

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(национальный исследовательский университет)»

Ю.В. Скворцов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В НЕЛИНЕЙНОЙ МЕХАНИКЕ**

САМАРА 2013

СОДЕРЖАНИЕ

1	ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПАНЕЛИ ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS.....	3
2	ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПАНЕЛИ ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ MSC.PATRAN/NASTRAN	18
3	ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОГОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS	35
4	ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРОРЫВНОЙ МЕМБРАНЫ ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS	36
5	РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАСТЯЖЕНИИ ПОЛОСЫ, ОСЛАБЛЕННОЙ УГЛОВЫМ ВЫРЕЗОМ, ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ MSC.PATRAN/NASTRAN	49
6	ИССЛЕДОВАНИЕ СОУДАРЕНИЯ ПОЛОГО ШАРА С НЕДЕФОРМИРУЕМОЙ ПРЕГРАДОЙ ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS	62
7	РАСЧЁТ БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЗАТЯЖКОЙ ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS	72
8	МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБКИ ПРОВОЛОКИ ПРИ ПОМОЩИ ЖЁСТКИХ РОЛИКОВ В СРЕДЕ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS.....	84
9	МОДЕЛИРОВАНИЕ ШТАМПОВКИ ПРОФИЛЯ ЭЛАСТИЧНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ В СРЕДЕ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS.....	93
10	МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ МЕТОДОМ ВЫГЛАЖИВАНИЯ В СРЕДЕ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS.....	106

1 ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПАНЕЛИ ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS

Исходные данные: цилиндрическая панель нагружена сосредоточенной силой P в центре, как показано на рисунке 1.1; оболочка шарнирно оперта вдоль ее прямолинейных кромок и свободна вдоль криволинейных; материал линейно-упругий изотропный (модуль упругости $3,1 \cdot 10^3$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3).

Допущение: отношения наименьшей длины стороны панели и радиуса кривизны оболочки к толщине больше 10, что позволяет использовать для ее моделирования оболочечные элементы.

Цель: 1) определить критическую нагрузку методом начальной устойчивости; 2) выполнить анализ с учетом геометрической нелинейности путем задания приращений нагрузки и определить верхнюю критическую нагрузку (сравнить с предыдущим решением); 3) выполнить анализ с учетом геометрической нелинейности путем задания приращений перемещений и определить верхнюю и нижнюю критические нагрузки; 4) исследовать закритическое поведение панели методом длины дуги.

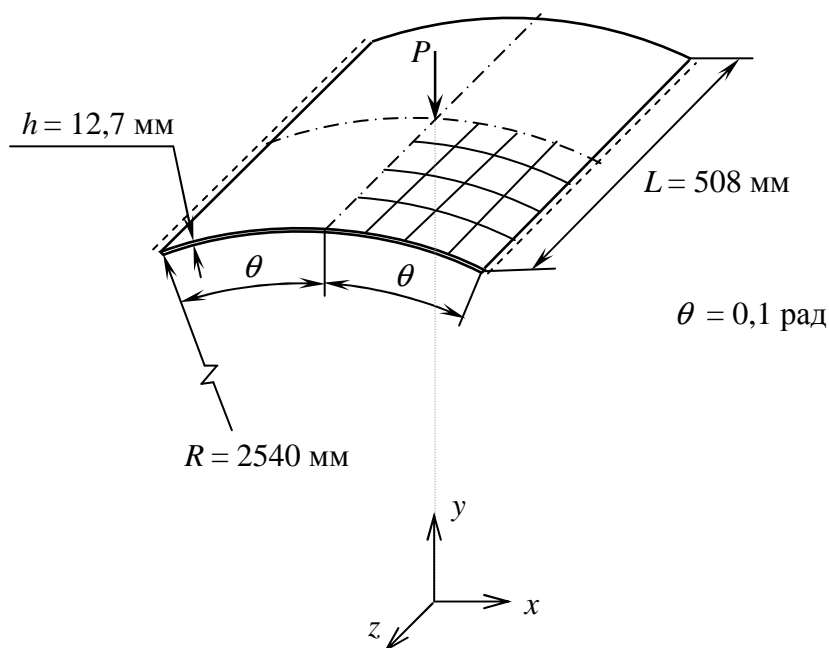


Рисунок 1.1 – Геометрия оболочки

Благодаря двойной симметрии конструкции и нагрузки здесь можно ограничиться рассмотрением лишь четверти панели. При этом вместо силы P нужно будет прикладывать силу $P/4$.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

I. Метод начальной устойчивости.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab1.
2. Установить тип используемых в расчете элементов – 4-узловой оболочечный элемент SHELL63: $M_M > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete$. Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Shell > Elastic 4node 63*, *OK* и *Close*.
3. Определить реальные постоянные для выбранного типа элементов: $M_M > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete$. Нажимаем *Add* и указываем тип элементов «Type 1 Shell63», *OK*.
В соответствующие поля вводим:
«Real Constant Set No»: 1 (номер набора реальных постоянных)
«Shell thickness at node I» ТК(I): 12.7 (толщина оболочки, мм)
OK.
Закрываем диалоговую панель кнопкой *Close*.
4. Задать свойства материала: $M_M > Preprocessor > Material Props > Material Models$.
В правом окне последовательно (двойным щелчком мыши) выбираем *Structural > Linear > Elastic > Isotropic*.
Вводим:
EX: $3.1e3$ (модуль упругости, МПа)
PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)
OK.
Закрываем панель.
5. Для удобства ввода исходных данных определить скалярные параметры: $U_M > Parameters > Scalar Parameters$.
В поле «Selection» последовательно вводим: $R=2540$; $L=508$; $pi=acos(-1)$; $theta=0.1*180/pi$. После каждого ввода здесь необходимо нажать кнопку *Accept* (принять).
Закрываем панель кнопкой *Close*.
6. Построить точки: $M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS$.

Вводим координаты точек (используя буквенные обозначения скалярных параметров) согласно следующей таблице:

Номер точки	x, мм	y, мм	z, мм
1	0	0	0
2	0	0	$L/2$
3	0	R	0

Включаем нумерацию геометрических объектов: $U_M > PlotCtrls > Numbering$, отмечаем флаги «Keypoint numbers», «Line numbers» и «Area numbers».

Для лучшего обзора точек установить с помощью кнопки *Isometric View* панели управления видом изометрическую проекцию.

Первые две точки здесь являются вспомогательными, они будут использоваться для определения оси вращения и траектории вытягивания. Третья точка представляет собой центральную точку панели.

7. Построить дугу окружности путем вращения точки 3 относительно оси, заданной точками 1 и 2, на угол θ : $M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Keypoints > About Axis$.

При этом необходимо указать курсором мыши сначала точку 3, а затем после нажатия кнопки *OK* точки 1 и 2.

Далее в поле «Arc length in degrees» (длина дуги в градусах) вводим отрицательное значение $-\theta$ (направление вращения здесь определяется правилом правого винта). *OK*.

Отображаем на экране все объекты (команда $U_M > Plot > Multi-Plots$) и устанавливаем подходящий масштаб (кнопка *Fit View* панели управления видом).

8. Определить траекторию вытягивания путем построения прямой линии по точкам 1 и 2: $M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Line$.

Указываем точки 1 и 2, *OK*.

9. Построить цилиндрическую поверхность путем вытягивания дуги вдоль заданной траектории: $M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Lines > Along Lines$.

Сначала указываем дугу (линия L1), а затем после нажатия кнопки *OK* – траекторию (линия L2). *OK*.

10. Удалить вспомогательные геометрические объекты (т.е. линию L2 и принадлежащие ей точки 1 и 2): *M_M>Preprocessor>Modeling>Delete>Line and Below.*

Указываем линию L2, *OK.*

Для отображения поверхности выбираем последовательность *U_M>Plot>Areas* (рисунок 1.2).

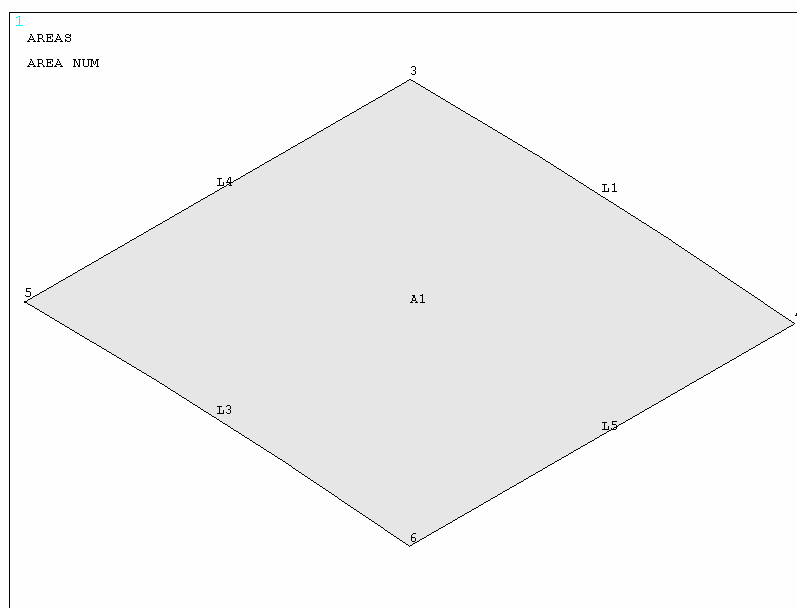


Рисунок 1.2 – Цилиндрическая поверхность

11. Разбить поверхность на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool.*

Следует отметить, что для получения результатов приемлемой точности здесь достаточно построить сетку 8x8.

Для этого нажимаем кнопку *Set* строки «Global» и в поле «No. of element divisions» (число делений линий на элементы) вводим значение 8.

Затем в списке «Mesh» в качестве объектов для разбиения выбираем Areas (поверхности), в поле «Shape» (форма элементов) указываем Quad (четырёхугольная).

Устанавливаем режим Mapped (регулярная сетка).

Для генерации сетки нажимаем кнопку *Mesh* и указываем поверхность A1, *OK.*

12. Задать граничные условия симметрии: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>Symmetry B.C. >...with Area.*

Сначала указываем линию L1 (см. рисунок 1.2), выбор фиксируем кнопкой *OK*.

Затем указываем прилегающую к линии поверхность A1, нажимаем *Apply* для продолжения работы с данной командой.

Условия симметрии на линии L4 задаются аналогично.

13. Задать граничные условия шарнирного опирания на прямолинейной кромке: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

Указываем линию L5 (см. рисунок 1.2) и после нажатия кнопки *OK* выбираем компоненту UX (поступательное перемещение по оси x). *Apply*.

Поскольку при задании граничных условий на линиях можно выбрать только одну компоненту (или сразу все), необходимо повторить данные действия еще дважды, указывая компоненты UY и UZ.

14. Задать сосредоточенную силу в центре панели: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints*.

Поскольку значение силы нам неизвестно, зададим единичную нагрузку, например $P = 1$ кН.

Сначала указываем точку 3 (см. рисунок 1.2), *OK*.

Затем в списке «Direction of force/moment» (направление силы/момента) выбираем строку FY и в поле «Force/moment value» (значение силы/момента) вводим число -250 (знак минус говорит о том, что сила действует против оси).

Напомним, что здесь мы задаем не полную силу, а $P/4$.

15. Выполнить линейный статический анализ (первый этап).

Как отмечалось ранее, задача начальной устойчивости решается в два этапа. Сначала проводится линейный статический анализ, а затем решается проблема собственных значений.

Проверяем, установлен ли статический анализ (команда *M_M>Solution>Analysis Type>New Analysis*).

Далее в меню выбираем последовательность *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls*; включаем опцию «Calculate prestress effects» для создания начальных напряжений.

И, наконец, посылаем задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

По окончании статического анализа следует выйти из решателя (команда *M_M>Finish*).

16. Выполнить анализ начальной устойчивости (второй этап).

Сначала с помощью команды *M_M>Solution>Analysis Type>New Analysis* выбираем тип анализа Eigen Buckling (анализ начальной устойчивости).

Далее для задания опций анализа используем команду: *M_M>Solution>Analysis Type>Analysis Options*.

В поле «No. of modes to extract» (число извлекаемых собственных значений и векторов) вводим число 1.

Остальные значения данной и следующей диалоговых панелей принимаем по умолчанию (нажатием кнопки *OK*).

Снова посылаем задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

17. Определить критическую силу: *M_M>General Postproc>Result Summary*.

На экране появляется список, где во втором столбце, содержатся собственные значения (в нашем случае только одно, наименьшее):

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	10.620	1	1	1

Для рассматриваемой задачи $\lambda_1 = 10,62$ и, следовательно,

$$P_{кр} = \lambda_1 P = 10,62 \text{ кН.}$$

Можно ли доверять данному решению? Ответить на этот вопрос можно лишь, выполнив нелинейный анализ.

18. Отобразить на экране дисплея форму потери устойчивости.

Сначала нужно считать из файла результаты расчета, соответствующие второму этапу: *M_M>General Postproc>Read Results>Last Set*.

Далее для вывода данного изображения используем команду *M_M>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape*.

Форма потери устойчивости рассматриваемой конструкции представлена на рисунке 1.3.

Видно, что панель при потере устойчивости прогибается навстречу приложенной силы. Это связано с тем, что собственный вектор (характеризующий в данном случае форму потери устойчивости) даже после нормирования определяется с точностью до знака.

Таким образом, абсолютные значения перемещений, а также их знак здесь не имеют физического смысла.

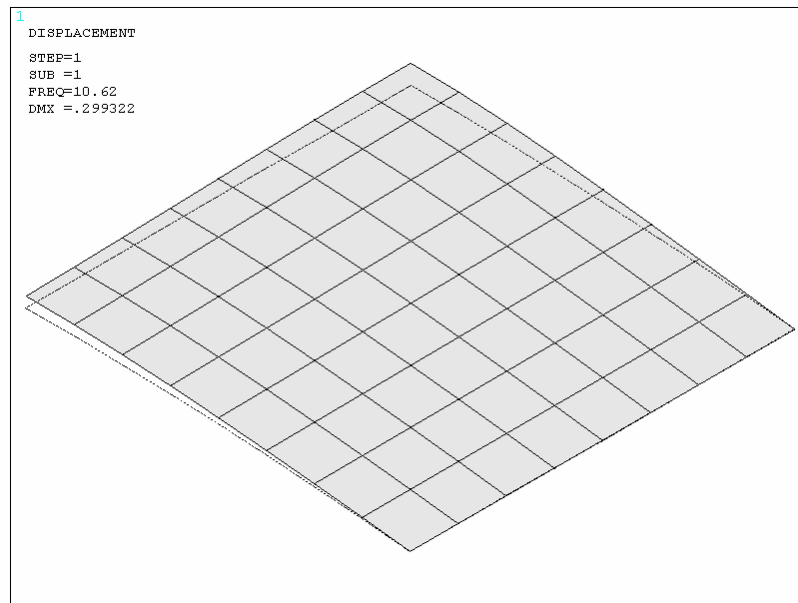


Рисунок 1.3 – Форма потери устойчивости

II. Геометрически нелинейный анализ (задание приращений нагрузки).

19. Увеличить значение сосредоточенной силы: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints.*

Анализ начальной устойчивости показывает, что критическая нагрузка значительно превышает заданную силу в 1 кН.

Увеличим нагрузку до 4 кН.

Для этого сначала указываем точку 3, а затем для силы FY вместо значения -250 вводим -1000. *OK.*

20. Выполнить геометрически нелинейный анализ.

Сначала с помощью команды *M_M>Solution>Analysis Type>New Analysis* устанавливаем статический анализ (Static).

Далее меняем опции анализа: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls.*

При этом появляется диалоговая панель с большим количеством вкладок. Выбираем вкладку «Basic» (рисунок 1.4).

Для учета больших перемещений в списке «Analysis Options» выбираем значение Large Displacement Static.

Время в конце шага нагружения (поле «Time at end of loadstep» раздела «Time Control») задаем равным 1.

Таким образом, время t будет меняться в интервале от 0 до 1. В статическом анализе данная переменная является фактически параметром нагружения, т.е. нагрузка в момент времени t будет определяться равенством

$${}^tP = P \cdot t,$$

где P – заданная нагрузка (в нашем случае 4 кН).

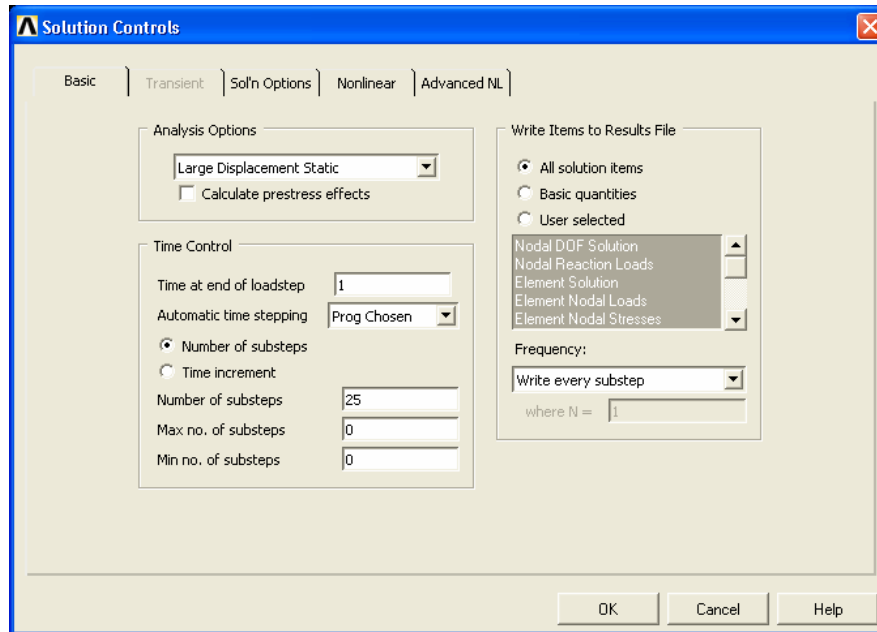


Рисунок 1.4 – Задание опций нелинейного анализа

С целью повышения точности расчета интервал изменения параметра t (процесс нагружения) делится на ступени (или подшаги) нагружения.

В поле «Number of substeps» раздела «Time Control» вводим число подшагов, например 25.

Здесь следует отметить, что чем больше подшагов, тем точнее получается решение. Обычно число подшагов выбирается из тех соображений, чтобы в пределах каждого подшага перемещения были малы по сравнению с размерами тела.

И, наконец, для сохранения промежуточных результатов на всех подшагах в списке «Frequency» (частота записи выходных величин в файл результатов) выбираем значение Write every substep.

После задания опций нелинейного анализа задача посылается на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

21. Определить верхнюю критическую нагрузку.

Входим в постпроцессор истории нагружения: *M_M>TimeHist Postpro*.

При этом автоматически появляется диалоговая панель для работы с переменными (рисунок 1.5). По умолчанию здесь определена только одна переменная TIME (время).

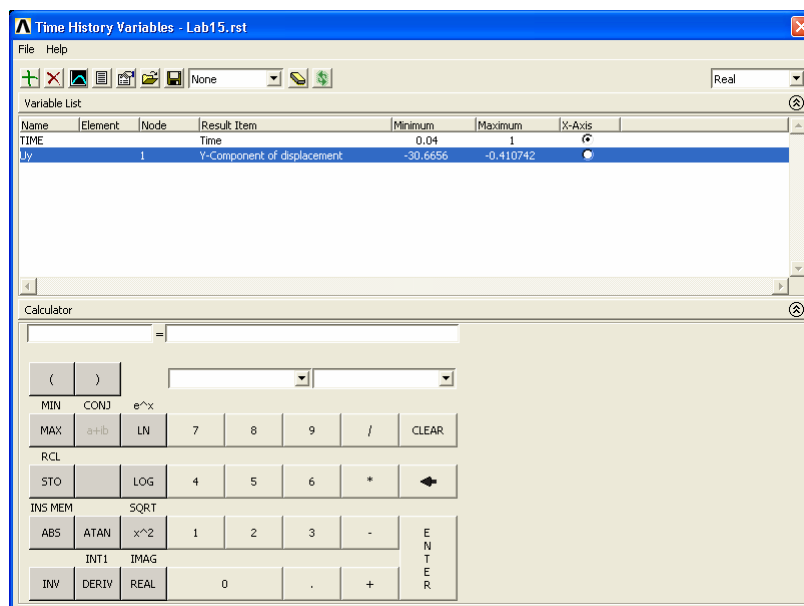


Рисунок 1.5 – Работа с переменными в постпроцессоре истории нагружения

Для задания новой переменной нажимаем кнопку *Add Data* (первая слева в панели инструментов).

При этом появляется диалоговая панель, где в списке выходных величин «Result Item» последовательно указываем *Nodal Solution* > *DOF Solution* > *Y-Component of displacement* (перемещение по оси y).

В поле «Variable Name» (имя переменной) вводим *Uy*. *OK*.

Далее на экране при помощи мыши указываем узел в центре панели, где приложена сила. *OK*.

После этого в списке существующих переменных появляется новая запись.

Для просмотра значений заданной переменной в текстовом формате ее нужно указать в списке и нажать кнопку *List Data* (четвертая слева в панели инструментов):

TIME	Uy
0.40000E-01	-0.410742
0.80000E-01	-0.838741
0.14000	-1.51760
0.23000	-2.63748
0.36500	-4.65229
0.45613	-6.44437
0.54725	-9.31290
0.55971	-10.2799
0.56531	-10.9587
0.56645	-10.8204
0.56758	-27.2309
0.56928	-27.2438
0.57184	-27.2678
0.57567	-27.3037
0.58141	-27.3574
0.59003	-27.4373

0.60296	-27.5559
0.62235	-27.7312
0.65144	-27.9886
0.69508	-28.3628
0.76053	-28.9001
0.85871	-29.6589
1.0000	-30.6656

Видно, что после $t = 0,56645$ происходит скачкообразное увеличение прогиба, т.е. оболочка теряет устойчивость с перескоком. Иногда при этом значении силы решение расходится.

Таким образом, верхняя критическая нагрузка $P_{кр}^B$ для рассматриваемой конструкции составляет $4 \cdot 0,56645 = 2,27$ кН, что почти в пять раз меньше критической нагрузки $P_{кр}^0$, найденной методом начальной устойчивости.

Таким образом, метод начальной устойчивости для решения подобных задач не применим!!!

22. Построить кривую равновесных состояний.

Для изображения зависимости «сила – перемещение» в привычном виде введем новые переменные на основе существующих с помощью калькулятора диалоговой панели постпроцессора истории нагружения (рисунок 1.5).

В первом поле калькулятора перед знаком равенства вводим имя новой переменной: P.

Ниже расположены два списка, причем из второго можно выбирать введенные ранее переменные. Выбираем TIME.

Данная величина появляется в поле после знака равенства.

Далее, используя кнопки калькулятора, выполняем умножение на 4 (т.к. заданная сила равна 4 кН).

Завершаем ввод нажатием кнопки *Enter*.

Для следующей переменной задаем имя W, затем в поле после знака равенства ставим минус и в расположенном ниже списке выбираем значение Uy.

В столбце «X-Axis» списка «Variable List» для переменной W устанавливаем признак использования ее в качестве оси абсцисс.

Далее в этом же списке указываем переменную P и нажимаем кнопку *Graph Data* (третья слева в панели инструментов).

Отображаемый при этом график представлен на рисунке 1.6.

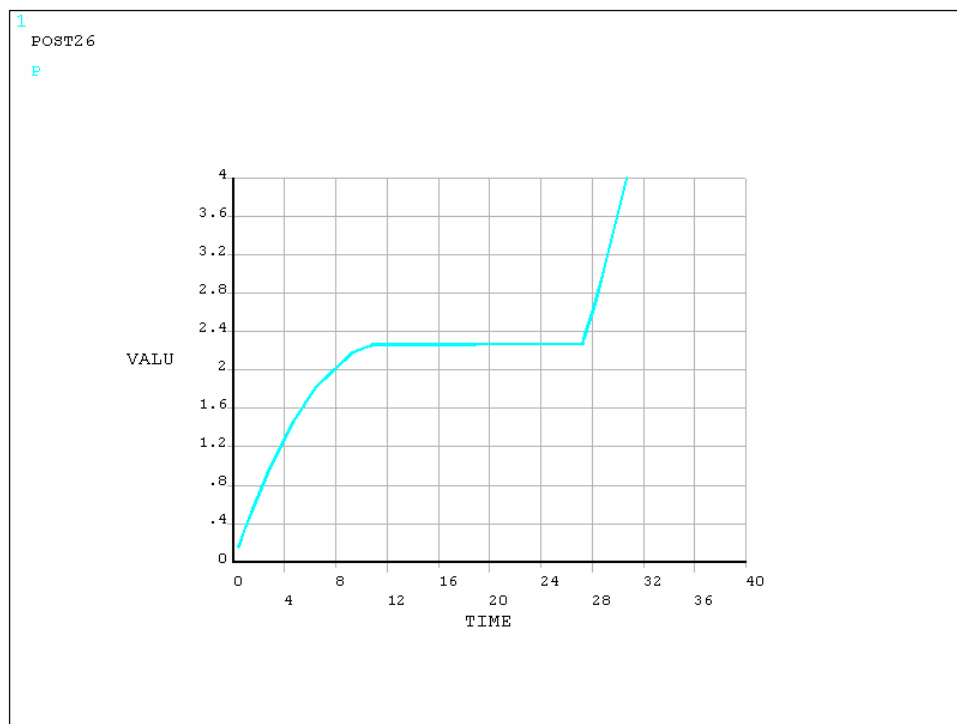


Рисунок 1.6 – Зависимость сила – перемещение, получаемая при задании приращений нагрузки

Видно, что при задании приращений нагрузки нельзя построить полную кривую равновесных состояний, поскольку данный прием не позволяет проходить через предельные точки. В этих точках матрица тангенциальной жесткости сингулярная, и решение либо расходится, либо происходит перескок на другую устойчивую ветвь кривой равновесных состояний (как в нашем случае).

III. Геометрически нелинейный анализ (задание приращений перемещений).

23. Удалить нагрузку: *M_M>Solution>Define Loads>Delete>Structural>Force/Moment>On Keypoints.*

Указываем точку 3, *OK.*

После этого появляется диалоговая панель, где необходимо выбрать направление удаляемой силы (в нашем случае FY, хотя можно оставить значение по умолчанию ALL, означающее, что будут удалены все силы, действующие в указанной точке). *OK.*

24. Вместо силы приложить в центральной точке перемещение: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints.*

Снова указываем точку 3, *OK.*

В списке «DOFs to be constrained» выбираем компоненту UY и в поле «Displacement value» вводим отрицательное значение -30 (в мм).

ОК.

25. Выполнить геометрически нелинейный анализ.

Заданные ранее опции анализа в основном нас устраивают. Поменяем лишь число подшагов и отключим опцию автоматического изменения шага: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls*.

Выбираем вкладку «Basic» и в поле «Number of substeps» вводим число 30. В поле «Automatic time stepping» (автоматическое изменение шага по времени) вместо значения Prog chosen (выбирается программой) указываем Off (отключить). При этом будет использоваться постоянный шаг по времени (нагрузке).

Посылаем задачу на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

26. Построить кривую равновесных состояний.

Входим в постпроцессор истории нагружения: *M_M>TimeHist Postpro*.

Для задания новой переменной нажимаем кнопку *Add Data*.

В древовидной структуре «Result Item» последовательно указываем *Reaction Forces>Structural Forces>Y-Component of force* (реакция по оси y).

В поле «Variable Name» вводим имя Ry. ОК.

Далее на экране мышью указываем узел в центре панели, где приложена сила. ОК.

С помощью калькулятора определим новые переменные.

В первом поле калькулятора перед знаком равенства вводим имя W.

После знака равенства вводим число 30 (заданное перемещение) и нажимаем кнопку умножения калькулятора. После этого из списка калькулятора выбираем TIME. Завершаем ввод нажатием кнопки *Enter*.

Для следующей переменной определяем имя P, затем в поле после знака равенства вводим: -0.004 (для получения значений силы для полной конструкции в кН), затем нажимаем кнопку умножения и в списке выбираем переменную Ry.

В столбце «X-Axis» списка «Variable List» для переменной W устанавливаем признак использования ее в качестве оси абсцисс.

Далее выбираем переменную P и нажимаем кнопку *Graph Data*.

Получаемый в этом случае график показан на рисунке 1.7.

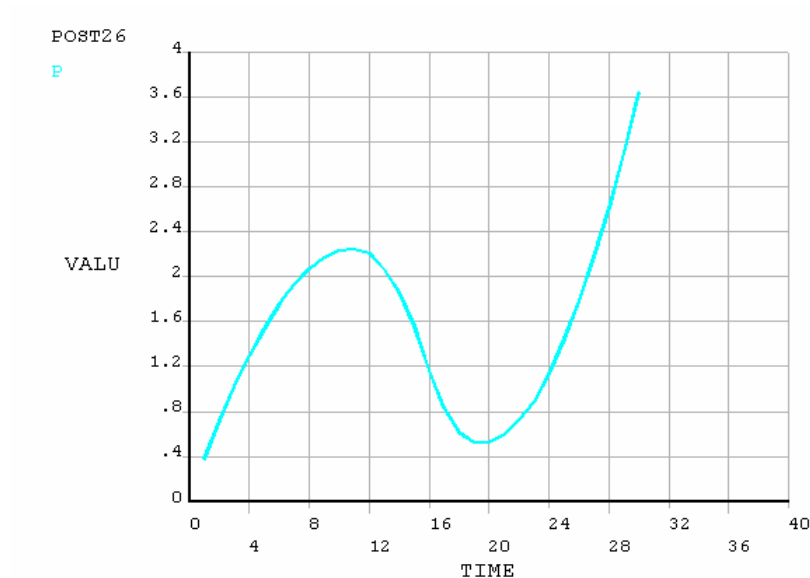


Рисунок 1.7 – Зависимость сила – перемещение, получаемая при задании приращений перемещений

27. Определить верхнюю и нижнюю критические нагрузки.

Оставаясь в постпроцессоре истории нагружения, нажимаем кнопку *List Data*:

TIME	P
0.33333E-01	0.378526
0.66667E-01	0.720438
0.10000	1.02700
0.13333	1.29922
0.16667	1.53774
0.20000	1.75923
0.23333	1.93177
0.26667	2.06904
0.30000	2.16991
0.33333	2.23118
0.36667	2.24776
0.40000	2.21172
0.43333	2.06778
0.46667	1.86789
0.50000	1.56015
0.53333	1.17250
0.56667	0.828485
0.60000	0.617896
0.63333	0.526659
0.66667	0.525477
0.70000	0.596451
0.73333	0.729056
0.76667	0.890694
0.80000	1.13421
0.83333	1.44735
0.86667	1.78666
0.90000	2.17501
0.93333	2.61268
0.96667	3.10033
1.0000	3.63885

Анализ полученных данных показывает, что сила сначала возрастает до некоторого значения, которое характеризует верхнюю критическую нагрузку, затем убывает до значения, соответствующего нижней критической нагрузке, после чего снова возрастает.

Таким образом, для рассматриваемой конструкции $P_{кр}^B = 2,25$ кН и $P_{кр}^H = 0,53$ кН. Здесь для верхней критической нагрузки получается более точное значение.

Напомним, что данный прием имеет ряд существенных ограничений. Он применим лишь в случае действия сосредоточенной нагрузки и не позволяет определять участки кривой равновесных состояний, не однозначные по перемещению.

IV. Использование метода длины дуги.

28. Удалить заданное в центральной точке перемещение: *M_M>Solution>Define Loads>Delete>Structural>Displacement>On Keypoints.*

Указываем точку 3, *OK.*

В списке «DOFs to be deleted» выбираем UY (направление удаляемого перемещения), *OK.*

29. Снова задать сосредоточенную силу в центре панели: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints.*

Здесь также необходимо сначала указать точку 3, а затем для силы FY ввести значение -1000.

30. Включить метод длины дуги: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls.*

Выбираем вкладку «Advanced NL» и активизируем опцию «Active arc-length method». Появляющееся при этом предупреждение можно проигнорировать; закрываем его кнопкой *Close.*

В поле «Max multiplier» (максимальный множитель) вводим значение 4, а в поле «Min multiplier» (минимальный множитель) – значение 0.1.

Данные параметры используются для задания пределов изменения длины дуги от одного подшага к другому, т.е. в случае хорошей сходимости длина дуги может за один подшаг увеличиться максимум в четыре раза, а при плохой – уменьшиться максимум в десять раз.

OK.

31. Выполнить нелинейный анализ с использованием метода длины дуги: *M_M>Solution>Solve>Current LS.*

32. Построить кривую равновесных состояний.

Входим в постпроцессор истории нагружения: *M_M>TimeHist Postpro.*

Для определения переменной нажимаем кнопку *Add Data.*

В качестве выходной величины выберем перемещение по оси *y* (*Nodal Solution>DOF Solution>Y-Component of displacement*) в узле в центре панели. Присвоим ей имя *Uy.*

В первом поле калькулятора перед знаком равенства вводим имя новой переменной *P.* Из списка калькулятора выбираем *TIME* и выполняем умножение данной переменной на 4. Завершаем ввод нажатием кнопки *Enter.*

Для следующей переменной задаем имя *W,* затем в поле после знака равенства ставим минус и в списке выбираем значение *Uy.*

В списке «*Variable List*» для переменной *W* устанавливаем признак использования ее в качестве оси абсцисс.

Далее выбираем переменную *P* и нажимаем кнопку *Graph Data.*

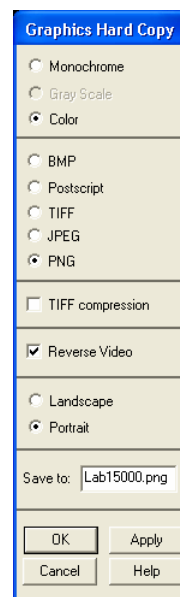
Кривая равновесных состояний будет иметь точно такой же вид, как и на рисунке 1.7.

33. Для отчета по работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M>File>Write DB Log File.*

Вводим имя *Lab1.lgw.*

34. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

Дополнительное задание: найти верхнюю и нижнюю критические силы для цилиндрической панели, представленной на рисунке 1.1, но с толщиной $h = 6,3$ мм. Кривую равновесных состояний записать в файл *Lab1000.png:* *U_M>PlotCtrls>Hard Copy>To File.* При этом использовать установки, как показано на рисунке справа.



2 ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПАНЕЛИ ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ MSC.PATRAN/NASTRAN

Исходные данные: цилиндрическая панель нагружена сосредоточенной силой P в центре, как показано на рисунке 2.1; оболочка шарнирно оперта вдоль ее прямолинейных кромок и свободна вдоль криволинейных; материал линейно-упругий изотропный (модуль упругости $3,1 \cdot 10^3$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3).

Допущение: отношения наименьшей длины стороны панели и радиуса кривизны оболочки к толщине больше 10, что позволяет использовать для ее моделирования оболочечные элементы.

Цель: 1) определить критическую нагрузку методом начальной устойчивости; 2) выполнить анализ с учетом геометрической нелинейности путем задания приращений нагрузки и определить верхнюю критическую нагрузку (сравнить с предыдущим решением); 3) выполнить анализ с учетом геометрической нелинейности путем задания приращений перемещений и определить верхнюю и нижнюю критические нагрузки; 4) исследовать закритическое поведение панели методом длины дуги.

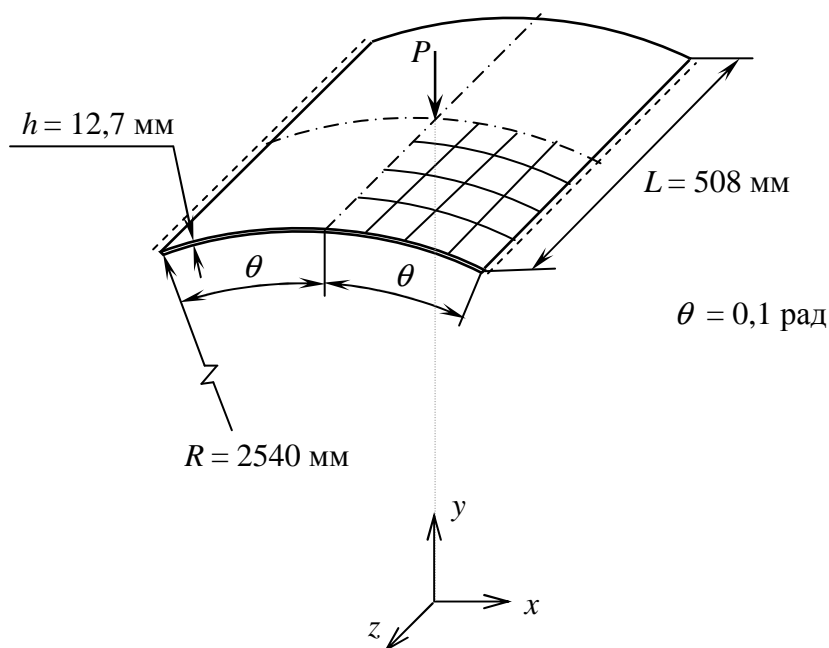


Рисунок 2.1 – Геометрия оболочки

Благодаря двойной симметрии конструкции и нагрузки здесь можно ограничиться рассмотрением лишь четверти панели. При этом вместо силы P нужно будет прикладывать силу $P/4$.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

I. Метод начальной устойчивости.

1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных: *File>New*.
В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab2.db, *OK*.
2. Задать начальные установки.
В разделе «Tolerance» диалоговой панели «New Model Preference» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 254 (в мм), *OK*.
3. Построить точку в центре цилиндрической панели.
Выбираем приложение «Geometry» и для построения точки по трем координатам устанавливаем сочетание *Create/Point/XYZ*.
Вводим:
«Point Coordinate List»: [0 2540 0]
Apply.
Включаем нумерацию геометрических объектов (кнопка *Label Control* панели инструментов).
4. Построить дугу окружности путем вращения точки 1 относительно оси Z на угол θ .
Устанавливаем сочетание *Create/Curve/Revolve*.
Вводим:
«Axis»: Coord 0.3 (ось вращения – ось Z)
«Total Angle»: -5.73 (полный угол, град)
«Offset Angle»: 0 (отступ угла, град).
Направление вращения здесь определяется правилом правого винта.
Активизируем поле «Point List» и в графическом окне указываем точку 1.
Если отключена опция «Auto Execute», нажимаем *Apply*.
С помощью кнопок *Iso 1 View* и *Smooth Shaded* панели инструментов устанавливаем изометрическую проекцию и изображение модели с закрашенными гранями и тенями.
5. Построить цилиндрическую поверхность путем вытягивания дуги в заданном направлении.
Устанавливаем сочетание *Create/Surface/Extrude*.

В поле «Translation Vector» вводим компоненты вектора смещения (в мм): <0 0 254>.

Активизируем поле «Curve List» и в графическом окне указываем кривую 1 (построенную на предыдущем шаге дугу).

Если отключена опция «Auto Execute», нажимаем *Apply*.

6. Разбить поверхность на конечные элементы.

Следует отметить, что для получения результатов приемлемой точности здесь достаточно построить сетку 8x8.

Выбираем приложение «Elements».

Сначала для задания равномерного расположения опорных точек сетки устанавливаем сочетанием Create/Mesh Seed/Uniform.

Используя опцию «Number of Elements», вводим число элементов: Number = 8.

Активизируем поле «Curve List» и указываем две смежные кромки. При необходимости нажимаем *Apply*.

Далее для нанесения сетки на поверхность устанавливаем сочетание Create/Mesh/Surface.

Выбираем:

«Elem Shape»: Quad (четырёхугольная форма)

«Mesher»: IsoMesh (генератор регулярных изосеток)

«Topology»: Quad4 (топология – четырёхугольник с четырьмя узлами).

Активизируем поле «Surface List» и в графическом окне указываем поверхность 1, *Apply*.

7. Задать свойства материала.

Запускаем приложение «Materials» и выбираем сочетание Create/Isotropic/Manual Input.

В поле «Material Name» вводим имя материала, например mater.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* и вводим свойства:

«Elastic Modulus» = 3.1e3 (модуль упругости, МПа)

«Poisson Ratio» = 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.


Нажимаем кнопку *Apply*.

8. Определить свойства элементов.

Выбираем приложение «Properties». Для задания свойств оболочечных элементов устанавливаем сочетание Create/2D/Shell.

В поле «Property Set Name» вводим имя набора свойств, например panel.

Не меняя установленные по умолчанию опции, нажимаем кнопку *Input Properties*.

Нажимаем кнопку  и из списка существующих материалов выбираем mater.

В поле «Thickness» вводим значение толщины: 12.7 (в мм).

Закрываем окно кнопкой *OK*.

Нажимаем кнопку *Select Application Region* и указываем поверхность 1.

Затем последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

9. Задать граничные условия симметрии.

Напомним, что здесь для узлов, расположенных в плоскости симметрии, необходимо закрепить поступательное перемещение в направлении, перпендикулярном этой плоскости, и два угла поворота относительно осей, параллельных данной плоскости.

Сначала при помощи кнопки *Top view* панели инструментов устанавливаем вид сверху, т.е. на плоскость *XZ*.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений выбираем сочетание *Create/Displacement/Nodal*.


В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например sum_x.

Нажимаем кнопку *Input Data* (ввод данных).

В поле «Translations» (поступательные перемещения) вводим <0,,>, что соответствует $u_x = 0$.

В поле «Rotations» (углы поворота) вводим <,0,0>, что соответствует $\vartheta_y = \vartheta_z = 0$. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: *Geometry*.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кривая или кромка) и указываем левую кромку (Surface 1.3).

Последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

Аналогично определяем второй набор граничных условий симметрии для узлов, расположенных в плоскости *XY*. Присвоим ему имя sum_z.

При этом для поступательных перемещений вводим <,,0>, а для углов поворота – <0,0,>.

В качестве области приложения здесь выбираем верхнюю кромку (Surface 1.4 или Curve 1).

10. Задать граничные условия шарнирного опирания на прямолинейной кромке.

В поле «New Set Name» вводим новое имя, например hinge.

Нажимаем кнопку *Input Data*.

В поле «Translations» вводим $\langle 0,0,0 \rangle$, *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region* и указываем правую кромку (Surface 1.1).

Последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

11. Задать сосредоточенную силу в центре панели.

Поскольку значение силы нам неизвестно, зададим единичную нагрузку, например $P = 1$ кН.


В том же приложении выбираем сочетание Create/Force/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например load.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Force» для задания силы, действующей в отрицательном направлении оси Y , вводим следующие компоненты (в Н): $\langle 0 -250 0 \rangle$. *OK*.

Необходимо напомнить, что здесь мы задаем не полную силу, а $P/4$.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем левую верхнюю вершину (Point 1, Curve 1.2 или Surface 1.3.1).

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

В конце устанавливаем изометрическую проекцию.

12. Выполнить анализ начальной устойчивости.

Запускаем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание Analyze/Entire Model/Full Run.

Для изменения типа решения нажимаем кнопку *Solution Type* и выбираем Buckling (анализ начальной устойчивости), *OK*.

Для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

13. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание Access Results/Attach XDB/Result Entities.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл lab2.xdb, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

14. Определить критическую силу.

Запускаем приложение «Results». Для быстрого изображения результатов используем сочетание *Create/Quick Plot*.

Собственное значение здесь приводится в списке «Select Result Cases» после названия второго случая результатов:

$$\text{Factor} = 10.646.$$

Таким образом, для рассматриваемой задачи $\lambda_1 = 10,65$ и, следовательно,

$$P_{\text{кр}} = \lambda_1 P = 10,65 \text{ кН}.$$

Можно ли доверять данному решению? Ответить на этот вопрос можно лишь, выполнив нелинейный анализ.

15. Отобразить на экране дисплея форму потери устойчивости.

В списке «Select Result Cases» указываем второй случай результатов.

В списке «Select Deformation Result» в качестве результата для изображения деформированного состояния модели выбираем строку *Eigenvectors, Translational*. *Apply*.

Форма потери устойчивости рассматриваемой конструкции представлена на рисунке 2.2.

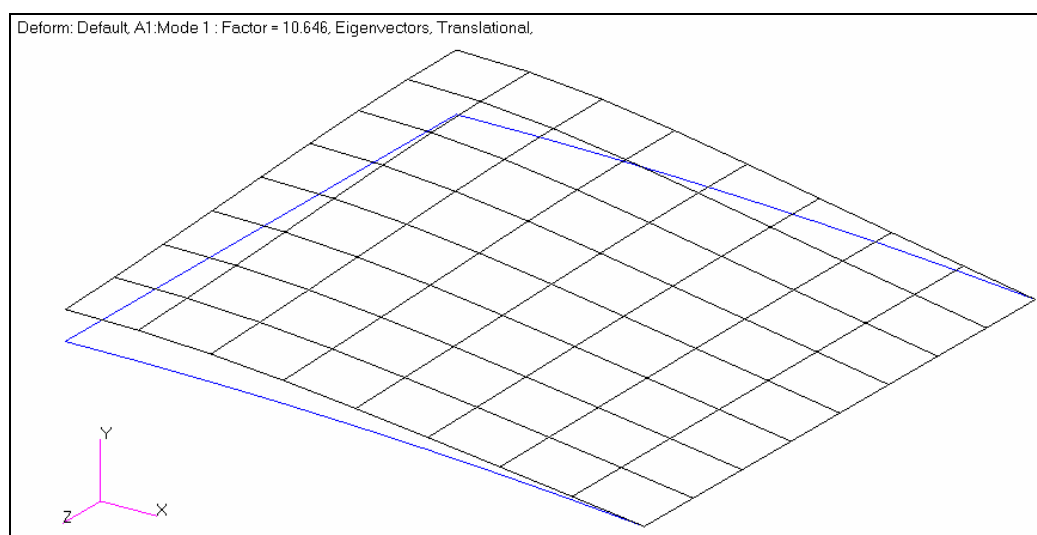


Рисунок 2.2 – Форма потери устойчивости

Видно, что панель при потере устойчивости прогибается навстречу приложенной силы. Это связано с тем, что собственный вектор (характери-

зующий в данном случае форму потери устойчивости) даже после нормирования определяется с точностью до знака.

Таким образом, абсолютные значения перемещений, а также их знак здесь не имеют физического смысла.

II. Геометрически нелинейный анализ (задание приращений нагрузки).

16. Увеличить значение сосредоточенной силы.

Анализ начальной устойчивости показывает, что критическая нагрузка значительно превышает заданную силу в 1 кН.

Увеличим нагрузку до 4 кН.

Запускаем приложением «Loads/BCs» и для изменения нагрузки выбираем сочетание Modify/Force/Nodal.

В списке «Select Set to Modify» указываем набор load.

Нажимаем кнопку *Modify Data* и в поле «Force» вводим <0 -1000 0>. *OK*.

В конце нажимаем *Apply*.

17. Выполнить геометрически нелинейный анализ.

Запускаем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание Analyze/Entire Model/Full Run.

Для изменения типа решения нажимаем кнопку *Solution Type* и выбираем Nonlinear Static (нелинейный статический анализ), *OK*.

Затем для модификации расчетного случая нажимаем кнопку *Subcases*.

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем Default. Данное имя должно появиться в поле «Subcase Name».

Для изменения параметров расчетного случая используем кнопку *Subcase Parameters*.

В поле «Number of Load Increments» вводит число ступеней (или шагов) нагружения, например 25. *OK*.

Для включения опции вывода промежуточных решений нажимаем кнопку *Output Requests* (запросы по выводу). В выпадающем меню «Form Type» (тип окна) выбираем пункт Advanced (расширенный) и устанавливаем «Intermediate Output Option»: Yes (выводить результаты для каждого вычисленного шага нагружения). *OK*.

Последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.

И, наконец, для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

Появляющиеся здесь сообщения закрываем кнопкой *Yes*.

18. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание Access Results/Attach XDB/Result Entities.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл lab2.xdb, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

19. Определить верхнюю критическую нагрузку.

Запускаем приложение «Results». Для быстрого изображения результатов используем сочетание Create/Quick Plot.

В данном случае для каждого шага по нагрузке создается отдельный случай результатов. Случаи результатов представлены в списке «Select Result Cases», где указываются текущие значения нагрузки в процентах от полной (рисунок 2.3).

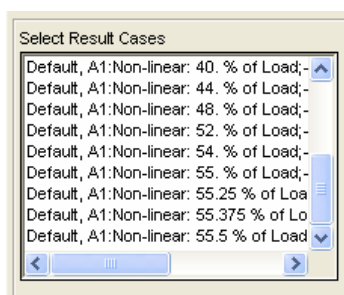


Рисунок 2.3 – Случаи результатов


Можно заметить, что решение достигло лишь 55,5% заданной нагрузки. При превышении этого значения решение расходится, поскольку оболочка теряет устойчивость с перескоком.

Таким образом, верхняя критическая нагрузка $P_{кр}^B$ для рассматриваемой конструкции составляет $4 \cdot 0,555 = 2,22$ кН, что почти в пять раз меньше критической нагрузки $P_{кр}^0$, найденной методом начальной устойчивости.

Таким образом, метод начальной устойчивости для решения подобных задач не применим!!!

20. Построить кривую равновесных состояний.


Для построения двухмерного графика устанавливаем сочетание Create/Graph/Y vs X.

В разделе «Select Result Cases» выбираем сразу все случаи результатов, соответствующие различным ступеням нагружения (кнопка  должна быть отжата).

В списке «Select Y Results» в качестве выходной величины, отображаемой по оси ординат, выбираем Displacement, Translational (поступательные перемещения). Ниже в выпадающем меню «Quantity» указываем компоненту Magnitude (величина, т.е. длина вектора).

В меню «X» за ось абсцисс принимаем Global Variable (глобальную переменную).

Ниже в меню «Variable» выбираем пункт Percent of Load, тем самым, уточняя, что в качестве глобальной переменной будет использоваться нагрузка (с указанием значений в процентах от полной нагрузки).

Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

Активизируем поле «Select Nodes» и в графическом окне указываем узел в центре цилиндрической панели.

После нажатия кнопки *Apply* в отдельном окне появляется график зависимости прогиба в центре оболочки от нагрузки (рисунок 2.4).

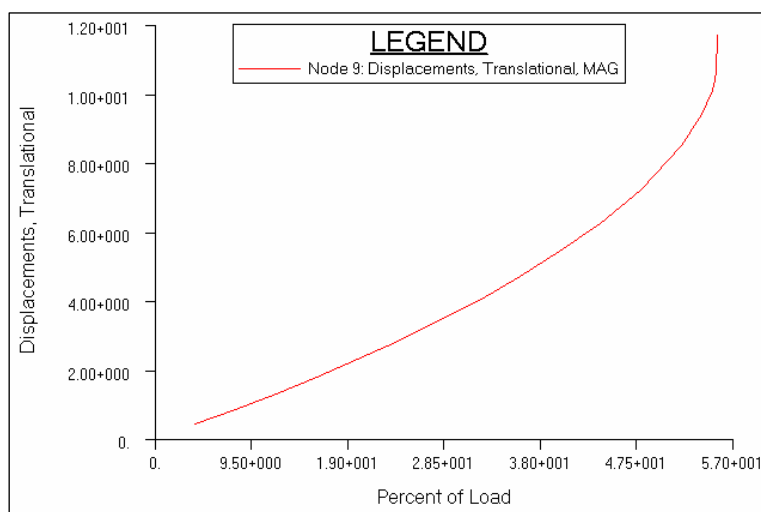


Рисунок 2.4 – Зависимость перемещение – сила, получаемая при задании приращений нагрузки

Отметим, что при задании приращений нагрузки нельзя построить полную кривую равновесных состояний, поскольку данный прием не позволяет проходить через предельные точки. В этих точках матрица тангенциальной жесткости сингулярная, и решение либо расходится (как в нашем слу-

чае), либо происходит перескок на другую устойчивую ветвь кривой равновесных состояний.

Для удаления окна с графиком устанавливаем сочетание Delete/Plots и в списке «Existing Plot Types» выбираем GRA_default_Graph, *Apply*.

III. Геометрически нелинейный анализ (задание приращений перемещений).

21. Удалить нагрузку.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и устанавливаем сочетание Delete/Force.

В списке существующих наборов «Existing Sets» указываем load, *Apply*.


22. Вместо силы приложить в центральной точке перемещение.

Для задания перемещений выбираем сочетание Create/Displacement/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например load.

Нажимаем кнопку *Input Data* и для задания смещения против оси Y в поле «Translations» вводим следующие компоненты вектора (в мм): $\langle 0, -30, 0 \rangle$, *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем центральную точку цилиндрической панели (Point 1, Curve 1.2 или Surface 1.3.1).

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

23. Выполнить геометрически нелинейный анализ.

Запускаем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание Analyze/Entire Model/Full Run.

С помощью кнопки *Solution Type* проверяем, выбрана ли опция Nonlinear Static (нелинейный статический анализ), *OK*.

Затем для модификации расчетного случая нажимаем кнопку *Subcases*.

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем Default. Данное имя должно появиться в поле «Subcase Name».

Для изменения параметров расчетного случая используем кнопку *Subcase Parameters*.

В поле «Number of Load Increments» вводит число ступеней (или шагов) нагружения: 30, *OK*.

С помощью кнопки *Output Requests* проверяем, установлена ли опция вывода промежуточных решений. *OK*.

Последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.

И, наконец, для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

Появляющиеся здесь сообщения закрываем кнопкой *Yes*.

24. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание *Access Results/Attach XDB/Result Entities*.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл *lab2.xdb*, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

25. Построить кривую равновесных состояний.

Запускаем приложение «Results» и устанавливаем сочетание *Create/Graph/Y vs X*.


В разделе «Select Result Cases» выбираем сразу все случаи результатов, соответствующие различным ступеням нагружения.

В списке «Select Y Results» в качестве выходной величины, отображаемой по оси ординат, выбираем *Constraint Forces, Translational* (силы реакций).

Ниже в выпадающем меню «Quantity» указываем компоненту *Y Component*.

В меню «X» за ось абсцисс принимаем *Global Variable* (глобальную переменную).


Ниже в меню «Variable» выбираем пункт *Percent of Load*.

Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

Активизируем поле «Select Nodes» и в графическом окне указываем узел в центре цилиндрической панели.

Далее с помощью кнопки-пиктограммы  устанавливаем вид для задания атрибутов изображения.

В выпадающем меню «Curve Fit» (подгонка кривой) для сглаживания кривой выбираем пункт *Least Squares* (метод наименьших квадратов).

И, наконец, для задания опций вычерчивания нажимаем кнопку-пиктограмму .

В поле «Scalar Factor» (коэффициент масштабирования) вводим отрицательное число: -0.004 (для получения значений силы для полной конструкции в кН).

Нажимаем *Apply*.

Отображаемый в этом случае график показан на рисунке 2.5.

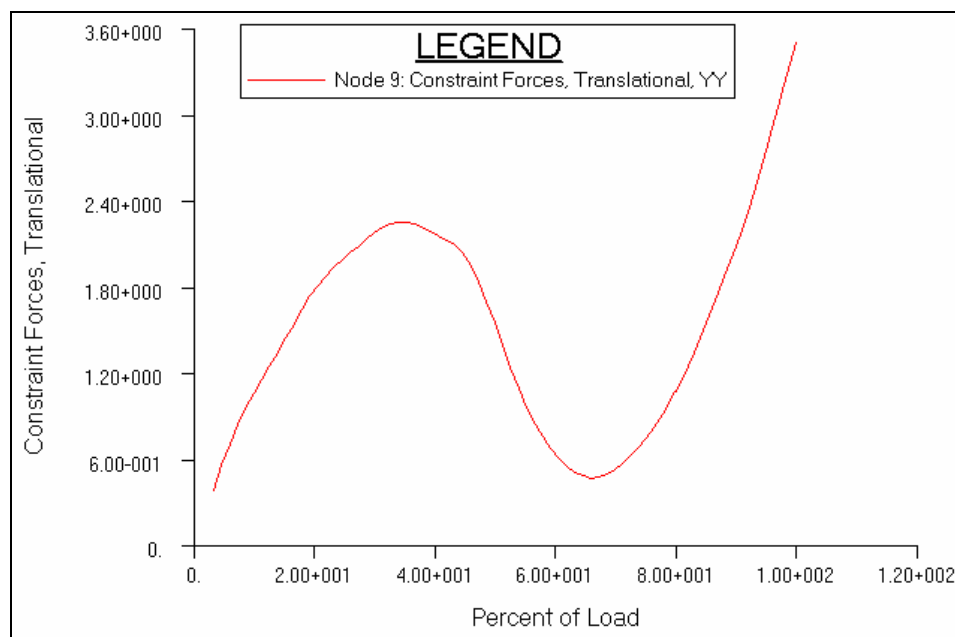


Рисунок 5 – Зависимость сила – перемещение, получаемая при задании приращений перемещений

Отметим, что по оси абсцисс здесь откладываются значения перемещения в процентах от заданного (т.е. 100% соответствует перемещению в 30 мм), а по оси ординат – значения центральной силы P (в кН).

Для удаления окна с графиком устанавливаем сочетание Delete/Plots и в списке «Existing Plot Types» выбираем GRA_default_Graph, *Apply*.


26. Определить верхнюю и нижнюю критические нагрузки.

Для формирования текстового отчета устанавливаем сочетание Create/Report/Append File.

В разделе «Select Result Cases» выбираем сразу все случаи результатов, соответствующие различным ступеням нагружения.

В списке «Select Report Result» указываем Constraint Forces, Translational (силы реакций).

В списке «Select Quantities» выбираем компоненту Y Component.


Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

В выпадающем меню «Target Entity» (целевые объекты) выбираем Nodes (узлы).

Активизируем поле «Select Nodes» и в графическом окне указываем узел в центре цилиндрической панели.

С помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

В поле «File Name» вводим новое имя файла отчета, например Lab2.rpt.

И, наконец, для задания опций вычерчивания нажимаем кнопку-пиктограмму .

В поле «Scalar Factor» (коэффициент масштабирования) вводим значение -0.004.

Нажимаем *Apply*.

Файл Lab2.rpt записывается в рабочую папку пользователя. Он будет содержать, в частности, следующие данные:

% of Load	Y Component
3.33333	0.385382
6.66667	0.752572
10.	1.087873
13.3333	1.276289
16.6667	1.544026
20.	1.782592
23.3333	1.993317
26.6667	2.036274
30.	2.177243
33.3333	2.208565
36.6667	2.279461
40.	2.161691
43.3333	2.090053
46.6667	1.955874
50.	1.784340
53.3333	1.168436
56.6667	0.842921
60.	0.627947
63.3333	0.467819
66.6667	0.470183
70.	0.527525
73.3333	0.719951
76.6667	0.852208
80.	1.065348
83.3333	1.420261
86.6667	1.749240
90.	2.081060
93.3333	2.463956
96.6667	3.022873
100.	3.496700

Анализ полученных данных показывает, что сила сначала возрастает до некоторого значения, которое характеризует верхнюю критическую на-

грузку, затем убывает до значения, соответствующего нижней критической нагрузке, после чего снова возрастает.

Таким образом, для рассматриваемой конструкции $P_{кр}^B = 2,28$ кН и $P_{кр}^H = 0,47$ кН. Здесь для верхней критической нагрузки получается более точное значение.

Напомним, что данный прием имеет ряд существенных ограничений. Он применим лишь в случае действия сосредоточенной нагрузки и не позволяет определять участки кривой равновесных состояний, не однозначные по перемещению.

IV. Использование метода длины дуги.

27. Удалить заданное в центральной точке перемещение.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и устанавливаем сочетание Delete/Displacement.

В списке существующих наборов «Existing Sets» указываем load, *Apply*.


28. Снова задать сосредоточенную силу в центре панели.

В том же приложении выбираем сочетание Create/Force/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например load.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Force» для задания силы, действующей в отрицательном направлении оси Y , вводим следующие компоненты (в Н): <0 -1000 0>. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем точку в центре цилиндрической панели (Point 1, Curve 1.2 или Surface 1.3.1).

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

29. Выполнить геометрически нелинейный анализ с использованием метода длины дуги.

Запускаем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание Analyze/Entire Model/Full Run.

С помощью кнопки *Solution Type* проверяем, выбрана ли опция Nonlinear Static (нелинейный статический анализ), *OK*.

Затем для модификации расчетного случая нажимаем кнопку *Subcases*.

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем Default.

Для изменения параметров расчетного случая используем кнопку *Subcase Parameters*.

В поле «Number of Load Increments» вводит число ступеней (или шагов) нагружения: 30, *OK*.

Далее для включения метода длины дуги нажимаем кнопку *Arc-Length Method* и устанавливаем флаг «Use Arc-Length Method».

В поле «Min. Adjust. ratio (MINALR)» (минимальный множитель) вводим значение 0.1, а в поле «Max. Adjust. ratio (MAXALR)» (максимальный множитель) – значение 4.

Данные параметры используются для задания пределов изменения длины дуги от одного шага к другому, т.е. в случае хорошей сходимости длина дуги может за один шаг увеличиться максимум в четыре раза, а при плохой – уменьшиться максимум в десять раз.

В поле «Max. Controlled Increment Steps» (максимально допустимое число шагов приращений) вводим число 100. *OK*.

С помощью кнопки *Output Requests* проверяем, установлена ли опция вывода промежуточных решений. *OK*.

Последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.

И, наконец, для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

Появляющиеся здесь сообщения закрываем кнопкой *Yes*.

30. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание Access Results/Attach XDB/Result Entities.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл lab2.xdb, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.


31. Построить кривую равновесных состояний.

Запускаем приложение «Results» и устанавливаем сочетание Create/Graph/ Y vs X.

В разделе «Select Result Cases» выбираем сразу все случаи результатов, соответствующие различным ступеням нагружения.

В списке «Select Y Results» в качестве выходной величины, отображаемой по оси ординат, выбираем Displacement, Translational (поступательные перемещения). Ниже в выпадающем меню «Quantity» указываем компоненту Magnitude.

В меню «X» за ось абсцисс принимаем Global Variable. Ниже в меню «Variable» выбираем пункт Percent of Load.


Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

Активизируем поле «Select Nodes» и в графическом окне указываем узел в центре цилиндрической панели.

Далее с помощью кнопки-пиктограммы  устанавливаем вид для задания атрибутов изображения.

В выпадающем меню «Curve Fit» для сглаживания кривой выбираем пункт Spline (сплайн).

Снимаем флаг «Sort Data By X Coordinate» (сортировать данные по X координате).

И, наконец, для задания опций вычерчивания нажимаем кнопку-пиктограмму .

В поле «Scalar Factor» (коэффициент масштабирования) вводим число 1.

Нажимаем *Apply*. В отдельном окне появляется график (рисунок 2.6).

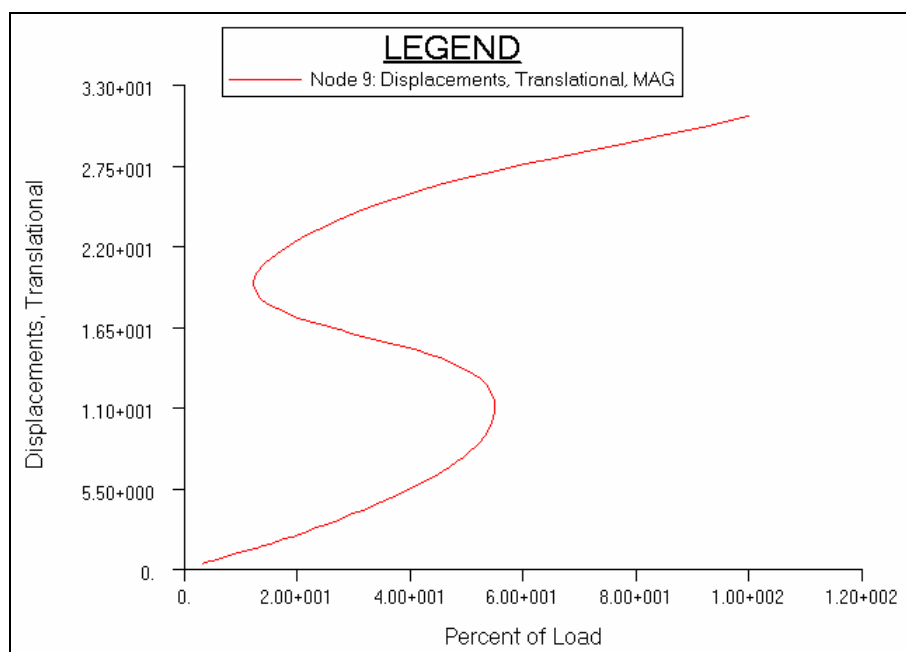
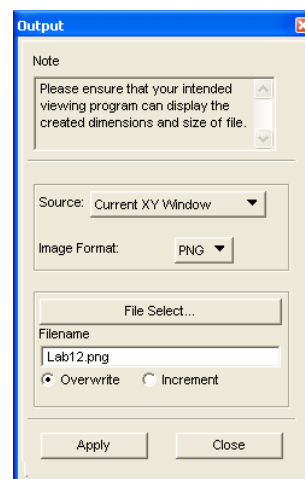


Рисунок 2.6 – Зависимость перемещение – сила, получаемая методом длины дуги

Отметим, что по оси абсцисс здесь откладываются значения силы в процентах от заданной (т.е. 100% соответствует силе в 4 кН), а по оси ординат – значения прогиба в центральной точке (в мм).

32. Выйти из программы: *File>Quit*.

Дополнительное задание: найти верхнюю и нижнюю критические силы для цилиндрической панели, представленной на рисунке 2.1, но с толщиной $h = 6,3$ мм. Кривую равновесных состояний записать в файл Lab2.png, применяя команду *File>Images* полосы меню. При этом использовать установки, как показано на рисунке справа.



3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРИТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОГОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS

Исходные данные: шарнирно опёртая по контуру пологая сферическая оболочка нагружена в вершине сосредоточенной силой P (рисунок 3.1). Материал линейно-упругий изотропный ($E = 6,895 \cdot 10^4$ МПа; $\mu = 0,3$).

Допущение: учитываются только осесимметричные формы потери устойчивости.

Цель: исследовать закритическое поведение конструкции методом длины дуги; построить зависимость сосредоточенной силы P от прогиба в центре w .

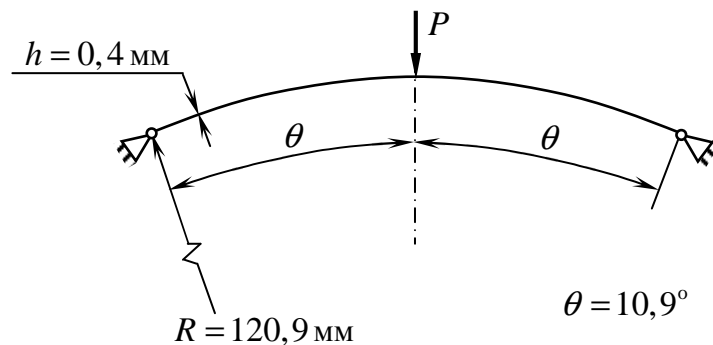


Рисунок 3.1 – Геометрия сферической оболочки

Рекомендации:

1. Для построения модели использовать элементы осесимметричной оболочки SHELL208.

2. Оболочку разбить на 25 конечных элементов.

3. Силу P принять равной 250 Н.

4. При задании опций анализа выбрать статический анализ с учётом больших перемещений (Large Displacement Static) и активизировать метод длины дуги (Activate arc-length method), при этом принять:

«Number of substep» = 100;

«Max multiplier» = 4;

«Min multiplie» = 0.002.

5. При построении графика $P = f(w)$ прогиб считать положительным. График записать в файл Lab3.png.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРОРЫВНОЙ МЕМБРАНЫ ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS

Исходные данные: круглая в плане мембрана, имеющая кольцевую острую насечку (рисунок 4.1), нагружена распределенным по нижней поверхности давлением p . Размеры данной конструкции представлены на рисунке 4.2. Юбка мембраны вставляется в жесткую оправку. Материал – технически чистый алюминий АД0 (модуль упругости $7 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3), условная диаграмма деформирования которого задана точками (таблица 4.1).

Допущения: поскольку конструкция мембраны и нагрузка симметричны относительно одной оси, можно рассматривать лишь одно сечение и свести трехмерную задачу в двухмерной осесимметричной. Диаграмма деформирования материала аппроксимируется кусочно-линейной зависимостью.

Цель: определить по расходимости итераций критическое значение давления, при котором происходит разрушение мембраны.

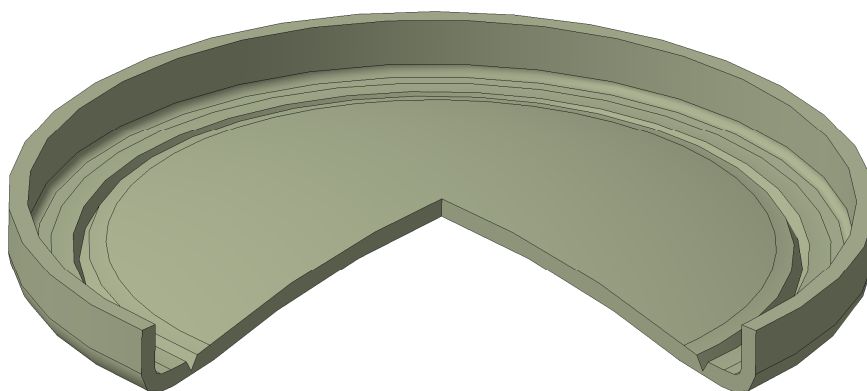


Рисунок 4.1 – Общий вид прорывной мембраны

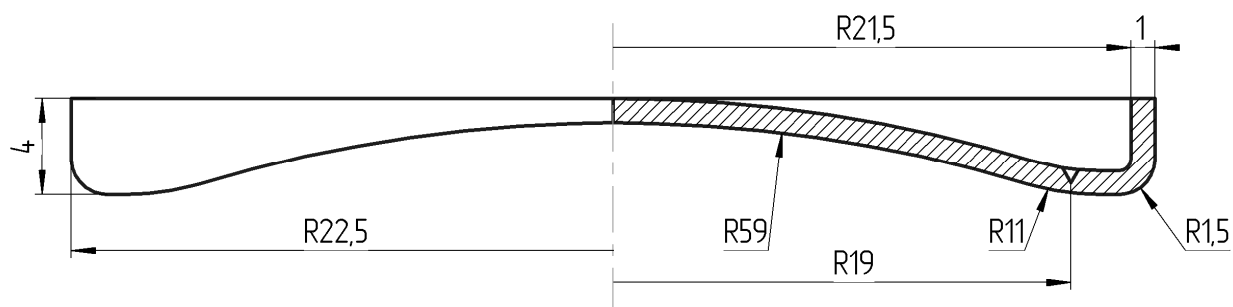


Рисунок 4.2 – Размеры мембраны

Таблица 4.1 – Зависимость условного напряжения от деформации

№	ε	σ , МПа
1	0,000554	38,8
2	0,01	49,9
3	0,04	60,0
4	0,10	69,3
5	0,20	75,6
6	0,30	78,1
7	0,40	79,0
8	0,50	78,6
9	0,55	77,4

Поскольку технически чистый алюминий обладает высокой пластичностью, в данной задаче ожидаются большие деформации. Поэтому здесь потребуется действительная диаграмма деформирования, выражающая зависимость действительного напряжения $\bar{\sigma}$ от логарифмической деформации $\bar{\varepsilon}$. Для их вычисления воспользуемся следующими формулами:

$$\bar{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon); \quad \bar{\varepsilon} = \ln(1 + \varepsilon).$$

Рассчитанные таким образом значения сведены в таблицу 4.2. Следует отметить, что отношение координат первой точки $\bar{\sigma}_1/\bar{\varepsilon}_1$ должно быть равно модулю упругости, поэтому после пересчета их значения оставлены без изменения. В противном случае при запуске задачи на счет ANSYS выдаст сообщение об ошибке.

Таблица 4.2 – Зависимость действительного напряжения от логарифмической деформации

№	$\bar{\varepsilon}$	$\bar{\sigma}$, МПа
1	0,000554	38,8
2	0,00954	50,4
3	0,0389	62,5
4	0,0956	76,3
5	0,1827	90,8
6	0,2628	101,6
7	0,3369	110,7
8	0,4055	117,9
9	0,4362	119,8

Для сравнения на рисунке 4.4 представлены условная (штриховая линия) и действительная (сплошная линия) диаграммы деформирования рассматриваемого материала.

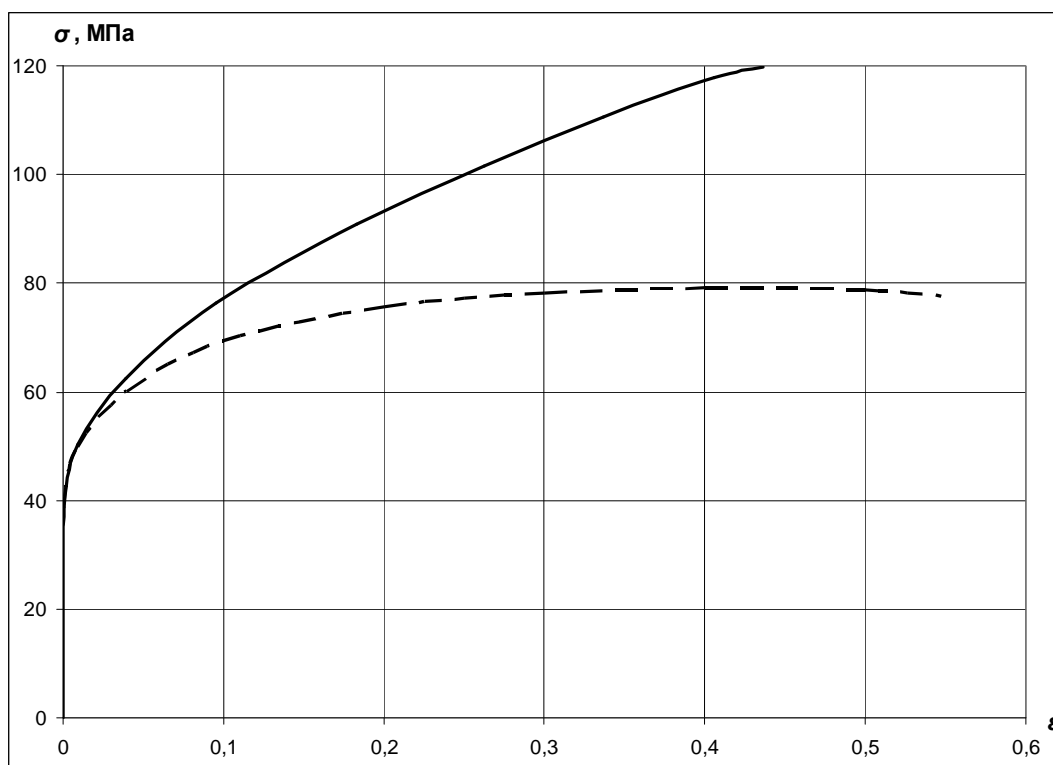


Рисунок 4.4 – Диаграммы деформирования материала АД0

Следует напомнить, что при решении осесимметричных задач в программе ANSYS глобальная ось Y должна являться осью симметрии, а X – радиальной осью. Начало системы координат сечения поместим в верхнюю точку мембраны, причем ось X направим вправо, а ось Y – вверх, как показано на рисунке 4.5.

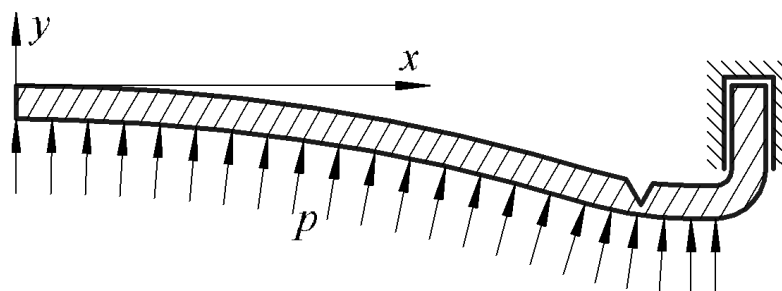


Рисунок 4.5 – Расчетная схема

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab4.
2. Установить тип используемых в расчете конечных элементов – 8-узловой плоский элемент PLANE183 с формулировкой «осесимметричное поведение»: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Quad 8node 183*, *OK*.

В окне «Element types» нажимаем *Options* и для опции КЗ устанавливаем значение *Axisymmetric*. Далее *OK* и *Close*.

3. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

Сначала задаем линейные упругие свойства. Для этого в правом окне последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

Вводим:

EX: 7e4 (модуль упругости, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

Далее определяем нелинейный участок диаграммы деформирования, выбирая полилинейную модель с изотропным упрочнением: *Structural>Nonlinear>Inelastic>Rate independent>Isotropic Hardening Plasticity>Mises Plasticity>Multilinear*.

При этом появляется диалоговая панель, где по умолчанию установлен режим ввода значений напряжения в зависимости от полной деформации (*Stress versus Total Strain*).

В столбцы «STRAIN» и «STRESS» вводим соответственно значения логарифмической деформации и действительного напряжения из таблицы 4.2. Для добавления новой строки (т.е. точки) здесь следует воспользоваться кнопкой *Add Point*.

По окончании для проверки введенных значений следует отобразить зависимость $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ в виде графика (кнопка *Graph*).

Завершаем процесс ввода кнопкой *OK* и закрываем панель.

4. Построить геометрическую модель сечения мембраны.

Как видно из рисунка 4.2, настоящая модель может быть получена путем комбинирования нескольких примитивов (сектора узкого кольца и двух прямоугольников) с последующим скруглением углов.

- 4.1. Построить сектор кольца: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Partial Annulus*.

Вводим следующие параметры: координаты центра кольца WP X = 0 и WP Y = -60; внешний радиус Rad-1 = 60; начальный угол сектора Theta-1 = 70; внутренний радиус Rad-2 = 59; конечный угол сектора Theta-2 = 90. Нажимаем *OK*.

4.2. Построить два прямоугольника: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners*.

Для первого прямоугольника вводим следующие параметры: координаты левого верхнего угла WP X = 21.5 и WP Y = 0; ширина Width = 1; высота Height = -4. Нажимаем кнопку *Apply* для продолжения данной операции.

Для второго прямоугольника задаем: координаты правого нижнего угла WP X = 22.5 и WP Y = -4; Width = -5; Height = 1. Нажимаем *OK* для завершения этой операции.

Включим нумерацию поверхностей: *U_M>PlotCtrls>Numbering*. Отмечаем флаг «Area numbers».

Появляющееся при этом изображение показано на рисунке 4.6.

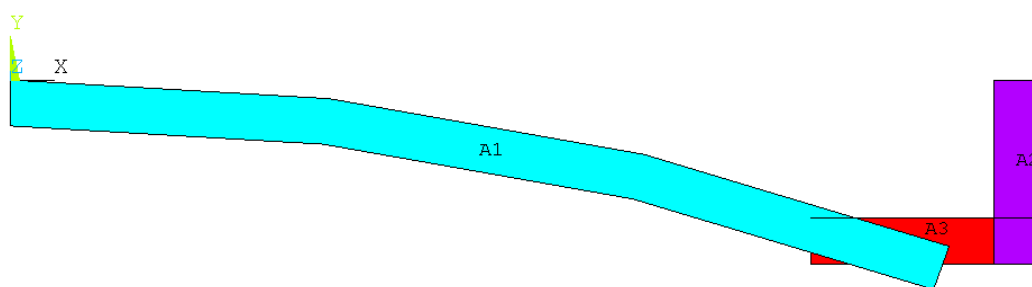


Рисунок 4.6 – Поверхности с нумерацией

4.3. Выполнить булеву операцию перекрытия двух ближайших к оси вращения поверхностей: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Overlap>Areas*.

Указываем поверхности A1 и A3, *OK*.

4.4. Удалить лишние поверхности: *M_M>Preprocessor>Modeling>Delete>Areas and Below*.

Указываем две расположенные внизу треугольные поверхности (A4 и A5), *OK*.

4.5. С помощью булевой операции сложения объединить все поверхности в одну: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add>Areas*.

Кнопкой *Pick All* указываем все поверхности.

4.6. Удалить только поверхность, оставляя ограничивающие ее линии: *M_M>Preprocessor>Modeling>Delete>Areas Only*.

Указываем поверхность, *OK*.

Для отображения линий выбираем последовательность: *U_M>Plot>Lines*.

Включим их нумерацию: *U_M>PlotCtrls>Numbering*. Отмечаем флаг «Line numbers» (рисунок 4.7).

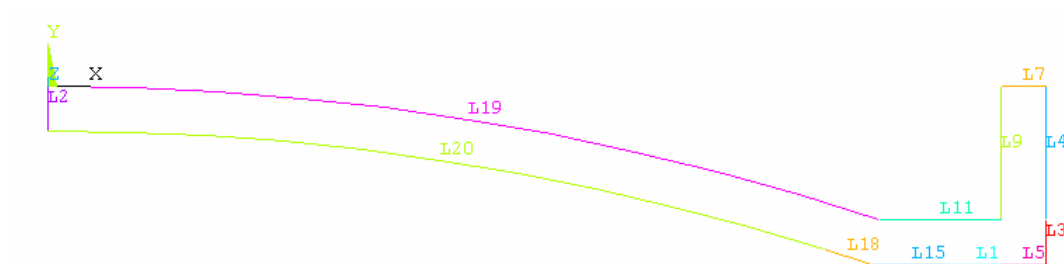


Рисунок 4.7 – Линии с нумерацией

4.7. Объединить линии, образующие стороны сечения мембраны: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add>Lines*.

Сначала указываем линии L20 и L18, *OK*. При этом появляется дополнительное окно, где по умолчанию установлена опция удаления исходных линий. Ничего не меняя, закрываем его кнопкой *Apply*.

Затем аналогичным образом объединяем три линии L15, L1 и L5.

В заключение объединяем линии L3 и L4.

4.8. Выполнить скругление углов: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Line Fillet*.

Указываем мышью в рабочем окне две линии L18 и L1, *OK*.

В поле «Fillet radius» вводим число 11 (радиус скругления в мм). Нажимаем кнопку *Apply* для продолжения данной операции.

Аналогично строим скругления радиусом 10 мм между линиями L19 и L11, радиусом 1,5 мм между линиями L1 и L3, радиусом 0,5 мм между линиями L11 и L9.

4.9. Построить поверхность по линиям, образующим ее контур: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>By Lines*.

Последовательно указываем линии, обходя контур, например, против хода часовой стрелки: L2, L18, L4, L1, L6, L3, L7, L9, L8, L11, L5 и L19 (всего двенадцать линий).

Для отображения поверхности выбираем последовательность:
U_M>Plot>Areas.

4.10. Для моделирования насечки построить равносторонний треугольник:
M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Polygon>Triangle.

Вводим следующие параметры: координаты центра тяжести треугольника $WP X = 19$ и $WP Y = -3$; радиус описанной окружности $Radius = 0.5$; угол поворота $Theta = 30$.

OK.

4.11. Сделать насечку при помощи булевой операции вычитания поверхностей: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Boolean>Subtract>Areas.*

На первый запрос указываем поверхность A1 (моделирующую сечение мембраны), *OK.*

На второй запрос указываем поверхность A2 (треугольник), *OK.*

В результате геометрическая модель будет представлена поверхностью A3 сложной формы, полностью соответствующей расчетной схеме (см. рисунок 4.5).

5. Выделить двумя сечениями область насечки для построения в ней более мелкой сетки.

5.1. Сместить начало рабочей плоскости в вершину насечки:
U_M>WorkPlane>Offset WP to>Keypoints.

Указываем мышью точку в вершине насечки, *OK.*

5.2. Повернуть рабочую плоскость на 90° вокруг оси WY: *U_M>WorkPlane>Offset WP by increments.*

Вводим:

«XY, YZ, ZX Angles»: 0,0,90

Apply.

5.3. Сместить рабочую плоскость на 0,5 мм в отрицательном направлении оси WZ.

В диалоговой панели «Offset WP» вводим:

«X, Y, Z offsets»: 0,0,-0.5

Apply.

5.4. Разрезать все поверхности рабочей плоскостью: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Area by WrkPlane.*

Нажимаем *Pick All*.

5.5. Сместить рабочую плоскость на 1 мм в положительном направлении оси *WZ*.

В диалоговой панели «Offset WP» вводим:

«X,Y,Z offsets»: 0,0,1

Apply.

5.6. Разрезать все поверхности рабочей плоскостью: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Area by WrkPlane.*

Нажимаем *Pick All*.

6. Разбить поверхности на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool.*

Для определения размера элементов на поверхностях в разделе «Size Controls» нажимаем кнопку *Set* строки «Areas». Указываем все поверхности кнопкой *Pick All* и в поле «Element edge length» (длина стороны элемента) вводим значение 0.3 (в мм). *Apply*.

Для сгущения сетки указываем область насечки, *OK*. В поле «Element edge length» вводим меньшее значение, например 0.1, *OK*.

Далее воспользуемся кнопкой *Set* строки «Lines». Указываем дугу скругления радиусом 0.5 мм, нажимаем *OK* и в поле «Element edge length» вводим значение 0.1, *OK*.

Затем в списке «Mesh» в качестве объектов для разбиения выбираем Areas (поверхности), в поле «Shape» (форма элементов) указываем Quad (четырёхугольная).

Устанавливаем режим Free (свободная сетка).

Для включения интеллектуальных средств построения сеток активизируем опцию «Smart Size». При помощи «бегунка» задаем первый уровень разбивки (Fine).

Для генерации сетки нажимаем кнопку *Mesh* и указываем все поверхности (*Pick All*).

7. Задать граничные условия.

Напомним, что при решении осесимметричной задачи в программе ANSYS все узлы, расположенные на оси симметрии *Y*, должны быть закреплены от перемещения в радиальном направлении.

Кроме того, на рассматриваемую мембрану наложены связи по контуру юбки (см. рисунок 4.5).

Воспользуемся командой задания перемещений на линиях: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

Указываем одну вертикальную линию слева (лежащую на оси симметрии) и две вертикальные линии справа (представляющие контур юбки), *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем UX (запрет поступательных перемещений по оси X), *Apply*.

Затем указываем верхнюю горизонтальную линию контура юбки, *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем UY (запрет поступательных перемещений по оси Y) и нажимаем *OK*.

8. Задать давление: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Lines*.

Указываем линии (всего пять) в нижней части контура сечения, *OK*.

В поле «Load PRES value» вводим значение давления, заведомо превышающее критическое, например 4 МПа. *OK*.

На рисунке 4.8 показана конечно-элементная модель мембраны с заданными граничными условиями и нагрузкой.

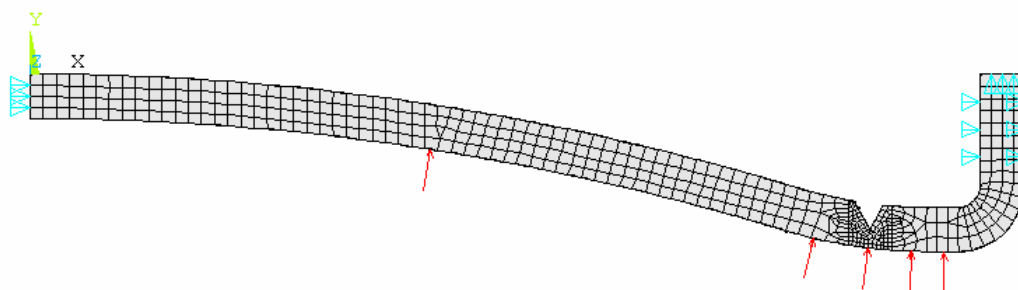


Рисунок 4.8 – Конечно-элементная модель с граничными условиями и нагрузкой

9. Выполнить геометрически и физически нелинейный анализ.

Сначала меняем опции анализа: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls*.

Выбираем вкладку «Basic».

Для учета больших перемещений (и деформаций) в списке «Analysis Options» выбираем значение Large Displacement Static.

Время в конце шага нагружения (поле «Time at end of loadstep» раздела «Time Control») задаем равным 1.

Таким образом, время t будет меняться в интервале от 0 до 1 и давление в момент времени t будет определяться равенством

$$p = p \cdot t,$$

где p – заданное давление (в нашем случае 4 МПа).

В списке «Automatic time stepping» (автоматический выбор шага по времени) оставляем значение по умолчанию: Prog Chosen (выбирается программой). При этом в случае плохой сходимости программа ANSYS будет автоматически уменьшать приращение нагрузки, что позволяет более точно оценить несущую способность конструкции. При хорошей сходимости размер шага по времени будет увеличиваться.

В поле «Number of substeps» (число подшагов) раздела «Time Control» вводим 200. Учитывая установку предыдущей опции, данное значение не будет соответствовать реальному числу подшагов. Однако оно точно будет определять размер первого шага по времени: $\Delta t_1 = 1/200 = 0,005$ с.

И, наконец, для сохранения промежуточных результатов на всех подшагах в списке «Frequency» (частота записи выходных величин в файл результатов) выбираем значение Write every substep.

После задания опций нелинейного анализа задача посылается на счет: *M_M>Solution>Solve>Current LS.*

10. Оценить несущую способность прорывной мембраны: *M_M>General Postproc>Result Summary.*

При этом на экране появляется список наборов результатов:

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.50000E-02	1	1	1
2	0.10000E-01	1	2	2

43	0.77707	1	43	184
44	0.77736	1	44	196
45	0.77750	1	45	205
46	0.77755	1	46	210
47	0.77760	1	47	222
48	1.0000	1	999999	225

Здесь в первом столбце указывается номер набора результатов, во втором – текущее время, в третьем – номер шага по нагрузке, в четвертом – номер подшага и в пятом – общее (к данному моменту времени) число итераций. Последний подшаг здесь имеет максимально возможный номер 999999. Это говорит о том, что последний набор результатов содержит несошедшееся (т.е. физически недостоверное) решение.

Таким образом, несущую способность (или критическую нагрузку) можно оценить по времени предпоследнего подшага:

$$p_{кр} = 0,7776 p = 3,11 \text{ МПа.}$$

11. Изобразить поле напряжений по Мизесу на предпоследнем подшаге.

Сначала следует считать из файла результатов в базу данных предпоследний набор: *M_M>General Postproc>Read Results>By Pick*.

Указываем предпоследний набор результатов и нажимаем *Read*, а затем *Close*.

Далее используем команду *M_M>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu*.

Из списка доступных результатов выбираем *Nodal Solution>Stress>von Mises stress* (напряжение по Мизесу), *OK*.

Получаемое при этом изображение представлено на рисунке 4.9.

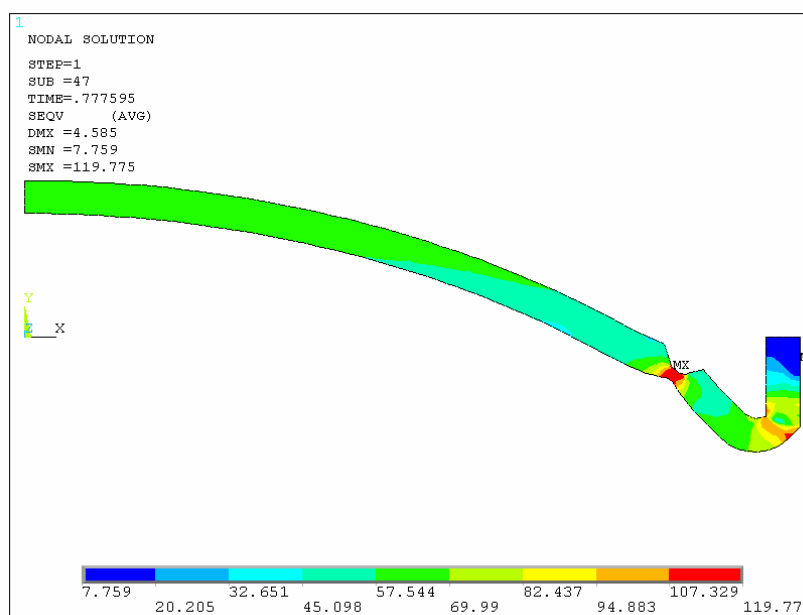


Рисунок 4.9 – Поле напряжений по Мизесу (МПа)

12. Включить анимацию процесса деформирования во времени: *U_M>PlotCtrls>Animate>Over Time* (данная команда выполнима только в модуле общего постпроцессора).

В поле «Number of animation frames» (число кадров анимации) вводим значение 30 для получения более плавной анимации.

Активизируем опцию «Time Range» (временной диапазон) и ниже вводим границы диапазона: 0; 0.7776.

В списке «Contour data for animation» выбираем выходную величину для изображения ее поля в процессе анимации (например, напряжение по Мизесу).

Остальные параметры оставляем без изменения.

Нажимаем *OK*.

Некоторое время займет формирование видео файла, после чего в рабочем окне будет представлена анимация переходного динамического процесса. Кроме того, появится дополнительная панель «Animation Controller», где следует включить опцию «Forward Only» (только вперед).

«Бегунок» данной панели позволяет управлять задержкой между кадрами (т.е. увеличивать или уменьшать скорость анимации).

Нажав *Stop* и *Close*, можно остановить анимацию и закрыть диалоговую панель «Animation Controller».

13. Построить зависимость пластической деформации в вершине насечки от времени: *M_M>TimeHist Postpro*.

Для задания новой переменной в диалоговой панели постпроцессора истории нагружения нажимаем кнопку *Add Data*.

При этом появляется дополнительное окно, где в списке выходных величин «Result Item» последовательно указываем *Nodal Solution>Plastic Strain>von Mises plastic strain* (эквивалентная пластическая деформация по Мизесу).

В поле «Variable Name» (имя переменной) вводим *ep1*. *OK*.

Далее на экране при помощи мыши указываем узел в вершине насечки. *OK*.

Затем в списке выделяем переменную *ep1* и нажимаем кнопку *Graph Data*.

Отображаемый при этом график представлен на рисунке 4.10.

14. Для отчета по работе записать в файл протокол команд базы данных:

U_M>File>Write DB Log File.

Вводим имя *Lab4.lgw*.

15. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT*.

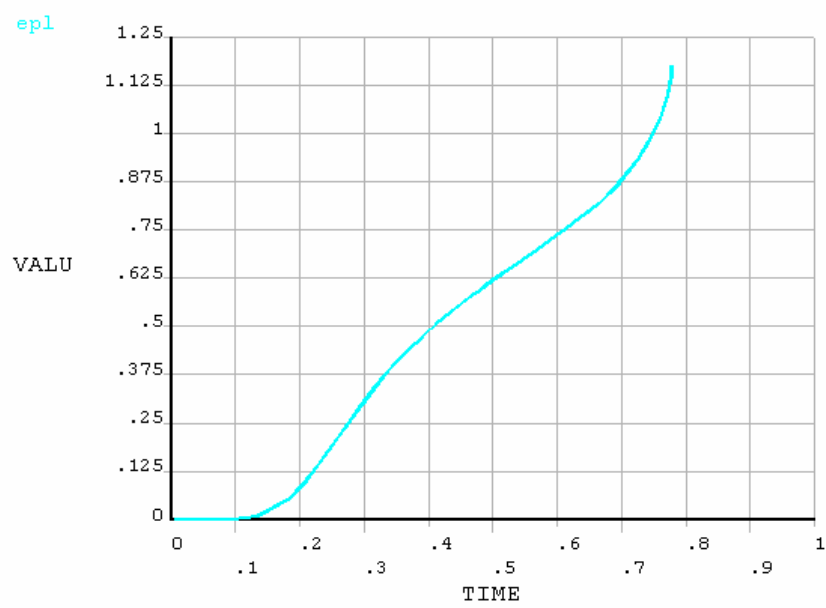


Рисунок 4.10 – Зависимость пластической деформации от времени

5 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАСТЯЖЕНИИ ПОЛОСЫ, ОСЛАБЛЕННОЙ УГЛОВЫМ ВЫРЕЗОМ, ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ MSC.PATRAN/NASTRAN

Исходные данные: полоса с угловым вырезом равномерно растягивается напряжениями $\sigma_0 = 1000$ МПа (рисунок 5.1). Вершина выреза притуплена радиусом R0,5. Материал – сталь 30ХГСА (модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}} = 860$ МПа; условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 970$ МПа), диаграмма деформирования которого задана точками (таблица 5.1).

Допущение: предполагается, что реализуется плоская деформация.

Цель: исследовать развитие пластических деформаций вблизи вершины выреза по мере возрастания нагрузки.

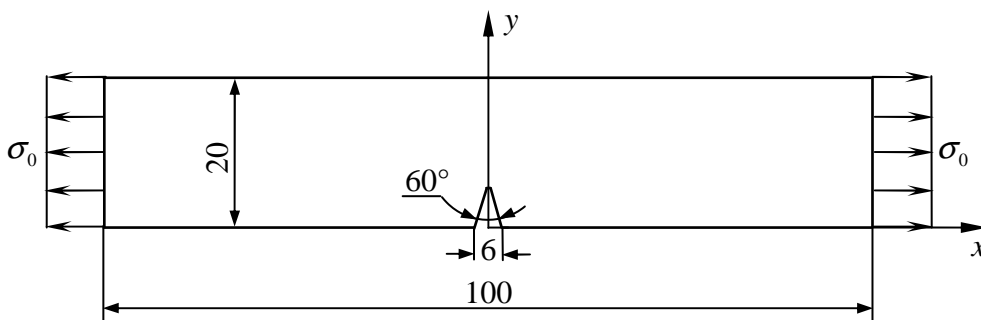


Рисунок 5.1 – Геометрия полосы с вырезом

Таблица 5.1 – Зависимость напряжения от деформации

№	ε	σ , МПа
1	0	0
2	0,0043	860
3	0,0050	920
4	0,0069	970
5	0,010	1010
6	0,015	1045
7	0,020	1067
8	0,025	1085
9	0,030	1095
10	0,035	1100
11	0,040	1100

Диаграмма деформирования стали 30ХГСА, построенная с использованием данных таблицы 5.1, представлена на рисунке 5.2. Следует отметить, что при задании кривой $\sigma - \varepsilon$ для решателя MSC.Nastran первая точка должна иметь нулевые координаты ($\sigma_1 = 0, \varepsilon_1 = 0$), а вторая точка – определять предел текучести ($\sigma_T = \sigma_2$). При этом наклон линии, соединяющей первую и вторую точки, должен быть равен модулю упругости:

$$\frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} = E .$$

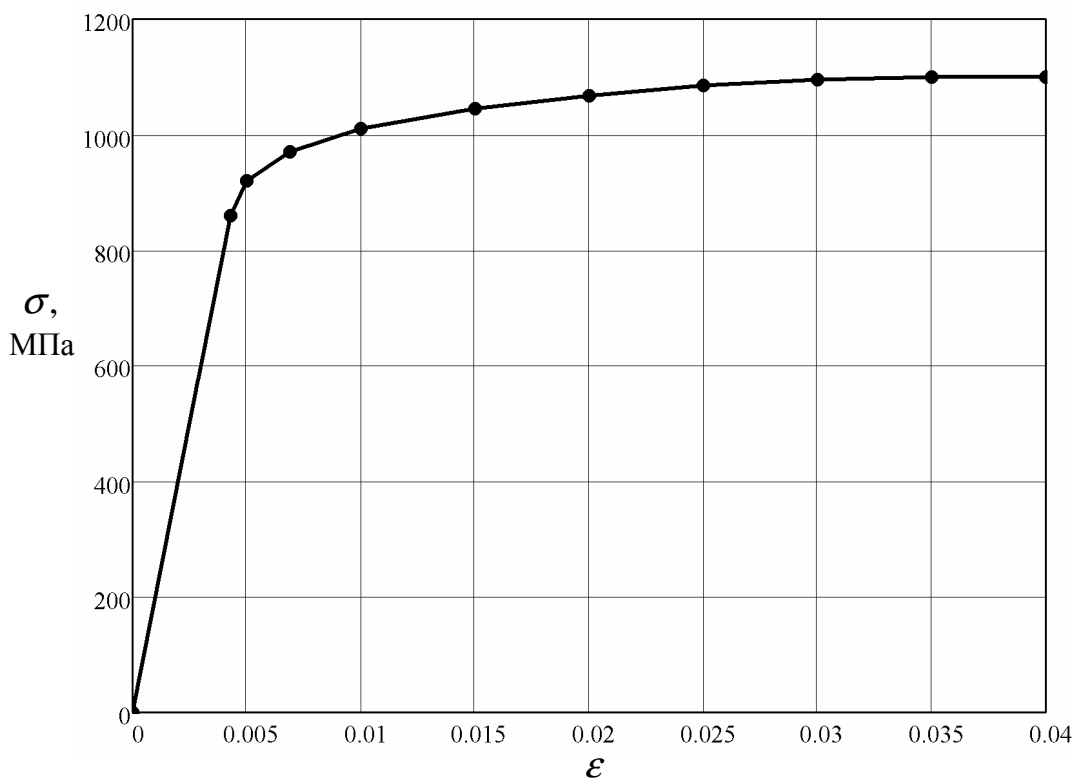


Рисунок 5.2 – Диаграмма деформирования стали

Подчеркнем, что в МКЭ-пакетах не различаются понятия пределов пропорциональности, упругости и текучести.

Вне области определения данной кривой ее экстраполяция осуществляется с сохранением наклона конечного сегмента, поэтому в конце добавлен горизонтальный участок.

Благодаря симметрии конструкции и нагрузки относительно вертикальной оси здесь можно ограничиться рассмотрением половины полосы.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных.

В полосе меню выбираем команду *File>New*.

В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab5.db, *OK*.

2. Задать начальные установки.

В разделе «Tolerance» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 50 (в мм), *OK*.

3. Построить два прямоугольника.

Выбираем приложение «Geometry» и устанавливаем сочетание *Create/Surface/XYZ*.

Для первого прямоугольника вводим:

«Vector Coordinates List»: <6 20 0> (описывающий диагональ вектор)

«Origin Coordinate List»: [0 0 0] (координаты начала вектора)


Apply.

Для второго прямоугольника:

«Vector Coordinates List»: <44 20 0>


«Origin Coordinate List»: [6 0 0]

Apply.

Для визуализации внутренней геометрии поверхностей воспользуемся кнопкой  панели инструментов.

Включаем нумерацию геометрических объектов.

4. Для определения выреза построить две точки.

Сначала полезно с помощью кнопки  панели инструментов увеличить размер изображения точек до девяти пикселей.

Устанавливаем сочетание *Create/Point/XYZ*.

Для первой точки в поле «Point Coordinate List» вводим следующие значения координат (в мм): [3,0,0], *Apply*.


Вторая точка по оси *Y* имеет значение координаты $3\sqrt{3}$ мм. Отметим, что в программе MSC.Patran при вводе отдельных компонент допустимы математические операции. Для этих целей используется обратный апостроф (располагается на одной клавише с буквой ё).

Таким образом, для второй точки в поле «Point Coordinate List» вводим [0, `3*SQRT(3)`,0], *Apply*.

5. Соединить построенные на предыдущем шаге точки прямой линией.

Выбираем сочетание *Create/Curve/Point*.

Используем установленную по умолчанию опцию 2 Point.

- Для поля «Starting Point List» указываем точку 7, а для поля «Ending Point List» – точку 8.
- Если снят флаг «Auto Execute», то для завершения операции нажимаем кнопку *Apply*.
6. Создать зеркальное отображение проведенной на предыдущем шаге линии.
- Устанавливаем сочетание Transform/Curve/Mirror.
- В поле «Define Mirror Plane Normal» в качестве нормали к плоскости зеркала вводим Coord 0.1 (т.е. ось X).
- Проверяем, что флаг «Delete Original Curves» снят.
- Для поля «Curve List» указываем линию 1.
- При необходимости нажимаем *Apply*.
7. Построить дугу скругления в вершине выреза.
- Устанавливаем сочетание Create/Curve/Fillet.
- В поле «Fillet Radius» вводим радиус скругления (в мм): 0.5.
- Опция «Trim Original Curves» (подрезать исходные кривые) должна быть включена.
- Для поля «Curve/Point 1 List» без использования клавиши *Shift* указываем кривую 1 и ее концевую точку со стороны оставляемой части (т.е. точку 7).
- Аналогично для поля «Curve/Point 2 List» указываем кривую 2 и точку 9.
- Если требуется, нажимаем *Apply*.
8. Разбить дугу скругления на две части в месте ее пересечения с кромкой поверхности.
- Выбираем сочетание Edit/Curve/Break.
- Используем установленную по умолчанию опцию Point (разбиение при помощи точки).
- Для удаления исходной кривой включаем флаг «Delete Original Curves».
- Для поля «Curve List» указываем дугу скругления (Curve 3).
- Затем активизируем область ввода «Break Point List», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка пересечения двух кривых) и без использования клавиши *Shift* указываем дугу скругления и левую кромку поверхности 1.
- При необходимости нажимаем *Apply*.
- Кнопкой *Yes* подтверждаем удаление исходной кривой.
9. Добавить кромку поверхности.

Устанавливаем сочетание Edit/Surface/Edge.

Ниже нажимаем среднюю кнопку-пиктограмму *Add Edge* (добавить кромку).

Используем опцию «Retain Long Portion of Edges» (оставить большую часть периметра).

Для поля «Surface» указываем поверхность 1, а для поля «Curve List» – лежащие на ней кривые 1 и 4.

Если требуется, нажимаем *Apply*.

10. Построить полуокружность.

Устанавливаем сочетание Create/Curve/2D ArcAngles.

В соответствующие поля вводим:

«Radius»: 2 (радиус, мм)

«Start Angle»: -90 (начальный угол, град)

«End Angle»: 90 (конечный угол, град)

«Construction Plane List»: Coord 0.3 (плоскость построения перпендикулярна оси Z глобальной декартовой системы координат).

Активизируем поле «Center Point List» (центр дуги окружности) и указываем точку в вершине выреза (расположенную в середине дуги скругления).

При необходимости нажимаем *Apply*.

11. При помощи построенной на предыдущем шаге полуокружности разбить поверхность на две части.

Выбираем сочетание Edit/Surface/Break.

Используем установленную по умолчанию опцию Curve (разбиение при помощи кривой).

Для удаления исходной поверхности включаем флаг «Delete Original Surfaces».

Для поля «Surface List» указываем поверхность 1, а для поля «Break Curve List» – построенную на предыдущем шаге полуокружность.

При необходимости нажимаем *Apply*.

Кнопкой *Yes* подтверждаем удаление исходной поверхности.

12. Удалить лишние кривые.

Устанавливаем сочетание Delete/Curve.

Активизируем поле «Curve List» и в графическом окне, удерживая нажатой левую кнопку мыши, охватываем прямоугольником всю модель.

Если требуется, нажимаем *Apply*.

Геометрическая модель половины полосы с вырезом, состоящая из трех поверхностей, показана на рисунке 5.3. Напомним, что зеленым цветом изображаются простые поверхности, а пурпурным – сложные trimmed-поверхности.

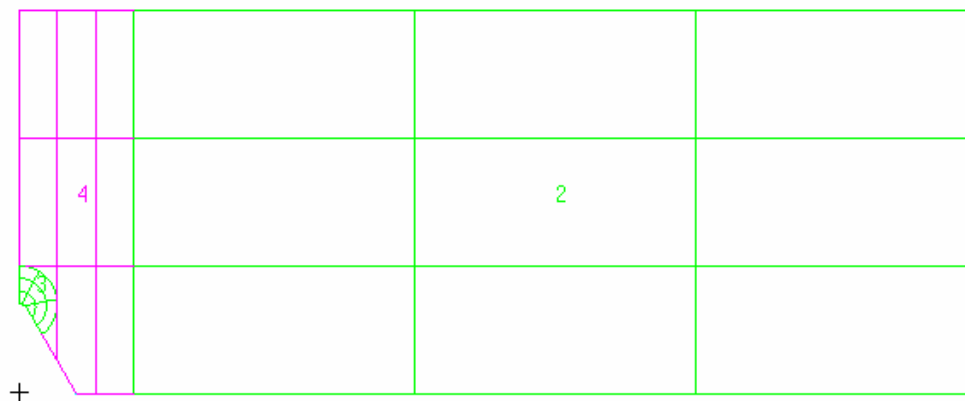


Рисунок 5.3 – Поверхности с нумерацией

13. Разбить поверхности на конечные элементы.

Запускаем приложение «Elements» и устанавливаем сочетание Create/ Mesh/Surface.

Выбираем:

«Elem Shape»: Quad (четырёхугольная форма)

«Mesher»: Paver (генератор свободных сложных сеток)

«Topology»: Quad4 (топология – четырёхугольник с четырьмя узлами).

Активизируем поле «Surface List» и в графическом окне указываем поверхность, окружающую вершину выреза (Surface 3).

В разделе «Global Edge Length» отключаем опцию автоматического вычисления глобальной длины стороны элемента и в поле «Value» вводим значение 0.2 (в мм). *Apply*.

Затем для поля «Surface List» указываем прямоугольную поверхность (Surface 2) и в области «Value» вводим значение 1 (в мм). *Apply*.

В конце указываем trimmed-поверхность (Surface 4) и для глобальной длины стороны элемента вводим значение 0.5 (в мм). *Apply*.

14. Сшить конечно-элементную модель.

Устанавливаем сочетание Equivalence/All/Tolerance Cube.

Ничего не меняя, нажимаем *Apply*. При этом места сшивки модели обводятся кружочками.

Получаемая здесь разбивка показана на рисунке 5.4.

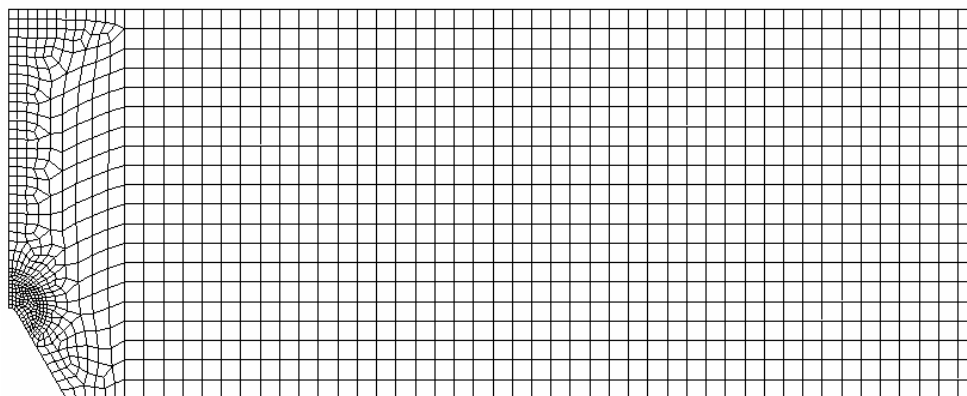


Рисунок 5.4 – Конечно-элементная сетка

15. Построить поле свойств материала, описывающее диаграмму деформирования.

Запускаем приложение «Fields» и устанавливаем сочетание Create/Material Property/Tabular Input.

В области ввода «Field Name» вводим имя поля свойств материала, например *diagram*.

В списке активных независимых переменных «Active Independent Variables» снимаем флаг «Temperature (T)» (температура) и устанавливаем флаг «Strain (e)» (деформация).

Для ввода данных нажимаем кнопку *Input Data*.

При этом появляется дополнительное окно с таблицей, содержащей два столбца (рисунок 5.5). Для ввода значения здесь необходимо активизировать соответствующую ячейку таблицы, набрать в поле «Input Data» нужное число и нажать клавишу *Enter*.

	e	Data
e-3	4.9999999E-003	9.2000000E+002
e-4	6.8999999E-003	9.7000000E+002
e-5	9.9999998E-003	1.0100000E+003
e-6	1.5000000E-002	1.0450000E+003
e-7	2.0000000E-002	1.0670000E+003
e-8	2.5000000E-002	1.0850000E+003
e-9	2.9999999E-002	1.0950000E+003
e-10	3.5000000E-002	1.1000000E+003
e-11	3.9999999E-002	1.1000000E+003

Рисунок 5.5 – Табличное задание поля

Последовательно вводим 11 точек диаграммы из таблицы 5.1.

Закрываем дополнительное окно кнопкой *OK*.

В конце нажимаем *Apply*.

Для проверки правильности задания поля отобразим его в виде двухмерного графика (действие *Show*).

В списке «*Select Field To Show*» выделяем строку *diagram*.

Нажимаем *Specify Range* (задать диапазон) и в соответствующие поля вводим:

«*Minimum*»: 0 (минимальное значение переменной ϵ)

«*Maximum*»: 0.04 (максимальное значение переменной ϵ)

«*No. of Points*»: 20 (число точек)

OK.

После нажатия *Apply* в отдельном окне появляется график, а рядом – таблица значений. Закрываем ее кнопкой *Cancel*.

Для закрытия окна с графиком следует воспользоваться кнопкой *Unpost Current XYWindow*.

16. Задать свойства материала.

Запускаем приложение «*Materials*» и устанавливаем сочетание *Create/Isotropic/Manual Input*.

В поле «*Material Name*» вводим имя материала, например *steel*.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* (ввод свойств). При этом появляется дополнительное окно, где по умолчанию установлена линейно-упругая модель состояния (*Linear Elastic*).

В соответствующие поля вводим:

«*Elastic Modulus*» = $2e5$ (модуль упругости в МПа)

«*Poisson Ratio*» = 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

Нажимаем кнопку *Apply*. При этом вновь созданная модель материала должна появиться в списке существующих материалов «*Existing Materials*».

Для задания пластических свойств снова нажимаем *Input Properties*.

В выпадающих меню выбираем:

«*Constitutive Model*»: *Elastoplastic* (упругопластическая модель состояния)

«*Nonlinear Data Input*»: *Stress/Strain Curve* (ввод кривой $\sigma - \epsilon$)

«*Yield Function*»: *Von Mises* (функция текучести Мизеса)

«Hardening Rule»: Isotropic (изотропное упрочнение).

Активизируем область ввода «Stress/Strain Curve =>» и ниже в списке имеющихся полей свойств материалов выбираем *diagram*. *OK*.

В конце опять нажимаем кнопку *Apply*.


17. Определить свойства элементов.

Выбираем приложение «Properties». Для задания свойств плоских элементов устанавливаем сочетание *Create/2D/2D Solid*.

В поле «Property Set Name» вводим имя набора свойств, например *band*.

Установленные по умолчанию опции *Plane Strain* (плоская деформация) и *Standard Formulation* (стандартная формулировка) нас устраивают.

Далее нажимаем *Input Properties* (ввод свойств).

Нажимаем кнопку  и из списка существующих материалов выбираем *steel*, *OK*.

Затем для выбора области приложения введенных свойств нажимаем кнопку *Select Application Region*.

Активизируем поле «Select Members» и указываем все три поверхности, пользуясь зоной выбора в виде прямоугольника.

Последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

18. Задать граничные условия.


Граничные условия для рассматриваемой задачи представляют собой условия симметрии на линии отсечения моделируемой части полосы.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений устанавливаем сочетание *Create/Displacement/Nodal*.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например *sym*.

Нажимаем кнопку *Input Data* (ввод данных) и в поле «Translations» (попутательные перемещения) вводим $\langle 0, \rangle$, что соответствует запрету перемещений в направлении оси *X*. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: *Geometry*.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кривая или кромка) и указываем две левые кромки, расположенные на оси симметрии.


Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

Отметим, что после задания условий симметрии модель имеет еще возможность перемещения как жесткое целое в направлении оси Y . Поэтому здесь следует наложить одну дополнительную связь.

В поле «New Set Name» вводим другое имя, например *u*.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Translations» вводим $\langle,0,\rangle$, что соответствует запрету перемещений в направлении оси Y . *OK*.

Нажимаем *Select Application Region*.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем одну точку, например правую нижнюю.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

19. Приложить нагрузку.


В том же приложении выбираем сочетание *Create/Pressure/Element Uniform*.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например *load*.

В качестве типа целевых элементов выбираем поверхностные, т.е. «Target Element Type»: *2D*.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Edge Pressure» (давление на кромке) вводим значение -1000 (положительное давление направлено к поверхности и вызывает сжатие, а в нашем случае необходимо задать растяжение, поэтому мы вводим отрицательное число). *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: *Geometry*.

Активизируем поле «Select Surfaces or Edges», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кромка) и указываем правую кромку модели.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

20. Запустить задачу на счет.

Выбираем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание *Analyze/Entire Model/Full Run*.

Для изменения типа решения нажимаем кнопку *Solution Type* и выбираем *Nonlinear Static* (нелинейный статический анализ), *OK*.

Затем для модификации расчетного случая нажимаем кнопку *Subcases*.

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем *Default*. Данное имя должно появиться в поле «Subcase Name».

Для изменения параметров расчетного случая используем кнопку *Subcase Parameters*.

В поле «Number of Load Increments» вводит число ступеней (или шагов) нагружения, например 25. *OK*.

Для включения опции вывода промежуточных решений нажимаем кнопку *Output Requests* (запросы по выводу). В выпадающем меню «Form Type» (тип окна) выбираем пункт *Advanced* (расширенный) и устанавливаем «Intermediate Output Option»: *Yes* (выводить результаты для каждого вычисленного шага нагружения).

Кроме того, для дополнительного вывода деформаций в верхнем списке «Select Result Type» указываем строку *Element Strains* (деформации в элементах), *OK*.

Последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.

И, наконец, для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

21. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.


В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание *Access Results/Attach XDB/Result Entities*.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл *lab5.xdb*, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

22. Включить анимацию распространения пластической зоны вблизи вершины выреза по мере возрастания нагрузки.

Запускаем приложение «Results» и устанавливаем сочетание *Create/Fringe*.

В разделе «Select Result Cases» выбираем сразу все случаи результатов, соответствующие различным ступеням нагружения. При этом для раскрытия списка случаев результатов следует отжать кнопку .

В списке «Select Fringe Result» указываем строку *Nonlinear Strain, Plastic Strain* (нелинейные деформации, пластические деформации).

Включаем опцию «Animate».

Далее нажимаем последнюю кнопку с кинолентой .

Для анимации по глобальной переменной выбираем «Animation Method»: *Global Variable*.

В поле «Number of Frames» (число кадров) вводим значение 25 для получения более плавной анимации.

И, наконец, нажимаем кнопку *Apply*.

Некоторое время займет формирование видео файла, после чего в графическом окне будет представлена анимация процесса распространения пластической зоны. Кроме того, появится дополнительная панель «Animation Control».

Скорость анимации здесь регулируется бегунком «Animation Speed».

В случае необходимости изменения опций здесь следует временно прервать процесс анимации, установив флаг «Pause Animation».

Для полного завершения процесса анимации необходимо нажать одну из кнопок раздела «Stop Animation and ...».

Поле пластических деформаций при полной нагрузке представлено на рисунке 5.6.

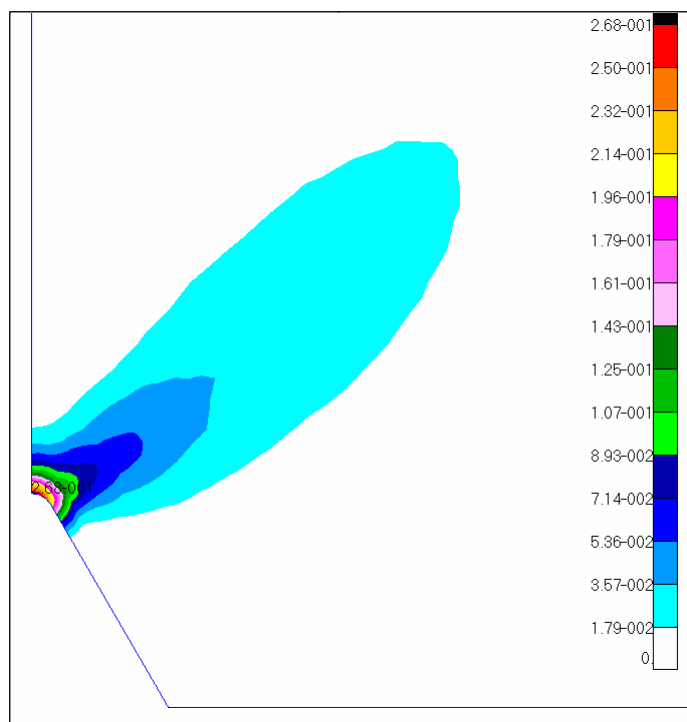



Рисунок 5.6 – Пластические деформации

23. Включить анимацию изменения поля напряжений по Мизесу по мере возрастания нагрузки.

Нажимаем кнопку-пиктограмму .

Следует отметить, что в списке «Select Fringe Result» для многоцветного изображения полей напряжений содержатся три величины: Stress Tensor (тензор напряжений); Nonlinear Stresses, Stress Tensor (нелинейные напря-

жения, тензор напряжений) и Nonlinear Stresses, Equivalent Stress (нелинейные напряжения, эквивалентное напряжение).

Для нелинейного элемента CQUAD4 первые две величины выдают одинаковые значения компонент, причем напряжения σ_{zz} полагаются равными нули. Однако в случае плоской деформации это не соответствует действительности, что приводит к некорректному вычислению эквивалентных напряжений.

Поэтому для правильного расчета напряжений по Мизесу здесь следует указать строку Nonlinear Stresses, Equivalent Stress.

Для включения процесса анимации нажимаем *Apply*.

Поле напряжений по Мизесу при полной нагрузке показано на рисунке 5.7.

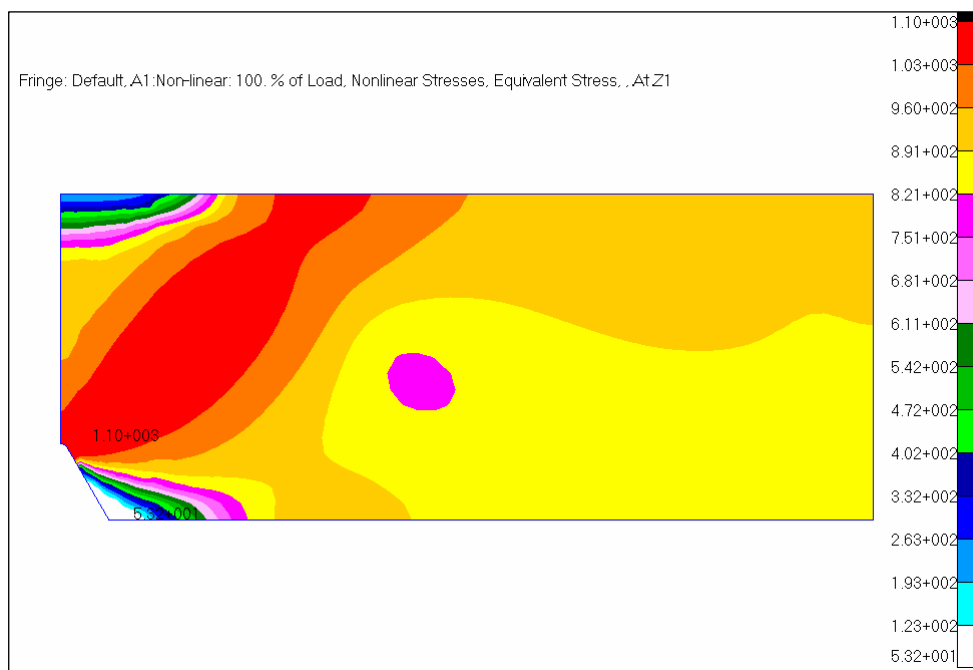


Рисунок 5.7 – Поле напряжений по Мизесу (в МПа)

24. Выйти из программы: *File > Quit*.

6 ИССЛЕДОВАНИЕ СОУДАРЕНИЯ ПОЛОГО ШАРА С НЕДЕФОРМИРУЕМОЙ ПРЕГРАДОЙ ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS

Исходные данные: полый шар диаметром 30 мм и толщиной стенки 2 мм ударяется со скоростью 90 км/ч об абсолютно жесткую поверхность (с отскоком), как показано на рисунке 6.1. Шар изготовлен из алюминиевого сплава Д1, имеющего следующие свойства: модуль упругости $7 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; касательный модуль (или модуль упрочнения) 2500 МПа; предел текучести 200 МПа; плотность 2700 кг/м^3 .

Допущения: поскольку форма недеформируемой преграды не имеет значения, она принимается в виде круглой площадки радиусом 20 мм; при этом задача становится осесимметричной. Диаграмма деформирования материала считается билинейной, т.е. состоящей из двух прямолинейных участков.

Цель: исследовать напряженно-деформированное состояние шара в момент соударения с преградой и после отскока от нее.

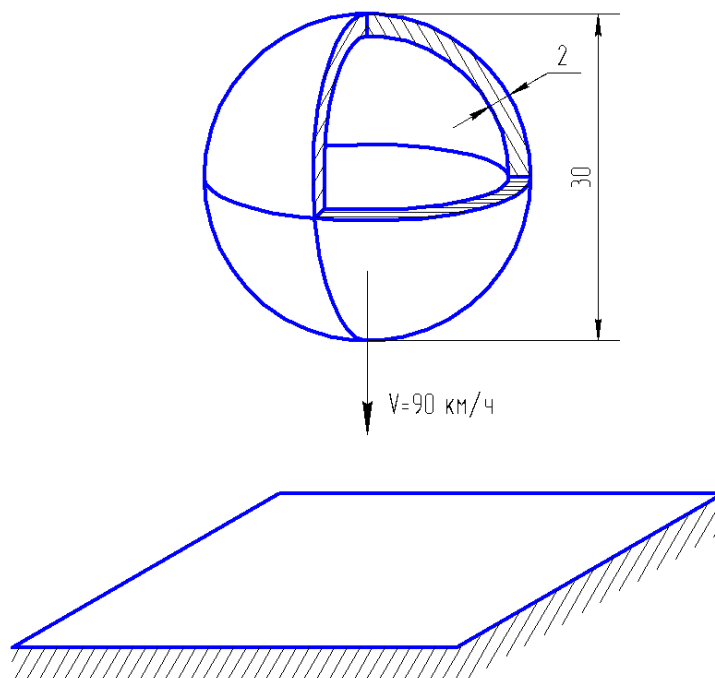


Рисунок 6.1 – Удар шара о преграду

В осесимметричной постановке полый шар будем представлять его сечением, имеющим форму полукольца с внешним радиусом 15 мм и внутрен-

ним – 13 мм; а недеформируемую преграду – линией длиной 20 мм, как показано на рисунке 6.2. Начало системы координат сечения поместим в центр преграды, причем ось X направим вправо, а ось Y – вверх по оси симметрии.

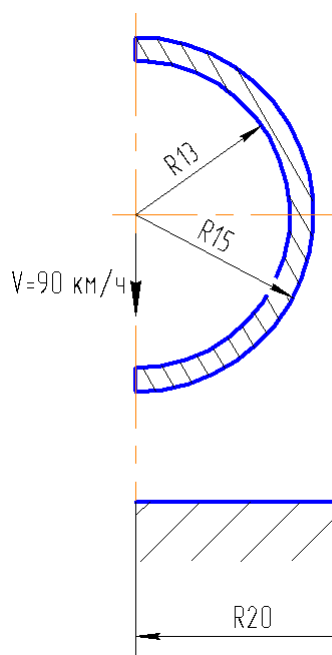


Рисунок 6.2 – Расчетная схема

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab6.
2. Установить тип используемых в расчете конечных элементов – 4-узловой плоский элемент PLANE182 с формулировкой «осесимметричное поведение»: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Quad 4node 182*, *OK*.

В окне «Element types» нажимаем *Options* и для опции К3 устанавливаем значение *Axisymmetric*. Далее *OK* и *Close*.

3. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

Сначала задаем линейные упругие свойства. Для этого в правом окне последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

Вводим:

EX: 7e4 (модуль упругости, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

Снова в правом окне выбираем *Structural>Density* и вводим:

DENS: 2700e-12 (плотность, т/мм³)

ОК.

Далее определяем нелинейный участок диаграммы деформирования, выбирая билинейную модель с изотропным упрочнением: *Structural>Nonlinear>Inelastic>Rate independent>Isotropic Hardening Plasticity>Mises Plasticity>Bilinear*.

Вводим:

Yield Stss: 200 (предел текучести, МПа)

Tang Mod: 2500 (касательный модуль, МПа).

Нажимаем кнопку *Graph* для отображения зависимости $\sigma - \varepsilon$ в виде графика.

Завершаем процесс ввода кнопкой ОК и закрываем панель.

4. Построить точки: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS*.

Вводим координаты точек согласно следующей таблице:

Номер точки	x, мм	y, мм	z, мм
1	0	0	0
2	20	0	0

Включаем нумерацию геометрических объектов: *U_M>PlotCtrls>Numbering*; отмечаем флаги «Keypoint numbers», «Line numbers» и «Area numbers».

5. Построить отрезок прямой линии, представляющий жесткую преграду: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Straight Line*.

Указываем сначала точку 2, а затем точку 1, ОК.

6. Построить полукольцо: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Partial Annulus*.

Вводим следующие параметры: координаты центра полукольца WP X = 0 и WP Y = 50; внешний радиус Rad-1 = 15; начальный угол сектора Theta-1 = -90; внутренний радиус Rad-2 = 13; конечный угол сектора Theta-2 = 90. Нажимаем ОК.

Отобразим на экране дисплея построенную геометрическую модель в виде линий: *U_M>Plot>Lines*.

7. Разрезать построенное полукольцо на две половины.

Данную операцию удобно выполнить с помощью рабочей плоскости.

7.1. Установить рабочую плоскость перпендикулярно дуге полукольца в ее середине: *U_M>WorkPlane>Align WP with>Plane normal to line*.

Указываем одну из дуг, образующих полукольцо, *OK*.

В поле «*Ratio along line*» (безразмерная координата вдоль линии) вводим значение 0.5 (середина линии). *OK*.

7.2. Разрезать все поверхности рабочей плоскостью: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Area by WrkPlane*.

Нажимаем *Pick All*.

8. Разбить поверхности на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

Для получения результатов приемлемой точности здесь следует взять хотя бы четыре элемента по толщине стенки шара. Учитывая данную рекомендацию, глобальный размер стороны элемента примем равным $2/4 = 0,5$ мм. Нажимаем кнопку *Set* строки «Global» и в поле «Element edge length» (размер длины стороны элемента) вводим значение 0.5, *OK*.

Поскольку поверхности являются «правильными», то можно установить режим *Mapped* (регулярная сетка).

Для генерации сетки нажимаем кнопку *Mesh* и указываем все поверхности (*Pick All*).

9. Создать контактную пару для описания взаимодействия жесткого и деформируемого тел.

Для этого сначала запускаем специальный инструмент «Contact Manager» (Менеджер контактов) путем нажатия одноименной кнопки пиктографического меню программы ANSYS либо командой *Main Menu>Preprocessor>Create>Contact Pair*.

Появляющуюся при этом диалоговую панель удобно сместить вниз, чтобы она не перекрывала изображение модели в рабочей области.

В данной панели пока доступна лишь первая кнопка, предназначенная для вызова средств Мастера контактов «Contact Wizard».

Нажимаем эту кнопку и создаем контактную пару, выполняя следующие шаги.

9.1. Указать ответную поверхность.

В разделе «Target Surface» в качестве объектов, используемых для определения ответной поверхности, выбираем *Lines* (линии).

В разделе «Target Type» (тип ответной поверхности) выбираем *Rigid* (абсолютно жесткая).

Нажимаем кнопку *Pick Target* и указываем прямую линию L1 (представляющую недеформируемую преграду).

Далее нажимаем *Apply* (поскольку после нажатия *OK* кнопка *Next* может оставаться неактивной).

На экран вернется диалоговая панель «Contact Wizard», в которой будет активна кнопка *Next*.

Нажимаем *Next* для перехода к следующему шагу.

9.2. Указать контактную поверхность.

В разделе «Contact Surface» в качестве объектов, используемых для определения контактной поверхности, выбираем Lines (линии).

В разделе «Contact Element Type» (тип модели контакта) выбираем Surface-to-Surface (поверхность – поверхность).

Нажимаем кнопку *Pick Contact* и указываем линию L9 (нижнюю внешнюю границу полукольца).

Далее нажимаем *Apply*, а не *OK*.

В диалоговой панели Мастера контактов нажимаем кнопку *Next* для перехода к следующему шагу.

9.3. Задать параметры контакта.

Отключаем опцию начального внедрения (проникновения) «Include initial penetration», которая требуется лишь в случае, когда контактирующие тела имеют в начале расчета область перекрытия (как, например, при посадке диска на вал с натягом).

Для коэффициента трения в поле «Coefficient of Friction» вводим значение 0.1.

И, наконец, для создания собственно контактной пары нажимаем кнопку *Create*.

9.4. Проверить ориентацию внешних нормалей к контактной и ответной поверхностям.

После нажатия кнопки *Create* Мастер контактов переключится в режим проверки ориентации нормалей. При этом в рабочем окне будут изображаться лишь контактные и ответные элементы с условными значками, показывающими направление нормалей.

Следует отметить, что нормали контактных и ответных элементов должны быть направлены навстречу друг другу.

В нашем случае нормали контактных элементов всегда будут направлены наружу (т.е. правильно).

Однако ориентация нормали к ответной поверхности здесь зависит от направления линии L1 (т.е. от порядка перечисления ее точек).

Если нормаль к ответной поверхности направлена вниз (т.е. неправильно), следует изменить ее ориентацию с помощью кнопки *Flip Target Normal*.

Для завершения процесса создания контактной пары нажимаем кнопку *Finish*. Затем можно закрыть окно «Contact Manager».

Отообразим на экране дисплея построенную геометрическую модель в виде линий: *U_M>Plot>Lines*.

10. Задать граничные условия.

Поскольку задача является осесимметричной, необходимо ограничить радиальные перемещения всех узлов, лежащих на оси Y.

Воспользуемся командой задания перемещений на линиях: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

Указываем линии L3 и L5 (лежащие на оси симметрии), *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем UX (запрет поступательных перемещений по оси X), *OK*.

Следует отметить, что ANSYS по умолчанию автоматически закрепляет жесткую ответную поверхность (линию) от всех перемещений.

11. Установить новый тип анализа – анализ переходных динамических процессов: *M_M>Solution>Analysis Type>New Analysis*.

Указываем анализ Transient, *OK*.

Выбираем метод решения Full (полный), *OK*.

12. Задать опции анализа: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls*.

Выбираем вкладку «Basic».

Для учета больших перемещений в списке «Analysis Options» устанавливаем значение Large Displacement Transient.

Время в конце шага нагружения (поле «Time at end of loadstep» раздела «Time Control») задаем равным 0.0002 (в сек).

В поле «Number of substeps» того же раздела вводим число подшагов, например 50.

И, наконец, для сохранения промежуточных результатов на всех подшагах в списке «Frequency» (частота записи выходных величин в файл результатов) выбираем значение Write every substep.

13. Непосредственно перед запуском задачи на счет задать начальные условия (перемещение и скорость отдельных узлов модели в момент времени $t = 0$): *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Initial Condit'n>Define*.

В панели указания активизируем селекторную кнопку *Box* и, удерживая нажатой левую кнопку мыши, растягиваем прямоугольник выбора так, чтобы в него попали все узлы, относящиеся к шару. *OK*.

В появившейся диалоговой панели «Define Initial Conditions» в поле «DOF to be specified» (определяемая степень свободы) выбираем компоненту *UY*, в поле «Initial value of DOF» (начальное перемещение) вводим -35 (в мм; шар смещается вниз до положения контакта с жесткой поверхностью), а в поле «Initial velocity» (начальная скорость) вводим -25000 (в мм/с; $90 \cdot 10^6 / 3600 = 25000$). *OK*.

14. Выполнить переходный динамический анализ: *M_M>Solution>Solve>Current LS*.

Отметим, что при выходе из модуля *Solution* начальные условия пропадают. Поэтому при повторном анализе их следует задать заново.

15. Запустить специальный инструмент «Results Viewer», предназначенный для пошагового просмотра результатов расчета: *M_M>General Postproc>Results Viewer*.

При этом на экране исчезнет главное меню и появится дополнительная панель, вид которой показан на рисунке 6.3.

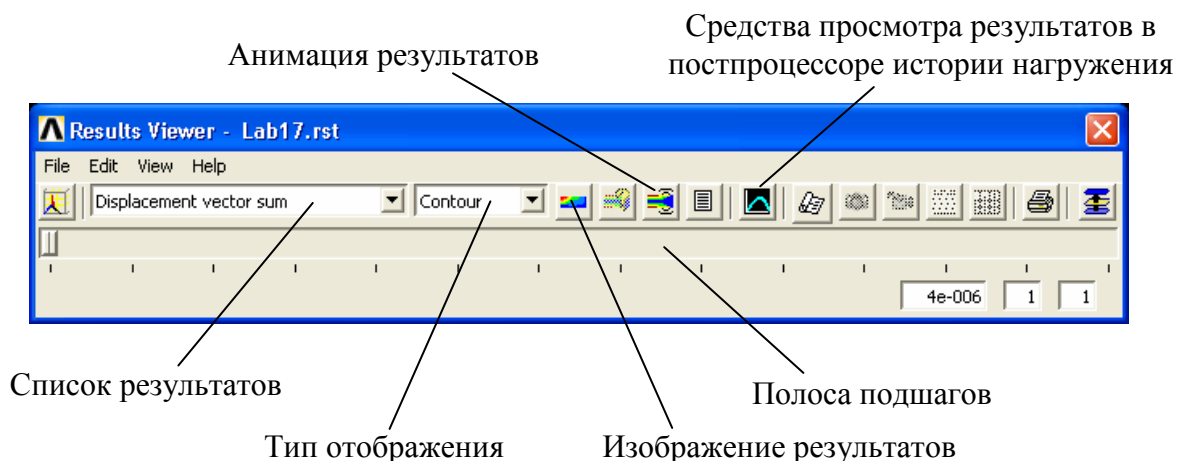


Рисунок 6.3 – Панель управления пошаговым отображением результатов

15.1. Изобразить эпюру контактного давления.

В списке результатов выбираем *Nodal Solution>Contact>Contact Pressure* (контактное давление) и нажимаем кнопку *Plot Results* (изображение результатов).

Далее, перемещая движок по полосе подшагов, можно наблюдать картину изменения величины контактного давления в различные моменты времени в рассчитанном интервале.

Эпюра контактного давления на первом подшаге представлена на рисунке 6.4.

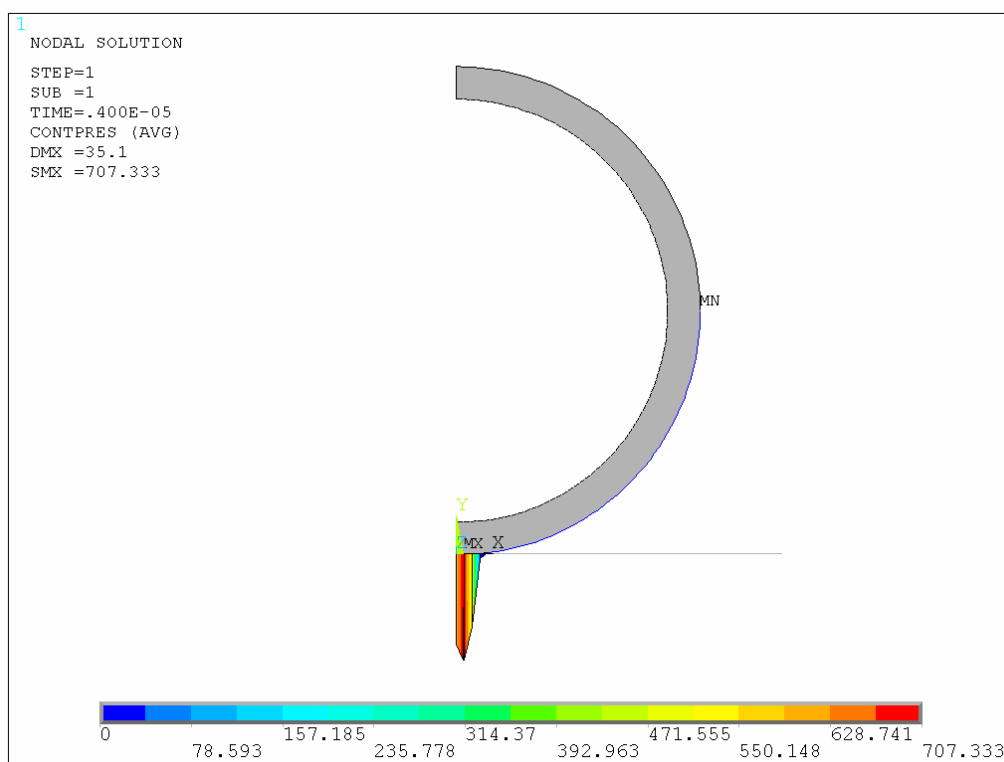


Рисунок 6.4 – Эпюра контактного давления (в МПа)

Отметим, что контактное взаимодействие здесь длится примерно 0,00009 с, после чего происходит разъединение тел (отскок шара).

Аналогичным образом можно анализировать и другие расчетные величины, входящие в список доступных результатов. Например, интерес могут представлять пластические деформации после соударения и область их локализации: *Nodal Solution>Plastic Strain>von Mises Plastic strain*.

15.2. Включить анимацию изображения результатов расчета.

Нажимаем кнопку *Animate Results* (анимация результатов) в панели «Result Viewer».

При этом появляется новая диалоговая панель, где в разделе «Type of Animation Sequence to Capture» в качестве типа анимации следует указать Over time (по времени), *OK*.

В следующем окне в поле «Number of animations frames» (количество кадров анимации) вводим число в интервале от 10 до 100 (чем больше кадров, тем более плавной будет анимация, но более затратным будет процесс записи видео файла), в поле «Animation time delay» (время задержки между кадрами, сек) вводим 0.1 и в списке «Contour data for animation» выбираем *Use Last Display* (использовать последнее изображение) либо другую выходную величину.

Нажатие кнопки *OK* приводит к формированию и отображению на экране анимированного представления выбранной величины.

15.3. Построить зависимость пластической деформации от времени.

В панели «Result Viewer» нажимаем кнопку *Time-History Variable Viewer* (средства просмотра результатов в постпроцессоре истории нагружения).

Для задания новой переменной нажимаем кнопку *Add Data*.

В списке «Result Item» последовательно указываем *Nodal Solution>Plastic Strain>von Mises plastic strain* (эквивалентная пластическая деформация по Мизесу).

В поле «Variable Name» (имя переменной) вводим *ep1*. *OK*.

Далее на экране при помощи мыши указываем самый нижний узел шара. *OK*.

Затем в списке выбираем переменную *ep1* и нажимаем кнопку *Graph Data*. В результате получим график зависимости пластической деформации от времени в указанной точке шара (рисунок 6.5).

16. Для отчета по работе записать в файл протокол команд базы данных:

U_M>File>Write DB Log File.

Вводим имя *Lab6.lgw*.

17. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT*.

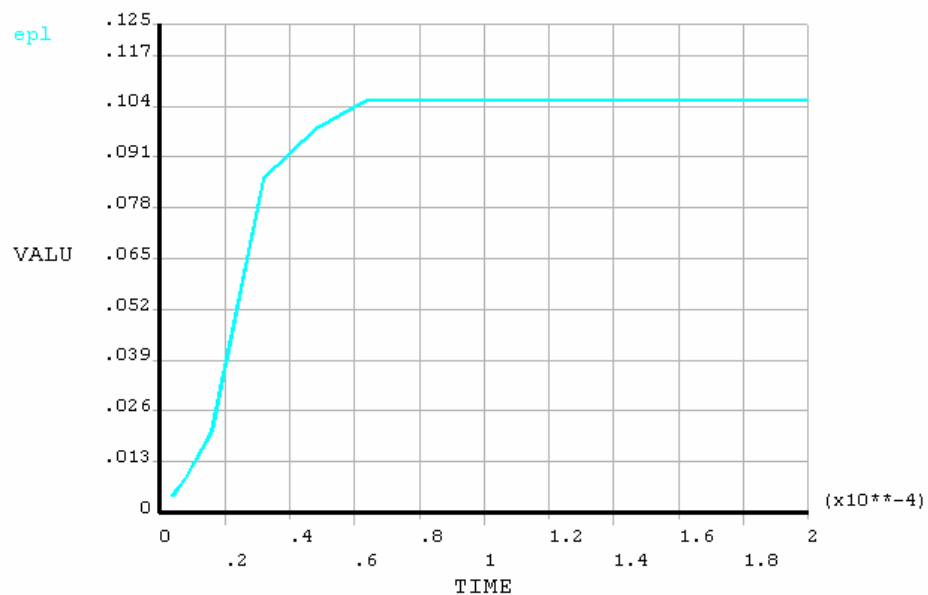


Рисунок 6.5 – График зависимости пластической деформации от времени

7 РАСЧЁТ БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЗАТЯЖКОЙ ПРИ ПОМОЩИ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS

Исходные данные: две круглые пластины диаметром 67 мм разной толщины (15 мм и 9 мм) скреплены болтом М6, поставленным с зазором 0,5 мм. Сила предварительной затяжки болта составляет 861 Н. Предполагается, что нижняя пластина жестко закреплена по внешнему контуру, а на верхнюю пластину действует распределенная по окружности нагрузка интенсивностью $q = 15 \text{ Н/мм}$, как показано на рисунке 7.1. Пластины изготовлены из алюминиевого сплава (модуль упругости $7 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона 0,3), а болт и гайка – из стали (модуль упругости $2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона 0,3).

Допущение: головка болта и гайка имеют цилиндрическую форму без граней под ключ, что позволяет ограничиться решением осесимметричной задачи.

Цель: исследовать напряженно-деформированное состояние болтового соединения; проверить раскрытие стыка соединяемых деталей под нагрузкой.

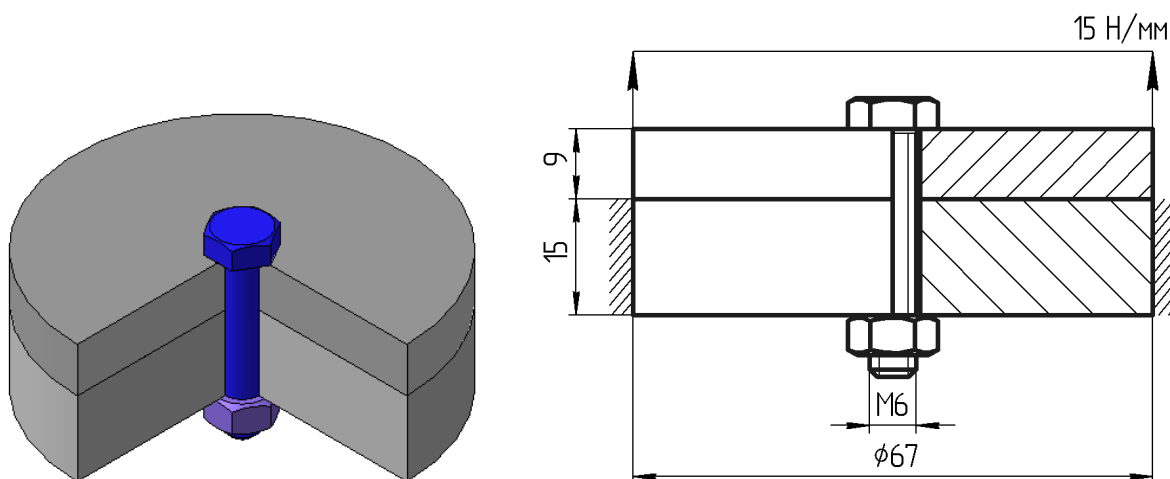


Рисунок 7.1 – Болтовое соединение пластин

В осесимметричной постановке болтовое соединение будем представлять его сечением, параметрические размеры которого показаны на рисунке 7.2. Начало системы координат поместим в центр нижней поверхности гайки, причем ось X направим вправо, а ось Y – вверх по оси симметрии.

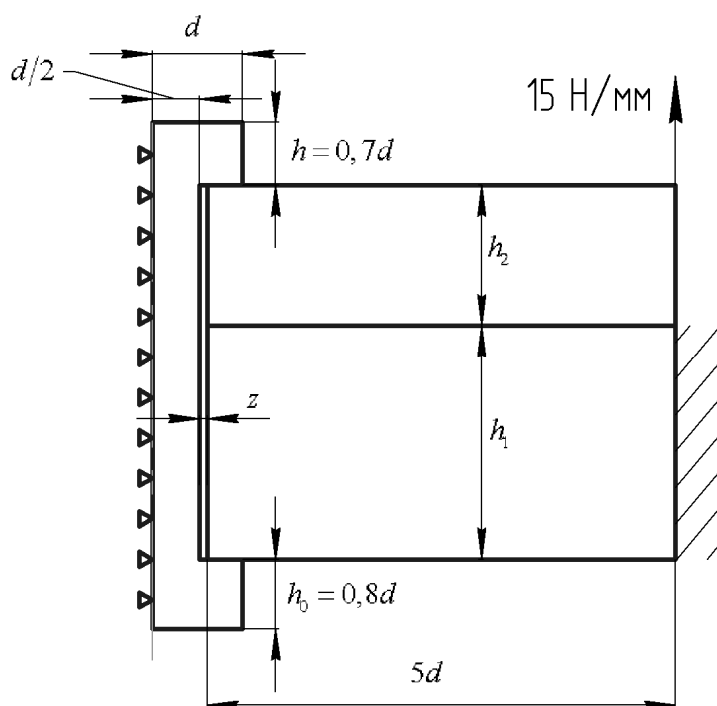


Рисунок 7.2 – Расчетная схема

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab7.
2. Установить тип используемых в расчете конечных элементов – 4-узловой плоский элемент PLANE182 с формулировкой «осесимметричное поведение»: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete*.
Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Quad 4node 182, OK*.
В окне «Element types» нажимаем *Options* и для опции К3 устанавливаем значение *Axisymmetric*. Далее *OK* и *Close*.
3. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

Сначала определяем первую модель материала (Material Model Number 1), содержащую свойства стали. Для этого в правом окне последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

Вводим:

EX: 2.1e5 (модуль упругости стали, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона стали)

OK.

Добавляем вторую модель материала со свойства алюминиевого сплава.

В меню «Material» панели «Define Material Model Behavior» выбираем пункт «New model». В появившемся окне «Define material ID» в поле «Define material ID» вводим номер 2 и нажимаем кнопку OK.

При этом в левом окне «Material Models Defined», где содержится список имеющихся моделей материалов, появляется новая запись: Material Model Number 2.

Далее в правом окне «Material Models Available» последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

В соответствующие поля вводим:

EX: $7e4$ (модуля упругости алюминиевого сплава, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициента Пуассона алюминиевого сплава)

Завершаем процесс ввода кнопкой *OK* и закрываем панель.

4. Для удобства ввода исходных данных определить скалярные параметры: *U_M>Parameters>Scalar Parameters*.

В поле «Selection» последовательно вводим значения параметров, характеризующих размеры сечения (см. рисунок 7.2): $d=6$; $z=0.5$; $h=0.7*d$; $h_0=0.8*d$; $h_1=15$; $h_2=9$. После каждого ввода здесь необходимо нажать кнопку *Accept* (принять). Закрываем панель кнопкой *Close*.

5. Построить геометрическую модель сечения болтового соединения.

Как видно из рисунка 7.2, данная модель может быть получена при помощи комбинирования прямоугольников.

- 5.1. Построить прямоугольники, представляющие сечения болта и гайки: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners*.

Для первого прямоугольника (цилиндрическая часть болта) вводим следующие параметры: координаты левого нижнего угла $WP X = 0$ и $WP Y = 0$; ширина $Width = d/2$; высота $Height = h_0+h_1+h_2+h$. Нажимаем кнопку *Apply* (применить) для продолжения данной операции.

Для второго прямоугольника (гайка) задаем: $WP X = 0$; $WP Y = 0$; $Width = d$; $Height = h_0$. *Apply*.

Для третьего прямоугольника (головка болта) вводим: $WP X = 0$; $WP Y = h_0+h_1+h_2$; $Width = d$; $Height = h$. Завершаем построение сечения крепежной пары кнопкой *OK*.

- 5.2. Построить прямоугольники, представляющие сечения скрепляемых деталей.

Переместим сначала рабочую плоскость так, чтобы ось $WP X$ была направлена вдоль линии опирания гайки на деталь, а ось $WP Y$ отстояла на 0,5 мм от цилиндрической части болта (для образования зазора между болтом и деталями): *U_M>WorkPlane>Offset WP to>XYZ*

Locations. В панели указания активизируем опцию «Global Cartesian» (глобальные декартовы координаты) и в поле ниже вводим: $d/2+z, h0, 0$. Нажимаем *OK*.

Опять выбираем команду *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners*.

Строим четвертый прямоугольник со следующими параметрами: $WP X = 0$; $WP Y = 0$; $Width = 1.5*d$; $Height = h1$. *Apply*.

Завершаем формирование сечения нижней пластины построением пятого прямоугольника: $WP X = 1.5*d$; $WP Y = 0$; $Width = 3.5*d$; $Height = h1$. *Apply*.

В заключение аналогично строим шестой и седьмой прямоугольники, представляющие сечение верхней пластины.

Для шестого прямоугольника: $WP X = 0$; $WP Y = h1$; $Width = d$; $Height = h2$. *Apply*.

Для седьмого: $WP X = d$; $WP Y = h1$; $Width = 4*d$; $Height = h2$. Завершаем построение кнопкой *OK*.

Включаем нумерацию геометрических объектов: *U_M>PlotCtrls>Numbering*; отмечаем флаг «Area numbers».

Для удобства дальнейших построений можно скрыть изображение рабочей плоскости: *U_M>WorkPlane>Display Working Plane*.

- 5.3. Выполнить булеву операцию перекрытия поверхностей, образующих крепежную пару: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Overlap>Areas*.

Указываем поверхности A1, A2 и A3. *OK*.

- 5.4. Склеить попарно поверхности, образующие каждую из скрепляемых деталей: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Glue>Areas*.

Сначала указываем поверхности A4 и A5 (нижняя пластина), *Apply*.

Затем указываем поверхности A6 и A7 (верхняя пластина), *OK*.

Геометрическая модель построена.

6. Разбить геометрическую модель на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

Здесь сначала следует назначить атрибуты поверхностям, так как в рассматриваемой задаче используются два материала.

Для этого в разделе «Element Attributes» диалоговой панели «MeshTool» в выпадающем списке выбираем Areas (поверхности), рядом нажимаем кнопку *Set*.

Указываем поверхности A8, A9, A10, A11 и A12, представляющие элементы крепежа (изготовленные из стали), *OK*.

Появляется диалоговая панель «Area Attributes», где по умолчанию установлены следующие значения:

MAT «Material number»: 1 (номер материала)

TYPE «Element type number»: 1 PLANE182 (номер типа элементов).

Поскольку они нас устраивают, нажимаем *Apply*.

Теперь указываем поверхности A1, A2, A4 и A6, описывающие соединяемые пластины из алюминиевого сплава, *OK*.

В поле «Material number» выбираем номер 2 (модель материала для алюминиевого сплава). *OK*.

В разделе «Size Controls» устанавливаем глобальный размер элементов с помощью кнопки *Set* строки «Global»; в поле «Element edge length» (длина стороны элемента) вводим значение 1 (в мм), *OK*.

Далее в списке «Mesh» в качестве объектов для разбиения выбираем Areas (поверхности), в поле «Shape» (форма элементов) указываем Quad (четырёхугольная). И, наконец, выбираем режим построения регулярной сетки Mapped, так как все поверхности имеют «правильную» топологию.

После нажатия кнопки *Mesh* указываем все поверхности (*Pick All*).

Получаемая здесь разбивка изображена на рисунке 7.3.

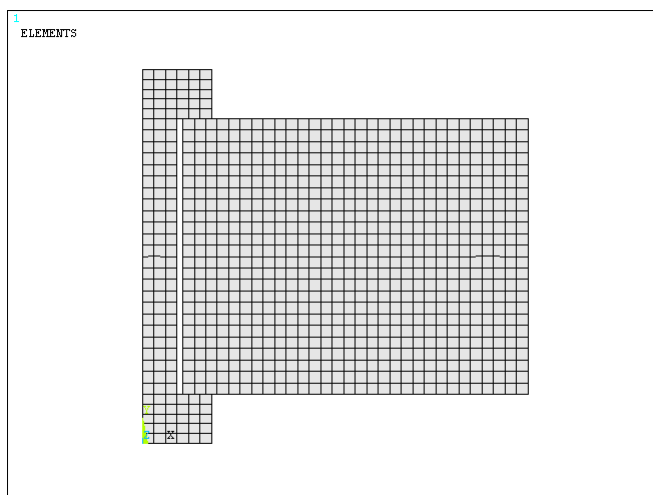


Рисунок 7.3 – Сетка конечных элементов

Далее удобно включить нумерацию линий: *U_M>PlotCtrls>Numbering*; отмечаем флаг «Line numbers».

7. Создать контактную пару для описания взаимодействия скрепляемых пластин.

Для этого сначала запускаем специальный инструмент «Contact Manager» (Менеджер контактов) путем нажатия одноименной кнопки пиктографического меню программы ANSYS либо командой *M_M>Preprocessor>Create>Contact Pair*.

В появившейся панели нажимаем первую кнопку, предназначенную для вызова средств Мастера контактов «Contact Wizard», и создаем контактную пару между скрепляемыми пластинами, выполняя следующие шаги.

- 7.1. Указать ответную поверхность.

В разделе «Target Surface» в качестве объектов, используемых для определения ответной поверхности, выбираем Lines (линии).

В разделе «Target Type» (тип ответной поверхности) выбираем Flexible (деформируемая поверхность).

Нажимаем кнопку *Pick Target* и указываем линии L4 и L15 (представляющие верхнюю границу нижней более толстой пластины).

Далее нажимаем *Apply* (поскольку после нажатия *OK* кнопка *Next* может оставаться неактивной).

На экран вернется диалоговая панель «Contact Wizard», в которой будет активна кнопка *Next*.

Нажимаем *Next* для перехода к следующему шагу.

- 7.2. Указать контактную поверхность.

В разделе «Contact Surface» в качестве объектов, используемых для определения контактной поверхности, выбираем Lines (линии).

В разделе «Contact Element Type» (тип модели контакта) выбираем Surface-to-Surface (поверхность – поверхность).

Нажимаем кнопку *Pick Contact* и указываем линии L5 и L21 (представляющие нижнюю границу верхней пластины).

Далее нажимаем *Apply*, а не *OK*.

В диалоговой панели Мастера контактов нажимаем кнопку *Next* для перехода к следующему шагу.

- 7.3. Задать параметры контакта.

Отключаем опцию начального внедрения (проникновения) «Include initial penetration».

Для коэффициента трения в поле «Coefficient of Friction» вводим значение 1.1 (алюминий-алюминий, чистая несмазанная поверхность).

И, наконец, для создания собственно контактной пары нажимаем кнопку *Create*.

Для завершения процесса создания контактной пары в последнем информационном окне нажимаем кнопку *Finish*.

8. Создать контактную пару для описания взаимодействия гайки и нижней пластины.

В панели Менеджера контактов снова нажимаем кнопку для вызова средств Мастера контактов и создаем вторую контактную пару, выполняя те же шаги, что и в предыдущем случае. Однако в качестве ответной поверхности указываем линию L13 (короткая линия нижней границы нижней пластины), а за контактную – принимаем линию L36 (верхний край гайки). Для коэффициента трения вводим значение 0.6 (сталь-алюминий, чистая несмазанная поверхность).

9. Создать контактную пару для описания взаимодействия головки болта и верхней пластины.

В панели Менеджера контактов опять нажимаем кнопку для вызова средств Мастера контактов и создаем третью контактную пару, выполняя те же шаги, что и в предыдущих случаях. Однако в качестве ответной поверхности указываем линию L23 (короткая линия верхней границы верхней пластины), а за контактную – принимаем линию L38 (нижний край головки болта). Коэффициент трения равен 0,6.

В конце следует закрыть диалоговую панель Менеджера контактов.

Отобразим на экране дисплея построенную геометрическую модель в виде линий: *U_M>Plot>Lines*.

10. Создать дополнительный узел для учета затяжки болта: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS*.

Для удобства дальнейшего использования этого узла ему следует присвоить легко запоминающийся номер (заведомо превышающий число узлов в модели), например 9999. Положение данного узла не имеет существенного значения, главное чтобы он был легко доступным при графическом указании.

Учитывая это, в поле «Node number» (номер узла) вводим 9999, а в поля «X, Y, Z Location in active CS» (координаты узла в активной системе координат) – соответственно $6*d; h+h1; 0$. ОК.

Отообразим поверхности: *U_M>Plot>Areas*.

11. Сгенерировать элементы предварительной затяжки болта: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Pretension>Pretensn Mesh>Elements in Area*.

Указываем цилиндрическую часть болта – поверхность A12; *OK*.

Указываем произвольный узел на оси *Y* в сечении цилиндрической части болта, например, узел, находящийся напротив линии стыка алюминиевых деталей, *OK*.

Далее в поле «Section number» (номер сечения) вводим 1, в поле «Section name» (имя сечения) – Bolt и в поле «Pretension node» (контрольный узел предварительной затяжки) – номер, созданного вручную узла, т.е. 9999. В списке «Separation coord system» (система координат разъединения) указываем Global Cartesian; а в списке «Separatn surface norm to» (нормаль к поверхности разъединения) выбираем *Y-axis*. *OK*.

В результате выполнения данной операции конечные элементы, моделирующие болт, делятся на две несвязанные группы, между которыми и создаются элементы предварительной затяжки. При этом усилие затяжки будет действовать по направлению нормали к поверхности разъединения. Следует отметить, что при каждом изменении сетки в центральной части болта необходимо заново генерировать элементы предварительной затяжки.

12. Задать граничные условия.

Поскольку задача является осесимметричной, необходимо ограничить радиальные перемещения всех узлов, лежащих на оси *Y*.

Кроме того, следует жестко закрепить наружный край нижней пластины.

Воспользуемся командой задания перемещений на линиях: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines*.

Указываем линии L29, L33 и L39 (т.е. все линии, лежащие на оси симметрии), *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем UX (запрет поступательных перемещений по оси *X*), *Apply*.

Далее указываем линию L18 (наружный край нижней пластины), *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем All DOF (запрет всех перемещений), *OK*.

13. Приложить усилие предварительной затяжки: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>on Nodes*.

Указываем контрольный узел 9999, имеющий только одну степень свободы. *OK.*

Затем в списке «Direction of force/moment» (направление силы/момента) выбираем направление FX и в поле «Force/moment value» вводим значение 861 (в Н). *OK.*

Следует отметить, что графическое изображение силы здесь не имеет физического смысла.

14. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar>SAVE_DB.*

База данных записывается в файл Lab7.db.

15. Задать опции анализа: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls.*

Отметим, что процесс нагружения для рассматриваемой задачи разбивается на два шага. При этом на первом шаге производится затяжка соединения, а на втором прикладывается основная нагрузка по контуру верхней пластины.

Выбираем вкладку «Basic». В поле «Number of substeps» раздела «Time Control» вводим число подшагов, например 30.

Для сохранения промежуточных результатов на всех подшагах в списке «Frequency» (частота записи выходных величин в файл результатов) выбираем значение Write every substep.

16. Выполнить анализ первого шага нагружения: *M_M>Solution>Solve>Current LS.*

По окончании решения, **не выходя из модуля Solution**, необходимо задать нагрузку на втором шаге и повторно запустить задачу на счет, как описано далее.

Отобразим конечно-элементную модель: *U_M>Plot>Elements.*

17. Зафиксировать затяжку.

Для этого сначала удаляем силу затяжки FX=891 Н в узле 9999: *M_M>Solution>Define Loads>Delete>Structural>Force/Moment>On Nodes.* Указываем узел 9999, *OK.*

В списке «Force/moment to be deleted» выбираем компоненту FX. *OK.*

Затем в этом узле для перемещения UX следует задать значение %_FIX% (включая два символа процента и знак подчеркивания): *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>on Nodes*

Опять указываем узел 9999, *OK.*

В поле «DOFs to be constrained» выбираем UX и в поле «Displacement value» вводим %_FIX%. *OK.*

Появившееся предупреждение о том, что имя `_FIX` является зарезервированным служебным именем, следует проигнорировать.

18. Приложить основную нагрузку.

Напомним, что при решении осесимметричной задачи при задании погонной кольцевой нагрузки q следует вводить полное значение силы $2\pi r q = 2\pi \cdot 24,5 \cdot 15 = 2309$ Н (где $r = d/2 = 49/2 = 24,5$ мм – радиус окружности, по которой действует погонная нагрузка q).

Воспользуемся командой задания сил в точках: `M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Keypoints`.

Указываем правую верхнюю точку сечения верхней пластины (т.е. точку 21), *OK*.

В списке «Direction of force/mom» (направление силы/момента) выбираем направление FY и в поле «Force/moment value» вводим число 2309. *OK*.

19. Выполнить анализ второго шага нагружения: `M_M>Solution>Solve>Current LS`.

20. Запустить специальный инструмент «Results Viewer», предназначенный для пошагового просмотра результатов расчета: `M_M>General Postproc>Results Viewer`.

20.1. Изобразить эпюру контактного давления.

В списке результатов выбираем `Nodal Solution>Contact>Contact Pressure` (контактное давление) и нажимаем кнопку `Plot Results` (изображение результатов).

Далее, перемещая движок по полосе подшагов, можно наблюдать картину изменения величины контактного давления в различные моменты времени в рассчитанном интервале.

По умолчанию время в конце первого шага составляет 1 с, а второго – 2 с.

Отметим, что при раскрытии стыка пропадает контактное давление между соединяемыми пластинами. В нашем случае это происходит в момент времени 1,47 с, что соответствует нагрузке

$$q_{\text{раск}} = (1,47 - 1)q = 0,47 \cdot 15 = 7,05 \text{ Н/мм.}$$

Эпюра контактного давления в конце первого шага представлена на рисунке 7.4.

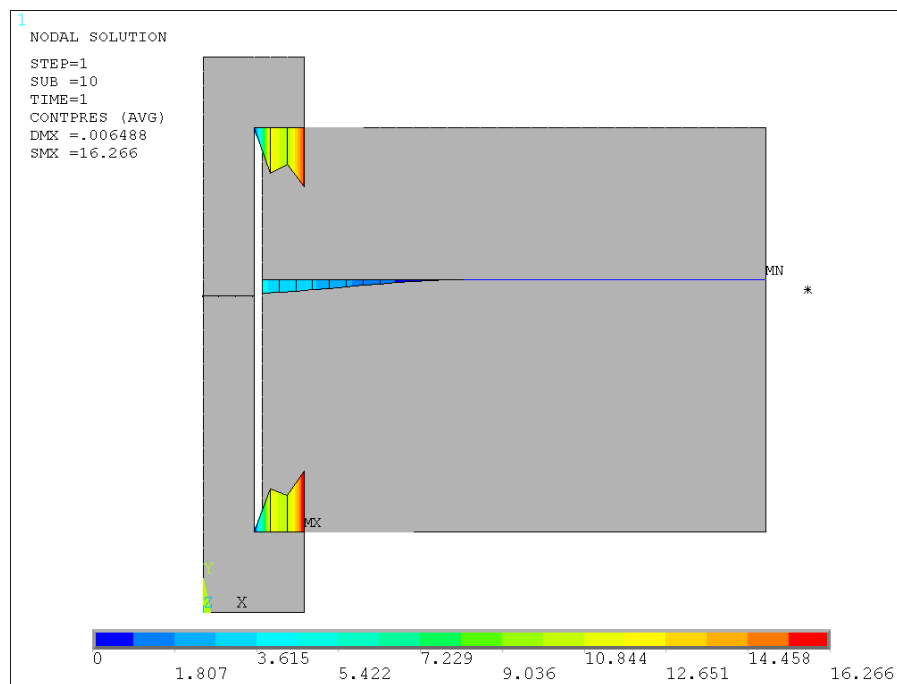


Рисунок 7.4 – Эпюра контактного давления (в МПа) после затяжки болта

20.2. Построить зависимость осевых напряжений в цилиндрической части болта от времени (параметра нагружения).

В панели «Result Viewer» нажимаем кнопку *Time-History Variable Viewer* (средства просмотра результатов в постпроцессоре истории нагружения).

Для задания новой переменной нажимаем кнопку *Add Data*.

В списке «Result Item» последовательно указываем *Nodal Solution>Stress>Y-Component of stress* (Y-компонента напряжений). В поле «Variable Name» (имя переменной) вводим SY. OK. Далее на экране при помощи мыши указываем узел на оси круговой симметрии в середине цилиндрической части болта. OK.

Затем в списке выбираем переменную SY и нажимаем кнопку *Graph Data*. В результате получим график зависимости осевых напряжений от параметра нагружения в указанной точке болта (рисунок 7.5), где можно выделить три участка. Первый прямолинейный участок (от 0 до 1 с) соответствует предварительной затяжке болта, т.е. первому шагу нагружения. Далее прикладывается основная нагрузка q , т.е. выполняется второй шаг. При этом, когда стык закрыт (от 1 до 1,47 с), рассматриваемая зависимость, как видно, является нелинейной. И, наконец, третий прямолинейный участок (от 1,47 до 2 с) характеризует нагружение болта после раскрытия стыка.

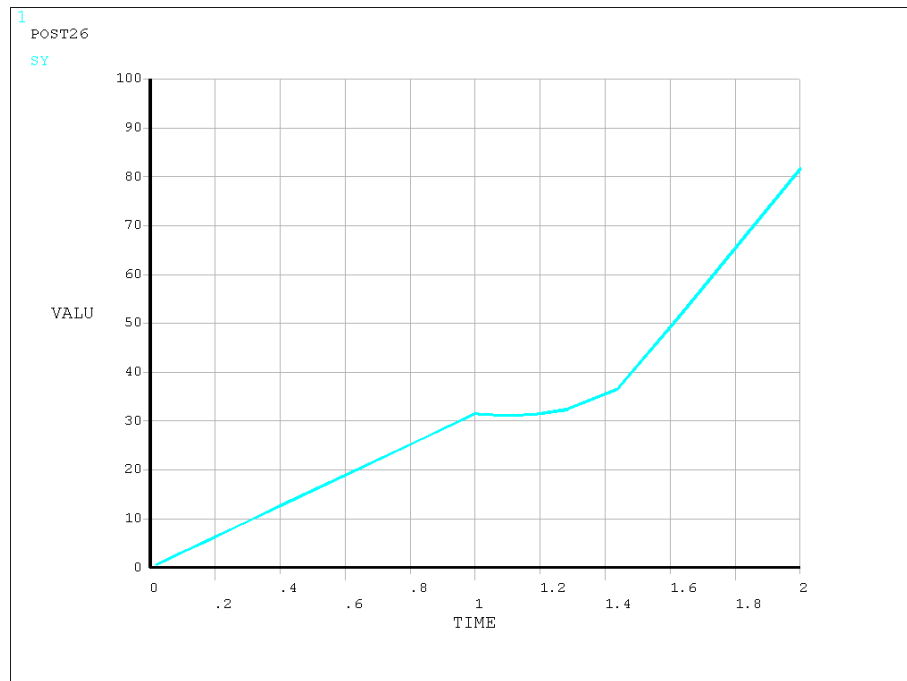


Рисунок 7.5 – График зависимости напряжений в цилиндрической части болта от параметра нагружения

21. Для отчета по работе записать в файл протокол команд базы данных:

U_M>File>Write DB Log File.

Вводим имя Lab7.lgw.

22. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT.*

8 МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБКИ ПРОВОЛОКИ ПРИ ПОМОЩИ ЖЁСТКИХ РОЛИКОВ В СРЕДЕ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS

Исходные данные: стальная проволока диаметром 2 мм установлена в гибочном устройстве, представляющем две пары жёстких роликов диаметром 10 и 4 мм (рисунок 8.1). Расстояние между осями роликов составляет 9 мм. Меньший ролик может перемещаться, обкатывая и прижимая заготовку к неподвижному ролику большего диаметра. Один торец проволоки жёстко закреплён. Коэффициент трения между роликом и проволокой равен 0,05. Материал проволоки – сталь 17Х18Н9 ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$; $\sigma_B = 570$ МПа; $\sigma_{0,2} = 200$ МПа; $E_T = 1000$ МПа).

Допущение: ролики считаются абсолютно жёсткими.

Цель: выполнить моделирование операции гибки при помощи жёстких цилиндров с ведущим узлом; исследовать изменение напряжённо-деформированное состояние проволоки в процессе данной операции.

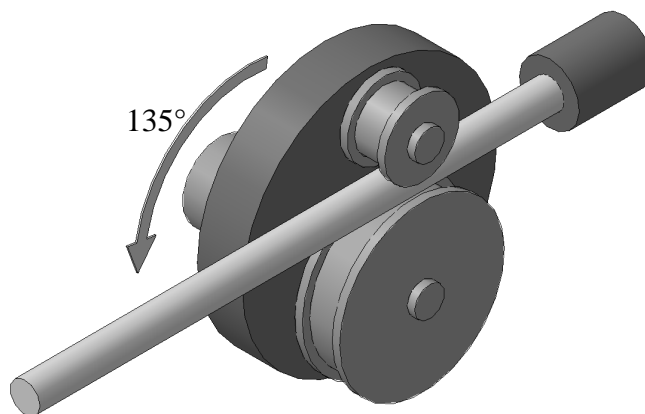


Рисунок 8.1 – Гибочное устройство

Благодаря симметрии конструкции здесь можно ограничиться моделированием лишь половины проволоки.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab8.
2. Установить тип используемых в расчёте элементов – 8-узловой шестигранный объёмный элемент SOLID185: *M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete.*

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Brick 8node 185, OK.*

3. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models*.

В правом окне последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic*.

Вводим:

EX: 2e5 (модуль упругости, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)

ОК.

Далее для задания нелинейных свойств выбираем билинейную модель деформирования с изотропным упрочнением: *Structural>Nonlinear>Inelastic>Rate Independent>Isotropic Hardening Plasticity>Mises Plasticity>Bilinear*.

Вводим:

Yield Stss: 200 (предел текучести, МПа)

Tang Mod: 1000 (касательный модуль, МПа)

ОК.

Закрываем панель.

4. Построить сектор цилиндра радиусом 1 мм, длиной 30 мм, с углом раствора 90°: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Cylinder>By Dimension*.

Вводим следующие параметры: внешний и внутренний радиусы RAD1 = 1 и RAD2 = 0; координаты нижнего и верхнего оснований Z1 = 0 и Z2 = 30; начальный и конечный углы сектора THETA1 = 0 и THETA2 = 90.

ОК.

При этом основания цилиндра будут параллельны рабочей плоскости, а его ось будет проходить через начало координат этой плоскости.

Далее удобно установить изометрическую проекцию.

5. Разбить объём на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.

Нажимаем кнопку *Set* строки «Lines» и указываем одну из направляющих цилиндра, например дугу L3, ОК.

В поле «No. of element divisions» (число делений на элементы) вводим значение 4, *Apply*.

Далее указываем две образующие цилиндра и его осевую линию (т.е. L7, L8 и L9), ОК.

В поле «No. of element divisions» вводим число делений на элементы: 20.

Для сгущения сетки к середине линии в поле «Spacing ratio» вводим отрицательное число -0.3, *OK*.

В списке «Mesh» в качестве объектов для разбиения выбираем Volumes (объёмы), в поле «Shape» указываем Hex (форма гексаэдра).

Используем режим Mapped (регулярная сетка).

После нажатия кнопки *Mesh* указываем объём V1, *OK*.

Получаемая здесь разбивка представлена на рисунке 8.2.

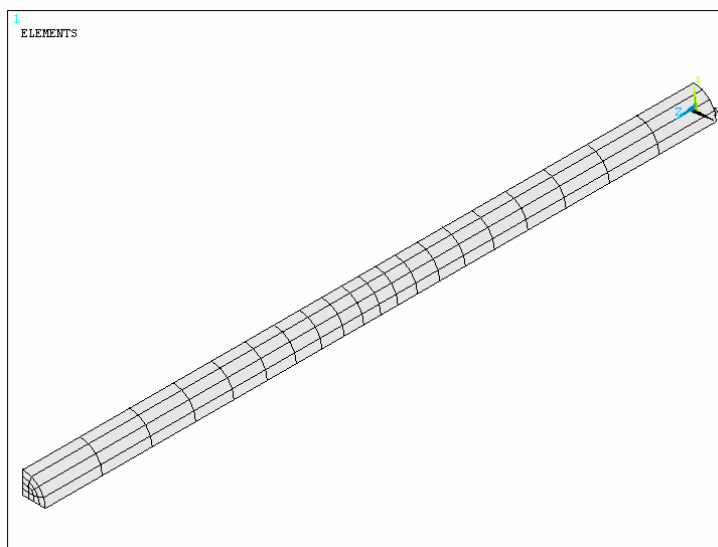


Рисунок 8.2 – Сетка на четверти цилиндра

6. Зеркально отобразить построенный объём вместе с конечно-элементной сеткой относительно плоскости *XZ*: *M_M>Preprocessor>Modeling>Reflect>Volumes*.

Указываем объём V1, *OK*.

Используем следующие значения:

«Plane of symmetry»: *X-Z plane Y* (плоскость симметрии)

«Items to be reflected»: *Volumes and mesh* (объекты, которые должны отображаться – объёмы и сетка)

«Existing volumes will be»: *Copied* (исходные объёмы будут копироваться)

OK.

7. Выполнить слияние совпадающих объектов для обеспечения непрерывности модели: *M_M>Preprocessor>Numbering Ctrl>Merge Items*.

В поле «Type of item to be merge», определяющем тип объектов для слияния, выбираем *All*, *OK*.

8. Совместить рабочую плоскость с глобальной плоскостью YZ : $U_M > WorkPlane > Offset WP by Increments$.

В диалоговой панели «Offset WP» вводим:

«XY, YZ, ZX Angles»: 0, 0, 90 (углы поворота, град)

ОК.

9. Для моделирования роликов построить цилиндры с основаниями, лежащими в глобальной плоскости YZ : $M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Cylinder > Solid Cylinder$.

Для неподвижного ролика вводим следующие параметры: WP X = -10 и WP Y = -6; Radius = 5; Depth = 3, *Apply*.

Для подвижного ролика: WP X = -10 и WP Y = 3; Radius = 2; Depth = 3, ОК.

10. Удалить построенные на предыдущем шаге объёмы, оставив при этом входящие в их состав объекты нижних уровней: $M_M > Preprocessor > Modeling > Delete > Volumes only$.

Указываем объёмы, описывающие геометрию роликов (т.е. V3 и V4), ОК.

Далее удобно изобразить на экране лишь поверхности ($U_M > Plot > Areas$).

11. Удалить торцевые поверхности, оставшиеся после удаления цилиндрических объёмов: $M_M > Preprocessor > Modeling > Delete > Areas only$.

Указываем четыре круглые торцевые поверхности (т.е. A9, A11, A14 и A15), ОК.

Полученная таким образом геометрическая модель показана на рисунке 8.3.

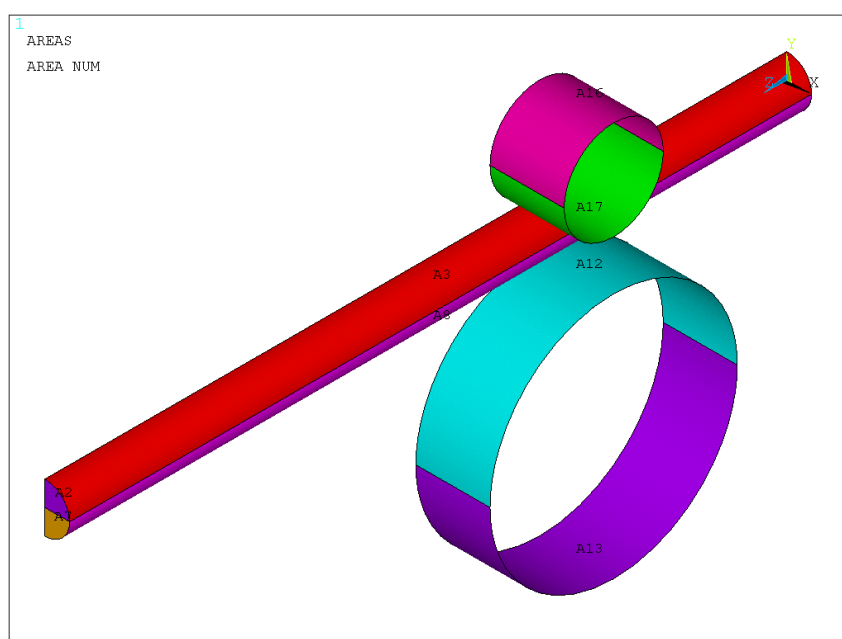


Рисунок 8.3 – Геометрическая модель с нумерацией поверхностей

12. Создать контактную пару для описания взаимодействия неподвижного абсолютно жёсткого ролика и деформируемой проволоки.

Для этого сначала запускаем специальный инструмент «Contact Manager» (Менеджер контактов) путём нажатия одноимённой кнопки пиктографического меню программы ANSYS либо командой *M_M>Preprocessor>Create>Contact Pair*.

В появившейся панели нажимаем первую кнопку, предназначенную для вызова средств Мастера контактов «Contact Wizard», и создаём контактную пару между неподвижным большим роликом и поверхностью проволоки, выполняя следующие шаги.

12.1. Указать ответную поверхность.

В разделе «Target Surface» в качестве объектов, используемых для определения ответной поверхности, выбираем Areas (поверхности).

В разделе «Target Type» (тип ответной поверхности) выбираем Rigid (абсолютно жёсткая).

Нажимаем кнопку *Pick Target* и указываем обе цилиндрические поверхности ролика большого диаметра (т.е. A12 и A13).

Далее нажимаем *Apply* (поскольку после нажатия *OK* кнопка *Next* может оставаться неактивной).

На экран вернётся диалоговая панель «Contact Wizard», в которой будет активна кнопка *Next*.

Нажимаем *Next* для перехода к следующему шагу.

12.2. Указать контактную поверхность.

В разделе «Contact Surface» в качестве объектов, используемых для определения контактной поверхности, выбираем Areas (поверхности).

В разделе «Contact Element Type» (тип модели контакта) выбираем Surface-to-Surface (поверхность – поверхность).

Нажимаем кнопку *Pick Contact* и указываем нижнюю цилиндрическую поверхность проволоки (т.е. A8).

Далее нажимаем *Apply*, а не *OK*.

В диалоговой панели Мастера контактов нажимаем кнопку *Next* для перехода к следующему шагу.

12.3. Задать параметры контакта.

Отключаем опцию начального внедрения (проникновения) «Include initial penetration».

Для коэффициента трения в поле «Coefficient of Friction» вводим значение 0.05.

И наконец, для создания собственно контактной пары нажимаем кнопку *Create*, а затем *Finish*.

13. Создать контактную пару для описания взаимодействия подвижного абсолютно жёсткого ролика и проволоки.

Снова открываем Мастер контактов «Contact Wizard» и выполняем следующие шаги.

13.1. Указать ответную поверхность.

В разделе «Target Surface» в качестве объектов, используемых для определения ответной поверхности, выбираем Areas.

В разделе «Target Type» указываем Rigid w/Pilot (абсолютно жёсткая с ведущим, или "пилотным", узлом).

Нажимаем кнопку *Pick Target* и указываем обе цилиндрические поверхности ролика малого диаметра (т.е. A16 и A17), *Apply*.

Нажимаем *Next* для перехода к следующему шагу.

13.2. Определить положение ведущего узла.

Выбираем опцию «Create an extra node in active CS» для явного указания местоположения узла в активной системе координат.

Ниже вводим координаты (в мм): $X = 10$; $Y = -6$; $Z = 10$.

Таким образом, ведущий узел помещаем на продолжение оси неподвижного ролика.

Нажимаем *Next* для перехода к следующему шагу.

13.3. Указать контактную поверхность.

В разделе «Contact Surface» в качестве объектов, используемых для определения контактной поверхности, выбираем Areas.

В разделе «Contact Element Type» выбираем Surface-to-Surface.

Нажимаем кнопку *Pick Contact* и указываем верхнюю цилиндрическую поверхность проволоки (т.е. A3), *Apply*.

Нажимаем *Next* для перехода к следующему шагу.

13.4. Задать параметры контакта.

Отключаем опцию начального внедрения «Include initial penetration».

Для коэффициента трения в поле «Coefficient of Friction» вводим значение 0.05.

Для завершения процесса создания контактной пары последовательно нажимаем кнопки *Create* и *Finish*.

В конце следует закрыть диалоговую панель Менеджера контактов.

14. Задать граничные условия.

Рассматриваемая проволока жёстко закреплена по правому торцу (см. рисунок 8.1).

Воспользуемся командой задания перемещений на поверхностях *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Areas*.

Указываем две поверхности на правом торце проволоки (т.е. A1 и A6), *OK*.

В поле «DOFs to be constrained» выбираем All DOF (все степени свободы). *OK*.

Кроме того, здесь необходимо приложить граничные условия симметрии, поскольку моделировалась лишь половина данной конструкции: *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>Symmetry B.C.>On Areas*.

Указываем две поверхности в плоскости разреза проволоки (т.е. A5 и A10), *OK*.

Следует отметить, что абсолютно жёсткие элементы роликов закрепляются автоматически по всем степеням свободы, для которых явно не заданы перемещения.

15. Задать нагрузку.

В качестве нагрузки в рассматриваемой задаче выступает поворот малого ролика относительно оси неподвижного ролика на угол 135° (2,356 рад).

Для задания перемещений в узлах выбираем команду *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes*.

Указываем ведущий узел жёсткого элемента, лежащий на оси большого ролика (наиболее удалённый от плоскости *YZ*). *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем ROTX (угол поворота относительно оси *X*), а в поле «Displacement Value» вводим 2.356 (в рад).

OK.

16. Задать опции анализа: *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls*.

Настоящая задача является геометрически и физически нелинейной, поэтому для учёта больших перемещений (и деформаций) в списке «Analysis Options» выбираем значение Large Displacement Static.

В поле «Number of substeps» раздела «Time Control» вводим число подшагов, например 100.

Для сохранения промежуточных результатов на каждом десятом подшаге в списке «Frequency» (частота записи выходных величин в файл результатов) выбираем значение Write every Nth substep и вводим «where N» = 10.
OK.

17. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar*>*SAVE_DB*.

База данных записывается в файл Lab8.db.

18. Выполнить статический анализ: *M_M*>*Solution*>*Solve*>*Current LS*.

19. Запустить специальный инструмент «Results Viewer», предназначенный для пошагового просмотра результатов расчёта: *M_M*>*General Postproc*>*Results Viewer*.

19.1. Изобразить поле напряжений по Мизесу.

В списке результатов выбираем *Nodal Solution*>*Stress*>*von Mises stress* и нажимаем кнопку *Plot Results*.

Далее, перемещая движок по полосе подшагов, можно наблюдать картину изменения величины эквивалентного напряжения в различные моменты времени в рассчитанном интервале.

Поле напряжений по Мизесу на последнем подшаге показано на рисунке 8.4. Здесь предварительно установлен вид на модель слева (кнопка *Left View*).

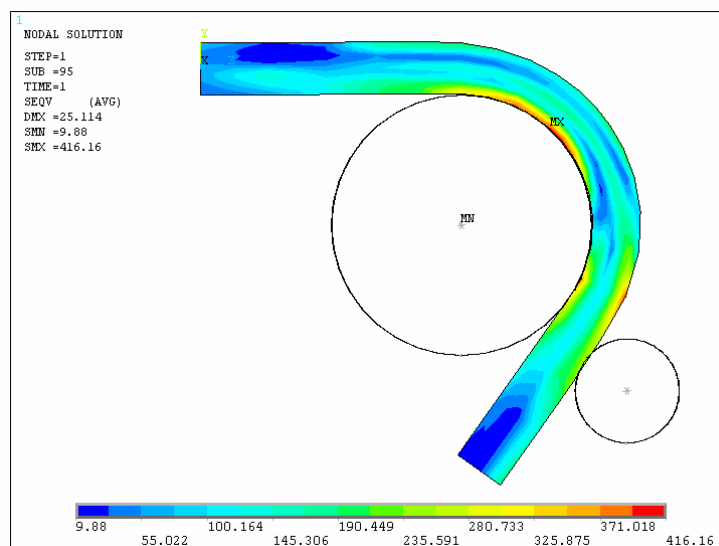


Рисунок 8.4 – Поле напряжений по Мизесу (в МПа)

Аналогичным образом можно анализировать и другие расчётные величины, входящие в список доступных результатов. Например, инте-

рес могут представлять остаточные пластические деформации: *Nodal Solution>Plastic Strain>von Mises Plastic strain*.

19.2. Включить анимацию изображения результатов расчёта.

Нажимаем кнопку *Animate Results* (анимация результатов) в панели «Result Viewer».

При этом появляется новая диалоговая панель, где в разделе «Type of Animation Sequence to Capture» в качестве типа анимации следует указать *Over time* (по времени), *OK*.

В следующем окне в поле «Number of animations frames» (количество кадров анимации) вводим число в интервале от 10 до 100 (чем больше кадров, тем более плавной будет анимация, но более затратным будет процесс записи видео файла), в поле «Animation time delay» (время задержки между кадрами, сек) вводим 0.1 и в списке «Contour data for animation» выбираем *Use Last Display* (использовать последнее изображение) либо другую выходную величину.

Нажатие кнопки *OK* приводит к формированию и отображению на экране анимированного представления выбранной величины.

20. Для отчёта по работе записать в файл протокол команд базы данных:

U_M>File>Write DB Log File.

Вводим имя *Lab8.lgw*.

21. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar>QUIT*.

9 МОДЕЛИРОВАНИЕ ШТАМПОВКИ ПРОФИЛЯ ЭЛАСТИЧНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ В СРЕДЕ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS

Исходные данные: для штамповки профиля уголкового сечения используется дюралевая заготовка в виде полосы шириной 60 мм и толщиной 1,5 мм. Штамп состоит из жёсткого пуансона и эластичной матрицы (подушки), помещённой в закрытый контейнер (рисунок 9.1). Материал заготовки – Д16Т ($E = 7 \cdot 10^4$ МПа; $\mu = 0,3$; $\sigma_b = 440$ МПа; $\sigma_{0,2} = 260$ МПа; $E_T = 1000$ МПа). Материал эластичной матрицы – полиуретан СКУ-7Л (константы двухпараметрической модели гиперупругого материала Муни-Ривлина $c_{10} = 4,5$ МПа и $c_{01} = 2,5$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,49$). Коэффициент трения между пуансоном и заготовкой составляет 0,05, а между матрицей и заготовкой – 0,1.

Допущения: пуансон считается абсолютно жёстким; ввиду большой протяжённости конструкции рассматривается случай плоской деформации.

Цель: выполнить моделирование операции штамповки при помощи жёсткого пуансона и гиперупругого материала; определить усилие штамповки; рассчитать упругое пружинение.

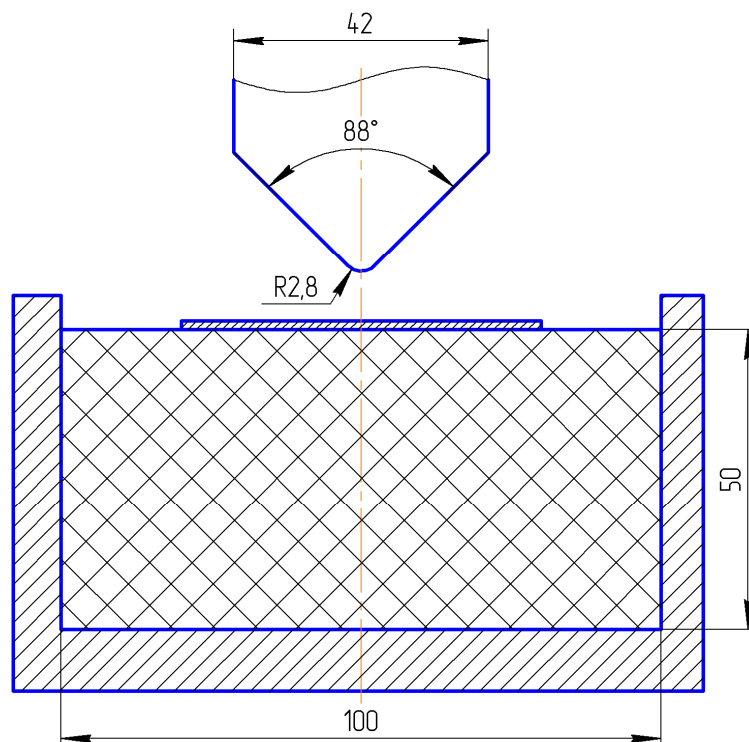


Рисунок 9.1 – Поперечное сечение штампа

Благодаря симметрии конструкции здесь можно ограничиться моделированием лишь половины сечения.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет ANSYS, указать имя задачи Lab9.
2. Установить тип используемых в расчёте конечных элементов – 8-узловой плоский элемент PLANE183 с формулировкой «плоская деформация»:
M_M>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete.

Нажимаем *Add* и выбираем *Structural Solid>Quad 8node 183, OK.*

В окне «Element types» нажимаем *Options* и для опции КЗ устанавливаем значение Plane Strain.

Далее *OK* и *Close.*

3. Задать свойства материала: *M_M>Preprocessor>Material Props>Material Models.*

Сначала определяем первую модель материала для Д16Т.

В правом окне последовательно выбираем *Structural>Linear>Elastic>Isotropic.*

Вводим:

EX: 7e4 (модуль упругости, МПа)

PRXY: 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

Далее для задания нелинейных свойств выбираем билинейную модель деформирования с изотропным упрочнением: *Structural>Nonlinear>Inelastic>Rate Independent>Isotropic Hardening Plasticity>Mises Plasticity>Bilinear.*

Вводим:

Yield Stss: 260 (предел текучести, МПа)

Tang Mod: 1000 (касательный модуль, МПа)

OK.

Для полиуретана СКУ-7Л следует выбрать модель гиперупругого материала Муни-Ривлина, причём при деформациях, не превышающих 100%, можно ограничиться двухпараметрической моделью.

В меню диалоговой панели указываем *Material>New model.*

Используем «Define Material ID»: 2, *OK.*

Последовательно выбираем *Structural>Nonlinear>Elastic>Hyperelastic>Mooney-Rivlin>2 parameters.*

Вводим:

C10: 4.5 (константа материала Муни-Ривлина c_{10} , МПа)

C01: 2.5 (константа материала Муни-Ривлина c_{01} , МПа)

d: 2.857e-3 (параметр несжимаемости материала, МПа⁻¹)

OK.

Следует отметить, что параметр несжимаемости материала рассчитывается по формуле

$$d = \frac{1 - 2\nu}{c_{10} + c_{01}} = \frac{1 - 2 \cdot 0,49}{4,5 + 2,5} = 2,857 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}.$$

Для полностью несжимаемого материала $d = 0$, поскольку $\nu = 0,5$.

Закрываем панель.

4. Построить прямоугольники, описывающие сечения заготовки и эластичной матрицы: *M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By 2 Corners*.

Для первого прямоугольника вводим следующие параметры: координаты левого нижнего угла WP X = WP Y = 0; ширина Width = 50; высота Height = 50. Нажимаем *Apply*.

Для второго прямоугольника: WP X = 0; WP Y = 50; ширина Width = 30; высота Height = 1.5, OK.

5. Для удобства ввода исходных данных определить скалярные параметры: *U_M > Parameters > Scalar Parameters*.

В поле «Selection» последовательно вводим: $r=2.8$; $alf=44 \cdot 3.14159/180$; $a=r \cdot (1/\text{SIN}(alf)-1)$; $b=21/\text{TAN}(alf)$. После каждого ввода здесь необходимо нажать кнопку *Accept* (принять).

Закрываем панель кнопкой *Close*.

6. Построить две точки: *M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS*.

Вводим координаты точек (используя скалярные параметры) согласно следующей таблице:

Номер точки	x, мм	y, мм	z, мм
9	0	51.5-a	0
10	21	51.5+b-a	0

- Включаем нумерацию геометрических объектов: *U_M>PlotCtrls>Numbering*, отмечаем флаги «Keypoint numbers», «Line numbers» и «Area numbers».
7. Соединить построенные на предыдущем шаге точки прямой линией: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line*.
Указываем точки 9 и 10, *OK*.
 8. Создать зеркальное отображение построенной на предыдущем шаге линии: *M_M>Preprocessor>Modeling>Reflect>Lines*.
Указываем линию L9, *OK*.
Используем следующие значения:
 - «Plane of symmetry»: Y-Z plane X (плоскость симметрии)
 - «Existing lines will be»: Copied (исходные линии будут копироваться)*OK*.
 9. Склеить две линии, представляющие границы сечения пуансона: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Boolean>Glue>Lines*.
Указываем линии L9 и L10, *OK*.
 10. Построить дугу скругления в вершине сечения пуансона: *M_M>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Line Fillet*.
Указываем линии L9 и L11, *OK*.
В поле «Fillet radius» вводим значение радиуса скругления (в мм): 2.8, *OK*.
 11. Разбить дугу на две равные части: *M_M>Preprocessor>Modeling>Operate>Boolean>Divide>Lines w/ Options*.
Указываем дугу скругления (т.е. линию L10), *OK*.
Используем следующие значения:
 - «Ratio of line lengths»: 0.5 (отношение длин линий)
 - «Existing line will»: Be modified (исходная линия будет удалена)*OK*.
 12. Удалить две линии, представляющие левую границу сечения пуансона: *M_M>Preprocessor>Modeling>Delete>Line and Below*.
Указываем линии L11 и L12, *OK*.
 13. Задать атрибуты элементов: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool*.
В разделе «Element Attributes» диалоговой панели «MeshTool» в выпадающем списке выбираем Areas и нажимаем расположенную правее кнопку *Set*.
Указываем поверхность сечения заготовки (т.е. A2), *OK*.
Вводим атрибуты заготовки:

«Material number»: 1 (номер материала)

«Element type number»: 1 PLANE183 (номер типа элементов)

Apply.

Далее указываем поверхность сечения эластичной матрицы (т.е. A1), *OK.*

Для матрицы меняем только материал:

«Material number»: 2

OK.

14. Разбить поверхности на конечные элементы: *M_M>Preprocessor>Meshing>MeshTool.*

Нажимаем кнопку *Set* строки «Lines» и указываем вертикальные кромки поверхности A2, *OK.*

В поле «No. of element divisions» (число делений на элементы) вводим значение 3, *Apply.*

Далее указываем горизонтальные кромки этой же поверхности, *OK.*

В поле «No. of element divisions» вводим число 20, а в поле «Spacing Ratio» для построения неравномерной сетки – число 3, *Apply.*

Затем указываем все четыре кромки поверхности A1, *OK.*

В поле «No. of element divisions» вводим число 30, а в поле «Spacing Ratio» – число 5, *OK.*

Отметим, что для некоторых линий сгущение сетки здесь следует поменять на обратное, так чтобы размеры элементов уменьшались снизу вверх, справа налево.

Нажимаем кнопку *Flip* строки «Lines» и указываем те линии, для которых данное условие не выполняется, *OK.*

В поле «Shape» указываем Quad (четырёхугольная) и выбираем режим Mapped (регулярная сетка).

Нажимаем кнопку *Mesh* и для выбора всех поверхностей *Pick All.*

Получаемая здесь разбивка представлена на рисунке 9.2.

15. Создать контактную пару для описания взаимодействия абсолютно жёсткого пуансона и деформируемой заготовки.

Для этого сначала запускаем специальный инструмент «Contact Manager» (Менеджер контактов) путём нажатия одноимённой кнопки пиктографического меню программы ANSYS либо командой *M_M>Preprocessor>Create>Contact Pair.*

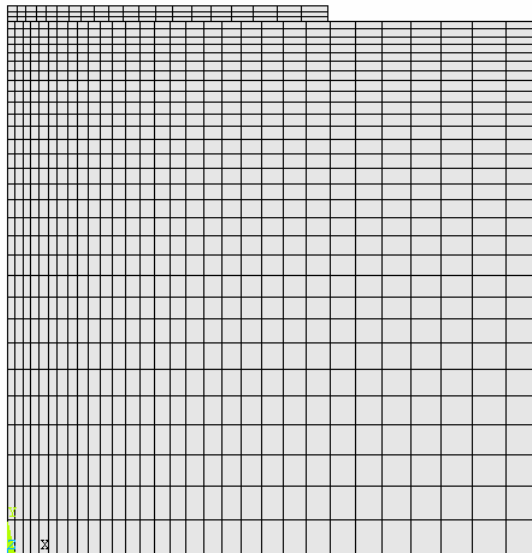


Рисунок 9.2 – Конечно-элементная модель

В появившейся панели нажимаем первую кнопку, предназначенную для вызова средств Мастера контактов «Contact Wizard» и выполняем следующие шаги.

15.1. Указать ответную поверхность.

В разделе «Target Surface» в качестве объектов, используемых для определения ответной поверхности, выбираем Lines.

В разделе «Target Type» указываем Rigid w/Pilot (абсолютно жёсткая с ведущим, или "пилотным", узлом).

Нажимаем кнопку *Pick Target* и указываем две линии, представляющие правую границу сечения пуансона (т.е. L9 и L10), *Apply*.

Нажимаем *Next* для перехода к следующему шагу.

15.2. Определить положение ведущего узла.

Выбираем опцию «Create an extra node in active CS» для явного указания местоположения узла в активной системе координат.

Ниже вводим координаты (в мм): $X = 0$; $Y = 75$; $Z = 0$.

Нажимаем *Next* для перехода к следующему шагу.

15.3. Указать контактную поверхность.

В разделе «Contact Surface» в качестве объектов, используемых для определения контактной поверхности, выбираем Lines.

В разделе «Contact Element Type» выбираем Surface-to-Surface (поверхность – поверхность).

Нажимаем кнопку *Pick Contact* и указываем верхнюю кромку поверхности A2, *Apply*.

В диалоговой панели Мастера контактов нажимаем кнопку *Next* для перехода к следующему шагу.

15.4. Задать параметры контакта.

Для коэффициента трения в поле «Coefficient of Friction» вводим значение 0.05.

И наконец, для создания собственно контактной пары нажимаем кнопку *Create*.

15.5. Изменить направление нормалей.

В конце появляется информационное окно, где констатируется факт создания контактной пары, указывается номер связанного с ней набора реальных постоянных и отмечается необходимость визуальной проверки на экране ориентации внешних нормалей к контактной и ответной поверхностям. Нормали к этим поверхностям должны указывать друг на друга.

Можно заметить, что в нашем случае нормаль к дуге скругления направлена неправильно.

Для изменения направления нормалей ответных элементов нажимаем кнопку *Flip Target Normals* и указываем дугу (т.е. линию L10), *OK*.

Завершается процесс создания контактной пары нажатием кнопки *Finish*.

16. Создать контактную пару для описания взаимодействия заготовки и эластичной матрицы.

Снова открываем Мастер контактов «Contact Wizard» и выполняем следующие шаги.

16.1. Указать ответную поверхность.

В разделе «Target Surface» в качестве объектов, используемых для определения ответной поверхности, выбираем Lines.

В разделе «Target Type» указываем Flexible (деформируемая).

Нажимаем кнопку *Pick Target* и указываем нижнюю кромку поверхности A2, *Apply*.

Отметим, что за ответную поверхность здесь мы выбираем более жёсткую.

Нажимаем *Next* для перехода к следующему шагу.

16.2. Указать контактную поверхность.

В разделе «Contact Surface» в качестве объектов, используемых для определения контактной поверхности, выбираем Lines.

В разделе «Contact Element Type» выбираем Surface-to-Surface.

Нажимаем кнопку *Pick Contact* и указываем верхнюю кромку поверхности A1, *Apply*.

Нажимаем *Next* для перехода к следующему шагу.

16.3. Задать параметры контакта.

Для коэффициента трения в поле «Coefficient of Friction» вводим значение 0.1.

Для завершения процесса создания контактной пары последовательно нажимаем кнопки *Create* и *Finish*.

В конце следует закрыть диалоговую панель Менеджера контактов.

17. Задать граничные условия.

Воспользуемся командой задания перемещений на линиях *M_M > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines*.

Указываем левую кромку поверхности A2 и обе вертикальные кромки поверхности A1, *OK*.

В поле «DOFs to be constrained» выбираем UX, *Apply*.

Далее указываем нижнюю кромку поверхности A1, *OK*.

В поле «DOFs to be constrained» выбираем UY, *OK*.

Следует отметить, что абсолютно жёсткие элементы пуансона закрепляются автоматически по всем степеням свободы, для которых явно не заданы перемещения.

18. Задать нагрузку.

В качестве нагрузки в рассматриваемой задаче выступает вертикальное перемещение пуансона (рабочий ход).

Глубину внедрения пуансона в подушку можно рассчитать по следующей эмпирической формуле:

$$H = r + 6s = 3 + 6 \cdot 1,5 = 12 \text{ мм},$$

где $r \approx 3$ мм – радиус скругления внутреннего угла профиля; $s = 1,5$ мм – толщина заготовки.

Для задания перемещений в узлах выбираем команду *M_M > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes*.

Указываем ведущий узел жёсткого элемента, лежащий на оси симметрии (самый верхний узел). *OK*.

В списке «DOFs to be constrained» выбираем UY, а в поле «Displacement Value» вводим отрицательное число (в мм): -12.

OK.

19. Задать опции первого шага нагружения (рабочий ход пуансона): *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls.*

Настоящая задача является геометрически и физически нелинейной, поэтому для учёта больших перемещений (и деформаций) в списке «Analysis Options» выбираем значение Large Displacement Static.

Время в конце первого шага нагружения (поле «Time at end of loadstep» раздела «Time Control») задаём равным 1.

В поле «Number of substeps» того же раздела вводим число подшагов: 200.

Для сохранения промежуточных результатов на каждом подшаге в списке «Frequency» (частота записи выходных величин в файл результатов) выбираем значение Write every substep.

OK.

20. Записать первый шаг нагружения в файл: *M_M>Solution>Load Step Opts>Write LS File.*

В поле «Load step file number» (номер файла шага нагружения) вводим число 1, *OK.*

При этом данные по первому шагу нагружения будут записаны в текстовый файл Lab9.s01.

21. Сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar>SAVE_DB.*

База данных записывается в файл Lab9.db.

22. Задать опции второго шага нагружения (обратный ход пуансона): *M_M>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls.*

Время в конце второго шага нагружения задаём равным 2 (поле «Time at end of loadstep»).

В поле «Number of substeps» вводим число подшагов: 50, *OK.*

23. Снять нагрузку.

Для задания перемещений в узлах выбираем команду *M_M>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes.*

Указываем ведущий узел жёсткого элемента, лежащий на оси симметрии (самый верхний узел). *OK.*

В списке «DOFs to be constrained» выбираем UY, а в поле «Displacement Value» вводим 0, *OK.*

24. Записать второй шаг нагружения в файл: *M_M>Solution>Load Step Opts>Write LS File.*

В поле «Load step file number» вводим номер 2, *OK.*

При этом данные по второму шагу нагружения будут записаны в текстовый файл Lab9.s02.

25. Запустить задачу на счёт: *M_M>Solution>Solve>From LS Files*.

Данная команда позволяет получить решения сразу для нескольких шагов нагружения, информация по которым считывается из файлов.

В соответствующие поля вводим:

«Starting LS file number»: 1 (номер начального файла шага нагружения)

«Ending LS file number»: 2 (номер конечного файла шага нагружения)

«File number increment»: 1 (приращение номеров файлов)

OK.

Возможные сообщения о том, что некоторые элементы становятся сильно искажёнными, следует игнорировать нажатием кнопки *Proceed* (продолжить).

26. Запустить специальный инструмент «Results Viewer», предназначенный для пошагового просмотра результатов расчёта: *M_M>General Postproc>Results Viewer*.

26.1. Изобразить поле напряжений по Мизесу.

В списке результатов выбираем *Nodal Solution>Stress>von Mises stress* и нажимаем кнопку *Plot Results*.

Далее, перемещая движок по полосе подшагов, можно наблюдать картину изменения величины эквивалентного напряжения в различные моменты времени в рассчитанном интервале.

Поле напряжений по Мизесу в конце первого шага показано на рисунке 9.3.

26.2. Включить анимацию изображения результатов расчёта.

Нажимаем кнопку *Animate Results* (анимация результатов) в панели «Result Viewer».

При этом появляется новая диалоговая панель, где в разделе «Type of Animation Sequence to Capture» в качестве типа анимации следует указать *Over time* (по времени), *OK*.

В следующем окне в поле «Number of animations frames» (количество кадров анимации) вводим число в интервале от 10 до 100 (чем больше кадров, тем более плавной будет анимация, но более затратным будет процесс записи видео файла), в поле «Animation time delay» (время задержки между кадрами, сек) вводим 0.1 и в списке «Contour

data for animation» выбираем *Use Last Display* (использовать последнее изображение) либо другую выходную величину.

Нажатие кнопки *OK* приводит к формированию и отображению на экране анимированного представления выбранной величины.

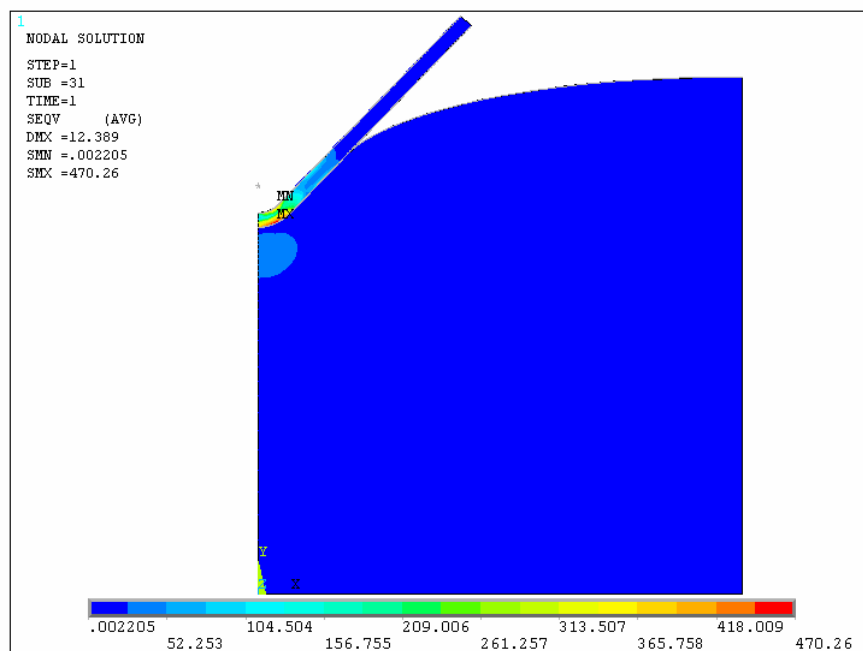


Рисунок 9.3 – Поле напряжений по Мизесу (в МПа) в конце первого шага нагружения

27. Определить усилие штамповки.

Входим в постпроцессор истории нагружения: *M_M>TimeHist Postpro.*

Для задания новой переменной нажимаем кнопку *Add Data.*

В древовидной структуре «Result Item» последовательно указываем *Reaction Forces>Structural Forces>Y-Component of force* (реакция по оси *Y*).

В поле «Variable Name» вводим имя *Ry*. *OK.*

Далее на экране мышью указываем ведущий узел жёсткого пуансона. *OK.*

С помощью калькулятора определим новую переменную.

В первом поле калькулятора перед знаком равенства вводим имя *R*.

После знака равенства вводим число *-2* и нажимаем кнопку умножения калькулятора. После этого из списка калькулятора выбираем *Ry*. Завершаем ввод нажатием кнопки *Enter.*

Далее выбираем переменную *R* и нажимаем кнопку *Graph Data.*

Получаемый в этом случае график показан на рисунке 9.4. Видно, что максимальное значение усилия здесь составляет *557 Н/мм.*

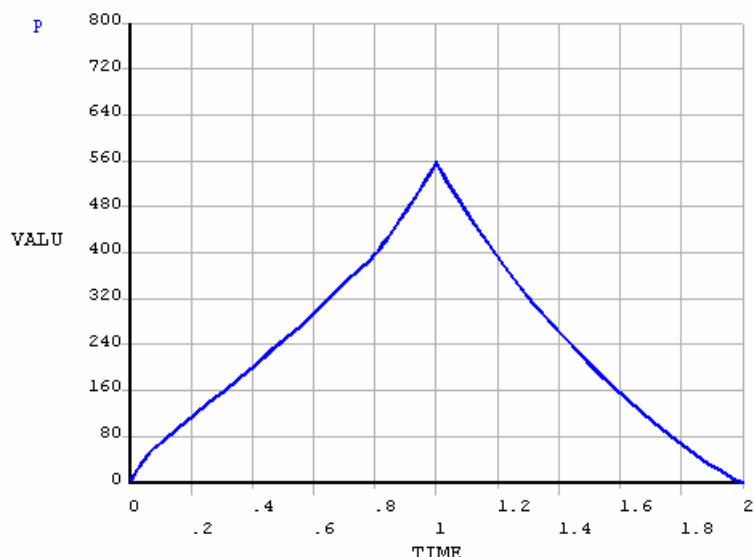


Рисунок 9.4 – Зависимость погонного усилия прессы от времени (в Н/мм)

28. Рассчитать упругое пружинение.

Данный шаг связан с модификацией модели, поэтому сначала здесь следует сохранить базу данных: *ANSYS Toolbar > SAVE_DB*.

Для изменения геометрии конечно-элементной модели путём добавления к координатам узлов найденных перемещений используем команду *M_M > Preprocessor > Modeling > Update Geom.*

Вводим:

- «Scaling factor»: 1 (коэффициент масштабирования)
- «Load step»: LAST (шаг нагружения – последний)
- «Substep»: LAST (подшаг – последний)
- «Filename, Extension, Directory»: Lab9.rst (файл результатов)

OK.

Далее отрисовываем модифицированную сетку элементов: *U_M > Plot > Elements.*

Для определения угла наклона полки профиля выбираем команду *U_M > List > Picked Entities +.*

В появившемся окне устанавливаем опции:

- «Query Item»: Distance Betwn (вид запроса – расстояние между)
- «On Entities»: 2 Nodes (объекты – два узла).

В графическом окне указываем два узла на внутренней поверхности полки профиля, *OK:*

```
The distance between nodes      2863 and      2897 in coordinate system      0 is:
DIST          DX (ND2-ND1)      DY (ND2-ND1)      DZ (ND2-ND1)
24.28913414   -17.46738999      -16.87756868      0.00000000
```


Фактический угол наклона полки профиля будет равен

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{|DX|}{|DY|} = \operatorname{arctg} \frac{17,467}{16,878} \approx 46^\circ.$$

Отметим, что в данном случае упругое пружинение может быть вычислено как разность между углом, образованным полками профиля, и углом пуансона:

$$\gamma = 2\alpha - 88^\circ = 2 \cdot 46 - 88 = 4^\circ.$$

В конце следует восстановить исходную модель: *ANSYS Toolbar* > *RESUME_DB*.

29. Для отчёта по лабораторной работе записать в файл протокол команд базы данных: *U_M* > *File* > *Write DB Log File*.

Вводим имя *Lab9.lgw*.

30. Выйти из программы: *ANSYS Toolbar* > *QUIT*.

10 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ МЕТОДОМ ВЫГЛАЖИВАНИЯ¹ В СРЕДЕ САЕ-СИСТЕМЫ ANSYS

Исходные данные: моделируемая часть детали представляет собой прямоугольную область размером 3x2 мм (рисунок 10.1). Выглаживающий инструмент имеет алмазную головку (индентор) радиусом 2 мм. Материал детали – сталь 12Х2Н4А ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$; $\delta = 12\%$; $\sigma_{\text{ц}} = 710$ МПа; $\sigma_{0,2} = 800$ МПа; $\sigma_{\text{в}} = 1000$ МПа), нелинейный участок диаграммы деформирования которой представлен табличной зависимостью напряжения от пластической деформации (таблица 10.1). На первом этапе производится внедрение индентора в деталь на глубину 10 мкм, на втором – индентор перемещается вдоль поверхности детали на расстояние 1 мм. При этом коэффициент трения составляет 0,1.

Допущения: индентор считается абсолютно жёстким; рассматривается случай плоской деформации.

Цель: исследовать распределение пластических деформаций после внедрения индентора, а также в процессе выглаживания; определить усилия внедрения индентора и выглаживания.

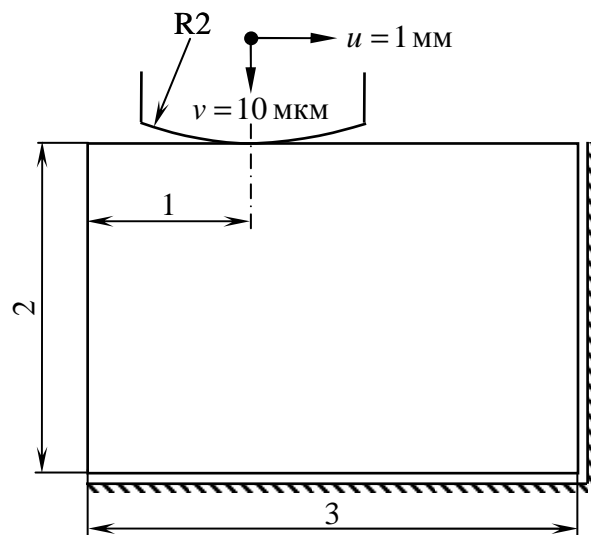


Рисунок 10.1 – Расчётная схема задачи

¹ Выглаживание – это один из современных высокопроизводительных методов финишной обработки поверхностей деталей, приводящий к уменьшению шероховатости поверхности и упрочнению поверхностного слоя.

Таблица 10.1 – Зависимость напряжения от пластической деформации

№	ε_p , %	σ , МПа
1	0	710,0
2	0,1	780,1
3	0,2	796,0
4	0,3	803,8
5	0,4	808,8
6	0,5	812,6
7	0,6	815,7
8	0,7	818,5
9	0,8	820,9
10	0,9	823,2
11	1,0	825,3
12	12	1000

Рекомендации:

1. Для построения модели использовать элементы PLANE183 с формулировкой «плоская деформация».

2. Для задания нелинейных свойств материала выбрать полилинейную модель деформирования Мизеса с изотропным упрочнением.

3. Отметим, что для получения достоверных результатов размер элементов в поверхностном слое здесь не должен превышать 10 мкм. Однако в учебных целях, учитывая высокую трудоёмкость задачи, можно ограничиться сеткой 50x30 со сгущением к верхней границе моделируемой области (параметр «Spacing Ratio» принять равным 10).

4. В качестве граничных условий задать условия симметрии на нижней и правой границах исследуемой области детали.

5. Для моделирования индентора использовать жёсткий контактный элемент с ведущим узлом.

6. При задании опций анализа выбрать статический анализ с учётом больших перемещений (Large Displacement Static), при этом для первого шага нагружения, соответствующего внедрению индентора, принять:

«Time at end of loadstep» = 1;

«Number of substep» = 100,

а для второго шага, моделирующего процесс выглаживания, задать:

Time at end of loadstep» = 2;

«Number of substep» = 300.

7. Для пошагового просмотра результатов расчёта использовать «Result Viewer».

8. Изобразить поле интенсивности пластических деформаций (Plastic strain intensity) в конце первого шага нагружения, т.е. после внедрения индентора.

9. Включить анимацию изображения поля интенсивности пластических деформаций по времени (параметру нагружения).

10. Для определения усилий внедрения индентора и выглаживания при помощи постпроцессора истории нагружения построить зависимости реакций ведущего узла жёсткого индентора от времени.

11. Для отчёта по работе записать в файл Lab10.lgw протокол команд базы данных.