



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 'Accept' button is highlighted with a tooltip that reads 'Accept and save data to database (Subsys: 1)'. The form contains a 'TITLE' field and three rows of input fields for material properties.

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 'Accept' button is highlighted with a tooltip that reads 'Accept and save data to database (Subsys: 1)'. The form contains a 'TITLE' field and three rows of input fields for material properties.

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)

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)

1 circleshell  
2 circleshell  
3 circleshell  
4 sphereshell

Пуансон – Part 4 – Элемент Shell 2 – Material 4

## Шаг 15

### Определение контакта 1

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*PARAMETER

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_(ID/TITLE/HPP)\_(THERMAL) ( 1 )

Setting

Accept changes: 1

CID	TITLE
1	

MPP1  MPP2

IGNORE	BUCKET	UCBUCKET	NS2TRACK	INITIATOR	PARMAX	UNUSED	CPARMB
0	200		3	2	1.0005		0

UNUSED	CHESEGS	PENSE	GRPAILE
	0	1.0	0

1	SSIID	HSIID	SSIYP	HSIYP	SBOXID	HBOXID	SPR	MPR
1	1	2	3	3			0	0

2	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BI	DI
2	0.2	0.0	0.0	0.0	20	0	0.0	1.0E+20

Заготовка - прижим

## Шаг 16

### Определение контакта 2

Keyword Input Form

NewID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*PARAMETER

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_(ID/TITLE/HPP)\_(THERMAL) ( 2 )

Setting

Open pick interface to allow data to be picked directly from the model

CID	TITLE
2	

MPP1  MPP2

IGNORE	BUCKET	UCBUCKET	NS2TRACK	INITIATOR	PARMAX	UNUSED	CPARMB
0	200		3	2	1.0005		0

UNUSED	CHESEGS	PENSE	GRPAILE
	0	1.0	0

1	SSIID	HSIID	SSIYP	HSIYP	SBOXID	HBOXID	SPR	MPR
1	1	3	3	3			0	0

2	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BI	DI
2	0.2	0.0	0.0	0.0	20	0	0.0	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'. The main area contains the following fields and options:

- Buttons: NewID, Draw, Pick, Add, Accept, Delete, Default, Done.
- Options:  Use \*PARAMETER (Subsys: 1), Setting.
- Keyword: \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE (ID/TITLE/MPP)\_ (THERMAL) ( 3 )
- Fields: CID (3), TITLE (empty).
- Options:  MPP1,  MPP2.
- Fields: IGNORE (0), BUCKET (200), LBUCKET (empty), NS2TRACK (3), INITITER (2), PARMAX (1.0005), UNUSED (0), CPARMB (empty).
- Fields: UNISID (empty), CHKSEGS (0), PENSE (1.0), GRPAILE (0).
- Fields: 1 SSID (1), MSID (4), SSTYP (3), MSTYP (3), SBOXID (empty), MBOXID (empty), SPR (0), MPB (0).
- Fields: 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 - пуансон

## Шаг 18

### Определение графика

The screenshot shows the 'Keyword Input Form' for defining a graph. The title bar reads 'Keyword Input Form'. The main area contains the following fields and options:

- Buttons: RefBy, Add, Accept, Delete, Default, Done.
- Options:  Use \*PARAMETER (Subsys: 1), Setting.
- Keyword: \*DEFINE\_CURVE\_(TITLE) ( 1 )
- Fields: TITLE (empty).
- Fields: 1 LCID (1), SIDR (0), SFA (1.0), SFO (1.0), OFFA (0.0), OFFO (0.0), DATTYP (0).
- Section: Repeated Data by Button and List
- Fields: 2 A1 (0.020000), O1 (-2000.0000).
- Table: Data Pt. 3, Load XYData

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

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

2	A1	O1
0.020000		-7.8

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

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						
1							
PID	DOF	VAD	LCID	SF	VID	DEATH	BIRTH
2	3	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

ID	TITLE			
1				
ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS
0.02	0	0.0	0.0	0.0

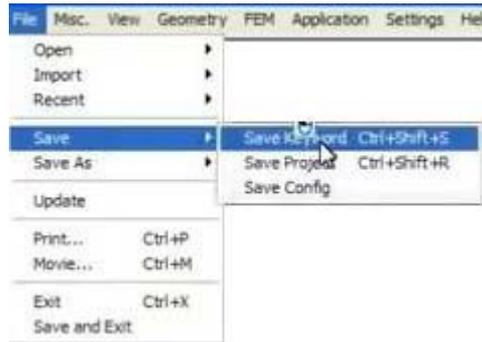
## Шаг 23

### Определение частоты записи выходных данных

ID	TITLE			
1				
DI	LCOI	BEAM	NPLTC	PSETID
0.001		0		

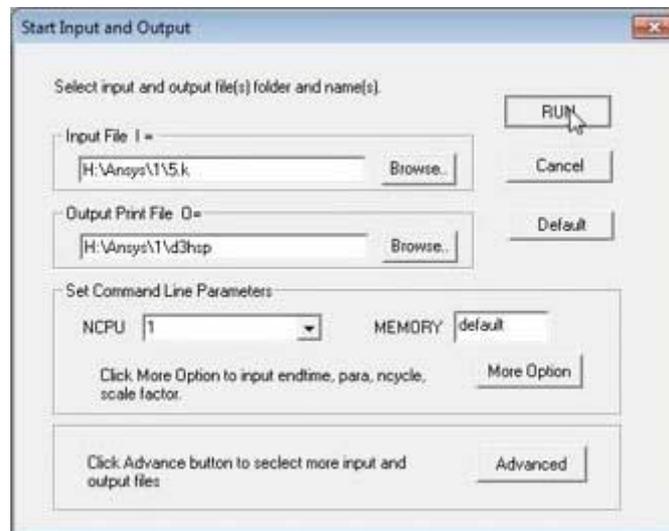
## Шаг 24

### Сохранение результатов



## Шаг 25

### Запуск на расчет



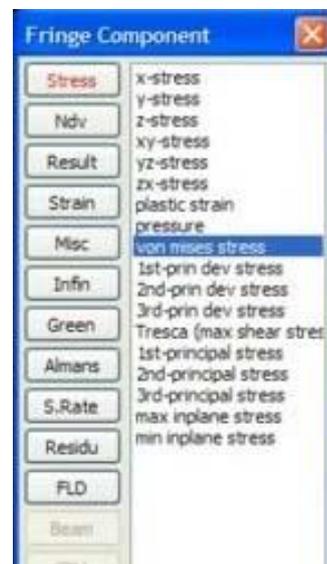
## Шаг 26

### Просмотр результатов по пластическим деформациям



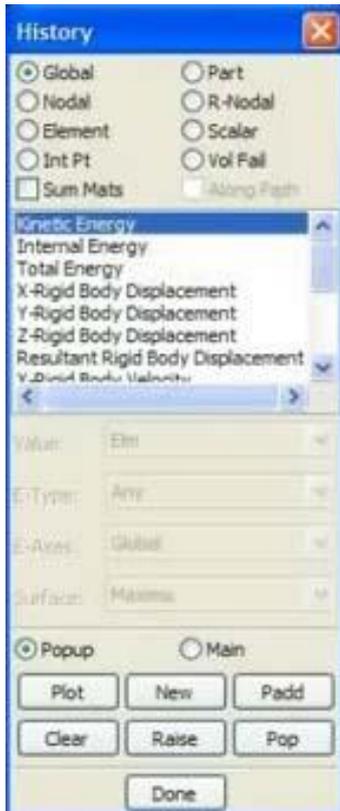
## Шаг 27

### Просмотр результатов по напряжениям



### Шаг 28

Просмотр результатов кинетической энергии



### Шаг 29

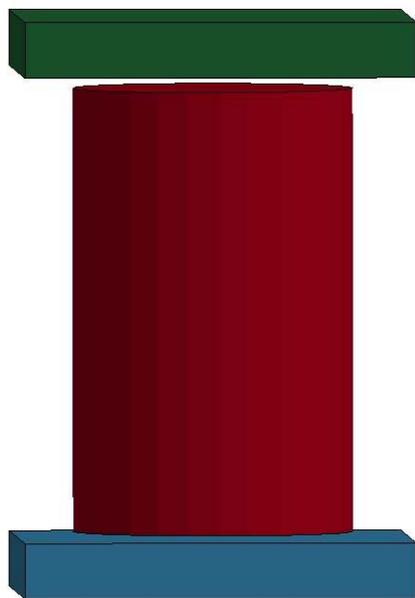
Просмотр деформации для выбранного элемента



<https://dynacrash.ru/Workshop/Ex6.zip>

# Семинар 7. Горячая штамповка (осадка) цилиндрической заготовки

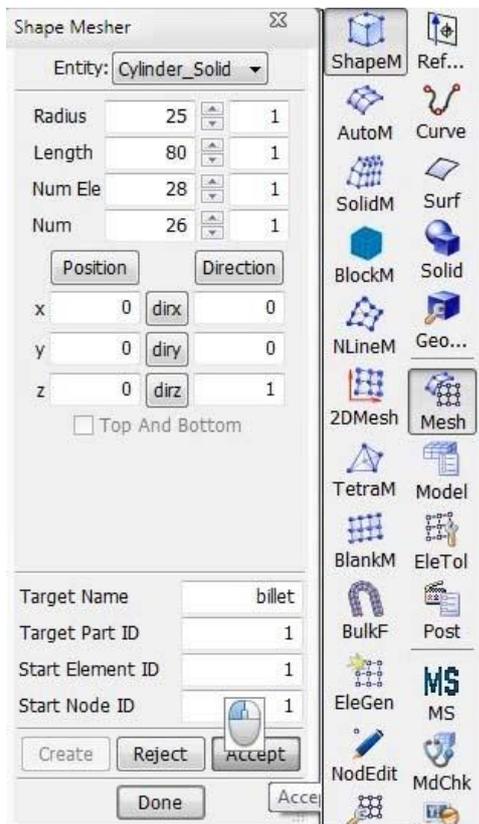
Моделирование процесса горячей штамповки (осадка цилиндрической заготовки). Учебный видеоролик <https://youtu.be/9mQL5QjVSz4>



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  $850 \text{ C}^0$  на заготовке. В параметрах контакта учитывается тепловая передача. Нижняя опора закреплена. Верхняя опора перемещается со скоростью  $2 \text{ м/сек}$ .

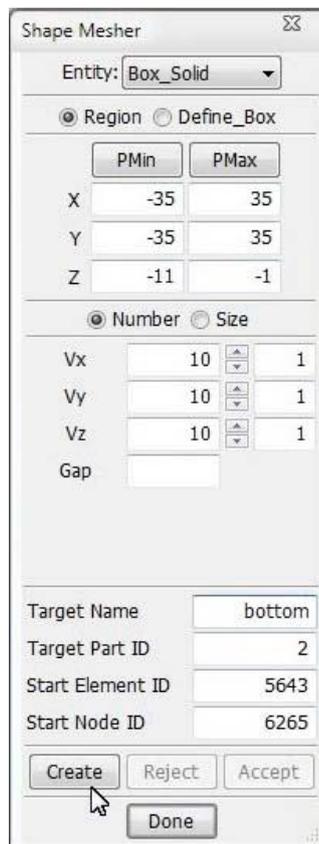
## Шаг 1

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	<input checked="" type="checkbox"/> 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

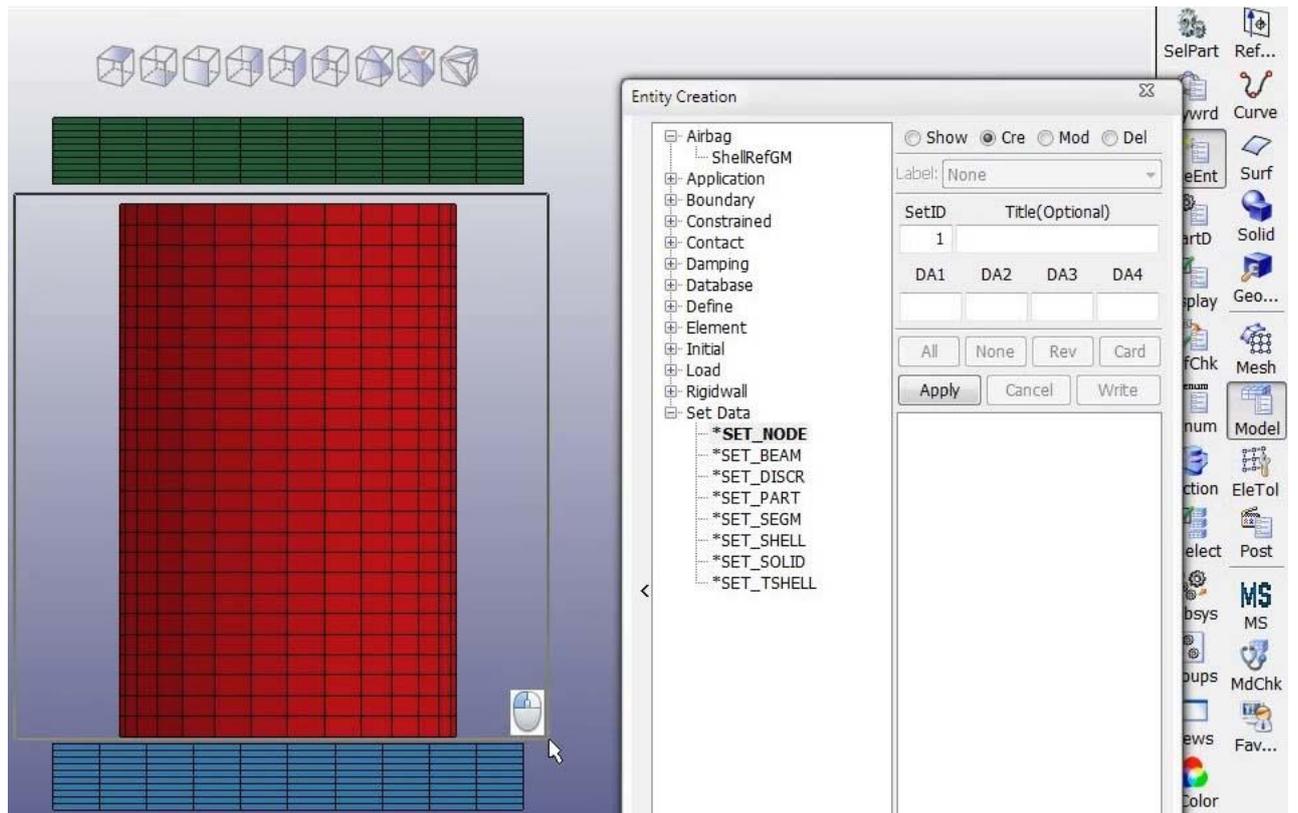
\*PART\_(TITLE) (3)

TITLE  
top

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

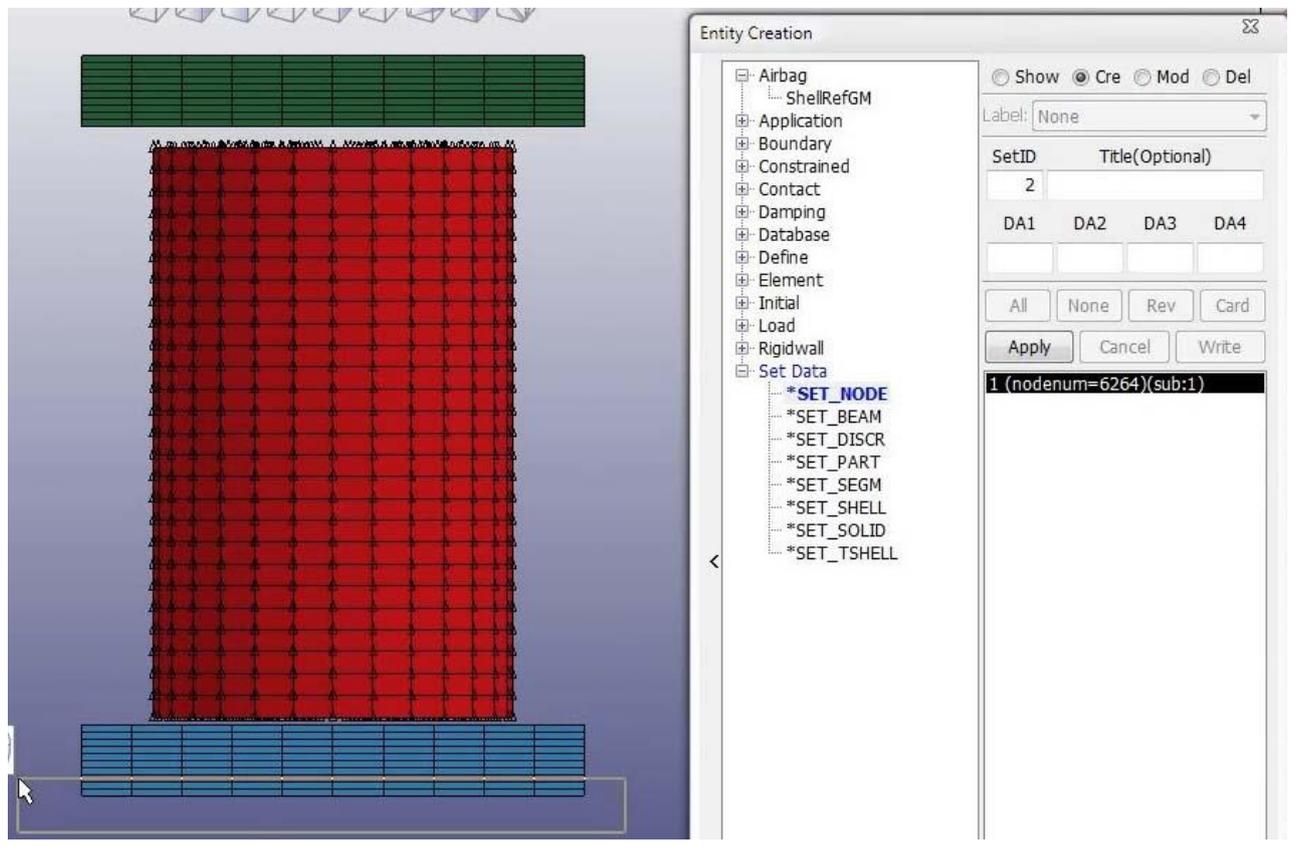
## Шаг 15

Определяем узловой набор 1 (заготовка)



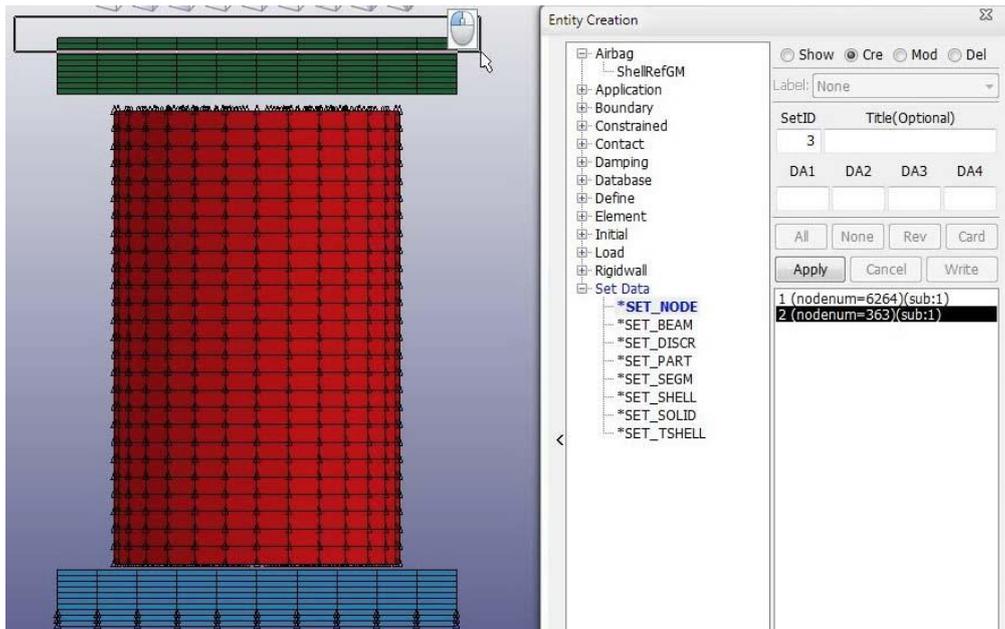
## Шаг 16

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

New ID Draw Pick Add Accept Delete Default Done

Use \*Parameter (Subsys: 1 New\_Subsystem\_1) Setting

\*BOUNDARY\_SPC\_SET\_(ID) (1)

ID	TITLE						
1							
NSID	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ
2	0	1	1	1	1	1	1

## Шаг 21

### Ограничение узлового набора 3

\*BOUNDARY\_SPC\_SET\_(ID) (2)

ID	TITLE						
3							
NSID	CID	DOFX	DOFY	DOFZ	DOFRX	DOFRY	DOFRZ
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					
IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX
0	200		3	2	1.0005
UNUSED	CHKSEGS	PENSEF	GRPABLE		
	0	1.0	0		
SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID
1	2	3	3		
FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK
0.2	0.0	0.0	0.0	20	0
SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT
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					
CF	FRAD	HTC	GCRIT	GMAX	CD_FACT
		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 связанного анализа

*CONTROL_SOLUTION			
SOLN	NLQ	ISNAN	LCINT
2		0	100

### Шаг 27

Определение времени завершения

*CONTROL_TERMINATION				
ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS
0.02	0	0.0	0.0	100000000.0

### Шаг 28

Определение параметров теплового решателя

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

### Шаг 29

Определение тепловых параметров для временного шага

*CONTROL_THERMAL_TIMESTEP (0)						
TS	TIP	ITS	TMIN	TMAX	DTEMP	TSCP
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	DT	BINARY	LCUR	IOOPT
	2e-5	0	0	1

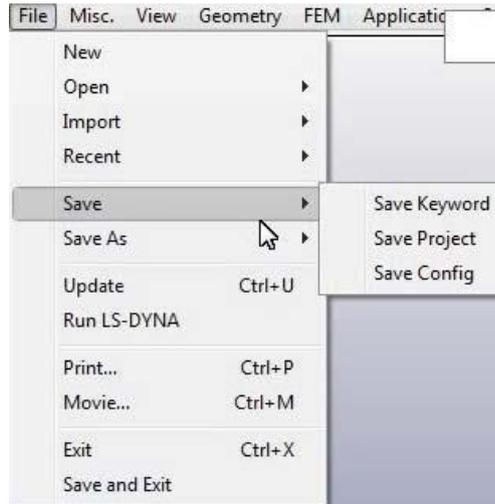
### Шаг 31

Определение частоты записи выходных файлов

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

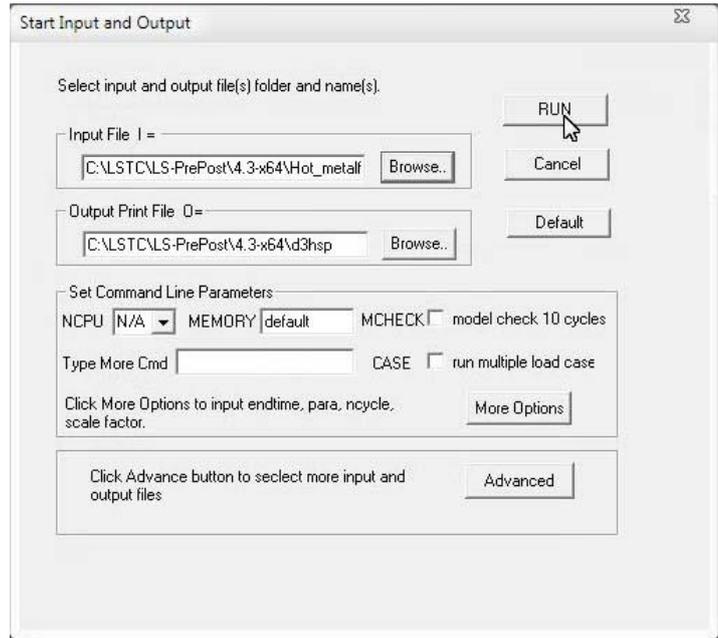
### Шаг 32

#### Сохранение файла



### Шаг 33

#### Запуск на расчет



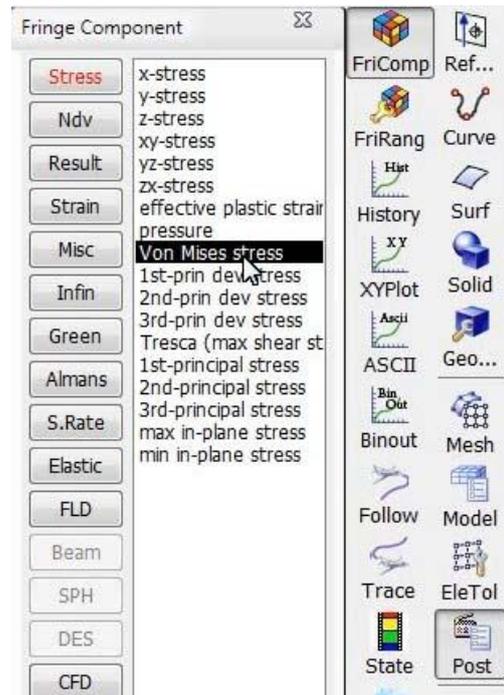
### Шаг 34

#### Вывод по пластическим деформациям



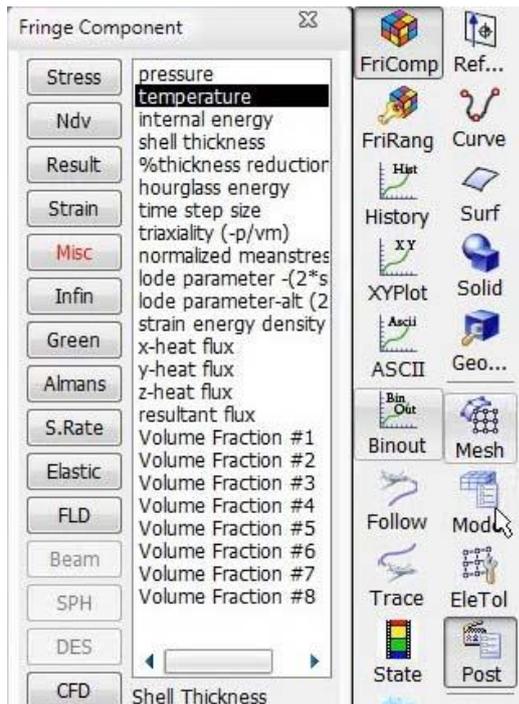
### Шаг 35

#### Вывод по напряжению



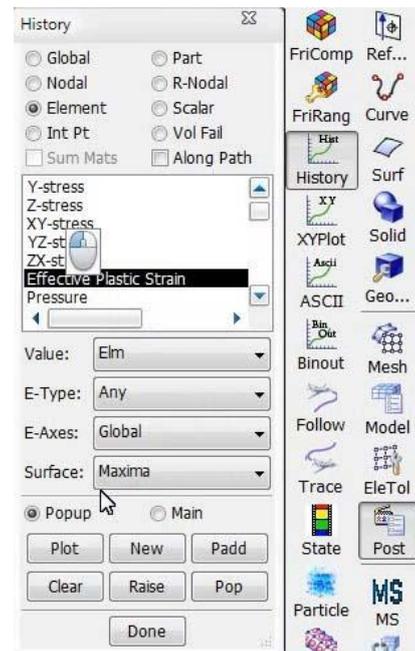
## Шаг 36

### Вывод по температуре



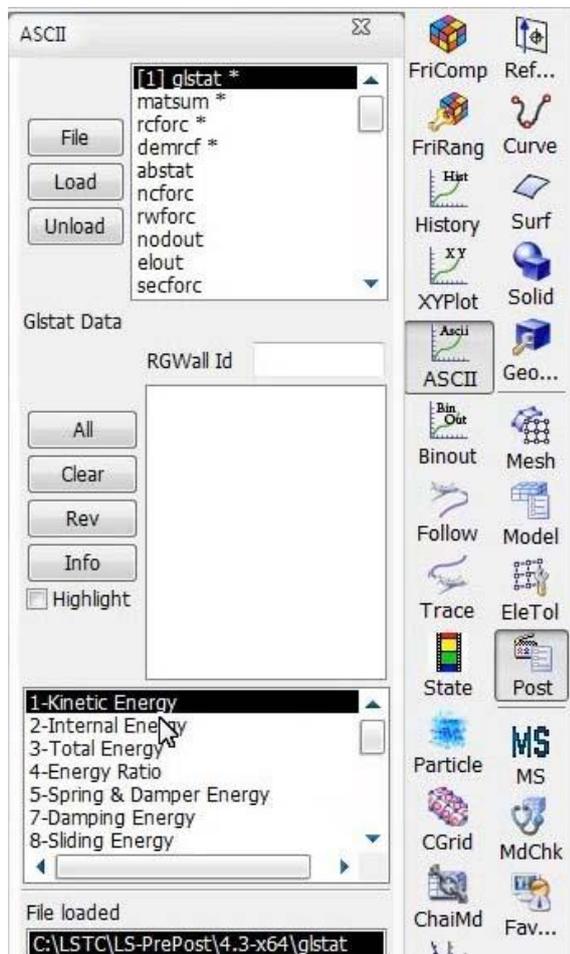
## Шаг 37

### Построение графиков выбранных элементов



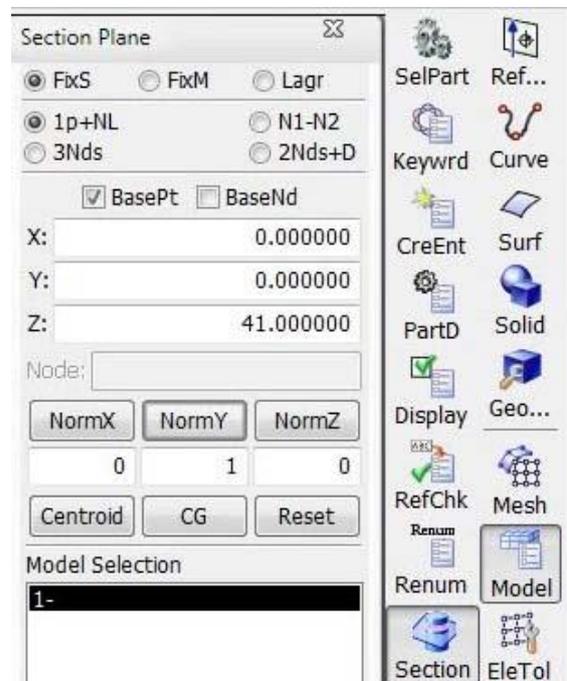
## Шаг 38

### Вывод графиков из ASCII файлов



## Шаг 39

### Просмотр сечений



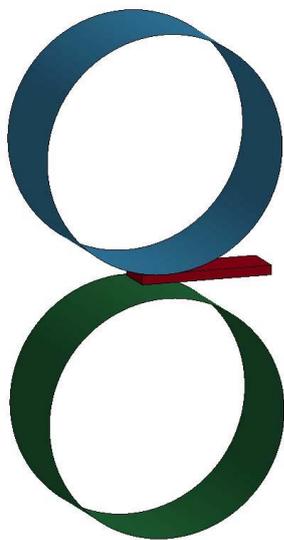
Файлы:

расчетная модель -  
Hot\_metalforming.k

<https://dynacrash.ru/Workshop/Ex7.zip>

# Семинар 8. Прокатка заготовки между цилиндрическими роликами

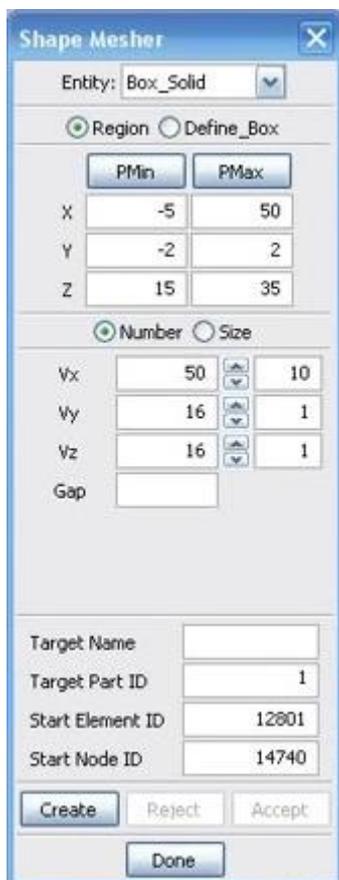
Учебный видеоролик <https://youtu.be/Td2xsoeGBpo>



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

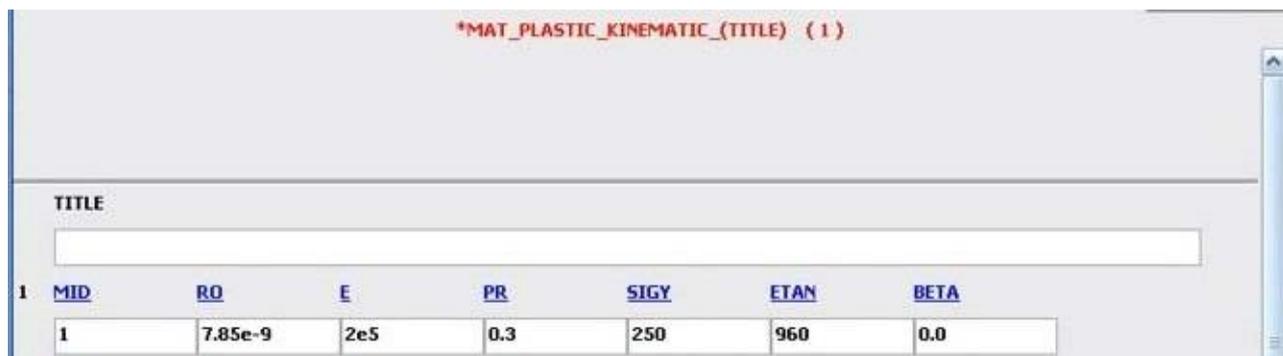
### Шаг 3

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							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	CPARMB
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	YDC	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	CPARMB
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	YDC	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

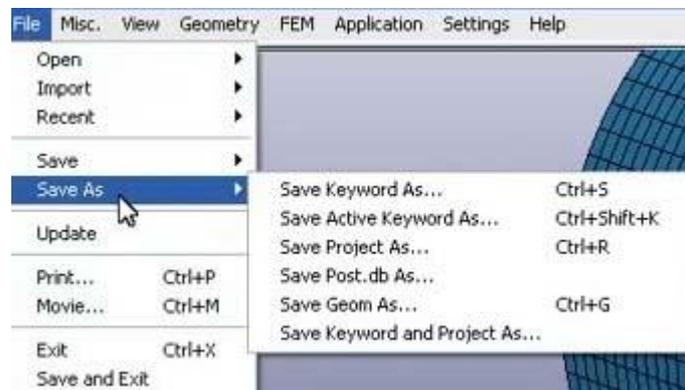
### Определение частоты записи выходных файлов

\*DATABASE\_BINARY\_D3PLOT ( 0 )

1	DT	LCDI	BEAM	NPLTC	PSETID
	0.001		0		

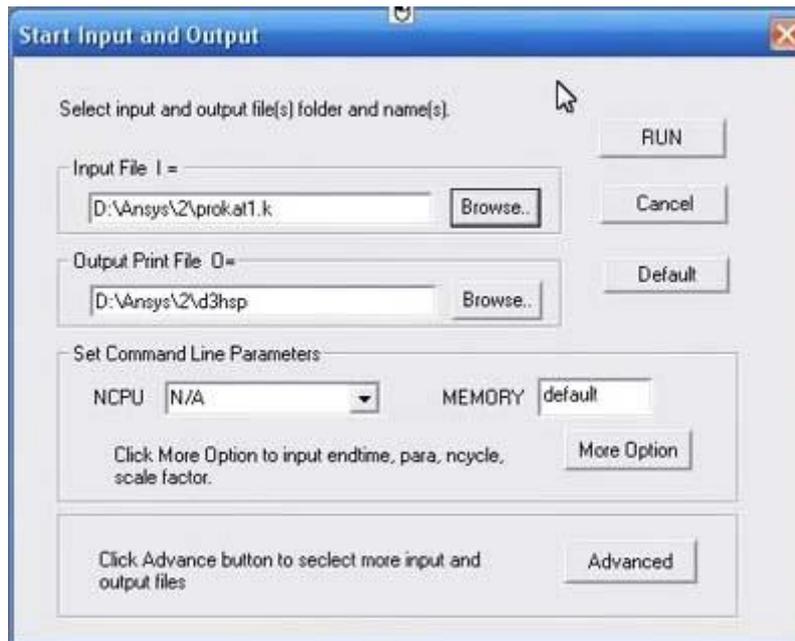
## Шаг 25

### Сохранение файла



## Шаг 26

### Запуск на расчет



## Шаг 27

### Анимация процесса



## Шаг 28

### Просмотр по пластическим деформациям



## Шаг 29

### Просмотр по напряжениям



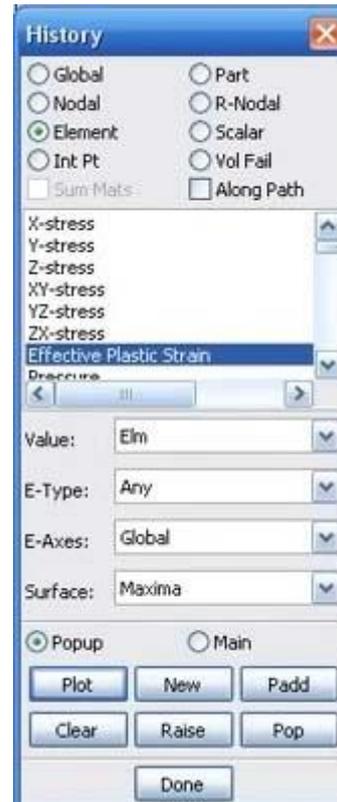
### Шаг 30

Вывод по кинетической энергии



### Шаг 31

Просмотр параметров по одному элементу



Файлы:

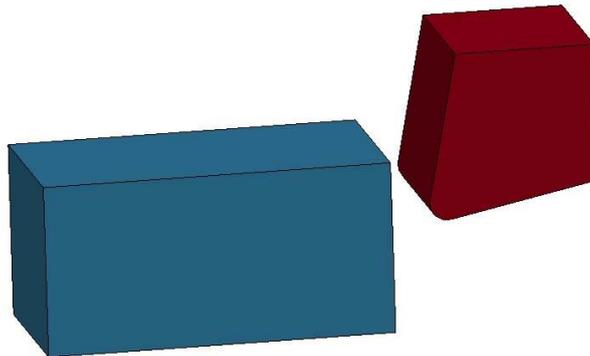
расчетная модель – prokat.k

<https://dynacrash.ru/Workshop/Ex8.zip>

# Семинар 9. Разделительная операция – процесс резки

Учебный видеоурок

[https://youtu.be/AQAuoXRh\\_EA?si=dG4\\_FyRBD4Npy7K](https://youtu.be/AQAuoXRh_EA?si=dG4_FyRBD4Npy7K)



Модель резки представлена инструментом и заготовкой. Заготовка - прямоугольный параллелепипед со сторонами 10x5x5 мм. Инструмент в виде более сложной фигуры с радиусом скругления 0,5 мм. Низ заготовки закреплен. Скорость движения резца 5 м/сек.

Особенности данного процесса моделирования: использование модели материала Johnson-Cook с накоплением поврежденности, коэффициентов разрушения, уравнением состояния и дополнительными тепловыми параметрами; учет нагрева заготовки в процессе резки; использование контакта с учетом тепловых параметров процесса взаимодействия; использование контакта и самоконтакта.

Принятая система измерения: длина – мм, масса – кг, время - мсек

1	Построение геометрии инструмента (резца). Построение геометрии инструмента. Создание контура из линий	<b>Curve → Line</b> 1. Start Point X=0, Y=0, Z=0; End Point 5; 1; 0 2. Start Point 5, 5, 0; End Point 5; 1; 0 3. Start Point 5, 5, 0; End Point 1; 5; 0 4. Start Point 0, 0, 0; End Point 1; 5; 0
2	Создание поверхности на основе линий	<b>Surf → FillPin</b> Указываем поочередно на линии

3	Создание объемной геометрии выдавливанием	<b>Solid</b> → <b>Extru</b> Start Pos=0 End Pos.=5	Указать на геометрию
5	Нанесение произвольной сетки на объемную геометрию	<b>Mesh</b> → <b>SolidM</b> Elem Size=1 Try Meshing Automatically	
6	Сохранение файла	<b>File</b> → <b>Save</b> → <b>Save Keyword</b>	
7	Создание заготовки	<b>Mesh</b> → <b>ShapeM</b> → <b>Box_Solid</b> PMin X=-11, Y=-2.8, Z=0.5. PMax X=-1, Y=2.2, Z=4.5. Vx=10, Vy=8, Vz = 5	
8	Ввод параметров модели материала заготовки	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Mat_johnson_cook (015)*</b> RO=7.81e-6, G=78.5, E=204, PR=0.3, A=0.553, B=0.601, N=0.234, C=0.0134, M=1, TM=1480, EPSO=0.001, CP=642, D1=1.2 <i>*проверьте что выбрана именно модель 015 (первая)</i>	
9	Определение модели материала ролика	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Mat_rigid (020)</b> R0=7.85e-6, E=200, PR=0.3, CM0=1, CON1=5, CON2=7	
10	Определяем тип элемента	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Section_solid</b> ELFORM=2	
11	Определяем уравнения состояния	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Eos_linear_polynomial</b> C1=170, V0=1	
12	Определение теплофизических параметров материалов	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Mat_thermal_isotropic (T01)</b> HC=642, TC=4.7e-5	
13	Определение части 1 (резец)	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Part*</b> PID=1 SECID=1 MID=2 EOSID=0 TMID=1	

		<i>*ввод осуществляется нажатием на черные кружки</i>
14	Определение части 2 (заготовка)	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Part</b> PID=2 SECID=1 MID=1 EOSID=1 TMID=1
15	Определение узлового набора из заготовки (необходимо для контакта)	<b>Model</b> → <b>CreEnt</b> → <b>Set Data</b> → <b>*Set_node.</b> Наверху нажимаем Cre. В появившемся окне Sel. Nodes выбираем ByPart и указываем на заготовку
16	Определение контакта	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Contact_eroding_nodes_to_surface*</b> SSTYP=4, MSTYP=3, SSID=1, MSID=1, FS=0.2, VDC=20, ISYM=1, EROSOP=1, IADJ=1, HTC=4.7E-5, LMIN=2, LMAX=1E4 <i>*сначала осуществляется выбор 3 и 4 параметра</i>
17	Создаем карту для самоконтакта между частями заготовки	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Contact_eroding_single_surface*</b> SSTYP=3, MSTYP=3, SSID=2, MSID=2, FS=0.2, VDC=20, ISYM=1, EROSOP=1, IADJ=1 <i>*сначала осуществляется выбор 3 и 4 параметра</i>
18	Определения кривой нагружения (для движения инструмента)	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Define_curve *</b> (A1, O1): (0, 0); (0.02,-5); (5, -5) <i>*Ввод осуществляется используя кнопку <b>Insert</b></i>
19	Определение карты для работы малого рестарта	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> → <b>*Change_curve_definition</b> LCID=1
20	Определение движения на	<b>Model</b> → <b>Keywrd</b> →

	инструмент	<b>*Boundary_Prescribed_motion_rigid</b> PID=1, DOF=1, VAD=0, LCID=1
21	Закрепление заготовки (полное ограничение низа заготовки)	<b>Model → CreEnt → Boundary → Spc</b> Наверху нажимаем Cre. В появившемся окне Sel. Nodes выбираем Area и указываем на нижние узлы заготовки (2 ряда)
22	Определение начальной температуры	<b>Model → Keywrd → *Initial_temperature_set</b> Temp=20
23	Учет в балансе энергии различных составляющих	<b>Model → Keywrd → *Control_energy</b> HGEN=2, RWEN=2, SLNTEN=2, RYLEN=2
24	Определение связанного анализа структура – тепло	<b>Model → Keywrd → *Control_solution</b> SOLN=2
25	Определение времени завершения	<b>Model → Keywrd → *Control_termination</b> ENDTIM = 1.5
26	Определение контрольных карт по тепловой составляющей	<b>Model → Keywrd → *Control_thermal_nonlinear</b> REFMAX=100
27	Определение карты по тепловой составляющей 2	<b>Model → Keywrd → *Control_thermal_solver</b> ATYPE=1, PTYPE=2, GPT=1
28	Определение карты по тепловой составляющей 3	<b>Model → Keywrd → *Control_thermal_timestep</b> ITS=1E-3, TMIN=1E-7, TMAX=1E-2, DTEMP=100
29	Определение базы данных ASCII по энергии и усилиям	<b>Model → Keywrd → *Database_ASCII_option</b> DT=0.003 G1stat, Matsum, Rcforc
30	Определение частоты записи	<b>Model → Keywrd → *Database_binary_d3plot</b> NPLTC=40

31	Определение частоты для рестарта	<b>Model → Keywrd → *Database_ binary_d3dump</b> CYCL=1E6
32	Определение контрольной карты контакта	<b>Model → Keywrd → *Control_ contact</b> SLSFAC=0.5
33	Сохранение файла	<b>File → Save → Save Keyword</b>
34	Запуск на расчет	Запуск через LS-DYNA Manager
35	Открываем plot файлы	<b>File → Open → LSDYNA binary plot</b> Загрузка файлов d3plot
36	Делаем анимация процесса	<b>Нижнее меню → Anim</b>
37	Вывод контуров по параметру Von Mises stress	<b>Post → FriComp → Stress → Von Mises stress</b>
38	Вывод контуров по параметру Effective plastic strain	<b>Post → FriComp → Stress → Effective plastic strain</b>
39	Вывод контуров по температуре	<b>Post → FriComp → Misc → temperature</b>
40	Построение графиков по сохраненным файлам glstat, matsum, rsforc	<b>Post → ASCII → glstat → Internal Energy</b>
41	Вывод графика усилия	<b>Post → ASCII → rforc → Ma-1 → 4-Resultant Force</b>
42	Построение графиков из вкладки история	<b>Post → Histiry → Global → Kinetic Energy</b>

Темы для учебных заданий процессов обработки металлов для моделирования  
в LS-DYNA

(Источник Филимонов В.И. ТОМД. Курсовая работа)

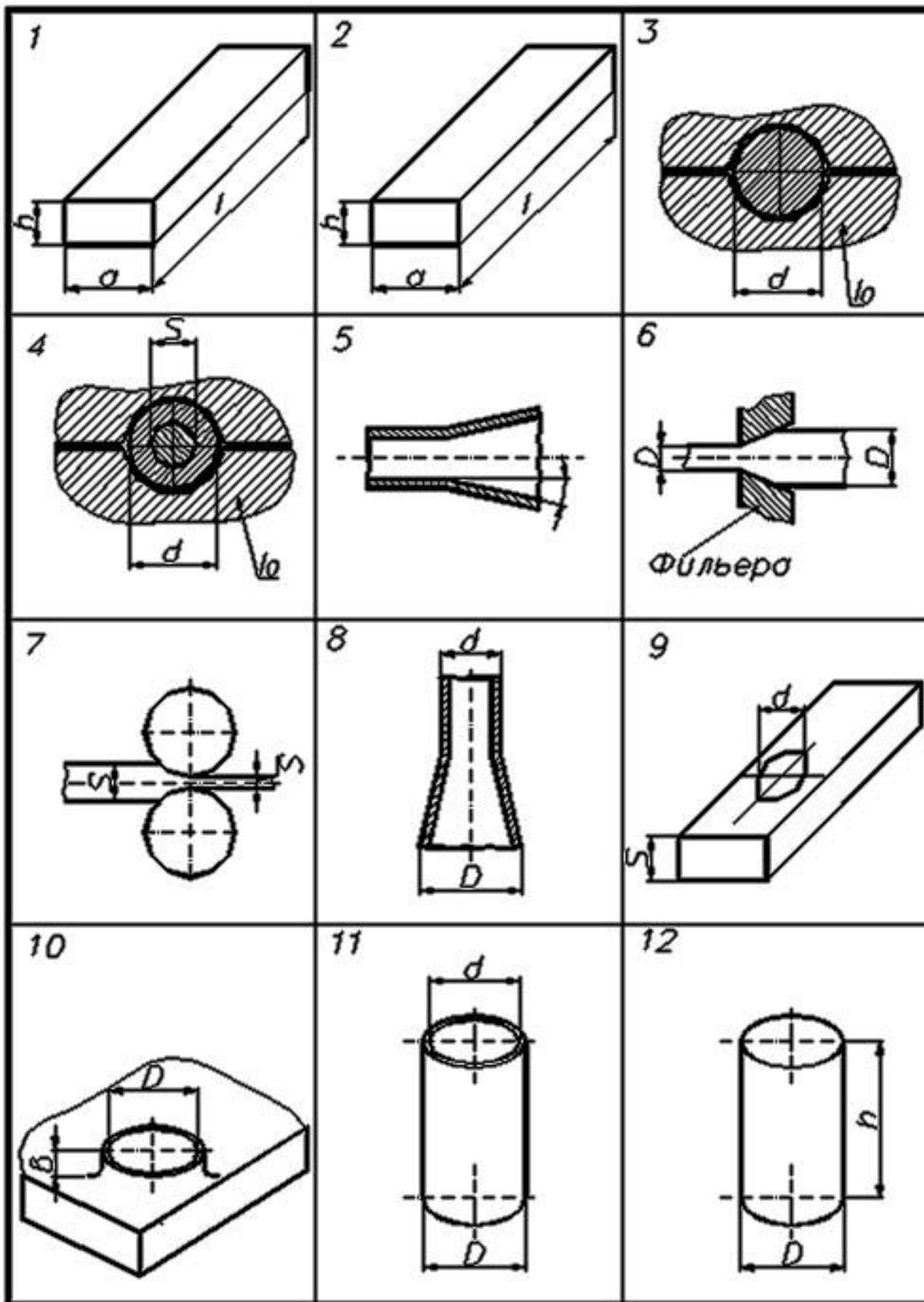
№ темы	Название темы	Исходные данные	Номер эскиза
1.	Ковка длиной полосы на прессе.	$a=60\text{мм}$ ; $h_0 = 30\text{мм}$ ; $h_k = 25\text{мм}$ ; $\mu_s = 0,3$ ; $l=800\text{мм}$ . Материал: Ст10, зерно↓.	1
2.	Осадка короткой полосы на прессе.	$H=40\text{мм}$ ; $h_k = 36\text{мм}$ ; $\mu_s = 0,2$ ; $l=400\text{мм}$ ; $a=80\text{мм}$ . Материал: Ст6; зерно↓.	2
3.	Протяжка сплошной заготовки в круглых бойках.	$h_0 = 60\text{мм}$ ; $d=80\text{мм}$ ; $\mu_s = 0,25$ ; $\Delta h = 6\text{мм}$ . Мате- риал: Ст6; зерно↓.	3
4.	Протяжка полой заготовки в вырезных бойках с оправкой.	$l_0 = 50\text{мм}$ ; $d=80\text{мм}$ ; $\mu_s = 0,3$ ; $\Delta h = 5\text{мм}$ ; $S=25\text{мм}$ . Материал: Сталь5; зерно↓.	4
5.	Разбортовка трубчатой заготовки.	$\varnothing 60\text{мм}$ ; $S=2\text{мм}$ ; $\alpha = 30^\circ$ . Материал: Ст2.	5
6.	Волочение проволоки.	$D_1 = 5\text{мм}$ ; $D_2 = 4,2\text{мм}$ . Материал: Ст2.	6
7.	Прокатка полосы из стали.	$S_0 = 1,6\text{мм}$ ; $S_k = 1,2\text{мм}$ ; $l = 600\text{мм}$ . Материал: Ст3.	7
8.	Редуцирование трубной заготовки.	$D_0 = 30 \rightarrow D_k = 22\text{мм}$ ; $l$ – са- мостоятельно. Материал: Ст6.	8
9.	Открытая прошивка плоской заготовки.	$\varnothing 28$ ; $S_0 = 12\text{мм}$ ; Материал: Ст3.	9
10.	Отбортовка плоской заготовки.	$D=30\text{мм}$ ; $v=5\text{мм}$ ; $S_0 = 1,5\text{мм}$ ; Материал: Ст2.	10
11.	Осадка цилиндрической заготовки с внутренним отверстием, (горячая).	$D=120\text{мм}$ ; $\frac{D}{d} = 2$ ; $\Delta h = 15$ ; $H=80\text{мм}$ . Материал: Ст3.	11
12.	Горячая осадка цилиндрической заготовки.	$D=60\text{мм}$ ; $\Delta h = 8$ ; $H=84\text{мм}$ . Материал: Ст5.	12

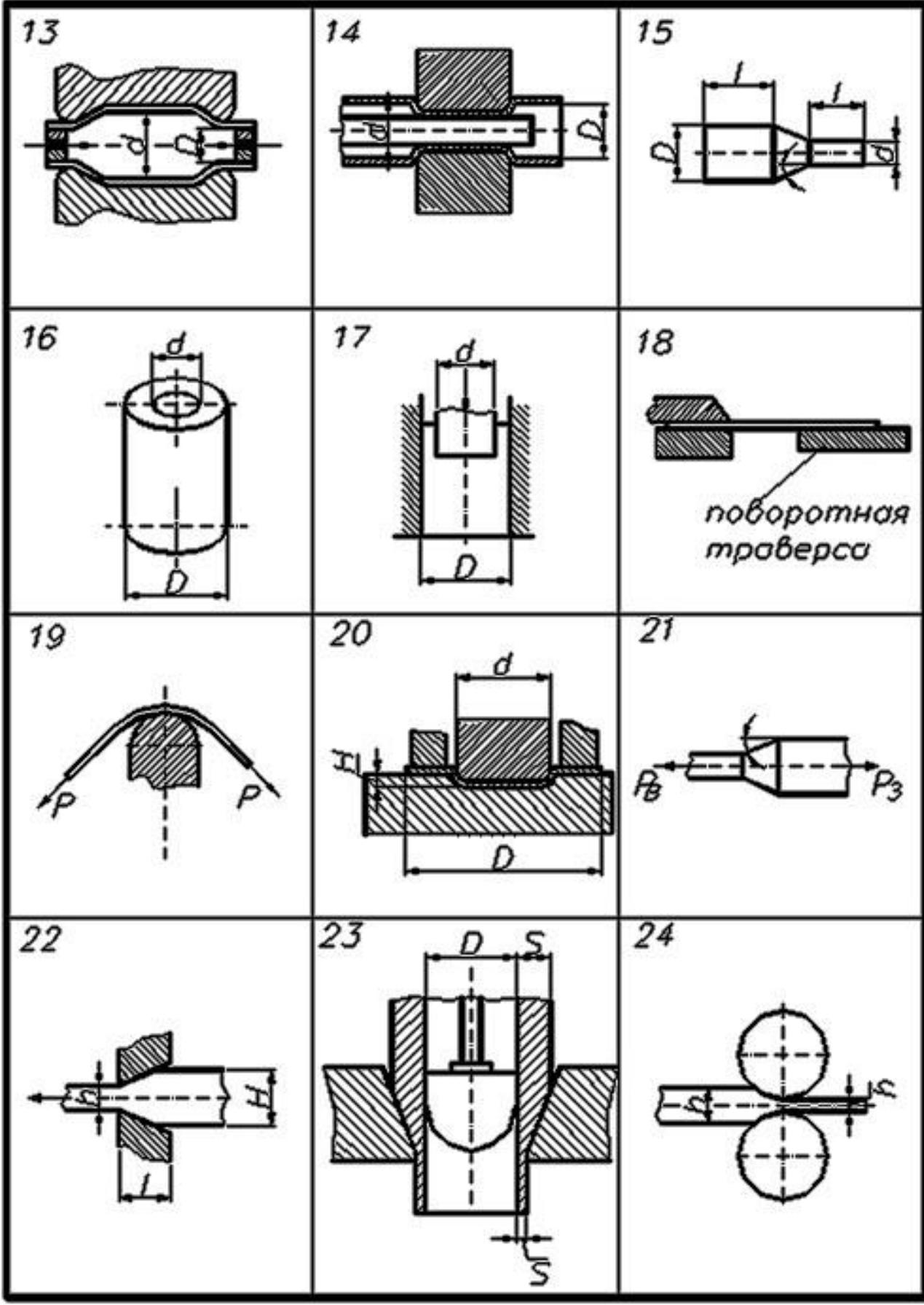
№ темы	Название темы	Исходные данные	Номер эскиза
13.	Локальное расширение трубчатой заготовки внутренним давлением.	$D=30\text{мм}; d=38\text{мм}; s_0 = 2;$ Материал: Ст0.	13
14.	Локальное обжатие трубчатой заготовки с оправкой.	$D=40\text{мм}; d=32\text{мм}; s_0 = 2\text{мм};$ Материал: Ст0.	14
15.	Штамповка выдавливанием осесимметричной детали, (горячая).	$D=140\text{мм}; d=42\text{мм};$ $l_1 = 200\text{мм}; l_2 = 36\text{мм};$ Материал: Ст0. $\chi - ?$	15
16.	Открытая прошивка цилиндрической заготовки. (горячая)	$D=80\text{мм}; d=52\text{мм};$ $H=100\text{мм};$ Материал Ст0.	16
17.	Закрытая прошивка цилиндрической заготовки, (горячая)	$D=90\text{мм}; d=60\text{мм};$ $H=120\text{мм};$ Материал Ст0.	17
18.	Гибка полосы моментом	$s_0 = 4\text{мм}; l = 130\text{мм};$ УГОЛ = $90^0$ ; $r_{\text{вн}} = r_{\text{мин}} + 2\text{мм}$	18
19.	Гибка полосы растяжением	$S=2\text{мм}; l=80\text{мм}; P = \frac{\sigma_T}{6};$ $r_{\text{вн}} = r_{\text{мин}} + 0.5\text{мм};$ УГОЛ $60^0$ ; Материал Ст2;	19
20.	Вытяжка плоской заготовки	$D=120\text{мм}; d=80\text{мм};$ $H=0,85\text{мм}$ от max; $s_0=1$ ; Учет трения, наличие прижима; Материал Ст0.	20
21.	Волочение проволоки в условиях противонапряжения	$D=12\text{мм}; d=8\text{мм}; P_3 = k\sigma_T$ (при различных значениях провести анализ)	21
22.	Прессование полосы через суживающуюся матрицу (нагрев)	$H=30\text{мм}; h=22\text{мм};$ $l=160\text{мм};$ Материал Ст0.	22
23.	Волочение трубы на оправке (нагрев), (цилиндр пробка)	$D=22\text{мм}; s_0=4; s_K = 3,2\text{мм};$ (расчеты); { различные схемы и уравнения для них (Гофман и Закс )}; Материал Ст2.	23
24.	Прокатка листа с натяжением на входе	$H=6\text{мм}; h_K = 5\text{мм}; l=400\text{мм};$ $P_{\text{вх}} = \sigma_T k;$ Материал Ст.	24

№ темы	Название темы	Исходные данные	Номер эскиза
25.	Вытяжка заготовки с утонением стенки	$D=60\text{мм}; d=40\text{мм}; S_0=2;$ $S_K=1,5\text{мм};$ Материал Ст6	26
26.	Прокатка листа с натяжением на выходе	$H=6\text{мм}; h=5\text{мм}; l=400\text{мм};$ $P_{\text{вых}} = k\sigma_T;$ Материал Ст2.	24
27.	Волочение проволоки при кулоновском трении	$D=6\text{мм}; d=4\text{мм};$ Материал Ст3.	6
28.	Обкатка заготовки	$D=30\text{мм}; \alpha = \frac{1}{5}; l=60\text{мм};$ $S_0 = 1.2 \text{ мм}.$	—
29.	Раздача трубы заготовки	$D=40\text{мм}; \alpha = \frac{1}{6}; l=60\text{мм};$ $S_0 = 5 \text{ мм};$ Материал Ст3.	5
30.	Гибка широкой полосы	$S=3\text{мм}; r_g = 4.5 \text{ мм};$ $\alpha = 90^\circ \text{ мм}; l=70\text{мм};$ Материал Ст3.	18
31.	Вытяжка с утонением стенки	$H=70\text{мм}; d=56\text{мм};$ $S_0 = 1.8\text{мм}; S_K = 1.2\text{мм};$	20
32.	Гибка профиля в роликах	$S_0 = 1.2 \text{ мм}; r_B = 2\text{мм};$ Материал Ст3.	—
33.	Гибка с торцовым сжатием	$S_0 = 1.5 \text{ мм}; r_B = 2\text{мм};$ Материал 0,8кп.	18*
34.	Профилирование листовой заготовки в валках.	НДС в уголковогой зоне: $r_g = 2.5 \text{ мм}; S=2\text{мм}.$	—

\* – со смещенным центром вращения поворотной траверсы

**Примечание:** Схемы и параметров процесса к рассмотрению могут полностью или частично изменяться от года к году по усмотрению преподавателя.





Учебный курс «Моделирование ударов и разрушения в программе LS-DYNA»

**Цель:** Подготовка к пользованию LS-Dyna позволит овладеть навыками моделирования процессов удара и разрушения. Пользователи научатся создавать достоверные расчетные модели, запускать процесс решения задачи и анализировать полученные результаты в препостпроцессоре LS-prepost.

**Объем подготовки:** 40 (сорок) часов.

**Форма подготовки:** очно или online.

№	Наименование консультационных услуг	Всего часов
1.	<b>Введение</b>	2
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- основы теории явного метода динамики;</li> <li>- особенности решения задач явными методами динамики;</li> <li>- критический шаг интегрирования;</li> <li>- применение программы LS-Dyna для задач удара;</li> <li>- методы расчета в LS-Dyna.</li> </ul>	
2.	<b>Введение в LS-Dyna</b>	6
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- структура пакета LS-Dyna;</li> <li>- этапы проведения расчета;</li> <li>- структура файлов;</li> <li>- постановка задач удара в LS-Dyna;</li> <li>- создание карт;</li> <li>- применение препроцессора ls-prepost;</li> <li>- единицы измерения.</li> <li>- методы расчета в LS-Dyna (FEM, ALE, SPH, EFG, SPG). 2D методы решения.</li> </ul> <p><b>Упражнение:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- изучение препостпроцессора LS-prepost;</li> <li>- создание геометрии для моделирования процессов удара.</li> </ul>	
3.	<b>Создание сеточной геометрии в LS-Dyna</b>	2
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- требования;</li> <li>- импорт геометрии;</li> <li>- задание размеров элементов;</li> <li>- методы создания конечно-элементных моделей;</li> <li>- создание конечно-элементной сетки;</li> <li>- <b>Упражнение: Импорт исходной геометрии. Создание сеточной геометрии в препроцессоре LS-prepost.</b></li> </ul>	
4	<b>Определение моделей материала</b>	6
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- линейно-упругий материал;</li> <li>- пластический материал;</li> <li>- жесткий материал;</li> <li>- композитный материал;</li> <li>- уравнения состояния материала;</li> <li>- идентификация параметров моделей упругопластичности;</li> <li>- модели накопления поврежденности и разрушения материала (GISSMO);</li> </ul> <p><b>Упражнение:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- моделирование процесса деформирования. испытание материала на растяжение.</li> <li>- кривые упрочнения;</li> <li>- определение параметров разрушения материала;</li> <li>- определение тепловых параметров материала.</li> </ul>	
5	<b>Определение типов элемента</b>	2

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- обзор существующих типов элемента;</li> <li>- объемный элемент;</li> <li>- оболочечный элемент;</li> <li>- SPH элемент;</li> <li>- ALE элемент (ейлеровый подход)</li> <li>- интегрирование элемента;</li> <li>- паразитные формы (hourglassing).</li> </ul>	
6	<b>Определение нагружения и граничных условий</b>	2
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- определение нагружения;</li> <li>- определение начальной скорости;</li> <li>- демпфирование;</li> <li>- определение узловых наборов;</li> <li>- типы ограничений;</li> <li>- определение неотражаемых границ</li> </ul>	
7	<b>Определение контактного взаимодействия</b>	5
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- алгоритмы контактного взаимодействия;</li> <li>- типы контакта;</li> <li>- определение контакта;</li> <li>- расширенные параметры контакта;</li> <li>- определение параметров расчета для методов ALE, SPH.</li> </ul> <p><b>Упражнение:</b> <b>Моделирование процесса удара шара об препятствие.</b></p>	
8	<b>Настройка параметров расчета</b>	2
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- шаг интегрирования;</li> <li>- настройка решателя;</li> <li>- демпфирование;</li> <li>- адаптивное разбиение;</li> <li>- варианты запуска файла на расчет;</li> <li>- прерывание решения и рестарт.</li> </ul> <p><b>Упражнение:</b> <b>Моделирование процесса удара шара об препятствие (определение остальных параметров);</b></p>	
9	<b>Анализ результатов</b>	3
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- визуализация результатов;</li> <li>- секущие плоскости;</li> <li>- таблицы и графики;</li> <li>- векторные результаты;</li> <li>- анимации.</li> </ul> <p><b>Упражнение:</b> <b>- Моделирование процесса удара шара об препятствие (анализ результатов);</b></p>	
10	<b>Рекомендации</b>	10
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- основные рекомендации.</li> </ul> <p><b>Упражнение:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- моделирование дроп-теста (падения);</li> <li>- моделирование удара и разрушения об жесткое препятствие. грунт;</li> <li>- моделирование удара и разрушения пули о преграду методом FEM, ALE, SPH</li> <li>- моделирования удара птицы об элементы двигателя методом SPH;</li> <li>- моделирование удара об воду методом ALE, SPH;</li> <li>- моделирования удара и разрушения об композитный слоистый материал;</li> <li>- моделирование краш-теста с манекеном</li> <li>- выполнение индивидуальных заданий.</li> </ul>	
	<b>ИТОГО</b>	40

Составитель: Илюшкин Максим Валерьевич

Подробности по e-mail: fzbm@mail.ru

Учебный курс «Моделирование процессов обработки металлов в программе LS-DYNA»

**Цель:** Подготовка к пользованию LS-Dyna позволит овладеть навыками моделирования процессов ОМД: листовой и горячей штамповки и механообработки. Пользователи научатся создавать достоверные расчетные модели, запускать процесс решения задачи и анализировать полученные результаты в препостпроцессоре LS-prepost.

**Объем подготовки:** 40 (сорок) часов.

**Форма подготовки:** очно или online.

№	Наименование консультационных услуг	Всего часов
1.	<b>Введение</b>	4
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- основы теории явного метода динамики;</li> <li>- особенности решения задач явными методами динамики;</li> <li>- критический шаг интегрирования;</li> <li>- применение программы LS-Dyna для задач ОМД;</li> <li>- методы расчета LS-Dyna.</li> </ul>	
2.	<b>Введение в LS-Dyna</b>	4
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- структура пакета LS-Dyna;</li> <li>- этапы проведения расчета;</li> <li>- структура файлов;</li> <li>- постановка задач ОМД в LS-Dyna;</li> <li>- создание карт;</li> <li>- применение препроцессора ansys workbench и ls-prepost;</li> <li>- единицы измерения.</li> <li>- методы расчета в LS-Dyna (FEM, ALE, SPH, SPG). 2D методы решения.</li> </ul> <p><b>Упражнение:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- изучение препостпроцессора LS-prepost.</li> <li>- создание геометрии заготовки и инструмента при моделировании процессов ОМД.</li> </ul>	
3.	<b>Создание сеточной геометрии в LS-Dyna</b>	2
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- требования;</li> <li>- импорт геометрии;</li> <li>- задание размеров элементов;</li> <li>- методы создания конечно-элементных моделей;</li> <li>- создание конечно-элементной сетки;</li> <li>- <b>Упражнение: Импорт исходной геометрии. Создание сеточной геометрии заготовки и инструмента.</b></li> </ul>	
4	<b>Определение моделей материала</b>	6
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- линейно-упругий материал;</li> <li>- пластический материал;</li> <li>- материал с анизотропией;</li> <li>- жесткий материал;</li> <li>- уравнения состояния материала;</li> <li>- идентификация параметров моделей упругопластичности;</li> <li>- модели накопления поврежденности и разрушения материала (GISSMO);</li> </ul> <p><b>Упражнение:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- моделирование процесса деформирования. испытание материала на растяжение.</li> <li>- кривые упрочнения;</li> <li>- определение формуемости материала,</li> <li>- определение параметров разрушения материала.</li> <li>- определение тепловых параметров материала</li> <li>- моделирование процесса нагрева и охлаждения заготовки.</li> </ul>	

5	<b>Определение типов элемента</b>	2
	- обзор существующих типов элемента; - объемный элемент; - оболочечный элемент; - интегрирование элемента; - паразитные формы (hourglassing).	
6	<b>Определение нагружения и граничных условий</b>	2
	- определение нагружения; - определение начальной скорости; - демпфирование; - определение узловых наборов; - типы ограничений.	
7	<b>Определение контактного взаимодействия</b>	5
	- алгоритмы контактного взаимодействия; - типы контакта; - определение контакта; - расширенные параметры контакта; - моделирование пружинения. - Определение параметров расчета для методов ALE, SPH, SPG. <b>Упражнение:</b> <b>Моделирование процесса деформирования и разрушения.</b>	
8	<b>Настройка параметров расчета</b>	2
	- шаг интегрирования; - настройка решателя; - демпфирование; - адаптивное разбиение; - варианты запуска файла на расчет; - прерывание решения и рестарт. <b>Упражнение:</b> <b>- моделирование процесса холодной и горячей штамповки (Определение остальных параметров);</b>	
9	<b>Анализ результатов</b>	3
	- визуализация результатов. - секущие плоскости. - таблицы и графики. - векторные результаты. - использование диаграмм предельной формуемости FLD - анимации. <b>Упражнение:</b> <b>- моделирование процесса холодной и горячей штамповки (анализ результатов);</b>	
10	<b>Рекомендации</b>	10
	- основные рекомендации; - параметры для моделирования листовой штамповки. <b>Упражнение:</b> <b>- моделирование процесса деформирования листового и объемного материала с адаптивным перестроением;</b> <b>- моделирование процесса ковки;</b> <b>- моделирование процесса объемной горячей штамповки методом ALE, SPH, SPG.</b> <b>- моделирование процесса горячей прокатки листа.</b> <b>- моделирование процесса вытяжки</b> <b>- моделирование процесса вырубки;</b> <b>- моделирование процесса резания металла резцом (точнее)</b> <b>- моделирование процессов фрезерования и сверления</b> <b>- выполнение индивидуальных заданий.</b>	
	<i>ИТОГО</i>	40

Составитель: Илюшкин Максим Валерьевич

Подробности по e-mail: fzbm@mail.ru

Видеоуроки “Моделирование в программе LS-DYNA”

Видеоуроки представляют собой методики по созданию расчетных моделей различных процессов для LS-DYNA

В видео представлена полная последовательность действий по созданию расчетной модели, запуска в решателе LS-DYNA и анализа результатов

В качестве решателя используется версия LS-DYNA R10.3

№	Название	Длительность, мин
1	Удар шарика о воду	22
2	Удар контейнера с водой	27
3	Падение воды в контейнер	23
4	Перелив жидкости в контейнер	20
5	Моделирование гидроабразивной резки	28
6	Воздействия волн на лодку методом ALE	53
7	Воздействия волн на лодку методом SPH	46
8	Точение методами ALE, EFG, SPG, EFG, Peri	10-30
9	Моделирование износа	16
10	Моделирование вытяжки листовой детали	60
11	Моделирование сверления	56
12	Моделирование электрогидроимпульсной штамповки	60
13	Идентификация моделей материала	120
14	Модели разрушения в LS-DYNA	80
15	Деформирования заготовки методом ISF (точечное деформ.)	24
16	Моделирование фрезерование	40
17	Моделирование раскатки уголка	28
18	Моделирование взрывной нагрузке в контейнере SPH / ALE	30/51

Составитель видеоуроков: Илюшкин Максим Валерьевич

Подробности по e-mail: fzbm@mail.ru

**АО “Ульяновский НИАТ”** - одно из ведущих предприятий России, которое более 40 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 <https://vk.com/club130155677>

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](mailto:fzbm@mail.ru)

Опыт применения программы LS-DYNA более 15 лет. Шесть курсов обучения у инструкторов LSTC, Dynaform, Dynamore (Paul DuBios, Art Shapiro, M'hamed Souli и др.).

Наш сайт, посвященный моделированию	<a href="https://www.dynacrash.ru">https://www.dynacrash.ru</a>
Наши примеры моделирования (Youtube)	<a href="https://www.youtube.com/playlist?list=PL95PBAKBuLSvI0j7dtXrgdMCoy4T8B9nB">https://www.youtube.com/playlist?list=PL95PBAKBuLSvI0j7dtXrgdMCoy4T8B9nB</a>
Примеры моделирования краш-тестов	<a href="https://www.youtube.com/playlist?list=PLc4h3kfWwlZ5dbZ5Kiii0hFbXISpUtZxb">https://www.youtube.com/playlist?list=PLc4h3kfWwlZ5dbZ5Kiii0hFbXISpUtZxb</a>
Группа в контакте “Металлообработка: моделирование, обучение LS-DYNA”	<a href="https://vk.com/ultzshp">https://vk.com/ultzshp</a>
Видеоуроки в LS-DYNA (rus)	<a href="https://www.youtube.com/playlist?list=PL95PBAKBuLSuydUmRjZzay9UIMjO658t9">https://www.youtube.com/playlist?list=PL95PBAKBuLSuydUmRjZzay9UIMjO658t9</a>