

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Н.Н. Берендеев

Проведение виртуального эксперимента по растяжению образцов металлов

Практикум

Рекомендовано методической комиссией физического факультета для
студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки:
03.03.02 «Физика» и 03.04.02 «Физика»

Нижний Новгород
2020

УДК 539.3
ББК Ж121
Б-48

Б-48 Берендеев Н.Н. ПРОВЕДЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО РАСТЯЖЕНИЮ ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛОВ: Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2020. - 37 с.

Рецензент: к. ф.-м.н., с.н.с. НИФТИ ННГУ Ю.Г. Лопатин

Практикум состоит из двух частей: теоретической и практической. В теоретическом блоке приведены сведения: об особенностях проведения стандартного эксперимента по растяжению металлов, методах обработки и анализа экспериментальных данных; сведения о концентрации напряжений; и описана математическая модель на основе, которой построен виртуальный эксперимент. Во второй - практической части – приведена пошаговая методика выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и задания.

Практикум предназначен для студентов старших курсов кафедры физического материаловедения ННГУ, изучающих дисциплины «Основы механики твердого тела», «Механика деформируемого твердого тела» и «Методы исследования структуры и свойств материалов». В качестве обязательного условия выполнения работы предполагается наличие у слушателей начальных навыков применения коммерческого пакета ANSYS WORKBENCH®.

Ответственный за выпуск:
председатель методической комиссии физического факультета ННГУ,
к.ф.-м.н., доцент **А.А. Перов**

УДК 539.3
ББК Ж121

© **Национальный исследовательский
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, 2020**

Содержание

Введение	4
1.Используемое оборудование и проекты	4
2.Теоретические основы проводимого виртуального эксперимента	4
2.1.Общие представления об испытании металлов на растяжении в соответствии с ГОСТ 1497-84	5
2.2.Общие представления о концентрации напряжений	9
2.3.Описание модели, построенной для проведения виртуального эксперимента.....	11
3.Пошаговая методика выполнения работы	17
3.1.Методика проведения виртуального эксперимента в случае гладких образцов.....	17
3.2.Методика проведения виртуального эксперимента в случае образцов с концентратором напряжений	30
4.Контрольные вопросы.....	32
5.Задания.....	33
Список литературы	35
Приложение	36

Введение

Целью данной работы является, во-первых, виртуальное ознакомление с проведением одного из стандартных экспериментов по исследованию механических свойств материалов - эксперимента по осевому статическому растяжению в соответствии с ГОСТ 1497-85 [1], а так же знакомство с анализом экспериментальных результатов в соответствии с указанным ГОСТом, во-вторых, исследование влияния особенностей структуры материала на поведение образцов данного материала в процессе растяжения и, в-третьих, ознакомление с особенностями влияния концентрации напряжений на процесс растяжения образца.

1.Используемое оборудование и проекты

Для настройки и запуска виртуального эксперимента необходима установленная бесплатная версия *Student* коммерческого пакета **ANSYS WORKBENCH®** версии не ниже, чем **19 R3**.

Виртуальный эксперимент по растяжению гладкого цилиндрического образца реализован в проекте "*tension_with_pores*".

Виртуальный эксперимент по растяжению образца с концентратором напряжений реализован в проекте "*tension_conc_with_pores*".

2.Теоретические основы проводимого виртуального эксперимента

Рассмотрим базовые положения необходимые для понимания и выполнения виртуального эксперимента. Указанные положения должны включать в себя: представления об методах испытания и металлов на растяжении и анализа экспериментальных данных в соответствии с ГОСТ 1497-85 [1]; представления о концентрации напряжения (так как одной из целей данной работы является изучение влияния концентрации напряжений на процесс растяжения образцов металлов), а также описание виртуальной модели эксперимента, которая реализована в приведенных в разделе 2 проектах.

Перейдем к детальному рассмотрению указанных выше аспектов.

2.1. Общие представления об испытании металлов на растяжении в соответствии с ГОСТ 1497-84

Согласно принятой в ГОСТ 1497-84 [1] методике при проведении экспериментов для определения механических характеристик материалов в условиях растяжения используются пропорциональные образцы с круглым или прямоугольным поперечным сечением. Характерный вид данных образцов показан на рисунке 1. В образце можно выделить три основные области: центральная область, называемая рабочей частью образца, в которой и проводятся измерения всех механических характеристик, и две концевые зоны на краях образца размеры и форма которых подбираются из условия того, что они должны быть закреплены в захватах испытательной машины, и при этом во время эксперимента разрушения образца в этих областях никогда не происходило.

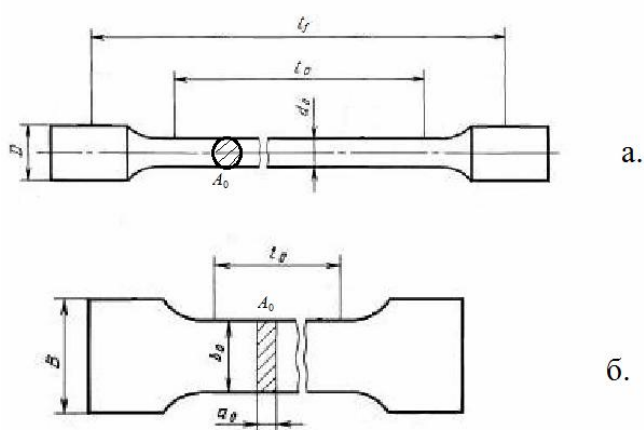


Рисунок 1. Характерный вид образцов, применяемых для испытаний в условиях осевого растяжения: а. - образец с круглым поперечным сечением, б. - образец с прямоугольным поперечным сечением

Образец материала, характеризуется следующими геометрическими параметрами: l_0 - начальная длина рабочей части образца и A_0 - начальная площадь поперечного сечения рабочей части образца. Иногда также рассматривается такая величина как полная длина образца l_f , которая равная длине образца не зажатой в захватах.

В ходе эксперимента по растяжению образца снимается зависимость силы прикладываемой к образцу F от удлинения рабочей части образца Δl [1]. Данная зависимость носит название первичной диаграммы растяжения или первичной диаграммы деформирования [2. 3]. Характерный вид данной зависимости показан на рисунке 2.

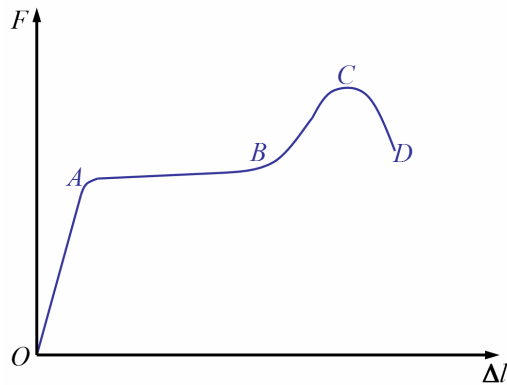


Рисунок 2. Характерный вид первичной диаграммы растяжения

На диаграмме растяжения традиционно выделяют следующие характерные зоны [2]: участок OA - зона упругости, участок AB - зона общей текучести, участок BC - зона упрочнения и участок CD - зона локальной текучести.

Необходимо обратить внимание на то, что если на этапах OA , AB и BC процессы упругого и пластического деформирования в материале происходят равномерно во всем объеме рабочей части образца, то после того как в момент времени, соответствующий точке C на диаграмме растяжения, на рабочей части образца формируется шейка [2] (локальная область меньшей площади поперечного сечения по сравнению с площадями поперечных сечений во всей остальной части рабочей части образца) в дальнейшем пластическое деформирование материала образца происходит в основном в данной местной зоне. Точка D на диаграмме растяжения соответствует моменту разрушения образца.

Для определения механических характеристик материала согласно ГОСТ 1497-84 [1] первичная диаграмма растяжения перестраивается во вторичную условную диаграмму растяжения в координатах напряжение σ - деформация ε (в данном случае рассматривается нормальное напряжение в поперечном сечении рабочей части образца и линейная осевая деформация). При перестроении используются следующие соотношения

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

и

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Характерный вид вторичной условной диаграммы растяжения показан

на рисунке 3.

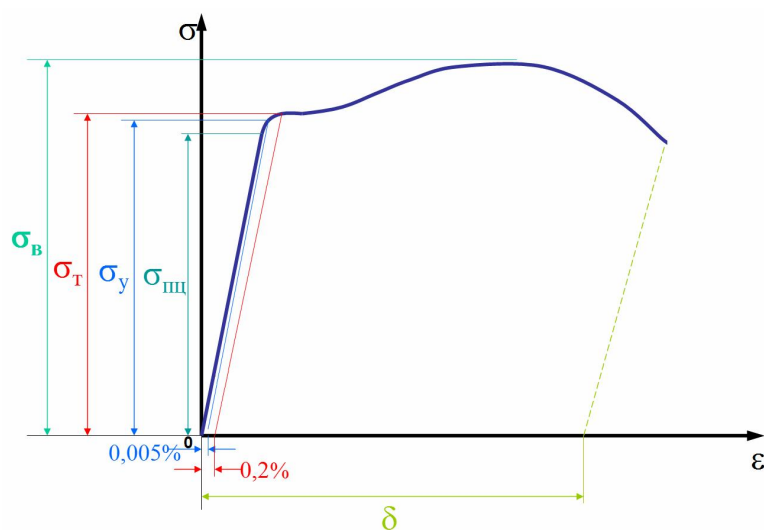


Рисунок 3. Характерный вид вторичной условной диаграммы растяжения и основные механические характеристики материала

В ГОСТ 1497-84 [1] в качестве основных механических характеристик материала рассматриваются следующие¹:

Предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ - "максимальное напряжение, до которого материал следует закону Гука";

Предел упругости $\sigma_{\text{у}}$ - "максимальное напряжение, до которого в материале не возникают остаточные деформации". С учетом того, что металлы имеют неоднородную зеренную структуру чаще предел упругости определяется как "напряжение при котором остаточные деформации равны $0,005\%$ ". В этом случае рассматриваемая величина обозначается как $\sigma_{0,005}$;

Предел текучести (физический предел текучести) $\sigma_{\text{Т}}$ - "напряжение, при котором материал деформируется без увеличения нагрузки". С учетом того, что металлы имеют неоднородную зеренную структуру, а так же того, что для металлов с ГПУ и ГЦК решеткой отсутствует зона общей текучести, чаще предел текучести определяется как "напряжение, при котором остаточные деформации равны $0,2\%$ ". В этом случае рассматриваемая величина называется условным пределом текучести и обозначается как $\sigma_{0,2}$;

Предел прочности $\sigma_{\text{В}}$ - "напряжение, соответствующее наибольшему усилию предшествующему разрыву образца";

¹ В данном случае рассматривается не полный набор всех механических характеристик материала, приведенных в ГОСТ 1497-84, а только те из них, которые будут определяться в ходе виртуального эксперимента.

Относительное удлинение после разрыва δ - "отношение приращения длины рабочей части образца после разрушения к начальной длине рабочей части образца выраженное в процентах".

Опишем предлагаемую в ГОСТ 1497-84 [1] методику определения приведенных выше механических характеристик материала.

Для определения предела пропорциональности используется графический способ [1]. При этом сначала находят силу ему соответствующую, а затем по формуле (1) находится само значение $\sigma_{\text{пц}}$. Для нахождения усилия, соответствующего пределу пропорциональности, рассматривают начальный участок (зоны OA и AB) первичной диаграммы растяжения. Затем из начала координат проводится луч, совпадающий с начальным линейным участком диаграммы (луч OM на рисунке 4). После этого на произвольном уровне, но так чтобы она пересекла первичную диаграмму растяжения проводят прямую WZ параллельную оси абсцисс (см. рисунок 4). На прямой WZ откладывают отрезок KN равный половине отрезка PK , как показано на рисунке 4. Проводится линия ON . Параллельно к линии ON проводится касательная QR к первичной диаграмме растяжения. Ордината точка S , в которой QR касается первичной диаграммы растяжения, равна искомому усилию, соответствующему пределу пропорциональности.

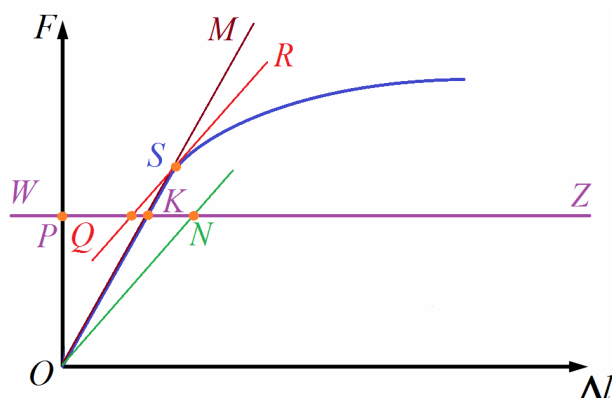


Рисунок 4. Графический способ определения усилия, соответствующего пределу пропорциональности

Нахождение пределов упругости, текучести и прочности проводится в соответствии с их определением при использовании вторичной условной диаграммы растяжения.

2.2. Общие представления о концентрации напряжений

Концентрацией напряжений называется резкое местное изменение поля напряжений, которое может быть вызвано геометрией объекта, условиями внешних воздействий и технологическими факторами, причем феномен может быть вызван как одной из перечисленных причин, так и их комбинацией [2, 4].

Схематично причины концентрации напряжений показаны на диаграмме приведенной на рисунке 5. Причину концентрации напряжений называют концентратором напряжений.

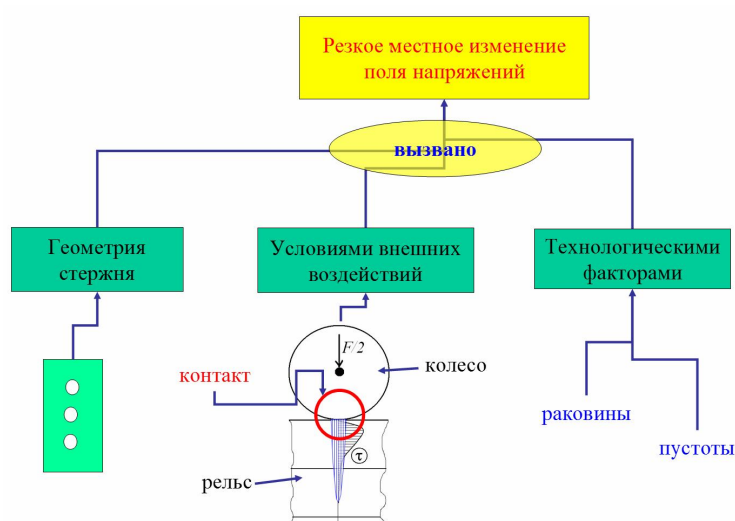


Рисунок 5. Причины концентрации напряжений

Согласно работам Нейбера (Н. Neuber) [4] основной характеристикой, описывающей концентрацию напряжений является теоретический коэффициент концентрации напряжений α_σ . Введем данную величину на основе следующего простого примера.

Рассмотрим прямолинейный стержень с прямоугольным поперечным сечением толщиной b и высотой h как показано на рисунке 6. Пусть так же длина стержня много больше его высоты. Предположим, что на половине длины и высоты стержня расположено круговое сквозное отверстие диаметром δ , который много меньше высоты стержня. Пусть на торцах стержень нагружен растягивающим напряжением σ .

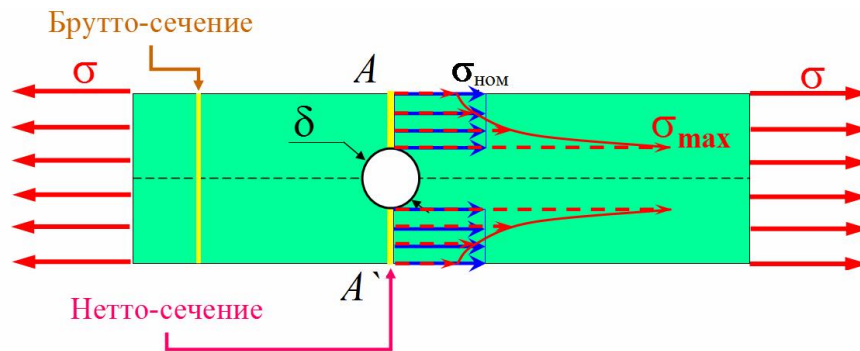


Рисунок 6. Стержень с круговым отверстием

Исходя из определения концентрации напряжений, отверстие в стержне будет концентратором напряжений. Проведем поперечно сечение в стержне совпадающее с диаметральной плоскостью концентратора напряжений (сечение AA' на рисунке 6). Назовем данное сечение нетто-сечением (любое поперечное сечение стержня не проходящее через концентратор напряжений будем называть брутто-сечением). Рассмотрим нормальные напряжения в нетто-сечении в предположении сопротивления материалов о равномерности распределения напряжений в сечении [2, 4], тогда нормальное напряжение в данном сечении будет равно

$$\sigma_{\text{ном}} = \frac{\sigma h}{h - \delta} . \quad (3)$$

В дальнейшем данное напряжение будем называть номинальным (номинальное напряжение - это напряжение найденное без учета возможных неоднородностей полей напряжений вызванных наличием концентратора напряжений).

В действительности, как показано на рисунке 6, в нетто-сечении напряжения распределены неравномерно. Например, в случае рассматриваемой задачи максимальное нормальное напряжение в изучаемом сечении σ_{max} равно $3\sigma_{\text{ном}}$.

Коэффициент концентрации напряжений как раз и есть отношение данного максимального напряжения в нетто-сечении к номинальному напряжению

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{ном}}} , \quad (4)$$

то есть показывает во сколько раз напряжение учитывающее локальные неоднородности в поле напряжений, вызванные концентратором напряжений, больше напряжения не учитывающего данные локальные неоднородности [2, 4].

В рассмотренном примере $\alpha_{\sigma} = 3$.

2.3. Описание модели, построенной для проведения виртуального эксперимента

Для проведения виртуального эксперимента была построена модель, описывающая процесс растяжения стержня. Рассмотрим основные особенности данной модели.

При построении модели были приняты следующие гипотезы

- форма образца определяется формой типового пропорционального образца в ГОСТ 1497-84 [1] в случае гладких образцов или формой типового пропорционального образца в ГОСТ 1497-84 с внесенным в него в центре образца типовым концентратором напряжений [5];
- для уменьшения размерности задачи² с учетом выбранной формы образца, и условий осевого растяжения рассматривается не весь образец, а только его часть с учетом плоскостей симметрии, при этом задача рассматривается в трехмерной постановке;
- в модель материала³ включается как возможность описания пластического деформирования, так и возможность появления, развития и взаимодействия пор, вызванных процессом пластического деформирования, так как данные явления сопровождают процесс растяжения образцов в ходе натуральных экспериментов [2, 6];
- несмотря на описание модели в рамках подхода сплошной среды [2] модель материала должна включать в себя ряд параметров, характеризующих структуру реального материала.

Приведем формулировку модели с учетом принятых выше гипотез.

Модель геометрии.

В данной работе рассматривается растяжение цилиндрических пропорциональных образцов (тип III ГОСТ 1497-84 [1]). В качестве концентратора напряжений используется кольцевая выточка. Чертежи гладкого образца и образца с концентратором напряжений приведены на рисунках 7 и 8 соответственно.

² Уменьшение размерности задачи выполнено с целью предоставления проходящим данную работу слушателям возможности использовать минимальные вычислительные ресурсы без потери адекватности решаемой задачи и точности получаемого решения.

³ Работа направлена в основном на изучение поведения пластичных металлов и их сплавов при растяжении

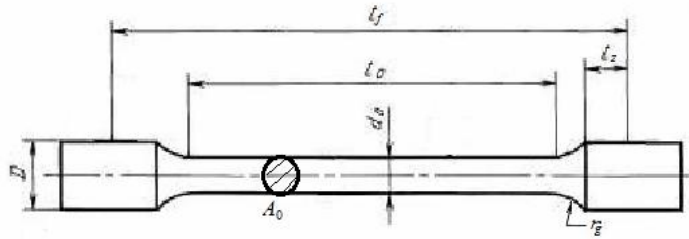


Рисунок 7. Чертеж гладкого образца

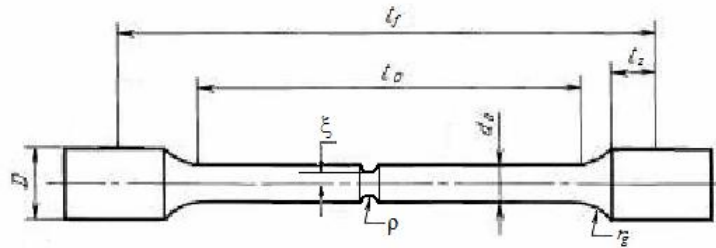


Рисунок 8. Чертеж образца с концентратором напряжений

Характерные размеры образцов на рисунках 7 и 8 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характерные размеры образцов

l_0 , мм	d_0 , мм	l_f , мм	D , мм	r_g , мм	l_z , мм
25	5	55	15	5	10

Параметры ρ и ξ , описывающие концентратор напряжений, могут варьироваться слушателем, для возможности анализа влияния степени концентрации напряжений на результаты эксперимента по осевому растяжению образца.

С учетом гипотезы о в ведении плоскостей симметрии в дальнейшем анализируется одна восьмая часть образца, которая показана на рисунках 9 и 10 для случая гладкого образца и для случая образца с концентратором напряжений соответственно, полученная путем в ведения четырех осевых плоскостей симметрии.

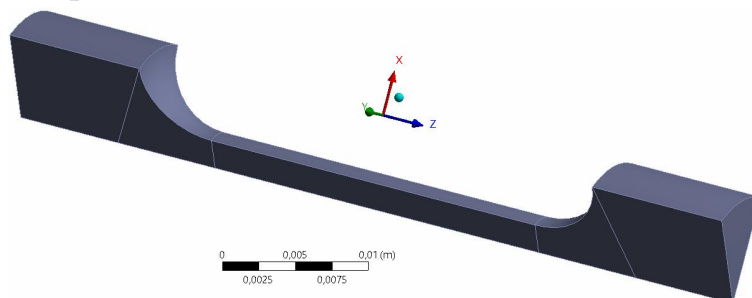


Рисунок 9. Модель геометрии гладкого образца

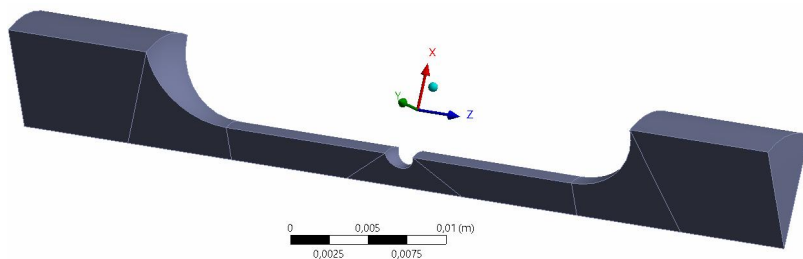


Рисунок 10. Модель геометрии образца с концентратором напряжений

Краевые условия.

На рисунке 11 приведены краевые условия используемые в изучаемой модели.

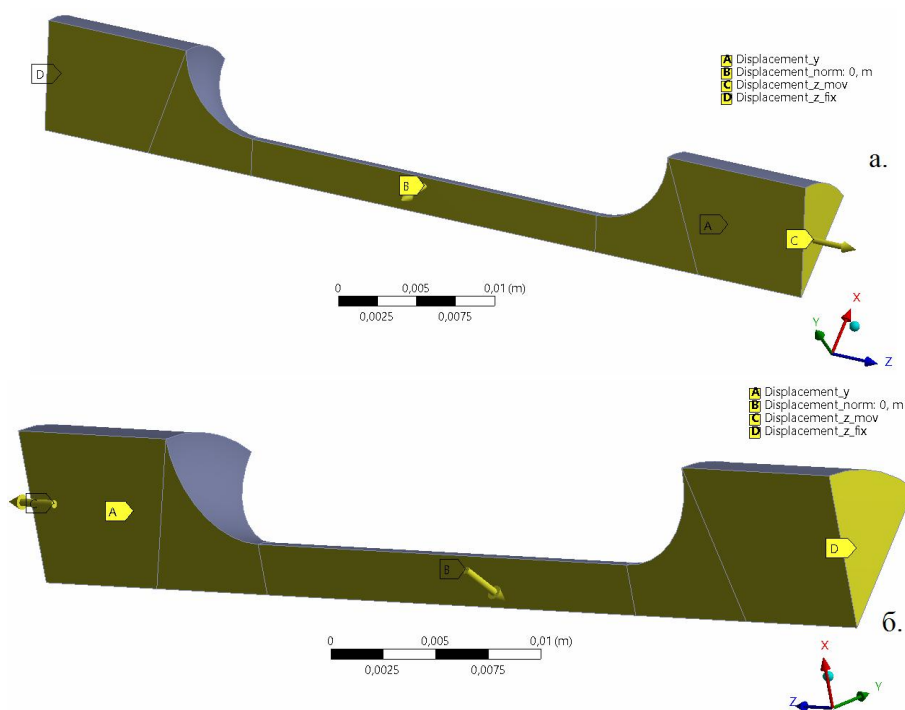


Рисунок 11. Краевые условия. Вид с противоположных сторон

Перечислим данные краевые условия.

В области Γ_{sym1} (область А) задано краевое условие, описывающее условие симметрии по данной плоскости

$$u_y|_{(x,y,z) \in \Gamma_{sym1}} = 0, \quad (5)$$

где u_y - компонента вектора перемещений в направлении оси y .

В области Γ_{sym2} (область В) задано также краевое условие, описывающее условие симметрии по данной плоскости

$$\frac{\sqrt{2}}{2}(-u_x + u_y) \Big|_{(x,y,z) \in \Gamma_{sym2}} = 0, \quad (6)$$

где u_x - компонента вектора перемещений в направлении оси x .

В области Γ_{fix} (область C) задано краевое условие, описывающее закрепление образца в неподвижном захвате

$$u_z|_{(x,y,z) \in \Gamma_{fix}} = 0 , \quad (7)$$

где u_z - компонента вектора перемещений в направлении оси z .

В области Γ_{mov} (область D) задано краевое условие, описывающее закрепление образца в подвижном захвате и движение данного захвата

$$u_z|_{(x,y,z) \in \Gamma_{mov}} = vt , \quad (8)$$

где v - скорость перемещения подвижного захвата, t - текущее время.

С учетом введенных гипотез о материале при построении модели для описания виртуального эксперимента была использована модель изотропного упруго пластического тела. Рассмотрим подробнее данную модель.

Компоненты тензора полных деформаций ε_{ij}^{tot} , $i, j = x, y, z$ равны сумме соответствующих компонент тензора упругих деформаций ε_{ij}^e и тензора пластических деформаций ε_{ij}^p

$$\varepsilon_{ij}^{tot} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p . \quad (9)$$

Компоненты тензора упругих деформаций связаны с компонентами тензора напряжений σ_{ij} законом Гука для изотропного тела [3]

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{2G} \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{3\nu}{1+\nu} \sigma_0 \right) , \quad (10)$$

где ν - коэффициент Пуассона, G - сдвиговой модуль упругости равный $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, где E , δ_{ij} - символ Кронекера

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} , \quad (11)$$

σ_0 - среднее напряжение равно

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) . \quad (12)$$

Для описания процесса пластического деформирования используется модель Гурсона (Gurson) [7, 8]. В данной модели помимо рассмотрения процесса на макроуровне за счет рассмотрения влияния процессов зарождения роста и слияния пор на величину макропластической деформации и изменение объема учитывается вклад процессов на более

низких структурных уровнях. Модель базируется на следующих предположениях

- в условиях гидростатического растяжения поры растут. Во время течения материал не сжимаем, следовательно изменение объема тела связано с ростом пор;
- зарождение новых пор обуславливается пластическим деформированием, которое приводит к разрушению связности на границах включения (вторая фаза)-матрица;
- слияние существующих пор приводит к ускоренному уменьшению нагрузки, которую выдерживает материал, без заметного изменения объема.

Рассмотрим подробнее базовые соотношения модели Гурсона.

Скорость изменения пористости материала (объемного содержания пор) f описывается следующим уравнением [7]

$$\dot{f} = \dot{f}_{growth} + \dot{f}_{nucl} , \quad (13)$$

где f_{growth} - объемное содержание растущих пор, f_{nucl} - объемное содержание зарождающихся пор.

Скорость изменения объемного содержания растущих пор определяется соотношением

$$\dot{f}_{growth} = (1 - f) \varepsilon_{ij}^p \delta_{ij} . \quad (14)$$

Интенсивность скорость пластической деформации $\dot{\varepsilon}_i^p$ определяется соотношением, являющимся аналогом закона течения [3]

$$\dot{\varepsilon}_i^p = \frac{\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p}{(1 - f) \sigma_T} , \quad (15)$$

где σ_T - текущее значение предела текучести, задаваемое законом упрочнения [3]

$$\sigma_T = \Phi \left(\int_0^{\varepsilon_i^p} d\varepsilon_i^p \right) . \quad (16)$$

С учетом соотношений (15) и (16) модель пластичности Гурсона является моделью с изотропным упрочнением.

Скорость изменения объемного содержания растущих пор определяется соотношением [7]

$$\dot{f}_{nucl} = \frac{f_N \dot{\varepsilon}_i^p}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_{ij}^p - \varepsilon_N}{S_N} \right)^2 \right] , \quad (17)$$

где f_N - объемная доля включений или частиц второй фазы, ε_N - среднее значение пластической деформации, при котором начинается зарождение пор, S_N - среднее квадратичное значение уровня пластической деформации, при котором начинается зарождение пор.

Поверхность пластичности с учетом наличия пор, а так же возможности их слияния имеет вид [7, 8]

$$\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_T}\right)^2 + 2f^*q_1 \cosh\left(\frac{3}{2} \frac{q_2\sigma_0}{\sigma_T}\right) - (1 - q_3f^{*2}) = 0, \quad (18)$$

где σ_i - интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0)(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0)}, \quad (19)$$

$\cosh(.)$ - функция гиперболический косинус, q_1, q_2, q_3 - константы Твергаарда-Нидлемана (σ), f^* - функция Твергаарда-Нидлемана

$$f^*(f) = \begin{cases} f & , f \leq f_c \\ f_c + \frac{q_1}{f_F - f_c}(f - f_c) & , f > f_c \end{cases}, \quad (20)$$

где f_c - критический уровень пористости при котором начинается слияние пор, f_F - уровень пористости, при котором материал разрушается (несущая способность материала теряется полностью).

В качестве метода решения рассмотренной выше модели растяжения цилиндрического образца при проведении виртуального эксперимента был использован численный метод - метод конечных элементов [9]. Для построения дискретного аналога модели и последующего решения соответствующей дискретной модели был использован коммерческой пакет **ANSYS WORKBENCH®** [10].

Полученная конечно-элементная сетка с случае гладкого образца и образца с концентратором напряжений показана на рисунках 12 и 13 соответственно.

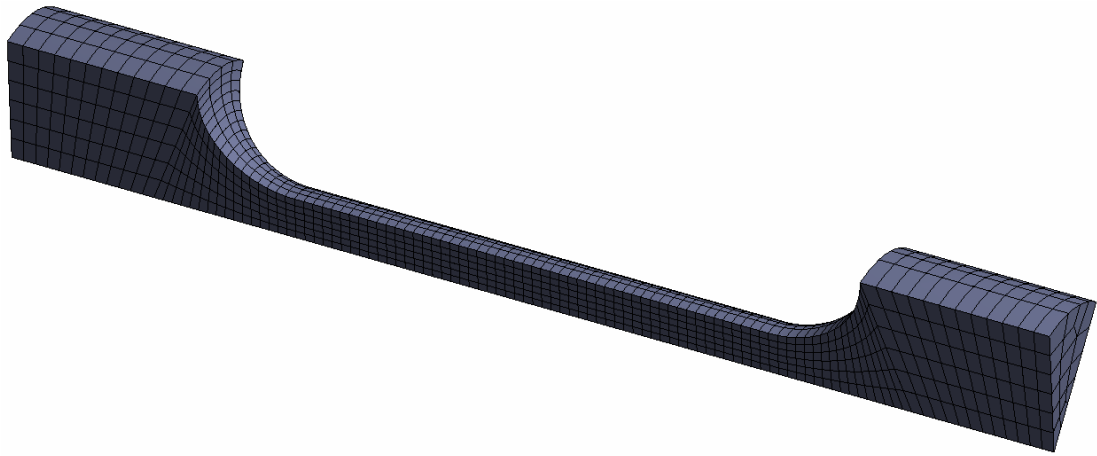


Рисунок 12. Конечно-элементная сетка в случае гладкого образца

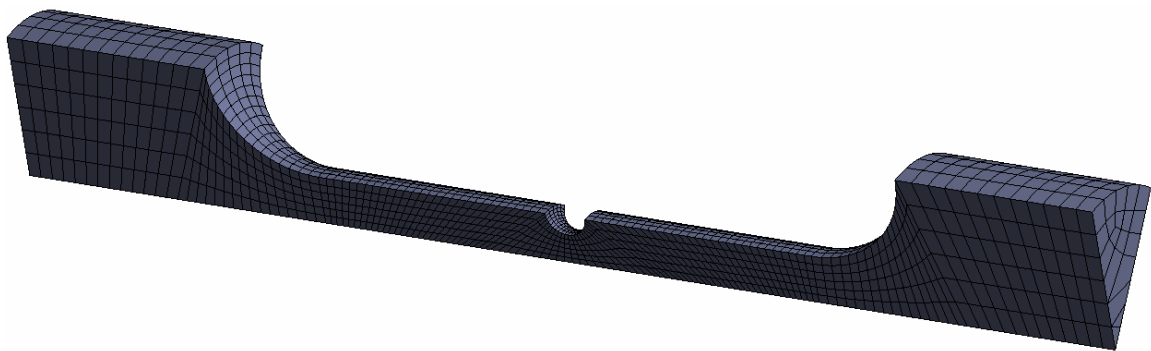


Рисунок 13. Конечно-элементная сетка в случае образца с концентратором напряжений

3. Пошаговая методика выполнения работы

Опишем методику проведения виртуального эксперимента и отбора данных необходимых для дальнейшего анализа. Данная процедура будет описана по отдельности для гладких образцов и для образцов с концентратором напряжений.

3.1. Методика проведения виртуального эксперимента в случае гладких образцов

Приведем пошаговую методику проведения виртуального эксперимента в случае гладких образцов.

1. В коммерческом пакете **ANSYS WORKBENCH®** открыть проект *tension_with_pores*.

2. В задаче *tension_with_pores* указанного выше проекта открыть блок задания моделей и свойств материалов (*Engineering Data*).

3. В открывшейся форме для материала *Steel* перейти в область детализации моделей и свойств данного материала, в которой выбрать модель кривой упрочнения *Multilinear Isotropic Hardening* (теория течения с изотропным упрочнением с кривой упрочнения, описываемой кусочно-линейной функцией), как показано на рисунке 14.

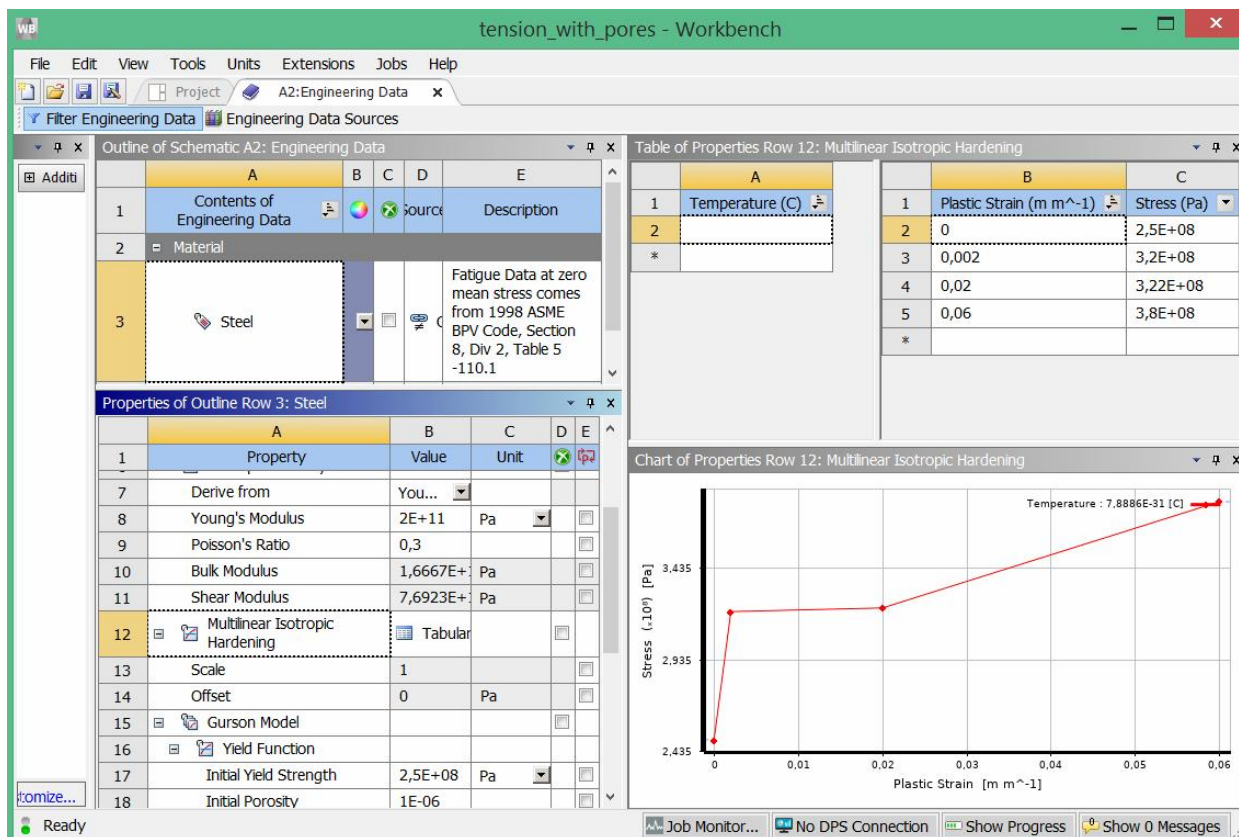


Рисунок 14. Форма задания моделей и свойств материалов. Задание кривой упрочнения

В области таблиц, расположенной в правом верхнем углу формы на рисунке 14, отображается таблица, задающая кусочно-линейную аппроксимацию кривой упрочнения. Более детально данная таблица показана на рисунке 15.

	B	C
1	Plastic Strain (m m ⁻¹)	Stress (Pa)
2	0	2,5E+08
3	0,002	3,2E+08
4	0,02	3,22E+08
5	0,06	3,8E+08
*		

Рисунок 15. Таблица, описывающая кривую упрочнения

При необходимости изменения кривой упрочнения все действия надо

проводить именно с данной таблицей. Рассмотрим основные правила при формировании данной таблицы:

- каждая строка в таблице описывает точку с координатами пластическая деформация - напряжение;
- начальное значение пластической деформации в таблице обязательно должно быть нулевым;
- в качестве начального значения напряжения наиболее корректно использовать предел упругости или предел пропорциональности;
- значения пластических деформаций могут только возрастать;
- значения напряжений могут не убывать;
- если величина пластической деформации превышает значение в последней строке таблицы, то уровень напряжения далее считается неизменным и равным значению в последней строке таблицы (материал рассматривается, как неупрочняющийся).

4. Для задания параметров модели пластичности Гурсона открытой форме для материала *Steel* перейти в область детализации моделей и свойств данного материала, в которой выбрать модель пластичности Гурсона (*Gurson model*), как показано на рисунке 16.

5. В модели Гурсона можно изменить параметр *Initial Yield Strength* (начальное значение предела текучести) (рисунок 16), который должен быть равен напряжению в первой строке таблицы, задающей функцию упрочнения (см. рисунок 15).

6. Для учета объемной доли частиц второй фазы служит значение параметра *Nucleation Porosity*, который показан на рисунке 16, где его значение равно 0,01 .

7. Выйти из блока задания моделей и свойств материалов (*Engineering Data*).

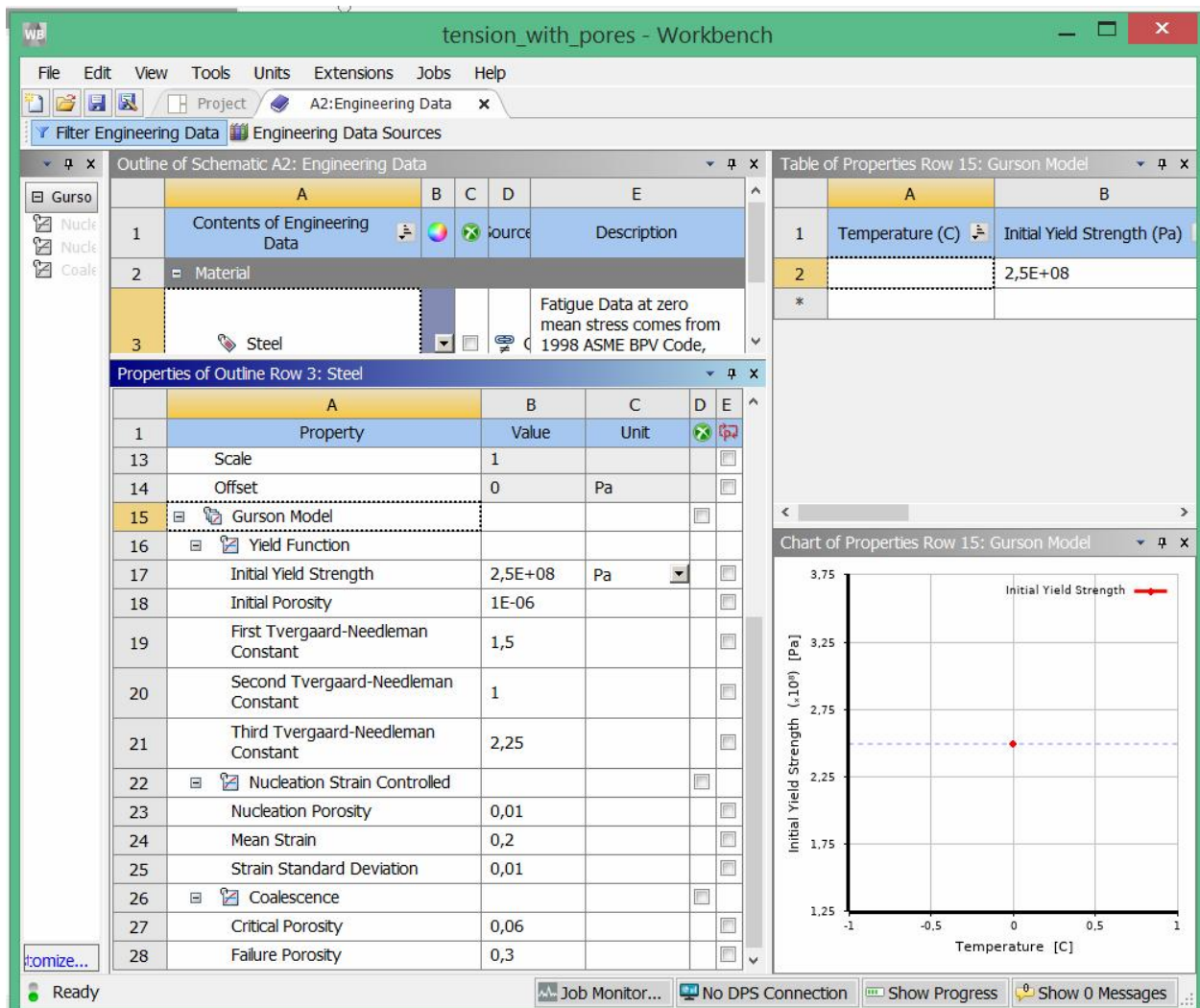


Рисунок 16. Форма задания моделей и свойств материалов. Модель пластичности Гурсона

8. Войти в блок построения дискретной модели (*Model*) в задаче *tension_with_pores*, согласившись применить сделанные изменения. При этом откроется форма блока построения дискретной модели и решения (*Mechanical*), показанная на рисунке 17.

9. Запустить процесс виртуального эксперимента, путем запуска решения задачи нажатием на кнопку *Solve*, которая выделена на рисунке 17.

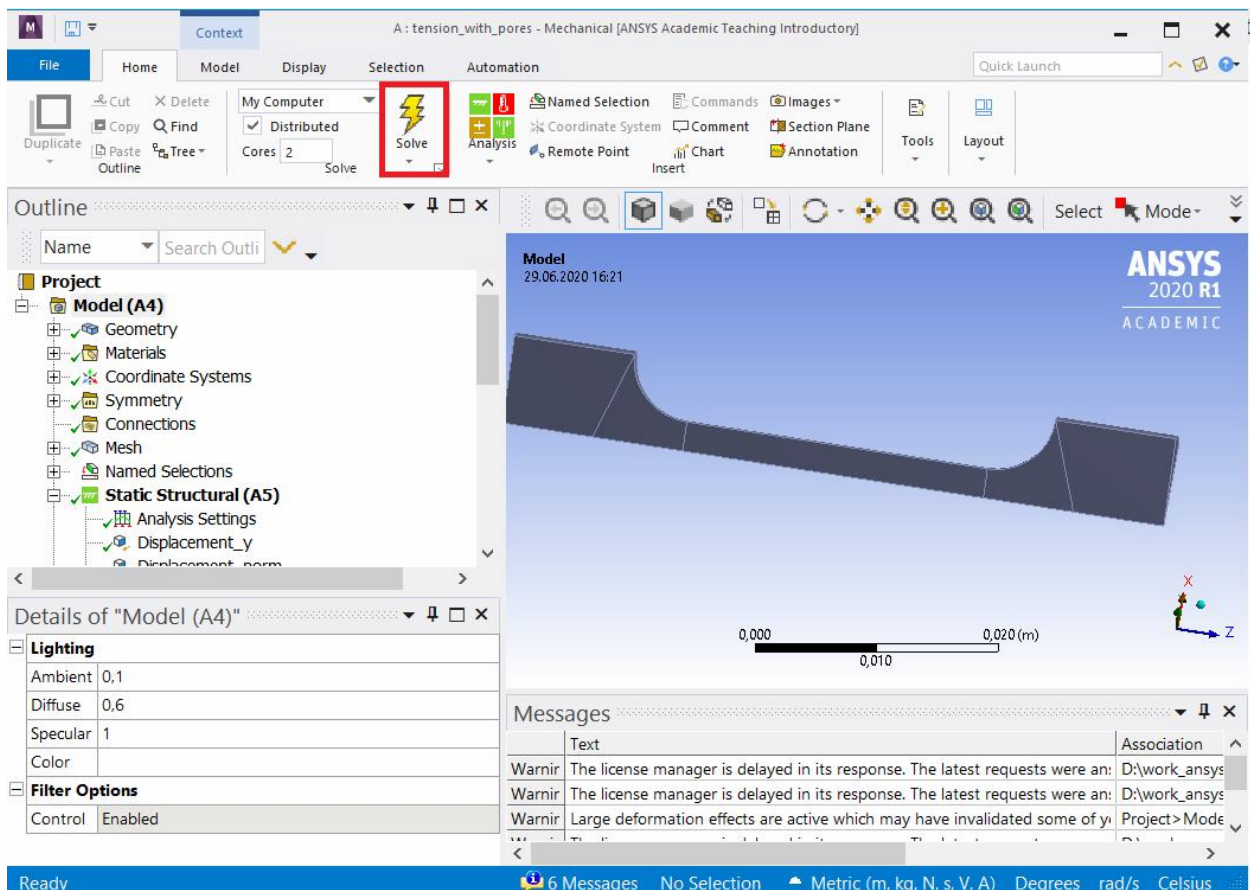


Рисунок 17. Форма построения дискретной модели и решения

10. Перейти к анализу результатов эксперимента.

11. Для построения картины распределения интенсивности напряжений в дереве задачи выбрать пункт *Equivalent Stress*, как показано на рисунке 18. После этого в рабочей области текущей формы отобразится рассматриваемая часть образца с показанной на ней картиной распределения интенсивности напряжений.

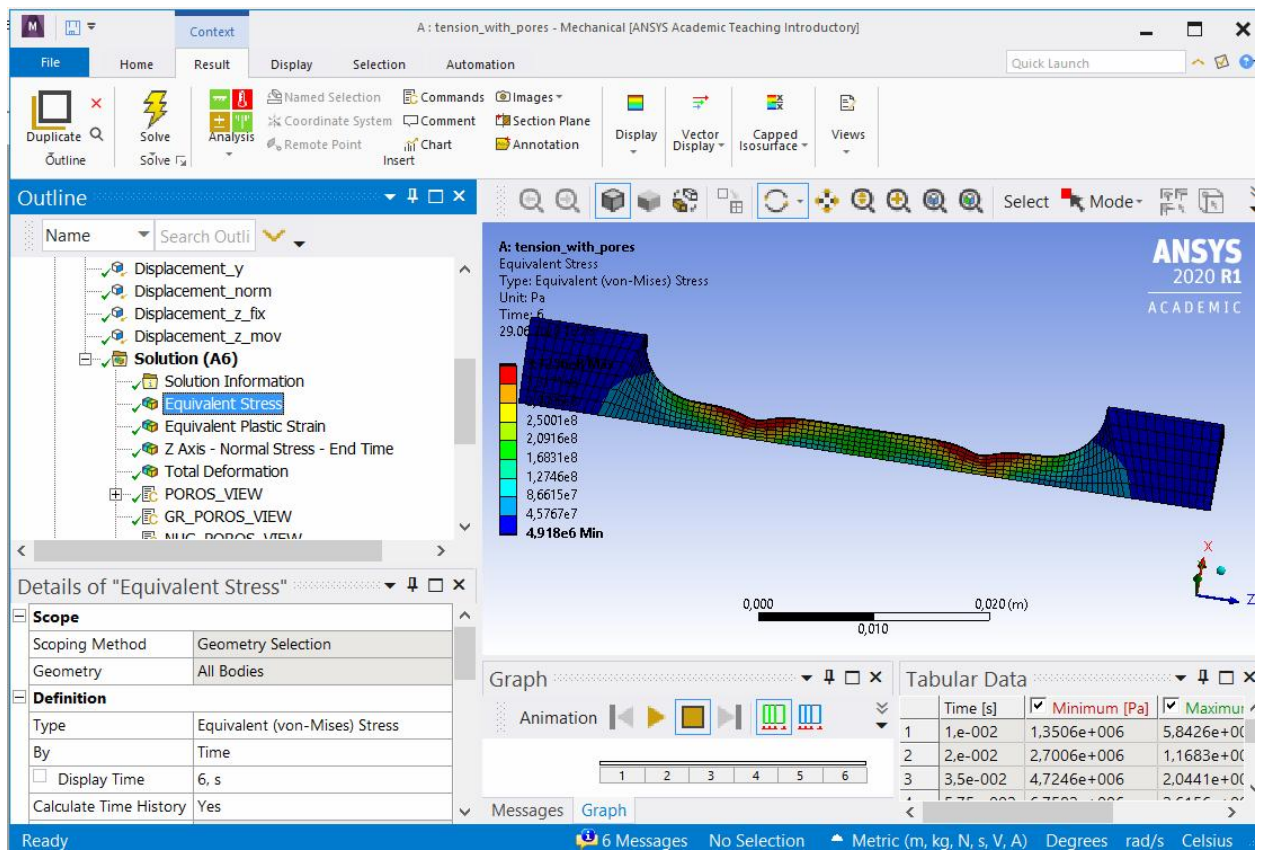


Рисунок 18. Построение картины распределения интенсивности напряжений

12. Аналогичным образом для построения картины интенсивности пластических деформаций в дереве задачи выбрать пункт *Equivalent Plastic Strain* и получить картину распределения интенсивности пластических деформаций в рабочей области формы, как показано на рисунке 19.

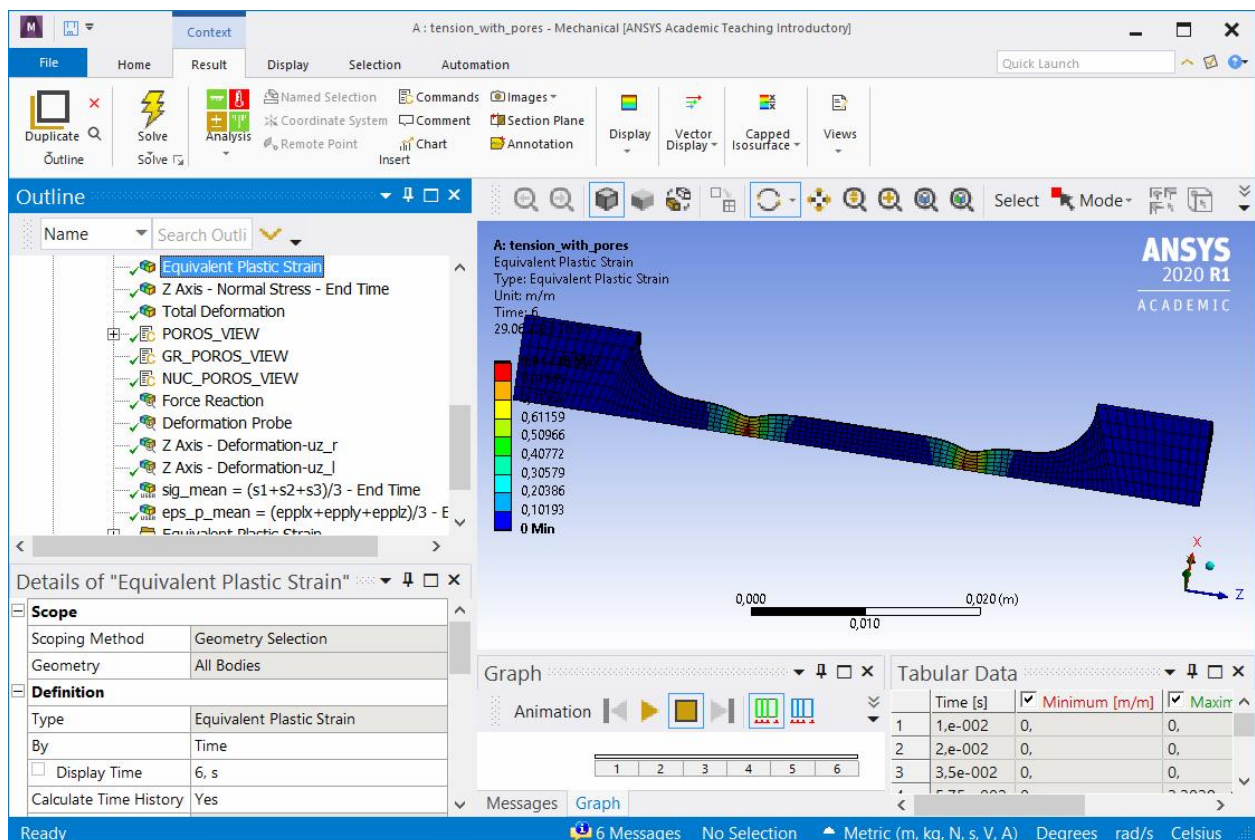


Рисунок 19. Построение картины распределения интенсивности пластических деформаций

13. Для построения первичной диаграммы растяжения на базе равной начальной длине рабочей части образца необходимо извлечь из результатов виртуального эксперимента зависимость продольной силы в образце от времени и зависимость удлинения рабочей части образца Δl от времени, которая получается путем вычитания из перемещения правого торца рабочей части u_z^r перемещения левого торца рабочей части образца u_z^l

$$\Delta l = u_z^r - u_z^l . \quad (21)$$

13.1. Для извлечения зависимости продольной силы в образце от времени необходимо в дереве задачи выбрать пункт *Force Reaction*, а затем как показано на рисунке 20 в выделенной области зоны таблиц, которая отмечена на рисунке 20, щелкнуть сначала левой, а затем правой кнопкой мыши. В выпадающем меню выбрать пункт *Copy Cell* (см. рисунок 21). Скопированные таким образом данные могут быть вставлены в таблицу MS Excel или OO Calc. При этом необходимо обратить внимание, что все полученные значения силы отрицательные, так как данные извлекались для силы реакции. Поэтому перед применением анализируемых данных значения силы должны быть умножены на минус единицу.

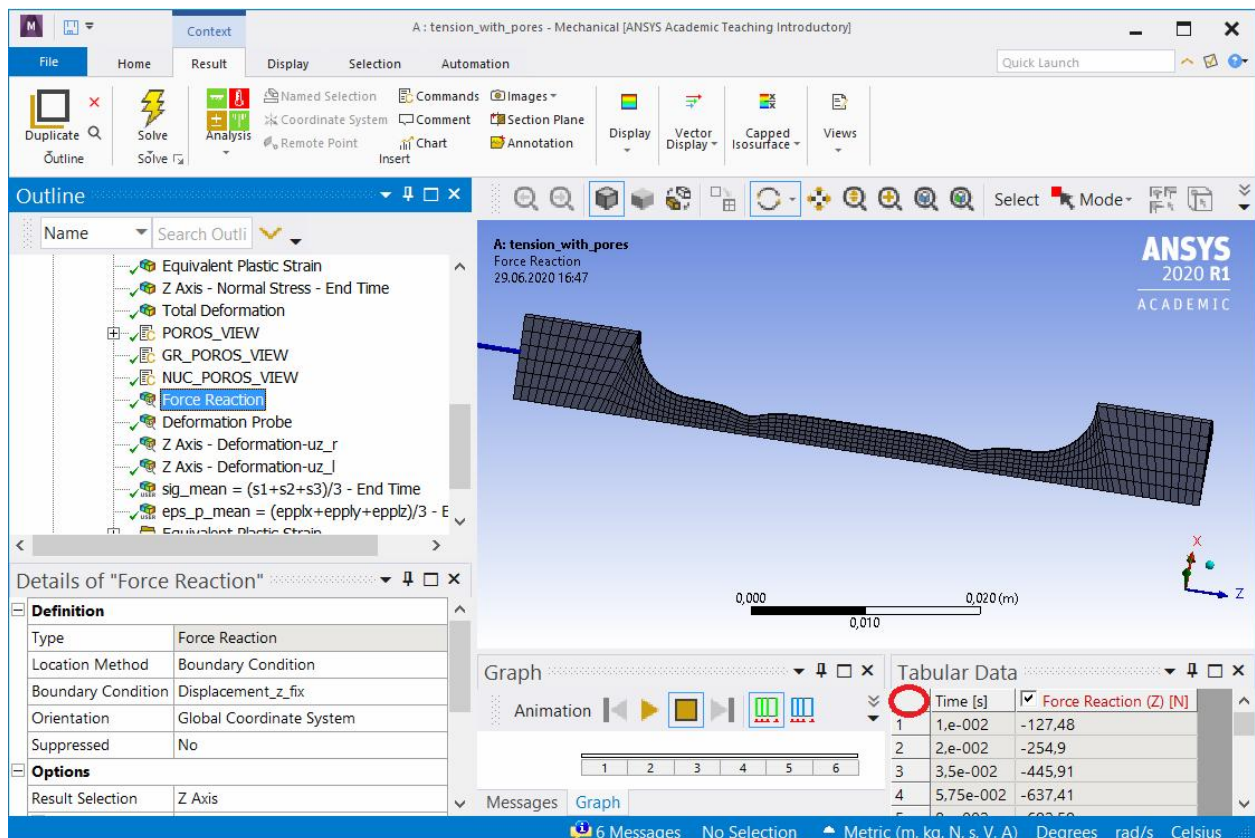


Рисунок 20. Выбор результата зависимость силы от времени

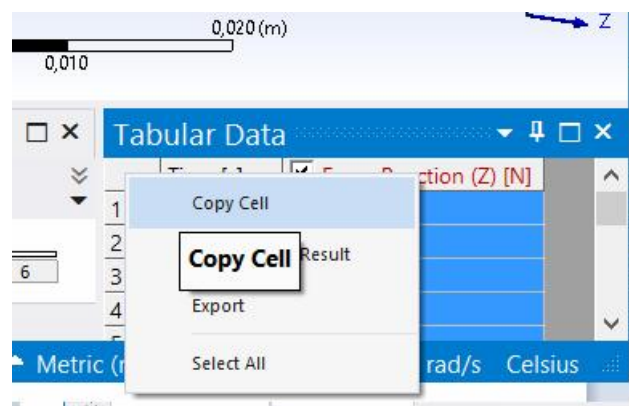


Рисунок 21. Выпадающее меню для копирования данных в буфер обмена

13.2. Для извлечения зависимости перемещения правого торца рабочей части от времени необходимо в дереве задачи выбрать пункт *Z axis-Deformation-uz_r*, как показано на рисунке 22. А затем для извлечения данных в буфер обмена повторить действия, описанные на шаге 13.1.

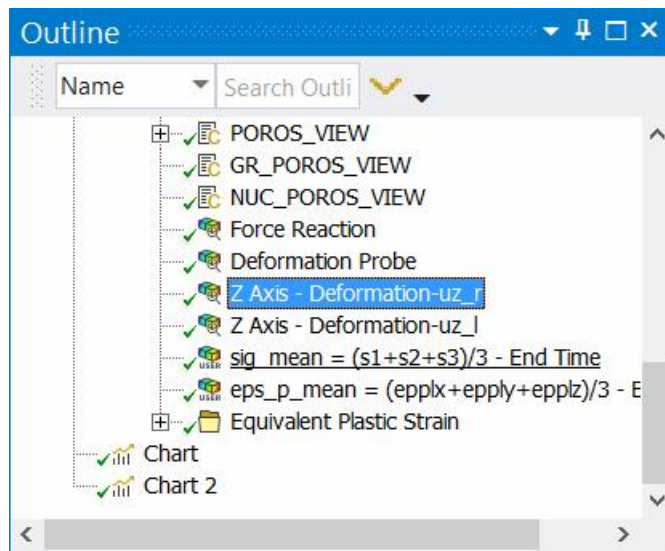


Рисунок 22. Выбор результата зависимость перемещения правого торца рабочей части от времени

13.3. Повторить действия, заданные на шаге 13.2, только выбрав в дереве задачи пункт *Z axis-Deformation-uz_l*.

14. Для построения первичной диаграммы растяжения на базе равной начальной полной длине образца необходимо извлечь из результатов виртуального эксперимента зависимость продольной силы в образце от удлинения всего образца. Для этого в дереве задачи надо выбрать пункт *Chart* (как показано на рисунке 23), а затем провести действия по извлечению, описанные в пункте 13.1.

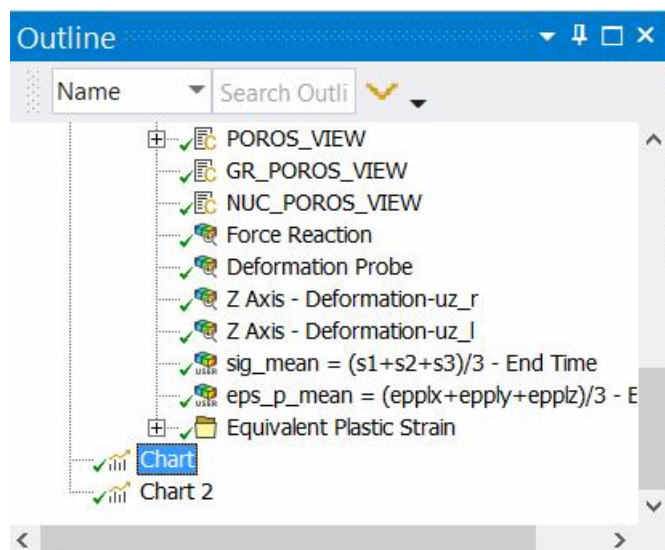


Рисунок 23. Выбор результата зависимость сила от удлинения образца

15. Провести обработку первичных диаграмм растяжения в соответствии с правилами, описанными в подразделе 3.1 данного пособия.

16. Для построения диаграммы деформирования в некоторой точке

образца надо выполнить следующие действия: определить номер узла КЭ сетки, соответствующий данной точке и создать на его основе именованное выделение, в дерево задачи вставить новый пункт интенсивность напряжений *Equivalent Stress* для созданного именованного выделения, затем в дерево задачи вставить новый пункт интенсивность полных деформаций *Equivalent Total Strain* для созданного именованного выделения, провести оценку результатов для введенных пунктов дерева задачи, извлечь зависимости анализируемых параметров от времени из изучаемых пунктов меню в буфер обмена.

16.1. Для создания именованного выделения в заданной точке, соответствующего связанному с ней узлу КЭ сетки, надо активизировать указатель выбор узла КЭ сетки, как показано на рисунке 24.

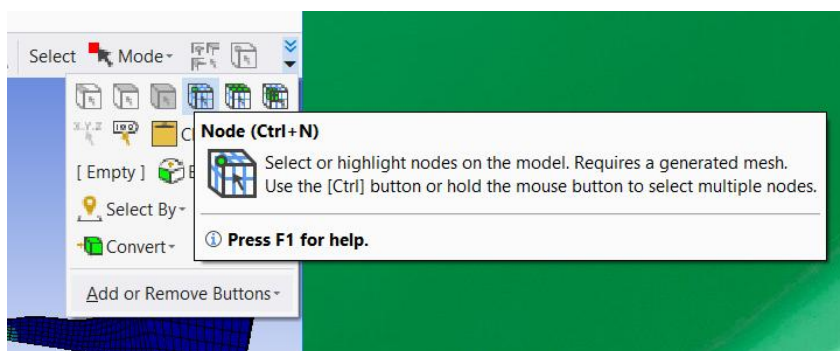


Рисунок 24. Активизация указателя выбора узла КЭ сетки

Затем в рабочей области формы щелкнуть левой кнопкой мыши по интересующей нас точке. При этом выделится узел КЭ сетки (см. рисунок 25). Щелкнуть по нему правой кнопкой мыши.

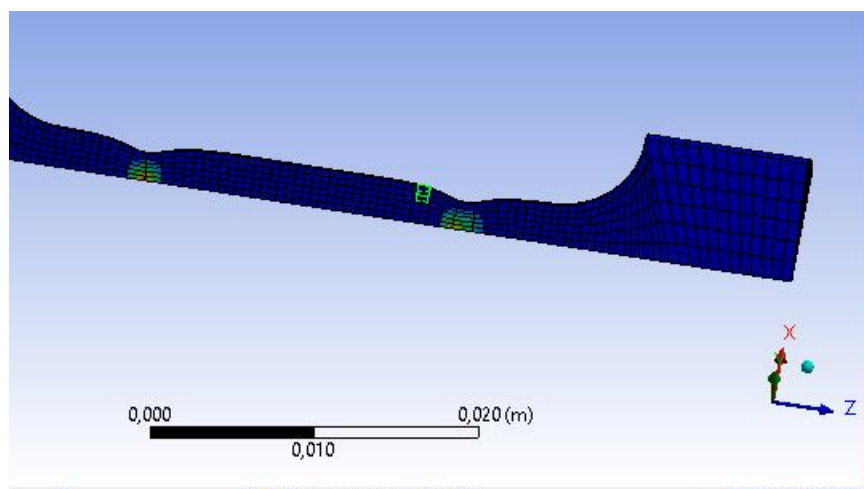


Рисунок 25. Выделение узла КЭ сетки

В появившемся выпадающем меню выбрать пункт *Create Named*

Selection, как показано на рисунке 26.

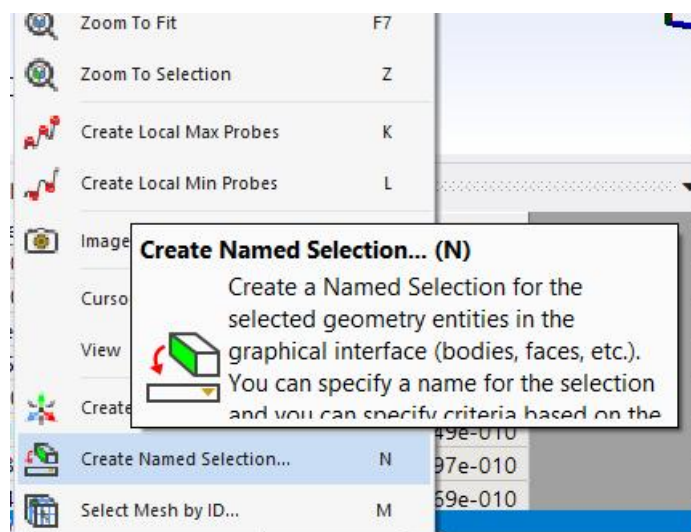


Рисунок 26. Выпадающее меню для создания именованного выделения

После этого в появившейся форме задать в текстовом поле имя выделения (например, на рисунке 27 введено имя "pnt_max") и нажать кнопку "Ok".

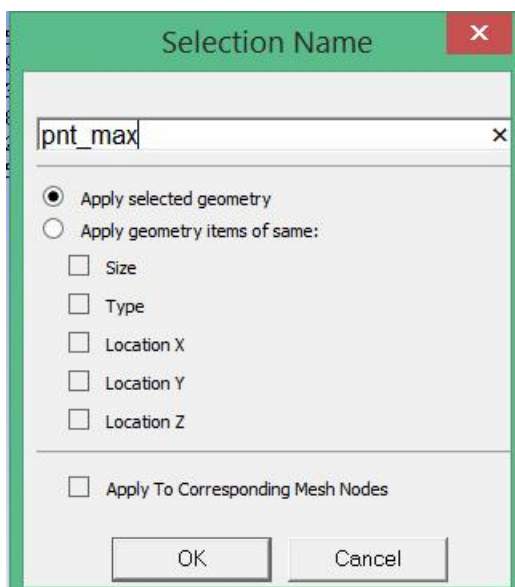


Рисунок 27. Выпадающее меню создания именованного выделения

16.2. Для создания нового пункта в дереве задачи интенсивность напряжений *Equivalent Stress* для созданного именованного выделения, необходимо сначала вставить в дерево задачи объект *Equivalent Stress*, а затем в его окне детализации в строке *Scoping Method* из выпадающего списка выбрать пункт *Named Selection*, как показано на рисунке 28. После чего в окне детализации в строке *Named Selection* из выпадающего списка выбрать ранее созданное именованное выделение *pnt_max* (см. рисунок 29).

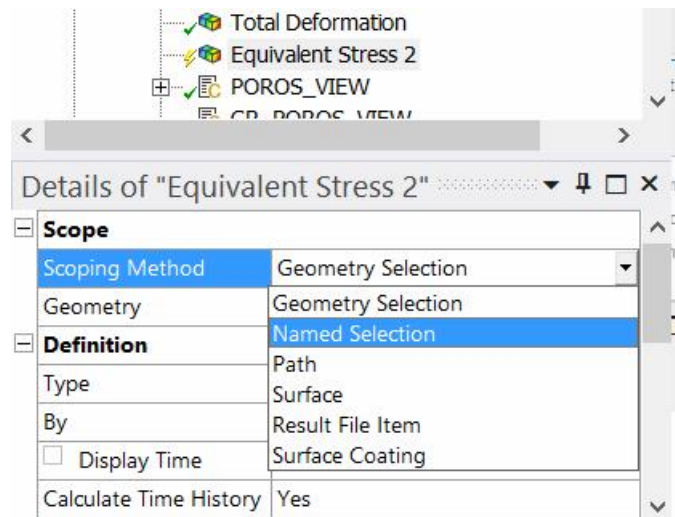


Рисунок 28. Выбор способа задания объекта для результата

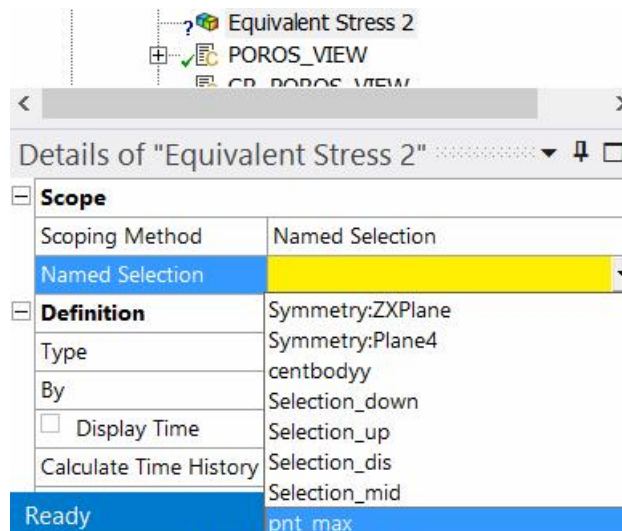


Рисунок 29. Выбор объекта для отображения результата

16.3. Для создания нового пункта в дереве задачи интенсивность полной деформации *Equivalent Total Strain* для созданного именованного выделения, необходимо сначала вставить в дерево задачи объект *Equivalent Total Strain*, а затем повторить действия описанные на шаге 16.2.

16.4. Провести оценку результатов решенной задачи в блоке *Solution* дерева задачи.

16.5 Для извлечения зависимости интенсивности напряжений от времени и интенсивности полных деформаций от времени в буфер обмена воспользоваться процедурой, описанной на шаге 13.1.

17. Для оценки степени пористости в материала образца в процессе нагружения необходимо в дереве задачи выбрать пункт *POROS_VIEW*, как показано на рисунке 30.

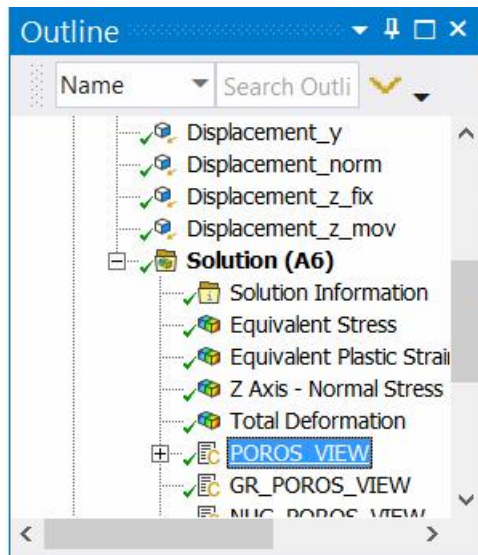


Рисунок 30. Выбор объекта для просмотра уровня пористости

В раскрытой ветке дерева задачи выбрать один из подпунктов для просмотра распределения степени пористости на некотором шаге по времени, например, на рисунке 31 выбран подпункт *Post Output 3*. Отображаемая при этом картина распределения изучаемой величины показана на рисунке 32.

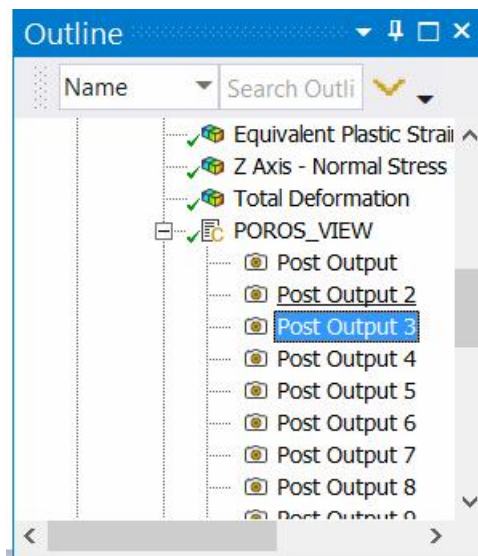


Рисунок 31. Выбор шага по времени, на котором будет изучаться уровень пористости

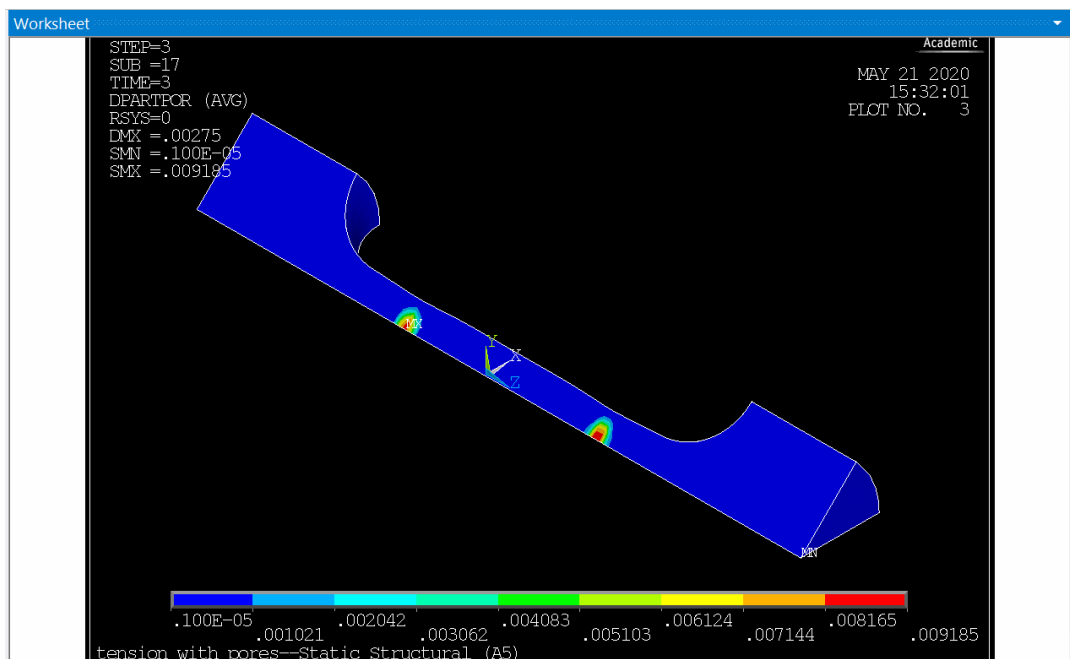


Рисунок 32. Картина распределения уровня пористости

3.2.Методика проведения виртуального эксперимента в случае образцов с концентратором напряжений

Приведем пошаговую методику проведения виртуального эксперимента в случае гладких образцов.

1. В коммерческом пакете **ANSYS WORKBENCH®** открыть проект *tension_conc_with_pores*.

2. В задаче *tension_conc_with_pores* указанного выше проекта провести манипуляции с блоком задания моделей и свойств материалов (*Engineering Data*) описанные на шагах 2 - 7 в подразделе 4.1.

3. В задаче *tension_conc_with_pores* указанного выше проекта открыть блок геометрического моделирования *Geometry*.

4. Для изменения радиуса и глубины выточки, являющейся концентратором напряжений надо в дереве задачи выбрать объект *Torus2* (см. рисунок 33).

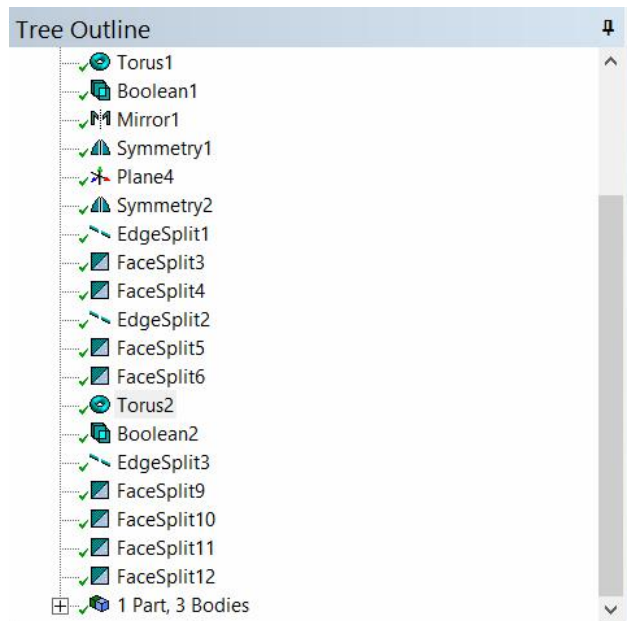


Рисунок 33. Объект для задания концентратора напряжений

5. В окне детализации, как показано на рисунке 34, параметр внутренний радиус тора *Inner Radius* задает расстояние от дна выточки до оси образца, а полусумма параметров *Inner Radius* и *Outer Radius* задает радиус выточки. На рисунке 34 параметр *Inner Radius* равен 1,5 мм, а параметр *Outer Radius* равен 3,5 мм.

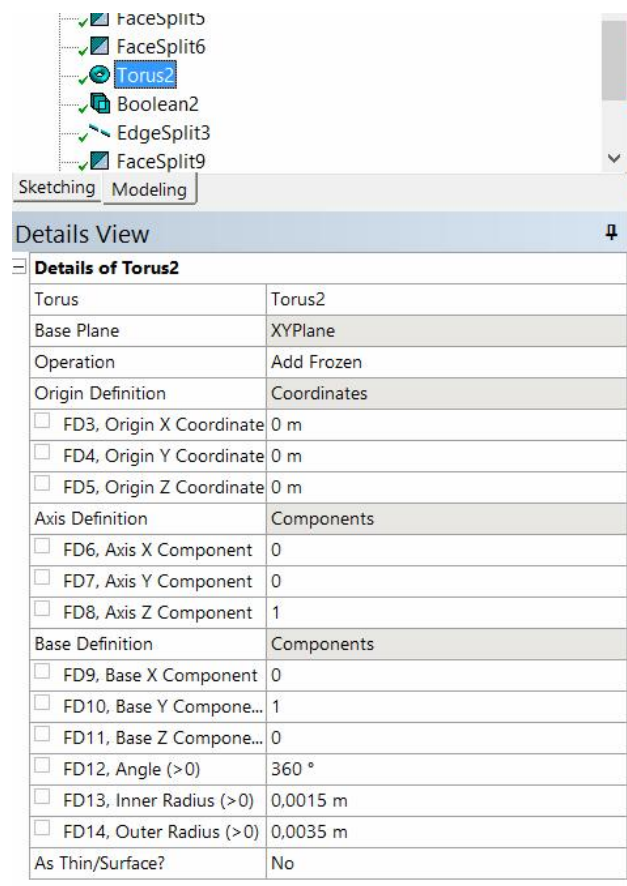


Рисунок 34. Окно детализации объекта *Torus2*

7. После изменения параметров объекта *Torus2* нажать кнопку *Generate* (см. рисунок 35). А затем выйти из блока построения геометрической модели.

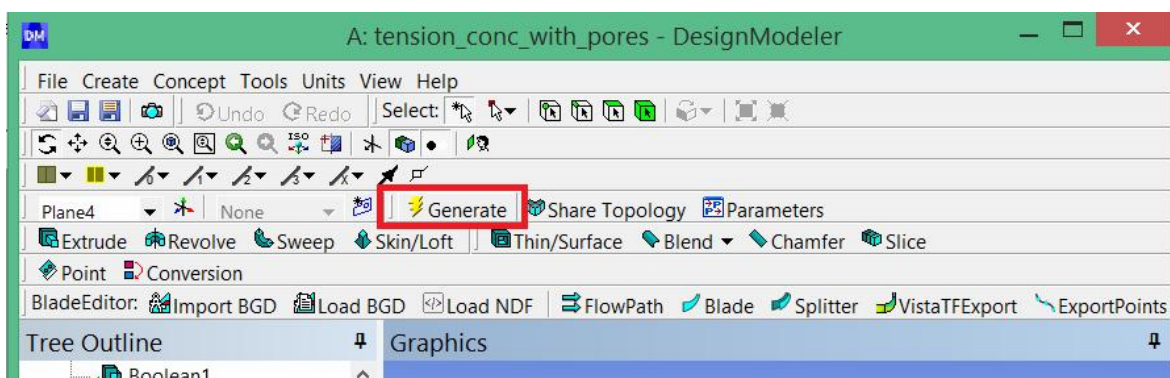


Рисунок 35. Запуск генерации геометрической модели

8. Выполнить шаги с 8 по 12 из подраздела 4.1.

9. Выполнить шаг 16 из раздела подраздела 4.1.

4. Контрольные вопросы

1. Назовите характерные зоны, выделяемые в типовом образце на растяжение.

2. Что такое первичная диаграмма растяжения.

3. Какие характерные зоны выделяют на диаграмме растяжения.

4. Дайте определение вторичной условной диаграммы растяжения.

5. Дайте определение пределу пропорциональности, пределу упругости, пределу текучести, пределу прочности и относительному удлинению после разрыва.

6. Опишите графическую методику определения предела пропорциональности.

7. Опишите методику определения предела упругости.

8. Опишите методику определения предела текучести.

9. Что такое концентрация напряжений.

10. Что такое концентратор напряжений.

11. Дайте определение коэффициента концентрации напряжений.

12. Запишите закон Гука для изотропного упругого тела для каждой из компонент тензора упругих деформаций.

13. Дайте определение теории течения с изотропным упрочнением. Почему ее корректно применять при построении модели материала в случае анализируемого процесса.

14. Перечислите все механизмы изменения уровня пористости в модели Гурсона.

15. Перечислите все шаги методики построения первичной диаграммы растяжения по результатам виртуального эксперимента.

16. Перечислите все шаги построения вторичной диаграммы деформирования в некоторой точке тела по результатам виртуального эксперимента.

5.Задания

1. Рассмотреть два материала с разной объемной долей частиц второй фазы.

2. Для каждого из материалов провести виртуальный эксперимент по растяжению гладкого образца и образца с концентратором напряжений.

3. Провести сравнение величин внешних сил, при которых возникает пластическая деформация, а так же максимальных сил выдерживаемых образцом в случае гладкого образца и в случае образца с концентратором напряжений.

4. Построить диаграммы деформирования в каждом из случаев для точек, лежащих на поверхности образца и в его центре в зоне максимальной деформации в шейке.

5. Для случая гладких образцов:

5.1. построить первичную диаграмму растяжения, вторичную условную диаграмму растяжения и получить стандартные механические характеристики (предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, предел прочности и относительное удлинение на разрыв) приняв в качестве базы для измерения перемещение полную длину образца;

5.2. построить первичную диаграмму растяжения, вторичную условную диаграмму растяжения и получить стандартные механические характеристики (предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, предел прочности и относительное удлинение на разрыв) приняв в качестве базы для измерения перемещение длину рабочей части образца;

5.3. сравнить полученные значения относительного удлинения на разрыв с максимальные значением интенсивности пластической деформации в области шейки в момент завершения виртуального эксперимента;

5.4. сравнить построенные диаграммы растяжения и найденные механические характеристики с учетом для оценки влияния базы эксперимента.

6. Найти коэффициент концентрации напряжений.

7. Оформить отчетные материалы в соответствии со следующими требованиями:

Отчет должен содержать следующие обязательные разделы:

- титульный лист (см. Приложение);
- список исполнителей (с подписями);
- реферат с постановкой задачи;
- список используемых терминов, обозначений и сокращений;
- описание объекта исследований и используемых методик;
- результаты виртуального эксперимента;
- обобщение и анализ результатов исследований;
- выводы;
- список используемой литературы.

При оформлении отчета следует придерживаться структуры отчета по НИР, требования к которому установлены ГОСТ 7.32-2001.

Список литературы

1. ГОСТ 25.502-79 Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – М. : Изд-во стандартов, 1981. - 28 с.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М. : Наука, 1967. – 552 с.
3. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. - М.: Машиностроение, 1975. - 400с.
4. Neuber H. Theory of stress concentration for shear-strained prismatic bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law // Trans. Of ASME, Journal of Applied Mechanics. – 1961. – v. 28. – p. 544 – 550.
5. Расчет на прочность деталей машин: справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шор, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
6. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. - М.: Высш. шк., 1980. - 368 с.
7. Gurson A.L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part 1 — Yield criteria and flow rules for porous ductile media// Trans. Of ASME, Journal of Engineering Materials an Technoligy. - 1977. - v. 1 - p. 2 - 15.
8. Tvergaard V. Influence of voids shear band instabilities under plane strain conditions//Int. J. Fracture. - 1981. - v. 17. - N. 4. - p. 389 - 407.
9. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. – 544 с.
10. ANSYS release 19.0 Documentation for ANSYS WORKBENCH [Электронный ресурс] : ANSYS Inc. — Электрон. дан. и прогр. — [Б. м.], 2019.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского (ННГУ)

Физический факультет ННГУ
Кафедра физического материаловедения ННГУ

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

(Отчет по лабораторной работе / научно-исследовательской практике)

Учебный курс: _____

(приводится полное название учебного курса, по которому проводится работа)

Выполнили
студенты _____ группы:

_____/_____
(подпись студента) Фамилия И.О. студента

_____/_____
(подпись студента) Фамилия И.О. студента

_____/_____
(подпись студента) Фамилия И.О. студента

_____/_____
(подпись студента) Фамилия И.О. студента

_____/_____
(подпись студента) Фамилия И.О. студента

_____/_____
(подпись студента) Фамилия И.О. студента

«Отчет принят» / «отчет не принят»:

Преподаватель, уч.степень, уч.звание

_____/_____
(подпись преподавателя) Фамилия И.О. преподавателя

_____/_____
(подпись преподавателя) Фамилия И.О. преподавателя

«_____» _____ 201__ г.

_____/_____
(подпись ответственного) Фамилия И.О. ответственного

_____/_____
(подпись ответственного) Фамилия И.О. ответственного

Нижегород 202__ г.

Николай Николаевич **Берендеев**

ПРОВЕДЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА ПО РАСТЯЖЕНИЮ
ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛОВ

Практикум

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать2020. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. .

Заказ № . Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Нижегородского госуниверситета
им. Н.И. Лобачевского
603600, г. Нижний Новгород, ул. Большая Покровская, 37
Лицензия ПД № 18-0099 от 14.05.01