

5. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО И ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЙ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СТАКАНА¹

Цели работы:

- анализ напряжений, возникающих в очаге деформации при вытяжке цилиндрического стаканчика; анализ влияния силы трения под прижимом и упрочнения на характер изменения и максимальную величину силы деформирования.
- ознакомление с методикой создания и расчета моделей операций листовой штамповки в явной трехмерной постановке в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA с последующим анализом результатов.

Постановка задачи.

Определить напряжения, деформации, силу деформирования при вытяжке цилиндрического стаканчика из круглой заготовки. Внутренний диаметр стакана – 111 мм. Толщина заготовки – 1 мм, диаметр 200 мм. Материал заготовки сталь 08кп: плотность $7.85 \cdot 10^9$ т/мм³; модуль упругости $2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона – 0.3, предел текучести – 220 МПа, модуль упрочнения – 800 МПа, коэффициент трения между материалом и инструментом – 0.1. В соответствии с технологическими рекомендациями радиус скругления матрицы и пуансона составляет 6...10 толщин материала, а зазор между матрицей и пуансоном 1.35...1.5 толщин. Удельная сила прижима – 2.5 МПа. Схема операции со всеми характерными размерами приведена на рис. 1.

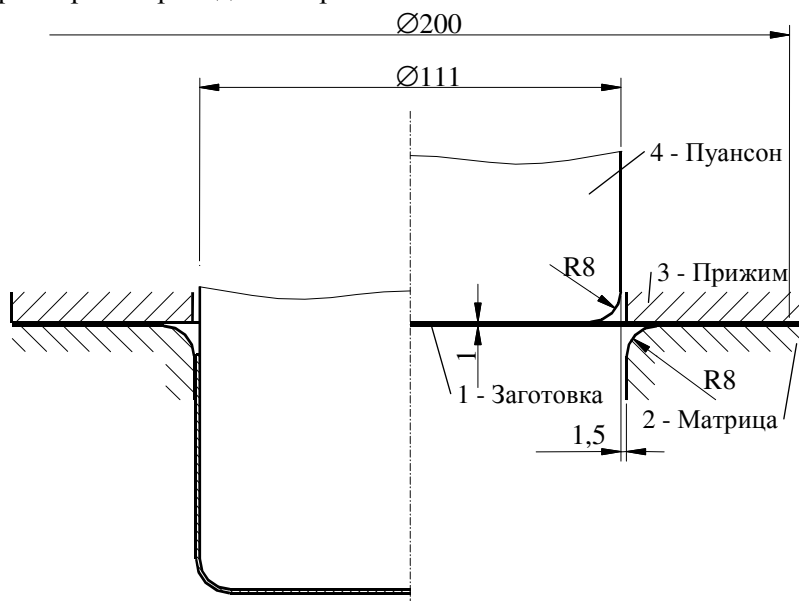


Рис. 1. Схема вытяжки.

Особенности использования программы LS-DYNA

LS-DYNA (LSTC Corp.) - многоцелевая программа, использующая явную формулировку метода конечных элементов (explicit finite element method). Она предназначена для анализа высоко нелинейных и быстротекущих процессов, а также динамического отклика трехмерных неупругих структур. Первая версия программы LS-DYNA была выпущена в 1976 г. LS-DYNA была и до сих пор является частью оборонной программы США. Пользователями программы являются все известные мировые и российские автомобильные концерны (BMW, Volvo, Toyota, ВАЗ, УАЗ и т.д.), множество аэрокосмических и множество фирм других отраслей.

Особенностью LS-DYNA является явная схема дискретизации по времени. Выбор шага интегрирования по времени в явных методах определяется устойчивостью процесса

¹ Лабораторная работа разработана совместно с М.Горьковым

Конструктивно оформленные части модели в комплексе LS-DYNA удобно объединять в единые компоненты (Part). Каждому такому компоненту соответствует определенная геометрия, материал, константы и конечный элемент (КЭ). С помощью компонент легко задавать граничные условия и контакт. В данной задаче примем следующую нумерацию компонент: заготовка будет иметь - 1, матрица - 2, прижим - 3 и пуансон - 4.

Последовательность решения задачи

В процедуре решения задачи подробно описаны только те действия, которые не выполнялись ранее.

1. Определение имени задачи – “Draw”. (U_M: File → Change Jobname ...)
2. Создание модели (Preprocessing).
 - 2.1. Определение типа задачи – Structural, LS-DYNA Explicit. (M_M: Preprocessor > Preferences...).
 - 2.2. Построение геометрической модели.

Геометрическая модель в данной задаче определяется срединными поверхностями оболочек (рис.2 справа). Построение трехмерной модели можно выполнить несколькими способами. В настоящей задаче удобно срединные поверхности заготовки и прижима задать непосредственным построением, а срединные поверхности матрицы и пуансона построить по следующему алгоритму: сначала строим объем в виде полого цилиндра, затем удаляем внутренний объем и внешние ненужные поверхности, потом скругляем сопряженные поверхности радиусом.

Для удобства построения начало координат следует совместить с центром срединной поверхности заготовки, а ось OZ направить вдоль оси симметрии. В этом случае ось OX будет находиться в плоскости сечения (см. рис.2), а ось OY направлена перпендикулярно плоскости сечения. Поскольку задача осесимметричная, достаточно построить ¼ трехмерной модели.

Не забывайте сохранять базу данных после каждого удачно выполненного пункта!!!

2.2.1. Построение поверхности прижима

- Построение поверхности с координатой z=0

M_M: Preprocessor > Modeling > Create > –Areas– Circle > Partial Annulus...

(WP X=0, WP Y=0, Rad-1=65, Theta-1=0, Rad-2=100, Theta-2=90)

- Перемещение построенной поверхности на 2 мм вдоль оси OZ

M_M: Preprocessor > Modeling > Move/Modify > –Areas– Areas >

(Выбрать поверхность, ОК, DZ=2, ОК)

Перейдя к трехмерному изображению (U_M: PlotCtrls → Pan,Zoom,Rotate ...), и повернув изображение убедитесь, что поверхность передвинута относительно начала координат)

2.2.2. Построение поверхности заготовки

Для удобства создания сетки КЭ представьте заготовку в виде совокупности двух поверхностей – круга радиусом, равным плоской части пуансона и кольца, составляющего остальную часть. После построения этих двух поверхностей не забудьте их склеить (Glue)

2.2.3. Построение поверхности пуансона

- Построение объема пуансона с координатой z=0

M_M: Preprocessor > Modeling > Create > –Volumes– Cylinder > Partial Cylinder...

(WP X=0, WP Y=0, Rad-1=0, Theta-1=0, Rad-2=55, Theta-2=90, Depth=80)

- Перемещение построенного цилиндра на 2 мм вдоль оси OZ
- Удаление объема

M_M: Preprocessor > Modeling > Delete > Volumes Only >

(Выбрать объем, ОК) Восстановить изображение (U_M:Plot, Areas)

- Удаление ненужных плоскостей ¼ цилиндра (верхней, и боковых)

Поскольку необходимо удалить не только плоскости, но и принадлежащие им ненужные линии воспользуйтесь **> Delete > Areas and Bellow**

- Построение скругления пуансона

M_M: Preprocessor > Modeling > Create > –Areas– Area Fillet

(Выбрать две поверхности, ОК, RAD=7.5, ОК) Процедура скругления занимает некоторое время, после ее завершения погасите окошко предупреждения.

2.2.4. Построение поверхности матрицы

Поверхность матрицы строим аналогично поверхности пуансона. Величину Depth (глубина) следует задать отрицательной, перемещение построенного объема также производится в отрицательном направлении. Кроме ненужных нижней и двух боковых плоскостей у матрицы следует удалить также ненужную внешнюю цилиндрическую поверхность.

Полученная физическая модель должна иметь вид, подобный изображенному на рис.3. (числа на рисунке – количество КЭ на каждой линии).

Запомните геометрическую модель в файле *geom.db*

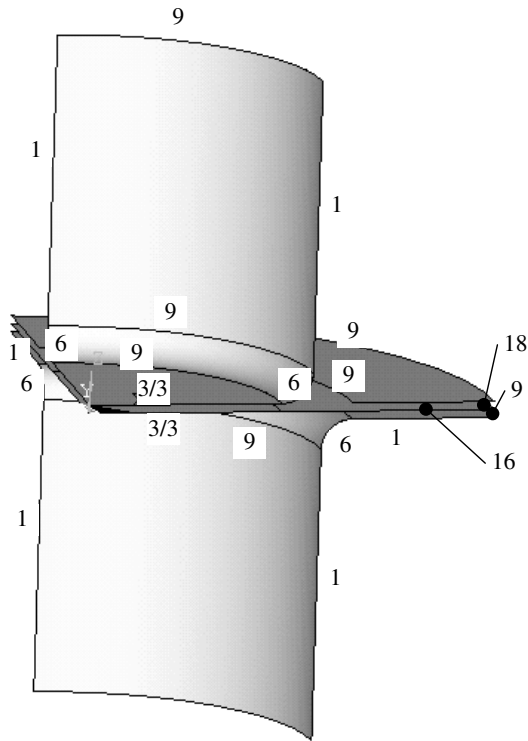


Рис.3

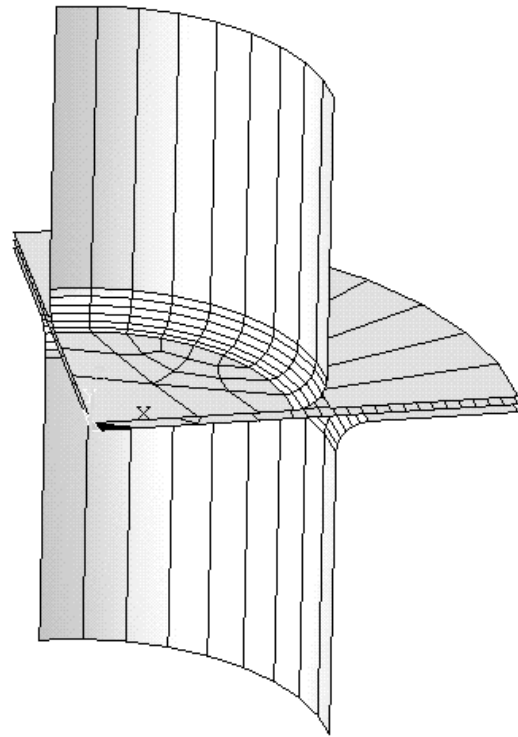


Рис.4

- 2.3. Определение типа и формулировки КЭ (Element Type).
Существует всего один оболочечный КЭ, доступный в явной постановке задачи – Thin Shell163 (тонкая оболочка). В свойствах этого КЭ необходимо указать его формулировку (Option). В данном случае рекомендуется “Belitschko-Wong”.
- 2.4. Задание параметров КЭ (Real Constants).
В параметры КЭ входят: Сдвиговой фактор, $SHRF=5/6$; количество точек интегрирования по толщине КЭ, $NIP=3$ и толщина КЭ в каждом из 4-х узлов, $T_i=1$ мм.
- 2.5. Задание свойств материала (Material Props).
Каждый компонент модели (Part) будет иметь свой материал, то есть всего их будет 4.
Модель материала заготовки (1) – пластичность с кинематическим упрочнением
M_M: Preprocessor > Material props > Define MAT Model...>Add...
(Plasticity , Bilinear Kinemat..., OK)
Задать значения плотности – DENS, модуля упругости – EX, коэффициента Пуассона – NUXY, предела текучести и модуля упрочнения в соответствии с исходными данными в указанной ранее системе единиц.
Модель материала матрицы (2), прижима (3) и пуансона (4) – твердое тело (Other, Rigid)
Плотность, модуль упругости и коэффициент Пуассона – такие же, как у заготовки. Кроме того необходимо задать ограничение степеней свободы для твердых тел. Например, пуансон может перемещаться только вдоль оси Z, поэтому для него ограничиваются перемещения (translational) вдоль осей X и Y (X and Y disps) и все повороты (rotational) - All rotations.
Запомните модель в файле *mater.db*
- 2.6. Разбиение модели на КЭ (Meshing).
- 2.6.1. Перед разбиением надо указать для соответствующих поверхностей (Area) тип КЭ, real constant и материал. Соответственно для поверхностей, принадлежащих разным элементам модели, различаться будут только номера материалов.
- 2.6.2. Так как ANSYS/ED имеет ограничение по количеству КЭ, то рекомендации по разбиению сетки (параметр NDIV) приведены ниже (см. рис.3):
- заготовка: все дуги 18 КЭ, боковые линии внешнего кольца – по 16, боковые линии внутреннего круга по 3 элемента со сгущением (параметр SPACE) 3;
 - матрица: на прямые линии по 1 КЭ, на дуги по 9, а на скругления 6;
 - прижим: на прямые линии по 1 КЭ, а на дуги по 9;
 - пуансон: на прямые линии вертикальные вдоль оси Z по 1 КЭ, на прямые на дне пуансона по 3 элемента со сгущением 3, на дуги по 9, на скругления по 6.
- 2.6.3. Для упрощения выбора нужных поверхностей и линий следует пользоваться инструментом выбора частей геометрической модели по координатам. Так для выбора поверхностей,

относящихся только к заготовке можно воспользоваться следующей последовательностью команд:

- **U_M: Select → Select Entities...** В окне Areas; By Location; Z Coordinates; Min,Max=-1,1; ОК – тем самым мы выбираем все поверхности, z координаты которых находятся в пределах от –1 до 1 мм.
- **U_M: Select → Everything Bellow → Selected Areas**
- **U_M: Plot → Areas**

2.6.4. Не забудьте при задании количества элементов со сгущением проверить в какую сторону получилось сгущение. Меньший размер элемента должен быть у периферии круга. Если сгущение задано неправильно – примените обращение сгущения – Flip

2.6.5. После полного разбиения модели следует восстановить выбор всех частей модели

- **U_M: Select → Select Everything**
- **U_M: Plot → Elements**

Изображение модели с разбиением на конечные элементы приведено на рис. 4.

Запомните базу данных в файле *mesh.db*

2.7. Создание идентификаторов (Parts).

Для каждого элемента модели создается идентификатор с уникальным набором параметров:

M_M: Preprocessor > LS-DYNA Options > Parts Options

Здесь выбрать “Create Parts”. Далее появится окно, в котором необходимо удостовериться, что номер материала и идентификатора совпадают. В случае несовпадения надо заново разбить модель на КЭ.

2.8. Создание контактных пар (Contact).

Контактные пары задаются командой:

M_M: Preprocessor > LS-DYNA Options > Contact > Define Contact

Тип контакта для всех пар автоматический “автоматический, поверхность-поверхность” (Surface to Surface, Automatic). Этот тип позволяет учитывать толщины оболочек. Статический коэффициент трения (Static Friction Coefficient) установить 0.15; коэффициент вязкостного трения позволяет

ограничить удельные силы трения, его следует задавать равным $\tau_{\max} = k = \sigma_s / \sqrt{3}$ (в нашем случае равен 127 МПа); коэффициент демпфирования вязкостного трения задают в процентах от критического значения (рекомендуется 20 процентов). Далее после нажатия кнопки “Apply” предлагается выбрать контактирующие элементы модели. Соответственно в первой строчке (Contact) следует установить №1 (заготовка) а все остальные №№2-4 в нижней (Target). Эту процедуру проделать для каждой пары. Дополнительно (не обязательно) можно создать пару прижим-матрица, так как после окончания вытяжки вся заготовка уйдет из-под прижима и ограничение движения прижима будет отсутствовать.

Запомните порядковые номера контактов. В дальнейшем при выводе результатов расчета это пригодится.

Поскольку толщина фланца во время вытяжки меняется, то следует задать дополнительные свойства контакта

M_M: Preprocessor > LS-DYNA Options > Contact > Advanced Control...

Опцию “SS Shell Thickness Change Opt” установить в значение “Thk Change Incl”.

Запомните базу данных в файле *contact.db*

2.9. Задание граничных условий (Constraints).

Здесь надо выбрать поверхность заготовки (Area) через окно Select Entities. Поверхность заготовки можно идентифицировать по атрибутам – материал 1. Далее выбрать все, что относится к этой поверхности: **U_M: Select → Everything Below → Selected Areas...** Вывести на экран узлы и выполнить команду:

M_M: Preprocessor > LS-DYNA Options > Constraints > Apply > On Nodes

Выбрать те узлы, которые находятся на границе симметрии (поочередно с обеих сторон) и запретить одну поступательную и две вращательные степени свободы для обеспечения условий осевой симметрии. Какие степени свободы следует запретить - определите сами. После чего на узлах должны появиться соответствующие указатели. Необходимо выбрать теперь всю модель.

Запомните базу данных в файле *constrain.db*

2.10. Приложение нагрузок (Loads)

В данной задаче будем использовать два типа внешних нагрузок – кинематическая нагрузка (движение пуансона с определенной скоростью) и силовая (воздействие прижима на заготовку с определенной силой).

2.10.1. Определение графиков внешних нагрузок.

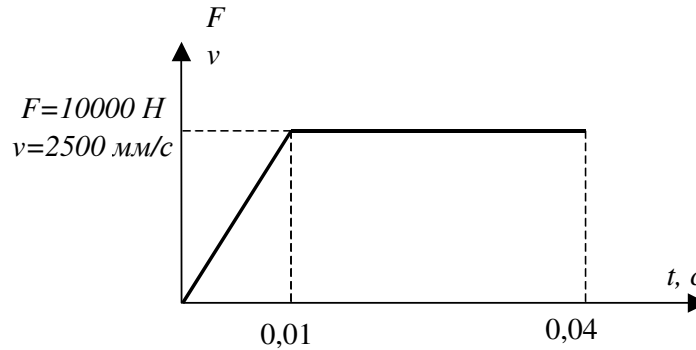
В реальности процесс вытяжки производят при скоростях движения инструмента не более 0.5 м/с. Ранее мы приводили сведения о том, что минимальный шаг интегрирования, определяемый условиями устойчивости решения при явных методах, обратно пропорционален скорости движения элементов. В том случае, если вы обладаете достаточным запасом времени и мощным процессором – следует использовать истинные скорости движения инструмента. В нашем

случае в учебных целях для сокращения времени расчета мы увеличим скорость движения инструмента в 5 раз до 2.5 м/с (2500 мм/с). Это может привести к появлению динамических эффектов, но сократит время расчета.

По условию задачи удельная сила прижима составляет 2.5 МПа. С учетом того, что мы используем четверть полной модели, сила, воздействующая на прижим в начале вытяжки для обеспечения такого давления должна составлять 10000 Н.

Ориентировочный путь, который должен совершить пуансон до полной вытяжки стакана, равен 80 мм. Таким образом, время перемещения пуансона с постоянной скоростью 2.5 м/с составит 0.032 с.

В программе LS-DYNA следует избегать ступенчатого изменения нагрузки, поэтому примем следующий график изменения скорости пуансона и силы прижима:



2.10.2. Задание массивов данных для внешних нагрузок.

Необходимо создать массивы для времени, скорости ползуна и силы прижима:

U_M: Parameters → Array Parameters → Define/Edit... → Add

Ввести поочередно названия “Time”, “Vel” и “Hold” в поле “Parameter Name”. Количество строк (row) ввести 3 (поле I,J,K No. of rows, cols, planes). Далее поочередно выбрать каждый массив, нажать “Edit” и отредактировать следующим образом (знак минус учитывает направление действия внешней нагрузки):

Time: 0 ; 0.01 ; 0.035.

Vel: 0 ; -2500 ; -2500 .

Hold: 0 ; -10000 ; -10000.

2.10.3. Приложение нагрузок.

M_M: Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Specify Loads

В поле “Load Label” указывать RBVZ для скорости, а для силы RBFZ. В поле “Component Name or Part Number” указывать номера идентификаторов пуансона и прижима. В поле “Parameter Name for time values” указать “time”. В поле “Parameter Name for data values” указать соответственно “vel” для пуансона и “hold” для прижима. Для просмотра заданных кривых можно воспользоваться командой:

M_M: Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Plot Load Curve.

3. Запуск на расчет.

3.1. Задание параметров расчета.

Для предотвращения появления искажений формы, присущих вырожденным КЭ, для моделирования операций формоизменения надо указать значение Hourglass:

M_M: Solution > Analysis Options > Hourglass Ctrl > Local

В поле “Material Reference number” указать номер заготовки (№1), а в поле VAL1 “Hourglass Control Type” – тип контроля – 4. В поле VAL2 значение 0.05. В полях VAL5 и VAL6 указать величину, равную значению VAL2 (рекомендации разработчиков).

Далее надо указать время окончания процесса формоизменения:

M_M: Solution > Time Controls > Solution Time

Указать время 0.035 с.

Также указать количество шагов для сохранения:

M_M: Solution > Analysis Options > Output Controls > File Output Freq

Установить значение для Time-History равным 100.

Указать необходимость вывода сил контактного взаимодействия в ASCII файл

M_M: Solution > Analysis Options > Output Controls > ASCII Output ...

Выбрать Resultant forces.

3.2. Сохранить базу SAVE_DB.

3.3. Запуск на расчет осуществляется командой “Solve”. Предварительное время расчета очень грубое и никогда не является истиной. Во время расчета можно нажать комбинацию Ctrl+C и ввести “sw2” для оценки оставшегося времени для расчета, “sw1” для завершения расчета.

4. Просмотр результатов.

Для вывода результатов расчета на экран необходимо считать необходимую запись в базе данных результатов расчета.

Чтение последней записи: **M_M: General Postproc > -Read Results- Last Set**

Чтение записи в конкретный момент времени: **M_M: General Postproc >-Read Results- By Time/Freq...**

Для более наглядного представления результатов необходимо осуществить вывод на экран только деформируемой заготовки (простейший способ – выбор по материалу), установить истинный масштаб деформаций (**Style → Displacement Scaling...**) и показ толщин КЭ:

U_M: PlotCtrls → Style → Size and Shape

Здесь установить “галочку” в опции /ESHAPE "Display of element shapes based on constant descriptions".

4.1. Выведите на экран деформированную форму готовой детали. Отобразите на ней эквивалентные напряжения (SEQV). Достройте изображение до полного объемного изображения (Symmetry Expansion). Сохраните это изображение в виде BMP файла на диске.

4.2. Создайте анимацию процесса вытяжки стакана с отображением величины эквивалентных деформаций.

4.3. Вернитесь к отображению ¼ детали. Для различных моментов времени отобразите эквивалентные напряжения таким образом, чтобы был виден очаг пластической деформации. Проанализируйте результаты и запишите выводы в отчет.

4.4. Для момента времени, соответствующему глубине стакана, равной 16 мм (сумма радиусов скругления матрицы и пуансона) отобразите величины напряжений во фланце σ_x и σ_y . В каком сечении эти напряжения равны соответственно радиальному и тангенциальному напряжениям во фланце? Постройте эпюры изменения радиальных и тангенциальных напряжений во фланце. (Path operations, сначала определить путь – define path, затем определить переменный для вывода – map onto path, и, наконец, вывести результаты на график – plot path items on graph). Запомните эпюры в BMP файле и зарисуйте в отчете.

4.5. Постройте график изменения силы деформирования по времени. Силу деформирования можно получить как результирующую силу в направлении координаты z для контакта пуансона с заготовкой (здесь пригодится номер контакта, который вы записали, при определении контактных пар). Контактные силы в процессе расчета записываются в файл RCFORC.DAT (при определении ASCII output). Для считывания этого файла перейдите в TimeHist Postprocessor. Затем в окне ANSYS Input с клавиатуры введите команду **file,,his** и нажмите Enter (это необходимо для ассоциации результатов с файлом draw.his). После этого можно считывать файл:

M_M: TimeHist Postpro > Read LSDYNA Data > RCFORC file...

В поле Read data for contact number введите номер контакта, соответствующий контакту пуансона с заготовкой. (Обратите внимание цифру 2 - номер переменной, заданной в поле выше).

Построение графиков может быть осуществлено следующим образом:

M_M: TimeHist Postpro > Graph variables...

В поле NVAR1 введите значение 4. (Сила RX соответствует переменной 2, RY – соответствует переменной 3, RZ – 4).

Полученный график запомните в BMP файле и зарисуйте в отчет (можно сглаженный). Определите максимальную силу деформирования и величину перемещения пуансона, соответствующую максимальной силе (учтите, что сила на графике соответствует деформированию ¼ части реальной модели). Проанализируйте, какому перемещению пуансона соответствует резкое снижение силы деформирования.

5. Проанализируйте влияние упрочнения, коэффициента трения и силы прижима на силу деформирования. Для того, чтобы материал был неупрочняемым можно задать малую величину модуля упрочнения (например 10 МПа). Для изменения коэффициента трения необходимо сначала удалить, а затем заново создать контактные пары с новым значением коэффициента трения. Изменение силы прижима производится путем изменения массива HOLD с последующим новым заданием внешних нагрузок.
6. Измените модель таким образом, чтобы коэффициент вытяжки стал равен 2.1. Промоделируйте процесс и проанализируйте результаты. Определите максимальный коэффициент вытяжки.

Отчет должен содержать название, цели работы, описание задачи, расчетную модель и результаты, полученные в процессе решения. Рекомендуется также записать основные приемы работы с графическим препроцессором, освоенные в ходе занятия.