

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Факультет «Аэрокосмический»
Кафедра «Техническая механика»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ П.А.Тараненко

_____ 2019 г.

**ОЦЕНКА РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛА ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА С
УЧЕТОМ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ШЕЙКЕ**

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–15.03.03.2019.034 ПЗ ВКР

Консультант,
инженер-конструктор
_____ А.С. Хоружий
_____ 2019 г.

Руководитель проекта, к.т.н.,
доцент
_____ В.Б. Порошин
_____ 2019 г.

Автор проекта
студент группы П-429
_____ Т.С. Птицина
_____ 2019 г.

Нормоконтролер, к.т.н., доцент
_____ Ю.Н. Ребяков
_____ 2019 г.

Челябинск 2019

АННОТАЦИЯ

Птицина Т.С., Оценка ресурса пластичности материала по результатам испытания цилиндрического образца с учетом вида напряженного состояния в шейке. – Челябинск: ЮУрГУ, П-429; 38 с. 25 ил., библиогр. список – 16 наим.

В выпускной квалификационной работе на тему «Оценка ресурса пластичности материала по результатам испытания цилиндрического образца с учетом вида напряженного состояния в шейке» изложены результаты исследования влияния на ресурс пластичности материала напряженного состояния в шейке цилиндрического образца.

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы получены следующие результаты.

1. Из расчета процесса деформирования цилиндрического образца с учетом образования шейки методом конечных элементов получены расчетные зависимости, отражающие вид напряженного состояния в шейке образца.
2. Подобраны параметры деформационного критерия, посредством гипотезы линейного суммирования повреждений на основе полученных данных.
3. Оценено различие в определении предельной пластической деформации для цилиндрического образца сравнением аналитического и численного результатов методом конечных элементов.
4. Исследован вид напряженного состояния в шейке плоского образца при помощи МКЭ-расчета и деформационного критерия.

					150303.19.034.00 ПЗ ВКР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Птицина Т.С.			<i>Оценка ресурса пластичности материала по результатам испытания цилиндрического образца с учетом вида напряженного состояния в шейке</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Проверил</i>		Порошин В.Б.				Д	2	38
<i>Н. Контр.</i>		Ребяков Ю.Н.				ЮУрГУ Кафедра ТМ		
<i>Утверд.</i>		Тараненко П.А.						

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ О МАТЕРИАЛЕ ДЛЯ МКЭ-РАСЧЕТА	7
2 ПОСТРОЕНИЕ МКЭ-МОДЕЛИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА	12
3 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ. РАСЧЕТ ПО ДЕФОРМАЦИОННОМУ КРИТЕРИЮ	16
4 ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО КРИТЕРИЯ ..	20
5 ГИПОТЕЗА ЛИНЕЙНОГО СУММИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ	26
6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОГО ОБРАЗЦА	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	35
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	37

					150303.19.034.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		3

ВВЕДЕНИЕ

Важной частью расчетов на прочность является прогнозирование разрушения конструкций. Для обеспечения их прочности и предотвращения разрушения в условиях эксплуатации необходимо с большой достоверностью определять степень пластических деформаций и напряжений в материале, соответствующих разрушению.

Пластическая деформация при разрушении материала (ресурс пластичности) обычно определяется с использованием справочных данных о материале по формуле

$$p_f = \ln \frac{1}{1-\psi} \quad (1)$$

($\psi = \frac{S_0 - S_{\text{шейки}}}{S_0}$ – относительное поперечное сужение при разрыве

цилиндрического образца, где S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца, $S_{\text{шейки}}$ – площадь поперечного сечения шейки в момент разрушения), полагая, что в шейке образца вплоть до момента разрушения реализуется одноосное напряженно-деформированное состояние (НДС).

В действительности же после потери устойчивости пластического течения, с началом образования шейки (приблизительно на уровне предела прочности σ_B), напряженное состояние (НС) перестает быть одноосным [1]. На оси цилиндрического образца реализуется осесимметричное объемное НС со стеснением процесса пластического деформирования [2]. Как известно, напряженное состояние, отличающееся от одноосного, может привести к снижению ресурса пластичности [3,4], и, как следствие, увеличить опасность внезапного разрушения.

Так, образование макротрещины, ведущей к разрушению образца, начинается именно на оси симметрии образца. В работе Н. Н. Малинина [5] показан рентгеновский снимок шейки алюминиевого круглого образца

непосредственно перед разрушением (рисунок 1). При этом наблюдается макротрещина в центре сечения, которая не достигла краев контура сечения.

Таким образом, при оценке прочности конструкций по предельной деформации ресурс пластичности материала, определенный по формуле (1), может оказаться завышенным, что является ошибкой «не в запас» прочности.



Рисунок 1. Рентгеновский снимок шейки алюминиевого круглого образца непосредственно перед разрушением [6]

Одним из способов исследования напряженного состояния образцов является проведение численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ). МКЭ наиболее перспективный и популярный метод для исследования процесса деформирования образцов при испытании на растяжение, которому посвящены ряд работ других исследователей [7]. Полученные при расчете

результаты позволят оценить величину ошибки при определении ресурса пластичности, представленным выше, аналитическим способом.

В связи с вышесказанным целью выпускной квалификационной работы является **оценка ресурса пластичности материала по результатам испытания цилиндрического образца с учетом вида напряженного состояния в шейке** с использованием МКЭ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд основных задач:

– разработка конечноэлементной модели цилиндрического образца из стали 20;

– проведение МКЭ-расчета образца с учетом образования шейки и получение расчетных характеристик, отражающих вид напряженного состояния в шейке образца в процессе деформирования;

– анализ результатов и подбор параметров деформационного критерия. Оценка ошибки при определении предельной пластической деформации для цилиндрического образца с шейкой по формуле (1), посредством сравнения с результатами МКЭ-расчета;

– исследование НС в шейке при испытании на растяжение образцов других типов для расширения границ применимости подходов, используемых ранее.

					150303.19.034.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

1 ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ О МАТЕРИАЛЕ ДЛЯ МКЭ-РАСЧЕТА

Для исследования ресурса пластичности в качестве материала образца принята углеродистая конструкционная сталь марки 20. Сталь 20 является пластичным материалом и широко используется для изготовления ответственных конструкций, длительно работающих при температурах до 350°C. Из нее изготавливают крюки кранов, муфты, вкладыши подшипников и другие детали, работающие под давлением, а также шестерни, червяки, патрубки, штуцера, вилки, болты, фланцы, корпуса аппаратов и другие детали.

В качестве исходных данных для проведения МКЭ-расчета были взяты механические характеристики материала из справочника [8]. Механические характеристики стали приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Механические характеристики прочности и пластичности Стали 20

Наименование характеристики	Значение
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	290
Временное сопротивление σ_B , МПа	340
Временное сопротивление срезу τ_B , МПа	257
Модуль упругости E, МПа	$2 \cdot 10^5$
Относительное поперечное сужение ψ , %	62

Ввиду отсутствия экспериментальных данных для стали 20 при кручении, предел прочности при сдвиге примем $\tau_B = 0,6\bar{\sigma}_F$.

Модель материала, заложенная в расчет, была описана с построением кривой деформирования материала образца в параметрах «истинное напряжение ~ логарифмическая деформация», поскольку при определении величин, соответствующих предельному состоянию (достижению ресурса пластичности при данном напряженном состоянии), деформации считать

малыми уже нельзя [9]. Так, при величине обычной деформации меньше 20% различие между логарифмической пластической деформацией и инженерной незначительно. Поскольку шейка образуется при обычной деформации 10-15%, то до этого момента логарифмическую деформацию приближенно можно считать равной обычной.

В связи со сказанным выше диаграмма деформирования была аппроксимирована степенной зависимостью по Рамбергу – Осгуду,

$$\bar{\sigma} = K p^m, \quad (1.1)$$

где K – коэффициент прочности; $p = (1 - \varepsilon_p)$ – логарифмическая пластическая деформация; ε_p – инженерная пластическая деформация; m – показатель упрочнения диаграммы деформирования.

Величина K может быть найдена по формуле

$$K = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{0,2}}{0,002^m} + \frac{\sigma_B \exp m}{m^m} \right), \quad (1.2)$$

m – показатель упрочнения, равный

$$m = \frac{\ln \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}} \right) + 0,056}{3,44} \quad \text{при} \quad \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}} \leq 1,32; \quad (1.3)$$

$$m = \frac{\ln \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}} \right) + 0,216}{4,78} \quad \text{при} \quad \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}} > 1,32.$$

Исходя из соотношения

$$\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}} = \frac{340}{290} = 1,17 \leq 1,32$$

Найдем показатель упрочнения

$$m = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}}\right) + 0,056}{3,44} = 0,061,$$

а затем подсчитаем коэффициент прочности K по формуле (1.2)

$$K = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{0,2}}{0,002^m} + \frac{\sigma_B e^m}{m^m} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{290}{0,002^{0,061}} + \frac{340 \cdot e^{0,061}}{0,061^{0,061}} \right) = 430 \text{ МПа.}$$

В итоге уравнение диаграммы деформирования в указанных координатах принимает вид

$$\bar{\sigma} = 430 p^{0,061} \text{ МПа.} \quad (1.4)$$

Истинное сопротивление разрыву представляет собой напряжение, соответствующее ресурсу пластичности материала

$$p_F = \ln \frac{1}{1-\psi}$$

$$\bar{\sigma}_F = K p_F^m,$$

$$\bar{\sigma}_F = 430 \cdot \left(\ln \frac{1}{1-0,62} \right)^{0,061} = 429 \text{ МПа.}$$

Подставив в эту формулу величину относительного поперечного сужения $\psi = 62\%$, получим

$$p_F = \ln \frac{1}{1-0,62} \cdot 100\% = 96,8\%.$$

Для построение истинной диаграммы деформирования необходимо также определить предел пропорциональности – напряжение, при котором касательный модуль $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ становится в полтора раза меньше модуля упругости E (рисунок 1.1):

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{2}{3} E.$$

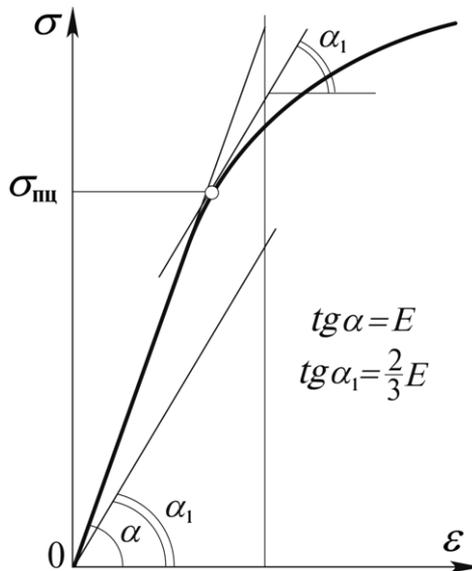


Рисунок 1.1. К определению предела пропорциональности

Дифференцирование уравнения (1.1) с учетом допущения $\bar{\sigma} = \sigma$, $e = \varepsilon$ и использованием последнего условия приводит к выражениям для расчета предела пропорциональности:

$$\sigma_{\text{пц}} = K \left(\frac{2E}{3mK} \right)^{\frac{m}{m-1}};$$

$$\sigma_{\text{пц}} = K \left(\frac{2E}{3mK} \right)^{\frac{m}{m-1}} = 430 \left(\frac{2 \cdot 2,01 \cdot 10^5}{3 \cdot 0,061 \cdot 430} \right) = 247 \text{ МПа.}$$

Аппроксимация диаграммы деформирования осуществлялась зависимостью с мультилинейным кинематическим упрочнением (рисунок 1.2) по одиннадцати точкам (таблица 1.2).

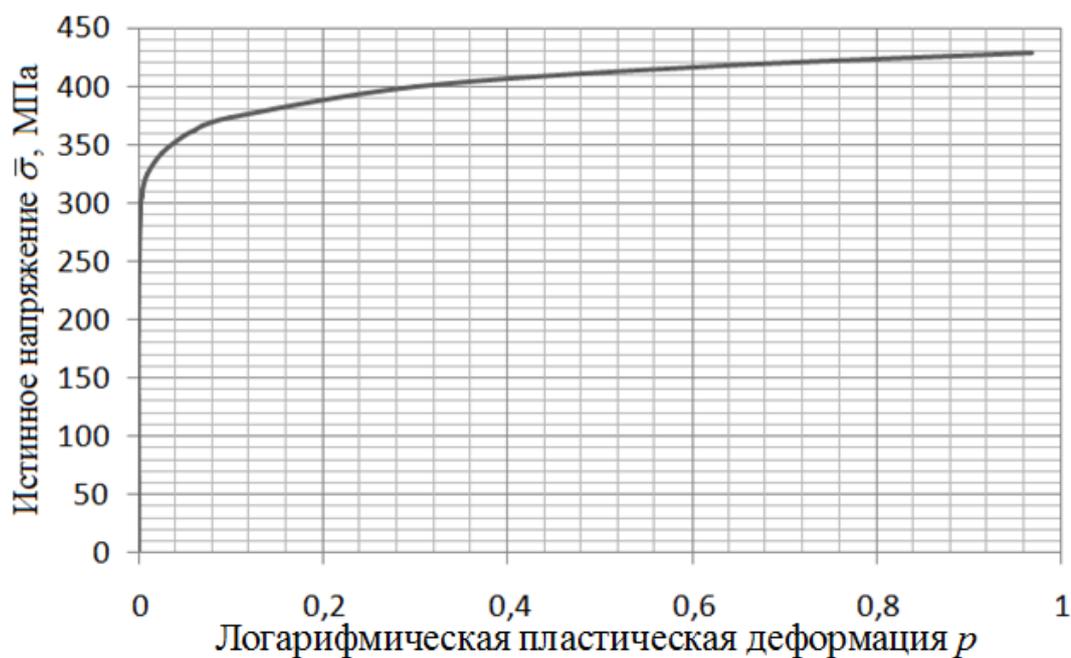


Рисунок 1.2. Диаграмма деформирования стали 20

Таблица 1.2. Координаты опорных точек на диаграмме деформирования стали 20

$\bar{\sigma}$, МПа	P
0	0
247	0,00011
294	0,002
311	0,005
325	0,01
343	0,025
363	0,061
374	0,1
400	0,3
417	0,3
429	0,968

2 ПОСТРОЕНИЕ МКЭ-МОДЕЛИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА

Исследование влияния вида НС на ресурс пластичности материала проведено на основании справочных данных об испытании цилиндрических образцов на растяжение до разрушения. В ходе испытаний на растяжение снимаются прочностные и деформационные характеристики материала (E , μ , $\sigma_{0,2}$, σ_B , δ , ψ). На рисунке 2.1 и в таблице 2.1 представлены геометрические характеристики образца согласно ГОСТ 1497-84 [10].

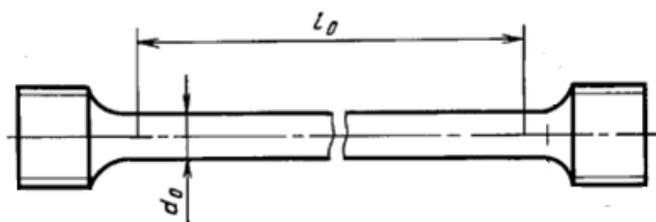


Рисунок 2.1. Цилиндрический образец для испытания на растяжение

Таблица 2.1. Геометрические характеристики образца

Наименование	Значение
Начальный диаметр d_0 , мм	10
Начальная расчетная длина l_0 , мм	80

В рамках выпускной квалификационной работы задача численного анализа деформирования цилиндрического образца решалась в упругопластической постановке методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS Workbench.

Для численного моделирования процесса деформирования образца создана упрощенная модель образца в осесимметричной постановке (рисунок 2.2), позволяющая провести расчет при ограниченных доступных вычислительных ресурсах.

Сетка конечных элементов для используемой модели построена с разным размером элементов по длине образца. Необходимость подобного подхода связана с повышенным требованием к точности расчета в зоне образования шейки. Для построения сетки модель образца поделена на две части с разными размерами элементов.

На линии 1, показанной на рисунке 2.2 размер конечного элемента (КЭ) равен 0,2 мм, на поверхности 2 указан размер конечного элементов (face sizing) 0,1 мм, на поверхности 3 задана регулярная сетка (face mashing) из четырехугольных элементов и размер КЭ – 0,2 мм.

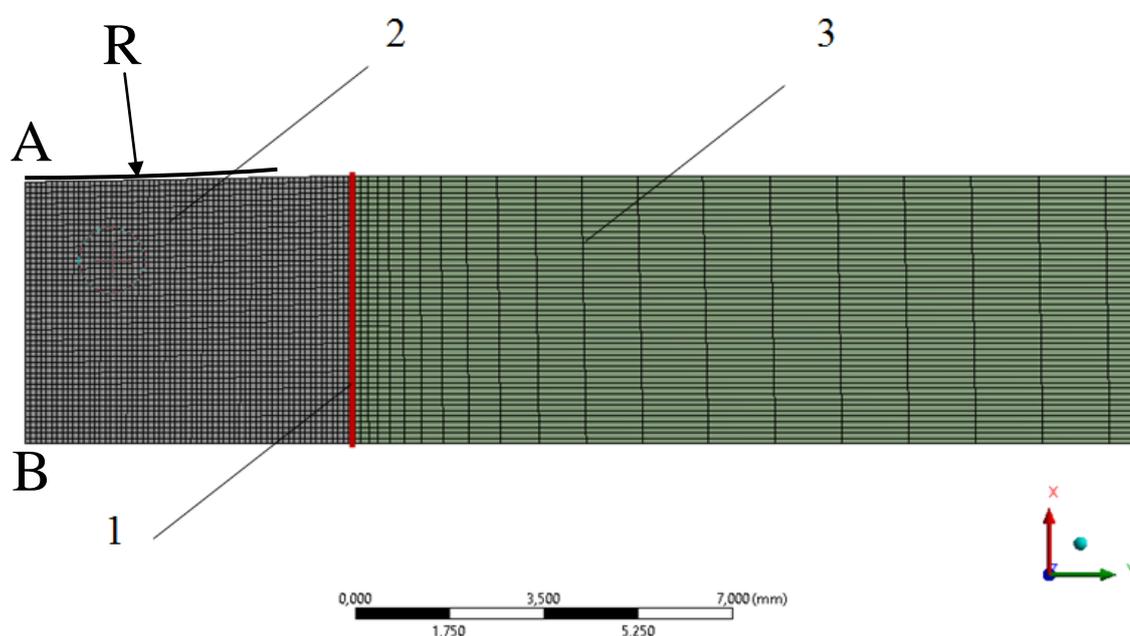


Рисунок 2.2. Модель с построенной сеткой

Сетка конечных элементов была выбрана на основании результатов исследования влияния размера элемента в зоне локализации пластических деформаций на величину максимальных эквивалентных напряжений в образце (рисунок 2.3).

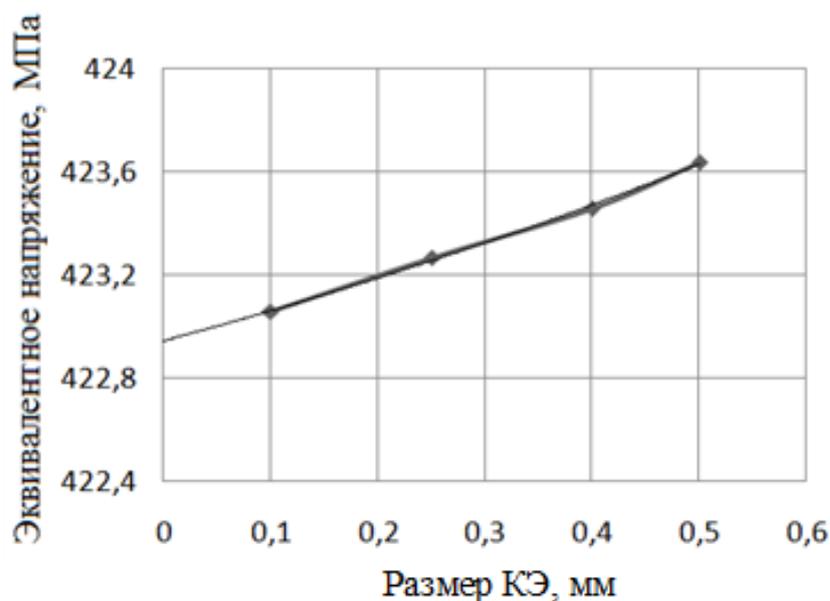


Рисунок 2.3. Проверка сходимости эквивалентных напряжений с уменьшением размера конечного элемента

Для расчета размер элемента принят равным 0,1 мм, в связи с оптимальным отношением точности полученных результатов и времени необходимого для решения задачи в пакете ANSYS Workbench.

При этом на области модели в зоне образования шейки (6 мм от оси симметрии) реализовано сужение с большим радиусом кривизны ($R=176,7$ мм). Использование подобной модели необходимо для локализации начала разрушения в сечении на пересечении осей симметрии. В связи с сужением модели в опасном сечении произошло уменьшение радиуса на 2 % от начального.

Граничные условия в постановке осевой симметрии: на линии 2 и 3 запрещено перемещение по оси X (симметрия относительно оси Y), по линии 1 запрещено перемещение по оси Y (симметрия относительно оси X). Нагружение было задано кинематически перемещением на захвате (линия 4) вдоль оси Y равным 10 мм (рисунок 2.4). Так как при построении модели используется симметрия образца, реальное прикладываемое перемещение при испытании на растяжение составит 20 мм.

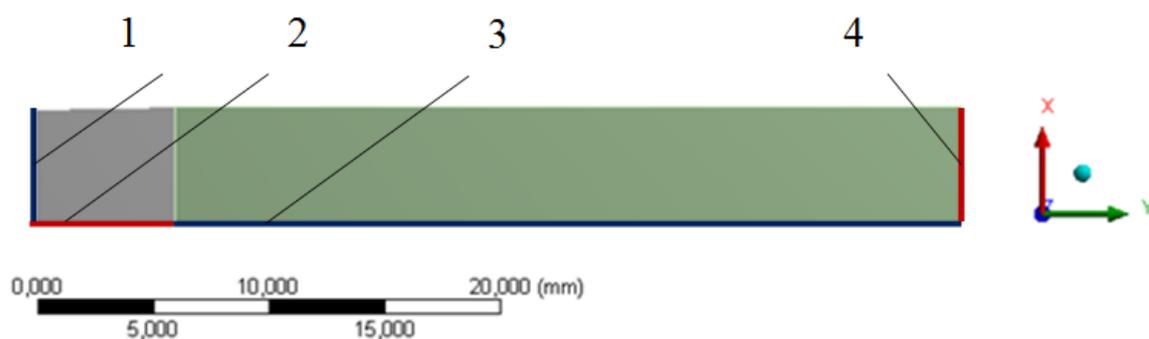


Рисунок 2.4. Граничные условия

Целью проведенных расчетов было получение величин интенсивностей пластических деформаций, эквивалентных напряжений, средних напряжений, которые меняются в ходе пластического деформирования образца. По деформационному критерию проведено исследование ресурса пластичности материала в наиболее опасном сечении AB (см. рисунок 2.2). Далее введем безразмерный параметр в виде

$$\xi = \frac{r}{R_0},$$

где r – текущий радиус поперечного сечения образца, R_0 – начальный радиус поперечного сечения образца. Параметр ξ будем называть относительным радиусом опасного сечения AB .

3 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ. РАСЧЕТ ПО ДЕФОРМАЦИОННОМУ КРИТЕРИЮ

Для оценки ресурса пластичности в зависимости от вида НС в опасном сечении образца проведена обработка результатов по деформационному критерию В.Л.Колмогорова, представляющего собой условие вязкого разрушения при статическом однократном нагружении в условиях сложного напряженного состояния [11]. Критерий имеет вид [12]

$$P_{II} = P_{IF} = P_F \cdot a \cdot \exp(b\beta).$$

$$\text{Тогда } P_F = \frac{P_{II}}{a \cdot \exp(b\beta)},$$

правую часть данного равенства будем называть «критериальной» пластической деформацией.

Здесь P_{II} - интенсивность пластической деформации, P_F – предельная пластическая деформация, β - жесткость напряжённого состояния, a и b – коэффициенты, зависящие от механических свойств материала.

Жесткость напряжённого состояния представляет собой отношение

$$\beta = \frac{\sigma_o}{\sigma_{II}}.$$

где $\sigma_o = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ – среднее напряжение;

$$\sigma_{II} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} - \text{интенсивность напряжений.}$$

Коэффициенты a и b в первом приближении были рассчитаны по справочным данным (см. таблица 1.1) в виде

$$a = \left(\frac{\tau_B \sqrt{3}}{\sigma_F} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad b = -3 \ln(a).$$

Коэффициенты деформационного критерия a и b оказались равны 1,879 и -1,892, соответственно.

Момент разрушения был определен, посредством сравнения «критериальной» пластической деформации P_F с ресурсом пластичности материала p_f . Ресурс пластичности был вычислен по формуле (1) через экспериментально определяемую величину показателя относительного поперечного сужения ψ (см. таблица 1.1).

$$p_f = \ln \frac{1}{1-\psi} = \ln \frac{1}{1-0,62} = 0,968.$$

Таким образом, выдвинуто предположение, что разрушение образца из Стали 20 произойдет при значениях «критериальных» деформаций близких к 96,8% (рисунок 3.1).

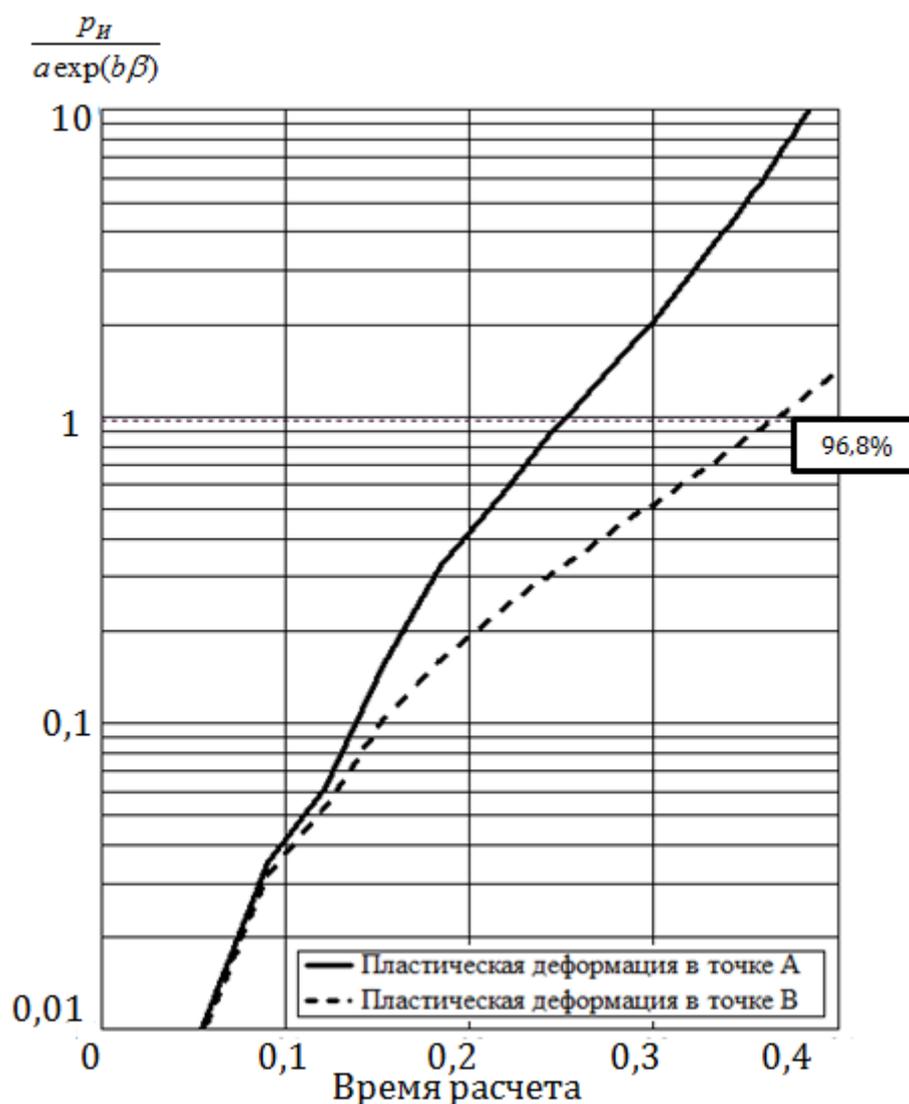


Рисунок 3.1. График изменения «критериальной» пластической деформации в точках A и B в процессе деформирования

Из графика зависимости «критериальной» пластической деформации от времени расчета (рисунок 3.1) следует, что в точке *A*, которая расположена на пересечении осей симметрии образца (см. рисунок 2.4), «критериальная» пластическая деформация достигает значения 96,8% значительно раньше, чем в точке *B*. Из этого можно сделать вывод, что точка *A* является наиболее опасной в цилиндрическом образце.

Данный вывод подтверждается рисунком 3.2, из которого следует, что в точке *A* происходит локализация пластических деформаций.

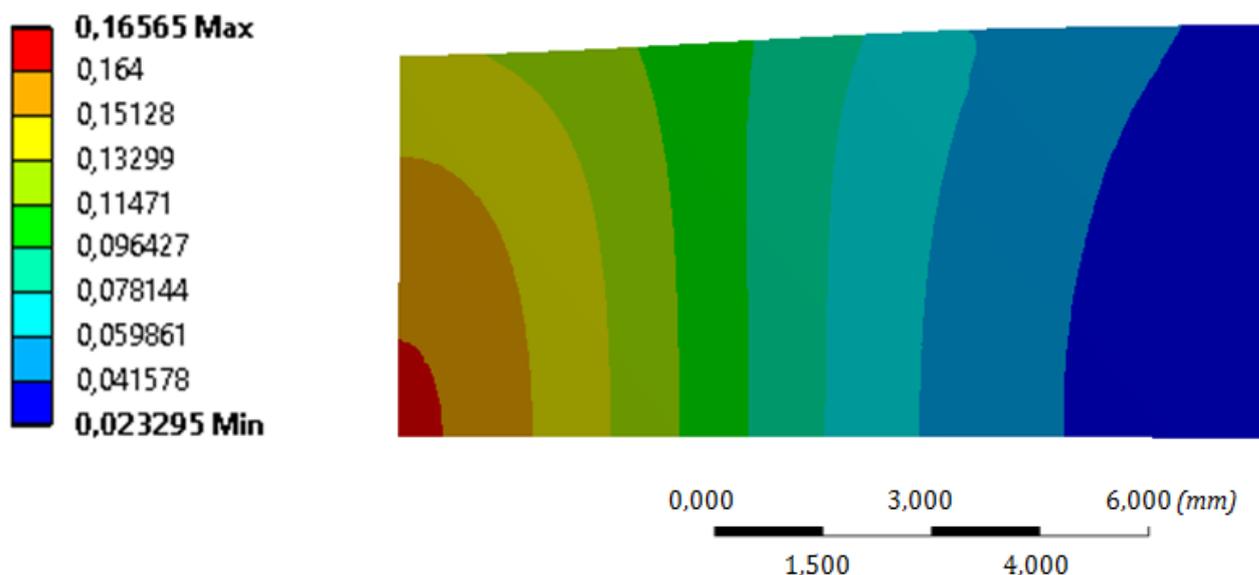


Рисунок 3.2. Эпюра пластических деформаций в момент локализации

Исходя из полученного результата, момент разрушения на пересечении осей симметрии образца соответствует времени расчета 0,2536 с. Величина прикладываемого перемещения пропорционально времени расчета (0 с – 0 мм, 1 с - 20 мм). Тогда будем считать, что разрушение образца начнется при растяжении образца на 5,072 мм. При этом изменение радиуса образца составит 0,97 мм.

Приведем для данного момента времени изменение «критериальной» пластической деформации по относительному радиусу сечения *AB* (рисунок 3.3).

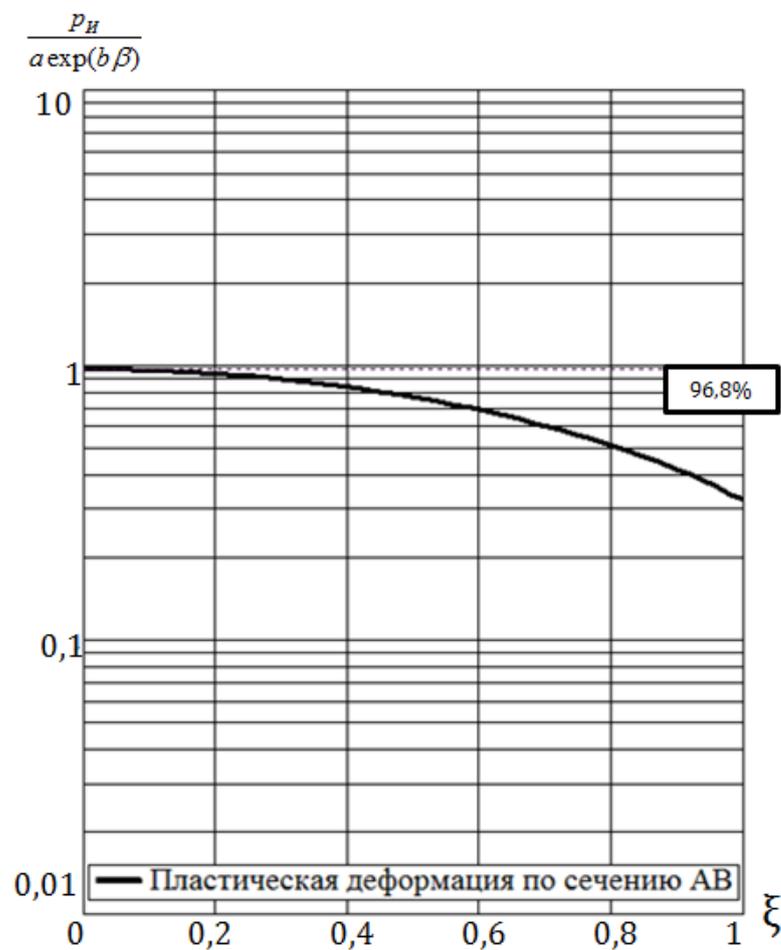


Рисунок 3.3. График изменения «критериальной» пластической деформации по относительному радиусу сечения AB

Согласно графику (рисунок 3.3) различие между «критериальными» пластическими деформациями в точках A и B составляет 66%.

Стоит заметить, что Я. Немецом были выполнены расчеты, учитывающие реальную геометрию шейки, для образцов из малоуглеродистых и низколегированных сталей, которые свидетельствуют, что для весьма пластичных материалов пластическая деформация в момент разрушения оказывалась завышенной в среднем на 30...40 %.

Таким образом, полученное отличие оказалось больше ожидаемого. Причины такого результата будут рассмотрены в последующих главах работы.

4 ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО КРИТЕРИЯ

В дальнейшем была проведена проверка адекватности использованного деформационного критерия. Она заключается в сравнение экспериментального перемещения точки на поверхности образца при разрушении и перемещения, названное критическим на основании результатов расчета с использованием деформационного критерия.

Так, растяжение образца характеризуется сужением поперечного сечения образца (уменьшением диаметра опасного сечения), т.е. образованием шейки. Значение изменения диаметра (в нашем случае радиуса) в программе ANSYS Workbench отслеживалось, как перемещение узла на поверхности образца. Зная диаметр шейки из экспериментальных данных, можно сопоставить значения предельных пластических деформаций в эксперименте и в расчёте. Если эти значения равны, то, значит, что используемый деформационный критерий не требует корректировки.

Рассчитаем радиус шейки через экспериментально определенное относительное поперечное сужение образца ψ при растяжении (см. таблица 1.1):

$$\psi = \frac{S_0 - S_{\text{шейки}}}{S_0}$$

$$\psi = \frac{\pi r_0^2 - \pi r_{sh}^2}{\pi r_0^2}$$

$$\pi r_{sh}^2 = \pi r_0^2 (1 - \psi)$$

$$r_{sh} = \sqrt{\frac{\pi r_0^2 (1 - \psi)}{\pi}} = \sqrt{(5 \cdot 10^{-3})^2 (1 - 0,62)} = 3,082 \text{ мм}$$

Таким образом, момент разрушения образца наступит при радиусе шейки 3,082 мм.

Из расчетов, проведенных в разделе 3, следует что «критериальная» пластическая деформация достигает ресурса пластичности 96,8% при изменении радиуса на 0,97 мм. Из несоответствие экспериментального и расчетного значения можно сделать вывод о некорректности полученных результатов по деформационному критерию.

Ниже на рисунках 4.1 – 4.4 представлены распределения жесткости напряженного состояния, интенсивности пластических деформаций, средних напряжений и эквивалентных напряжений по Мизесу в момент разрушения.

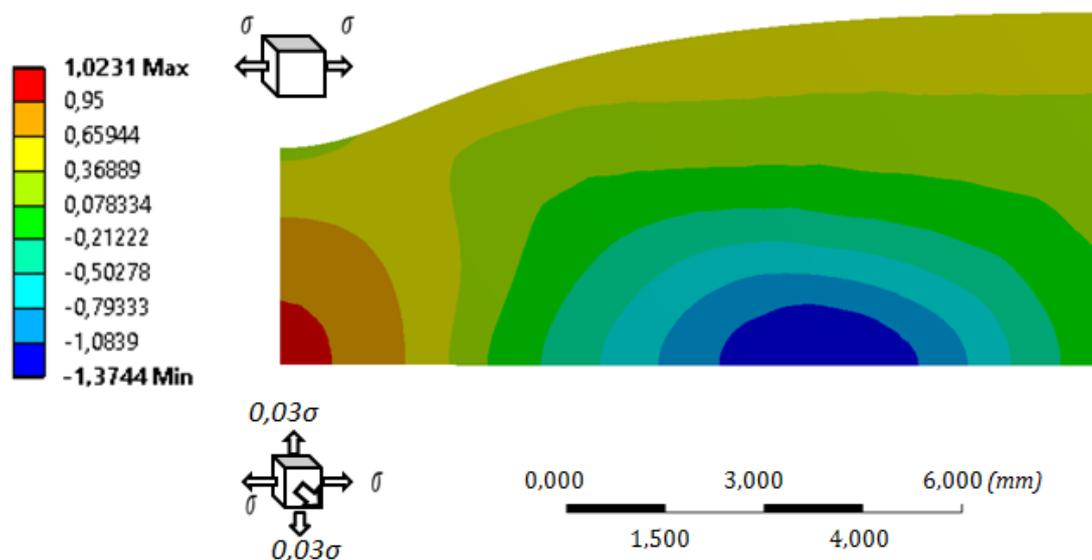


Рисунок 4.1. Распределение жесткости НС β в момент разрушения

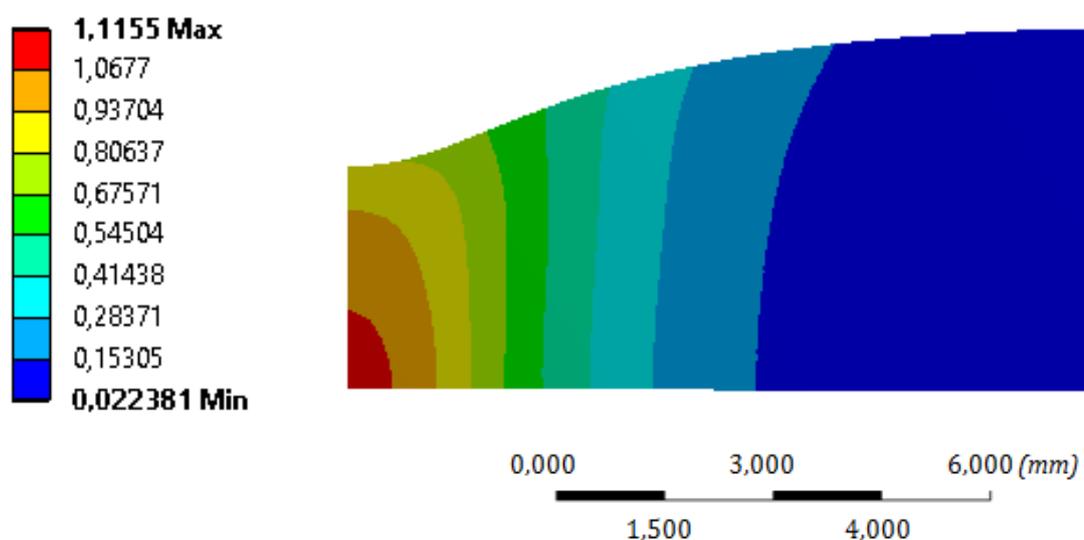


Рисунок 4.2. Распределение пластических деформаций в момент разрушения

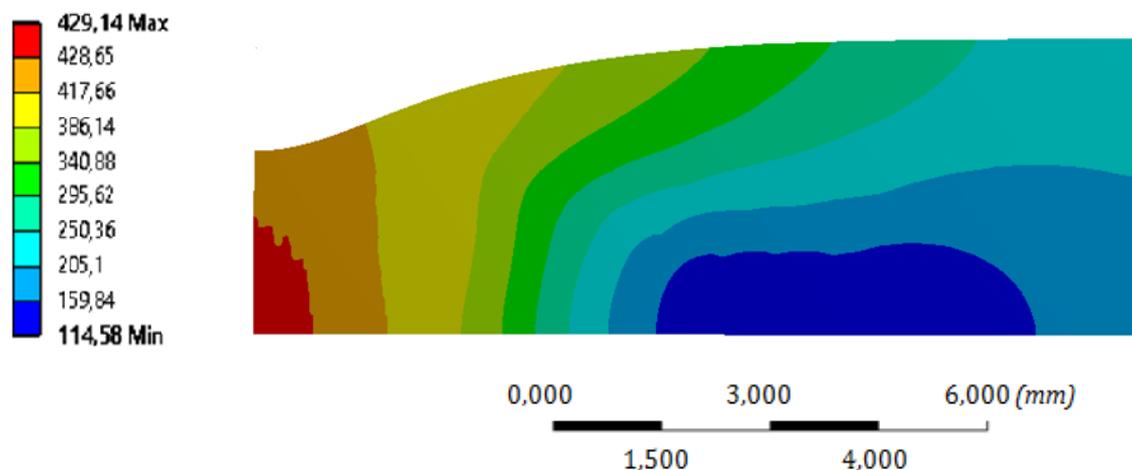


Рисунок 4.3. Распределение эквивалентных напряжений $\sigma_{И}$ в момент разрушения

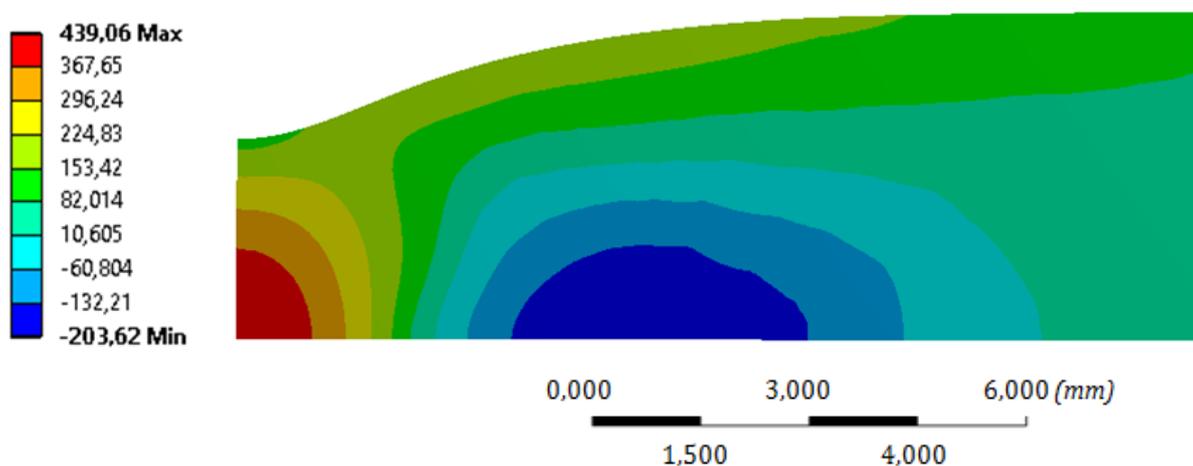


Рисунок 4.4. Распределение средних напряжений σ_0 в момент разрушения

Также на рисунках 4.1 приведены компоненты НС в точках A – на пересечении осей симметрии образца и B – на поверхности шейки. Так как в точке B второе и третье главные напряжения намного меньше главного и составляет $0,002\sigma$ и $0,006\sigma$ соответственно (σ – первое главное напряжение), то было решено считать напряженное состояние в точке на поверхности образца одноосным растягивающим.

На рисунке 4.5 приведены изменение значений жесткости НС по относительному радиусу ξ .

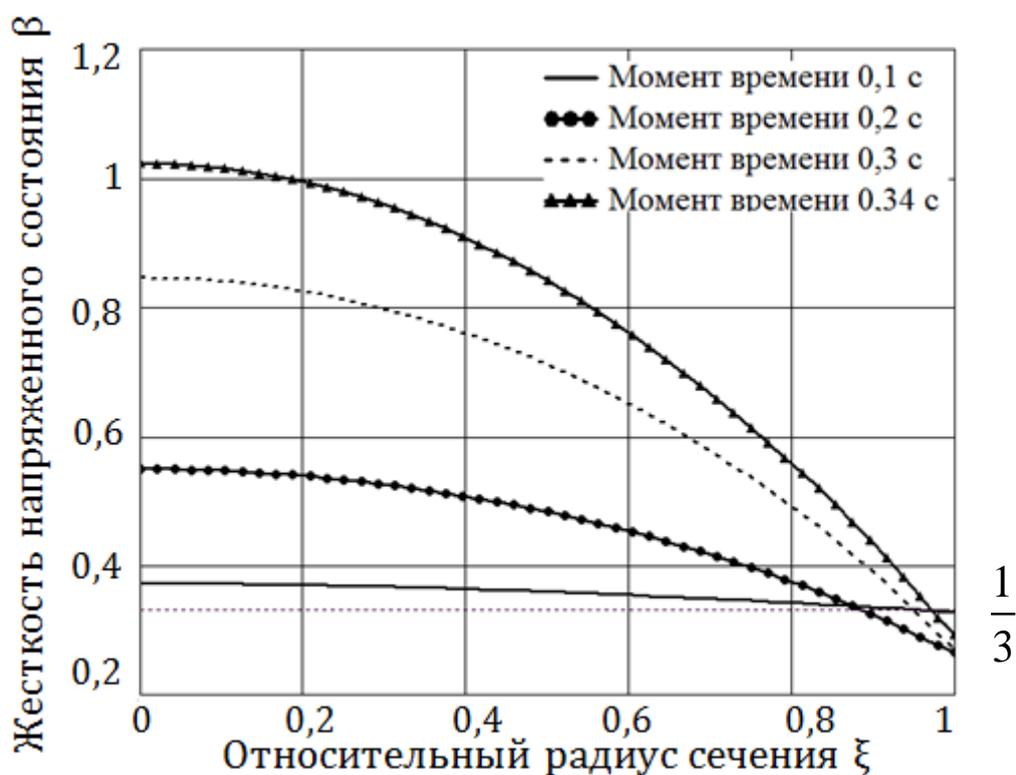


Рисунок 4.5. Изменение жесткости НС по относительному радиусу сечения AB

Из рисунка 4.5 следует, что наиболее жесткое НС во все моменты времени реализуется на пересечении осей симметрии цилиндрического образца. При этом β в точке на поверхности образца всегда остается близкой к значению $1/3$, соответствующему жесткости при одноосном напряженном состоянии.

В момент времени расчета, когда изменение радиуса в сечении AB достигает экспериментально определенного значения при разрушении (3,082 мм), была вычислена «критериальная» пластическая деформация (рисунок 4.6).

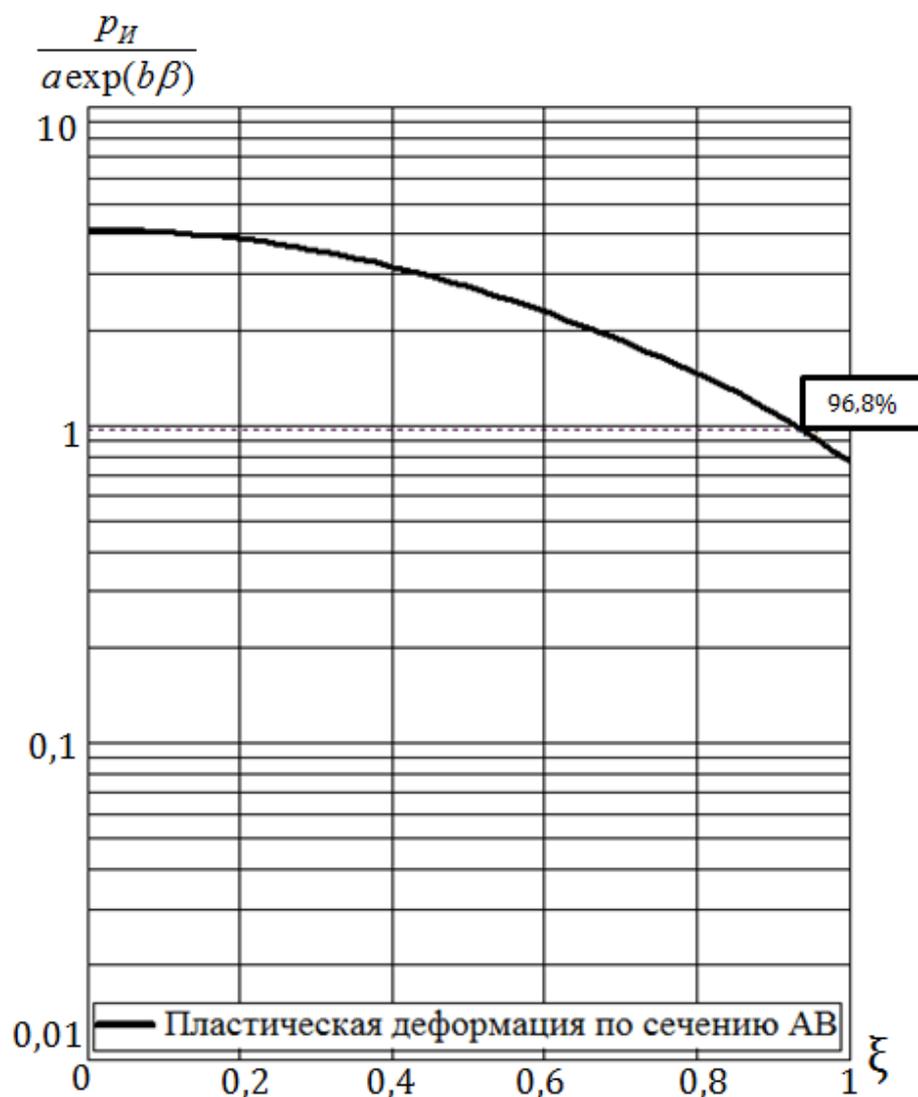


Рисунок 4.6. Изменение «критериальной» пластической деформации в момент разрушения по относительному радиусу сечения AB

Из графика (рисунок 4.6) видно, что в наиболее жесткой точке A значение «критериальной» пластической деформации намного выше ресурса пластичности материала. Возможной причиной является то, что параметры a и b , полученные в первом приближении по справочным данным для используемого материала, требуют корректировки.

В работах [13,14] было отмечено, что причиной такой ошибки может являться неучтенное влияние на повышение пластичности скорости изменения показателя вида напряженного состояния (истории деформирования).

В деформационном критерии, используемом в расчетах «критериальной» пластической деформации, принимается текущая величина жесткости напряженного состояния β без учета истории деформирования. Однако вблизи пересечения осей симметрии (точка A) начальная величина жесткости отличается от конечной существенно (рисунок 4.7) и это явление не может быть оставлено без внимания.

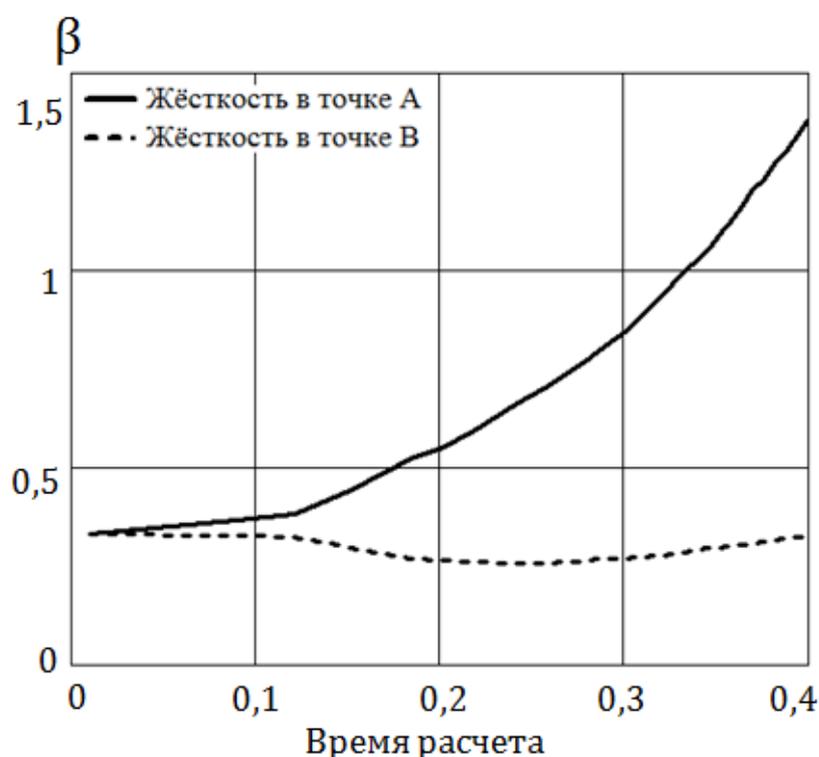


Рисунок 4.7. Изменение жесткости НС в точках A и B в процессе деформирования

Жесткость НС на поверхности образца (в точке B) меняется незначительно, в связи с тем, что напряженное состояние в процессе деформирования остается близким к одноосному (см. рисунок 4.1).

Исходя из вышесказанного следует, что учет вида напряженного состояния в процессе деформирования может существенно влиять на результат на пересечении осей симметрии цилиндрического образца [15]. Для корректировки параметров критерия было предложено провести осреднение жесткости, посредством гипотезы линейного суммирования повреждений.

5 ГИПОТЕЗА ЛИНЕЙНОГО СУММИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Для проверки предположения о влиянии изменения жесткости НС на ресурс пластичности материала в процессе деформирования была использована гипотеза линейного суммирования повреждений [4].

Для учета истории деформирования образца был введен параметр ω , называемый повреждением.

$$d\omega = \frac{dP_{II}}{P_{If}(\beta)}, \quad (5.1)$$

где P_{II} - текущая интенсивность пластической деформации,

P_{If} - интенсивность пластической деформации в момент разрушения образца.

P_{If} является функцией от жесткости напряженного состояния, при этом β меняется по времени расчета (рисунок 4.5).

Критическая интенсивность пластической деформации с учетом деформационного критерия примет вид:

$$P_{If} = p_f a \cdot \exp(b\beta).$$

Здесь $p_f = \ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right)$ - пластическая деформация при разрушении; a, b

- коэффициенты, зависящие от свойств материала.

Коэффициенты деформационного критерия, учитывающие изменение жесткости НС, найдем из соображения, что разрушение произойдет при достижении интенсивности пластических деформаций критического значения $P_{If}(\beta)$, то есть при $\omega = 1$. Тогда запишем выражение (5.1) следующим образом:

$$J = \int_0^{t_f} \frac{\dot{p} dt}{p_f a \cdot \exp(b\beta)} = 1, \quad (5.2)$$

где t_f - момент времени расчета, когда P_{II} достигнет значения p_f , \dot{p} - изменение интенсивности пластических деформаций. Данные величины получены с помощью расчета в пакете ANSYS Workbench.

В выражении (5.2) осреднение жесткости было проведено только для точки A , расположенной на пересечении осей симметрии цилиндрического образца. Подобный подход вызван тем, что, как было сказано выше, жесткость в процессе деформирования образца существенно меняется в точке A , а в точке B изменяется мало (см. рисунок 4.7).

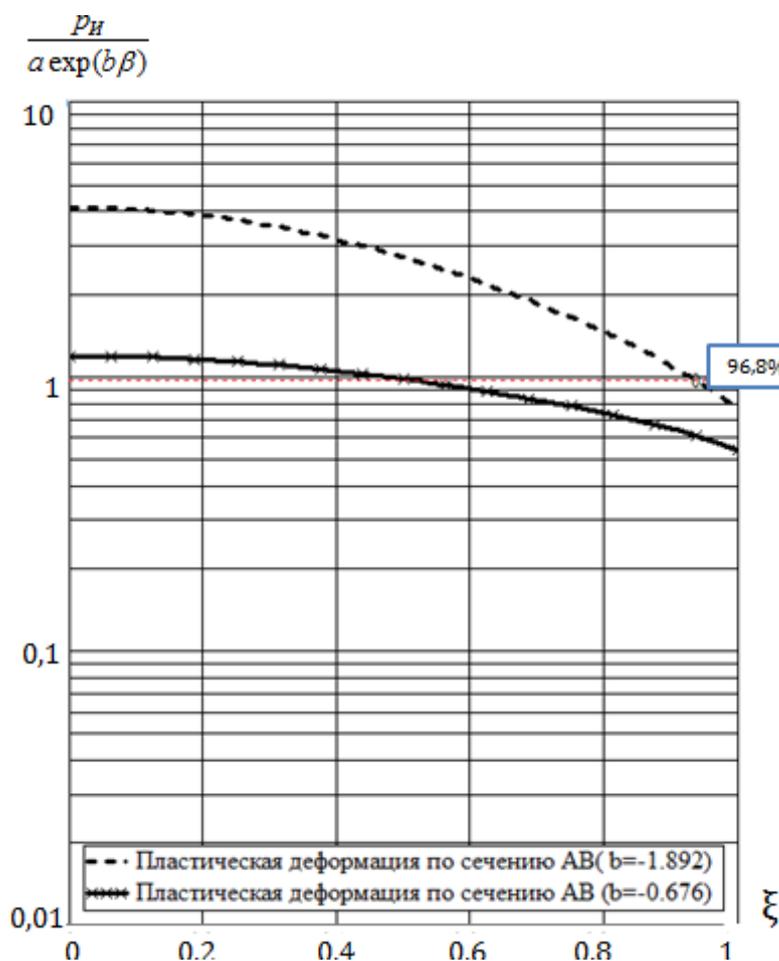


Рисунок 5.1. График изменения «критериальной» пластической деформации в момент разрушения при различных значениях b

Отличие в ресурсе пластичности по радиусу опасного сечения в момент разрушения при проведенном осреднении составляет 44%.

Соответственно определение ресурса пластичности по формуле $p_f = \ln \frac{1}{1-\psi}$ в предположении об одноосности НС дает ошибку, которая может достигать значительных величин. В то время как формула расчета пластичности дает лишь одно предельное значения, реальная предельная величина существенно зависит от жесткости НС.

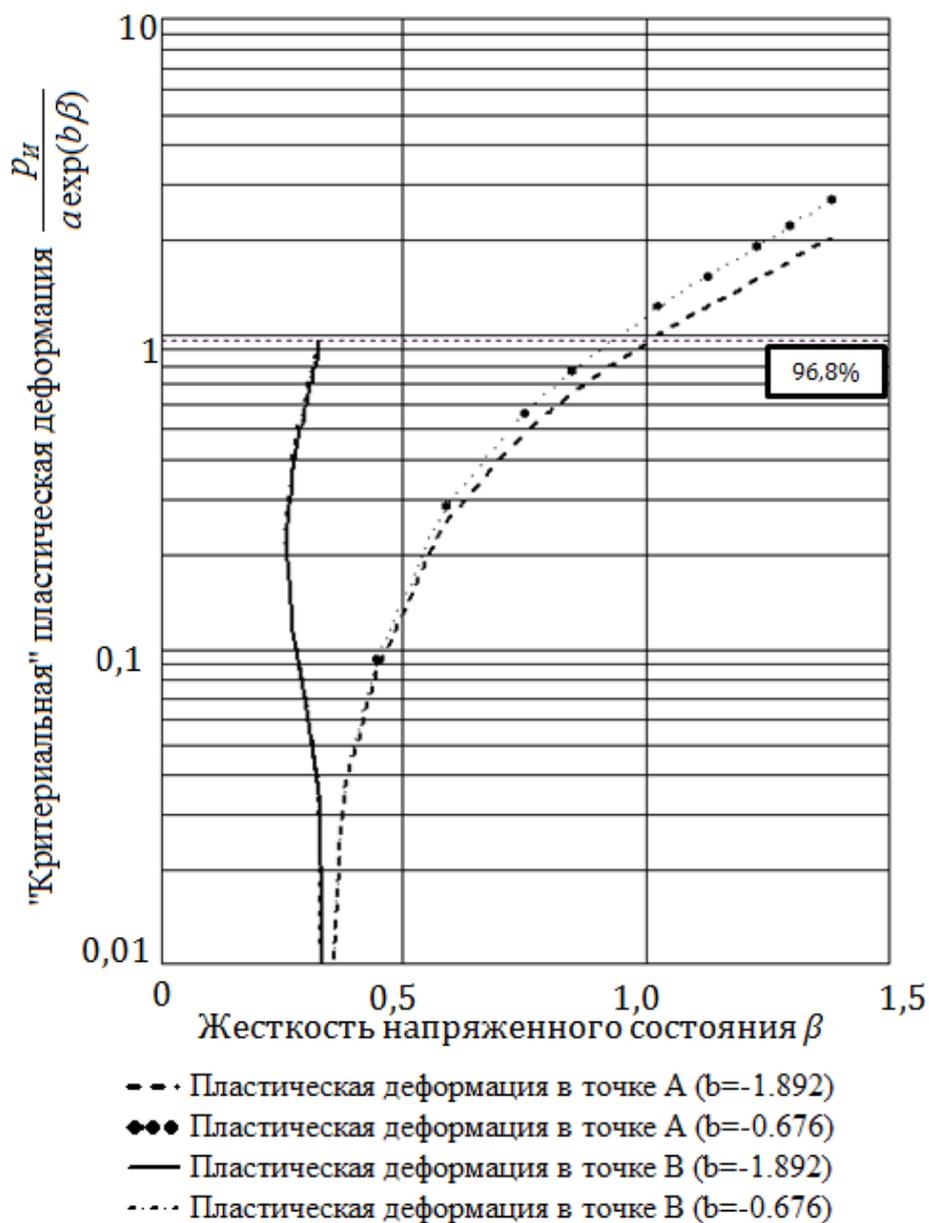


Рисунок 5.2. График зависимости «критериальной» пластической деформации от жесткости напряженного состояния β при различных значениях b

На рисунке 5.2 приведен график жесткости НС от «критериальной» пластической деформации для разных значений коэффициента деформационного критерия. По значениям, соответствующим пластическим деформациям в точке A , видно, что осреднение жесткости на оси симметрии существенно влияет на «критериальную» пластическую деформацию. Различие в момент разрушения составляет 71%. Таким образом, корректировка деформационного критерия является оправданной.

Другой подход подбора параметров a и b (без осреднения жесткости НС) заключается в приравнивании пластической деформации в опасной точке к ресурсу пластичности, определенному по справочным данным (рисунок 5.3).

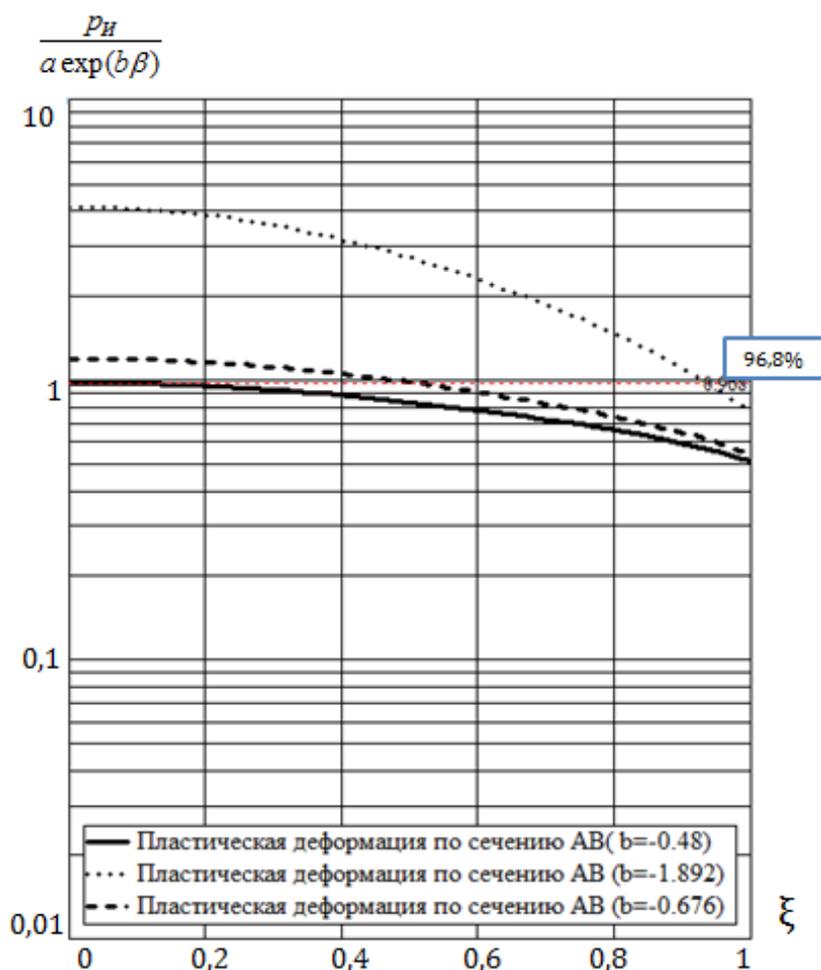


Рисунок 5.3. График изменения «критериальной» пластической деформации в момент разрушения по относительному радиусу сечения при различных значениях коэффициента b

Однако такой способ не связан с характеристиками процесса деформирования материала и при параметрах деформационного критерия, подобранных таким образом, может привести к существенной ошибке для других типов образцов (например, плоских [16]).

					150303.19.034.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

6 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОГО ОБРАЗЦА

В рамках исследования ресурса пластичности материала интересным является проведение расчетов процесса деформирования образцов, в которых реализуется напряженное состояние отличное от осесимметричного, реализующегося в цилиндрических образцах. Такими, например, являются плоские образцы. Они наиболее распространены в инженерной практике, так как просты в изготовлении и упоминаются в государственных стандартах об испытаниях образцов [10].

Для оценки ресурса пластичности по результатам испытаний плоского образца проведен МКЭ-расчет для модели, представленной на рисунке 6.1. Для расчетной модели было проведено упрощение геометрии образца из соображений симметрии.

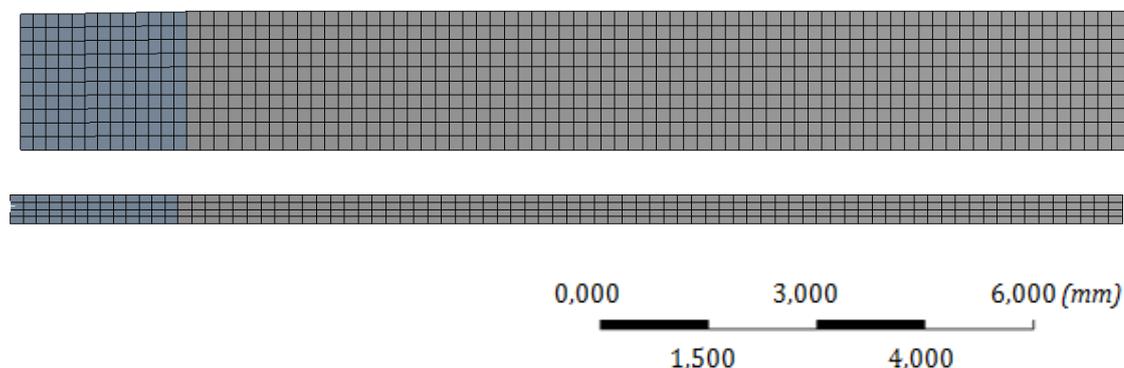


Рисунок 6.1. Сетка конечных элементов в плоском образце

По результатам расчета получено изменение «критериальной» пластической деформации по времени расчета (рисунок 6.2).

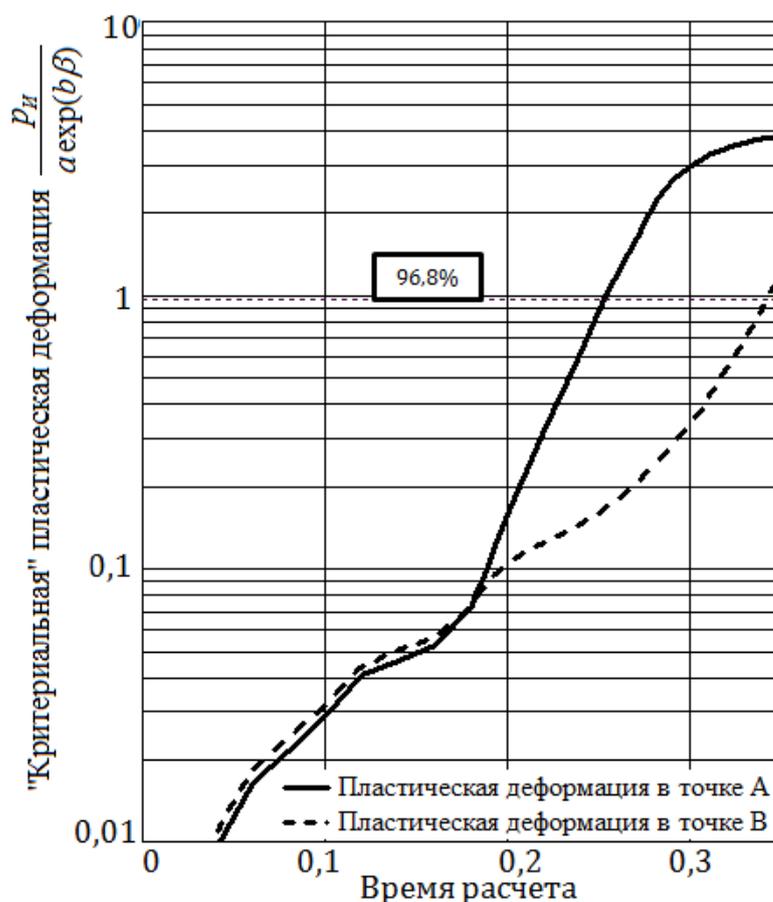


Рисунок 6.2. График изменения «критериальной» пластической деформации в точках *A* и *B* в процессе деформирования в плоском образце

Из рисунка 6.2 следует, что «критериальная» пластическая деформация в точке *A* накапливается быстрее. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что точкой начала разрушения является точка на пересечении осей симметрии образца. Далее были выведены результаты для момента времени 0,25 с, когда в образце достигается значение ресурса пластичности материала (рисунки 6.3,6.4).

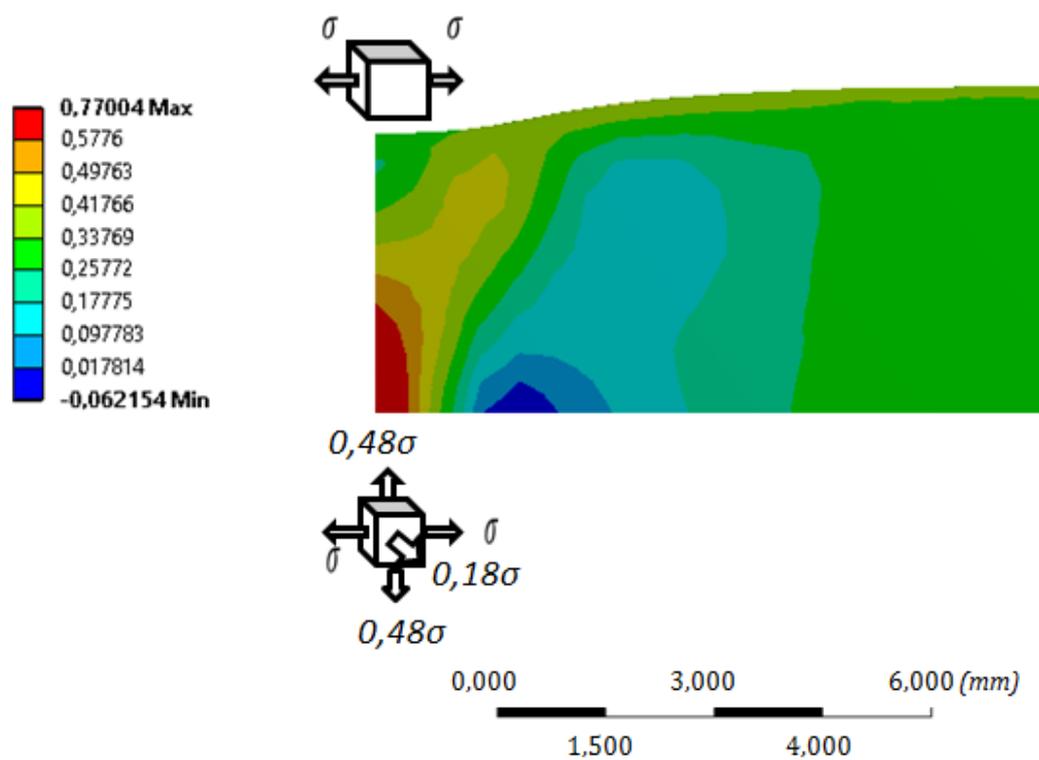


Рисунок 6.3. Распределение жесткости НС в плоском образце

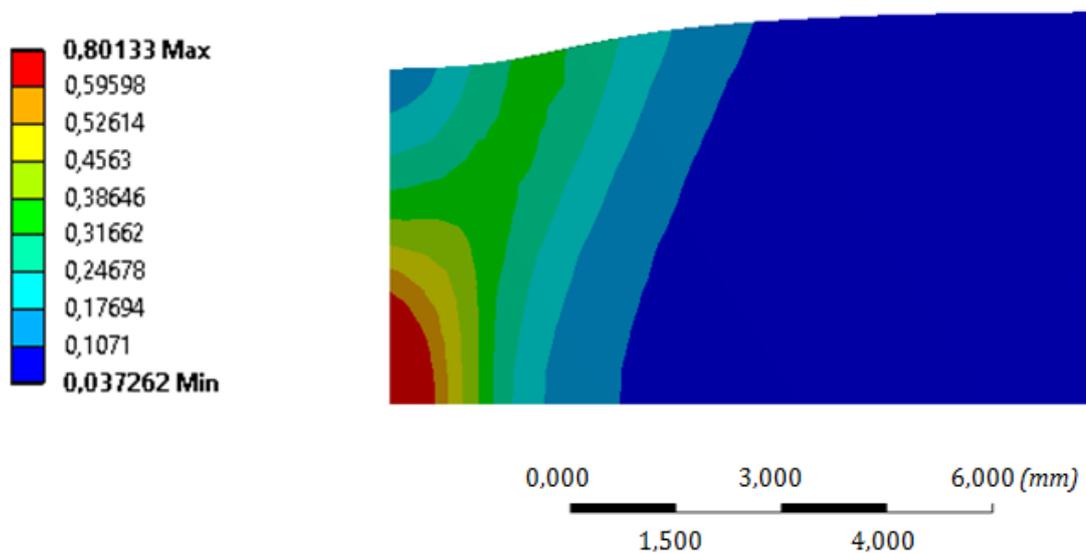


Рисунок 6.4. Распределение пластических деформаций в плоском образце

Как видно на рисунках 6.3 и 6.4, в момент достижения ресурса пластичности в точке *A* локализуются пластическая деформация и наибольшая по всему сечению жесткость напряженного состояния. На пересечении осей

симметрии в точке *A* напряженное состояние трехосное, на поверхности в точке *B* близкое к одноосному.

Стоит заметить, что для плоского образца пластическая деформация начинается позже (0,2 с по времени расчета), чем для цилиндрического, но при этом накапливается быстрее. На рисунке 6.2 видно, что в момент достижения ресурса пластичности величина жесткости напряженного состояния составляет 0,5, ниже, чем для цилиндрического образца 0,7.

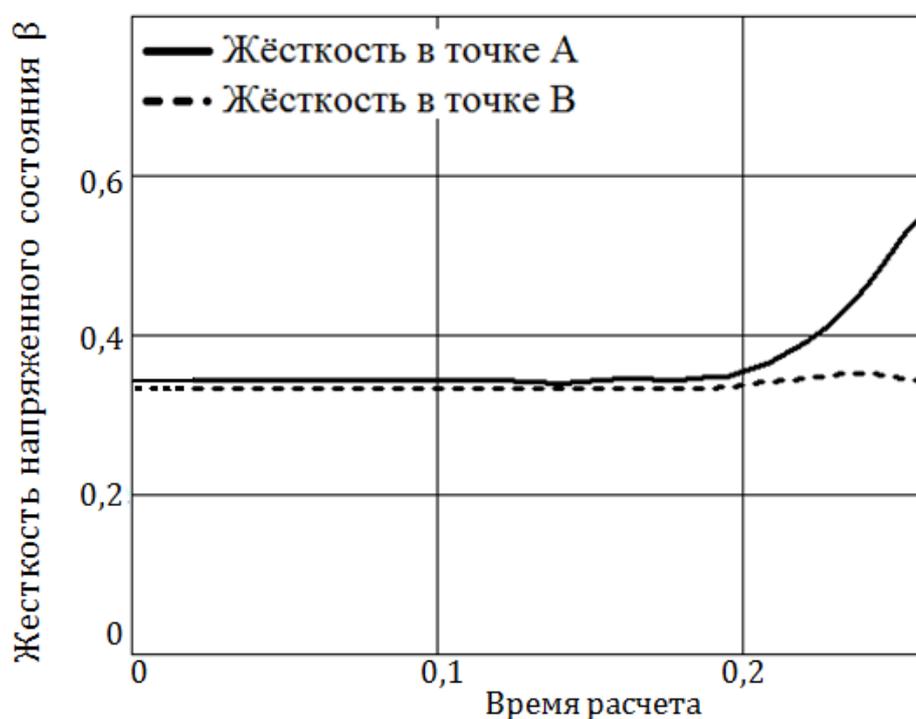


Рисунок 6.5. Изменение жесткости НС в точках *A* и *B* в процессе деформирования плоского образца

С целью оценки точности деформационного критерия с параметрами, подобранными для цилиндрических образцов, важной частью дальнейшей работы будет являться проведение испытаний на растяжение плоских образцов из стали 20.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе созданы КЭ модели цилиндрического и плоского образцов в программном комплексе ANSYS Workbench и проведен расчет процессов деформирования при одноосном растяжении. По справочным данным для стали 20 построена и передана в ANSYS Workbench кривая деформирования материала образца в параметрах «истинное напряжение ~ логарифмическая деформация», аппроксимированная степенной зависимостью по Рамбергу – Осгуду.

По результатам расчета цилиндрического образца ($l_0 = 10$ мм, $d_0 = 80$ мм) в плоской осесимметричной постановке дана оценка ресурса пластичности материала по деформационному критерию Колмогорова для стали 20 в зависимости от вида НС в опасном сечении образца. Так, отличие в «критериальной» пластической деформации по опасному сечению цилиндрического образца составило 71%.

Через экспериментальное значение относительного поперечного сужения при разрыве ψ определен момент разрушения. Моменту разрушения соответствует радиус шейки цилиндрического образца $r_{ш} = 3,082$ мм. Для момента разрушения получены распределения жесткости напряженного состояния β , пластических деформаций, эквивалентных $\sigma_{и}$ и средних σ_0 напряжений, определен вид НС на пересечении осей симметрии образца (трехосное НС) и на поверхности (одноосное НС).

Расчет показал, что наиболее жесткое НС реализуется на оси симметрии цилиндрического образца и в процессе деформирования жесткость нарастает. Сделан вывод о необходимости корректировки параметров деформационного критерия требуют, что позволит учитывать изменение жесткости напряженного состояния в процессе деформирования.

Аналогичные расчеты проведены для плоского образца и показали качественно схожие результаты, но с различием величин жесткости.

					150303.19.034.00 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

С учетом осреднения жесткости НС, посредством гипотезы линейного суммирования повреждений уточнены параметры критерия. Различие «критериальных» пластических деформаций в наиболее опасной точке сечения с учетом уточнения параметров критерия составило 55%, а без учета 71%. Подтверждено предположение о влиянии изменения жесткости НС по сечению на ресурс пластичности материала.

Результаты работы применимы для конструкций из стали 20. Созданная в работе методика может быть распространена и на другие стали, что позволит получить зависимости, характеризующие предельную пластическую деформацию. Важно заметить, что величина ошибки при оценке ресурса пластичности по формуле $p_f = \ln \frac{1}{1-\psi}$ существенно зависит от уровня пластичности материала. Чем ниже пластичность материала, тем меньше будет изменение геометрии образца при разрушении и, соответственно, отличие вида НС от одноосного.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Огородников, В.А. Пластичность металлов при объемном напряженном состоянии / В.А. Огородников, Л.И. Алиева, И.А. Деревенько // Вестник Национального технического университета Украины. Серия «Машиностроение» - 2012. - №64. – С.201-207
2. Смирнов–Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. – Л.: Машиностроение, 1977. – 462 с.
3. Сивак, Р.И. Пластичность металлов при сложном нагружении / Р.И. Сивак, И.О. Сивак // Вестник Национального технического университета Украины. Серия «Машиностроение» - 2010. - №60. – С.129-132
4. Wierzbicki, T. On the application of stress triaxiality formula for plane strain fracture testing / T. Wierzbicki, Y. Bai, X. Teng // Journal of Engineering Materials and Technology – 2009.– V. 131, №2.
5. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. – Изд. 2–е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
6. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. М., Изд. иностр. лит., 1954, 647 с.
7. Khandelwal, K. Experimental studies and models for ductile fracture in ASTM A992 steels at high triaxiality/ K. Khandelwal, R. Kiran // Journal of Structural Engineering – 2014. – V.140, №2.
8. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: справочник / Д.А. Гохфельд, Л.Б. Гецов, К.М. Кононов и др. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. – 409 с.

9. Васильев, В. А. Обзор возможностей современных САЕ-программ и приближенных методик аппроксимации диаграмм « σ - ϵ » для решения задач упруго пластического деформирования / В.А. Васильев, А.В. Самошин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль – 2017. – Т.3. — с. 108–114.

10. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.– М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2008,– 22 с.

11. Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчётов элементов конструкций на прочность. – М.:Машиностроение, 1981. – 282 с.

12. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург: Изд-во УрГТУ – УПИ, 2001. – 836 с.

13. Диаграммы пластичности и особенности их построения / В. А. Огородников, И. Ю. Кирица, В. И. Музычук // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Краматорськ, 2006. – С. 251–255.

14. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – Киев: Вища школа. Головное изд – во,1983. – 175 с.

15. Wierzbicki, T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space / Y. Bao, T. Wierzbicki // International Journal of Mechanical Sciences – 2004. – V. 46, №1. – P. 81–98.

16. Faleskog, J. Tension–torsion fracture experiments —Part I: Experiments and a procedure to evaluate the equivalent plastic strain / J. Faleskog, I. Barsoum // International Journal of Solids and Structures – 2013. – V. 50, №25–26. – P. 4241–4257.