

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

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, к.т.н.

_____ С.С. Верцюх

“ ____ ” _____ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н.,
профессор

_____ С.Б. Сапожников

“ ____ ” _____ 2018 г.

**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ
КОРПУСА МАГИСТРАЛЬНОЙ ЗАДВИЖКИ DN 1200 PN 8,0 МПА
С ВНУТРЕННИМИ ПОРАМИ ПРИ ОДНОКРАТНОМ
И ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ**

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)
ЮУрГУ – 150403.2018.016.00.ПЗ ВКР

Нормоконтролер, к.т.н., доцент

_____ Ю.Н. Ребяков

“ ____ ” _____ 2018 г.

Руководитель проекта, к.т.н., доцент

_____ В.Б. Порошин

“ ____ ” _____ 2018 г.

Автор проекта

студент группы П-235

_____ А.В. Шлишевский

“ ____ ” _____ 2018 г.

АННОТАЦИЯ

Шлишевский А.В. Оценка прочности и долговечности корпуса магистральной задвижки DN 1200 PN 8,0 МПа с внутренними порами при однократном и повторно-переменном нагружении. – Челябинск: ЮУрГУ, Аэрокосмический факультет; 2018, 120 с., 61 ил., 6 табл., библиогр список – 85 наим.

В выпускной квалификационной работе магистра на тему «Оценка прочности и долговечности корпуса магистральной задвижки DN 1200 PN 8,0 МПа с внутренними порами при однократном и повторно-переменном нагружении» изложены результаты исследования влияния внутренних дефектов – несплошностей типа пор на прочность и долговечность литого корпуса задвижки магистрального трубопровода.

Предложена методика оценки влияния названных дефектов на работоспособность литого корпуса задвижки магистрального трубопровода путем расчета фактического коэффициента запаса по деформации и напряжению и методика моделирования сплошной изотропной среды эквивалентной по своим деформационным и прочностным свойствам материалу с дефектами.

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы получены следующие результаты.

1. Выполнен анализ предельных состояний конструкций с дефектами.
2. Проведен численный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) нагруженной конструкции без учета внутренних дефектов.
3. Подобрана оптимальная сетка конечно-элементной модели корпуса задвижки для расчета НДС при наличии группового концентратора в виде тетраэдра со сферическими пустотами в его вершинах.
4. Методом выделения подконструкции выполнена оценка НДС в области внутреннего группового дефекта.

				150403.2018.016.00. ПЗ ВКР		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
Разраб.		Шлишевский А.В.			Оценка прочности и долговечности корпуса магистральной задвижки DN 1200 PN 8,0 МПа при однократном и повторно-переменном нагружении	Лит.
Проверил		Порошин В.Б.				Лист
Н.Контр		Ребяков Ю.Н.				Листов
Уте.		Сапожников С.Б.				Д
						2
						120
					ЮУрГУ Кафедра ТМ	

5. При однократном нагружении определены деформационные и прочностные характеристики модельной среды, эквивалентной по своим свойствам материалу с дефектами.
6. Определены также деформационные и прочностные характеристики модельной среды, эквивалентной по своим свойствам материалу с дефектами, при циклическом нагружении.
7. Произведен анализ результатов численного моделирования конструкции с дефектами и определена область корректного применения предложенной модели.
8. Основные элементы разработанной методики и результаты ее применения опубликованы в виде двух статей и докладов на конференциях международного уровня.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						3
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ	4
1 АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ КОНСТРУКЦИИ С ДЕФЕКТАМИ	6
1.1 Запорная арматура: конструкции, условия эксплуатации, основные виды пределных состояний.....	6
1.2 Подходы к моделированию пластичных материалов с различного рода дефектами	21
2 ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БЕЗДЕФЕКТНОЙ КОНСТРУКЦИИ.....	38
2.1 Численный анализ напряженно-деформированного состояния нагруженной конструкции без учета внутреннего дефекта	38
2.2 Подбор оптимальной сетки для расчета НДС конструкции с групповым гладким концентратором.....	46
3 ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДКОНСТРУКЦИИ С ДЕФЕКТАМИ.....	56
4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕДЫ С РЕГУЛЯРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПОРАМИ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ОДНОРОДНОЙ СПЛОШНОЙ ИЗОТРОПНОЙ СРЕДОЙ	72
4.1 Идентификация модели среды с регулярно распределенными порами при однократном нагружении	72
4.2 Идентификация модели среды с регулярно распределенными порами при циклическом нагружении	87
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	108
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	113

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		4

ВВЕДЕНИЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задвижки магистральных нефте- и продуктопроводов при приемо-сдаточных испытаниях испытывают однократные, а при эксплуатации – повторно-переменные нагрузки, действие которых усугубляется другими неблагоприятными факторами (повышенная или, наоборот, пониженная температура, деформационное старение металла, коррозия и др.). Усталость – основной механизм утраты работоспособности при повторно-переменном нагружении – представляет довольно сложное в смысле математического описания явление. Это обстоятельство связано с существованием различных механизмов повреждаемости и разрушения, обусловленных характером внешнего воздействия. Предельное состояние конструкции достигается в результате постепенного накопления материалом рассеянного повреждения, которое сопровождается изменением как деформационных, так и прочностных его свойств и приводит к зарождению микро-, а затем и макротрещин. Таким образом, ресурс запорной арматуры определяется, главным образом, сопротивлением усталостному разрушению, в ряде случаев, малоциклового.

Расчетное моделирование таких процессов позволяет оценивать ресурс изделия до его изготовления. С практической точки зрения полезным результатом такого исследования является разработка соответствующей расчетно-экспериментальной методики и конечно-элементной (КЭ) модели задвижки в целом, а также КЭ-модели отдельного фрагмента (подконструкции) наиболее нагруженной зоны с дефектами. Построенные на основе результатов вариантных расчетов номограммы позволяют существенно сократить трудоемкость определения фактического коэффициента запаса по предельной пластической деформации и соответствующему предельному напряжению в связи с размером дефектов, расстояния между ними и глубиной залегания дефектной структуры по толщине стенки корпуса задвижки.

Разработка методики определения параметров математической модели сплошной однородной изотропной среды, эквивалентной по своим деформационным и

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						5
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

прочностным свойствам пористой среде, позволяет применять проверенные инженерной практикой закономерности, критериальные соотношения и методы расчета приемлемой трудоемкости как для нормирования допускаемых размеров дефектов и их плотности, так и для назначения обоснованных коэффициентов запаса прочности по напряжению, деформации и долговечности реальной пористой среды.

В связи с вышесказанным, целью выпускной квалификационной работы (уровень магистратуры) является **оценка прочности и долговечности корпуса магистральной задвижки DN 1200 PN 8,0 МПа с внутренними порами при однократном и повторно-переменном нагружении.**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- произвести обзор конструкций задвижек, условий их эксплуатации и выявить актуальные виды предельных состояний (механизмы исчерпания несущей способности);
- рассмотреть подходы к моделированию пластичных материалов с дефектами в виде закрытых и открытых пор;
- произвести анализ существующих критериев достижения предельного состояния конструкции с учетом существования групповых гладких (литейных) дефектов в виде сферических пустот и выявить их недостатки;
- по имеющимся данным получить диаграммы деформирования Стали 20 при однократном и циклическом нагружении, в том числе, с учетом работы материала в области предельной деформации;
- разработать алгоритм, составить расчетную схему, сформировав адекватную конечно-элементную модель, и выполнить серию расчетов для оценки влияния положения группового гладкого дефекта в виде упорядоченной структуры, элементом которой является тетраэдр, в литом корпусе задвижки и расстояния между отдельными дефектами в условиях однократного статического нагружения;

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						6
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

- выполнить анализ результатов и сформулировать зависимости фактического коэффициента запаса по предельной деформации и напряжению от расстояния между дефектами и положения (глубины залегания) группы дефектов в данных условиях;
- разработать методику определения параметров математической модели сплошной однородной изотропной среды, эквивалентной по своим деформационным и прочностным свойствам пористой среде, при однократном и циклическом нагружении;
- исследовать закономерности влияния степени пористости реального тела на деформационные и прочностные характеристики модельной сплошной однородной среды и определить область корректного применения предложенного подхода.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						7
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

1 АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ КОНСТРУКЦИИ С ДЕФЕКТАМИ

1.1 Запорная арматура: конструкции, условия эксплуатации, основные виды предельных состояний

Запорная арматура предназначена для полного или частичного перекрывания и пуска потока рабочей среды в трубопроводе в зависимости от требований технологического процесса (цикл «открыто-закрыто»).

Серийно выпускаются следующие типы запорной арматуры: краны, клапаны (вентили), задвижки и заслонки (поворотные затворы) [13].

Запорные вентили изготавливаются размером до $D_y = 200$ мм, где D_y – условный диаметр прохода, диафрагмовые (мембранные) и прямоточные вентили – до $D_y = 300$ мм. В связи с большим гидравлическим сопротивлением вентили применяются в основном на тупиковых участках или в других случаях, когда гидравлическое сопротивление арматуры не имеет существенного значения. Применяются они также при сильфонном уплотнении шпинделя. Во всех остальных случаях используются задвижки. Широкое применение на сегодняшний день получили шаровые краны, а также заслонки (поворотные затворы). Вследствие простой конструкции, малой строительной длине и незначительному гидравлическому сопротивлению задвижки получили наиболее широкое применение. При малых давлениях используются параллельные двухдисковые задвижки, при больших давлениях – клиновые, с цельным, упругим или составным клином.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						8
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

Задвижки (рисунок 1.1) – одно из самых распространенных устройств запорной арматуры. Здесь, в отличие от кранов, запорный элемент совершает не вращательное движение, а возвратно-поступательное. Передвижение запорного элемента происходит перпендикулярно движению жидкости. Задвижки широко используются на технологических и магистральных трубопроводных линиях. Они имеют небольшую строительную длину. Строительная высота задвижек с невыдвижным шпинделем сравнительно невелика, задвижек с выдвижным шпинделем – значительно больше. Для закрытия или открытия прохода необходимо сделать большое число оборотов шпинделя, поэтому задвижки, особенно больших диаметров прохода, часто снабжаются электроприводом.

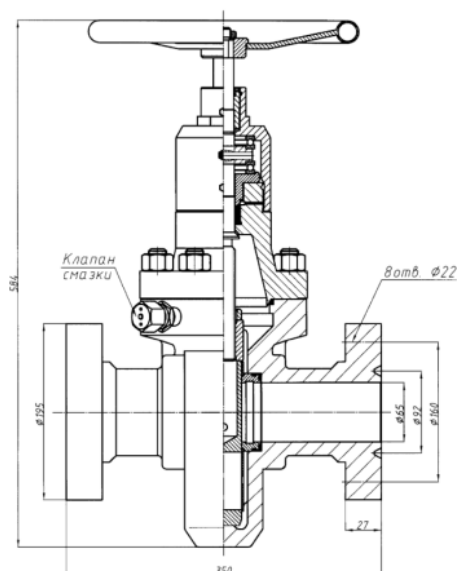


Рисунок 1.1. Задвижка ЗМС-65-14 К1 ХЛ (Бакинская)

Задвижки используются в качестве запорной арматуры в трубопроводах, транспортирующих нефть и нефтепродукты. Применение для этой цели вентиля, создающих большое гидравлическое сопротивление, потребовало бы больших энергетических затрат на перемещение среды. Для нефти и масел при давлении до 1 МПа и рабочей температуре до 90°C применяются чугунные задвижки без вставных уплотнительных колец. При больших давлениях и температурах применяются стальные задвижки. В нефтедобывающей промышленности для «ёлочек» нефтяных скважин применяются так называемая фонтанная арматура – задвижки

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						9
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

из легированных сталей, работающие под большим давлением в условиях возможного абразивно-жидкостного износа.

Задвижки, как и запорные краны, используются в основном в двух режимах: «открыто» и «закрыто», когда запорный элемент находится в крайних положениях. При использовании задвижки в промежуточном положении происходит разрушение ее рабочей поверхности из-за вибрации, вызванной высокочастотным перемещением исполнительного органа вдоль и поперек протекания жидкости при ее движении по трубопроводу. Расшатываются также и элементы крепления исполнительного элемента. Как результат – выход задвижки из строя раньше установленного срока.

Одной из часто используемых на магистральных трубопроводах задвижек является задвижка шиберная, применяемая в основном для установки на магистралях, транспортирующих технические взвешенные смеси (шлам, канализация) сыпучие материалы, воздушные и газовые потоки.

В отличие от других видов запорной арматуры шиберная задвижка способна полностью перекрыть сечение трубопровода, тем самым обеспечивая достаточную герметичность.

В качестве запорного элемента в такой задвижке используется плоский или клинообразный нож, который, передвигаясь перпендикулярно потоку, разрезает его и перекрывает сечение устройства. Именно по форме шиберного запорного элемента и классифицируют данную запорную арматуру: задвижки ножевые и клиновые.

Шиберная клиновая задвижка устанавливается на трубопроводе в случае, когда необходимо наиболее надежное перекрытие потока, она способна работать в условиях значительного давления рабочей среды. Запорный элемент арматуры такого типа имеет форму клина, такая же в точности форма поверхности и у седел устройства с уплотнителями.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						10
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

Под воздействием усилия, создаваемого при вращении шпинделя, происходит перемещение запорного клина в направлении, перпендикулярном движению рабочей среды. При полном перекрытии сечения клин под действием давления среды деформируется (в пределах упругости материала), что способствует максимальной герметизации.

Шиберным клиновым задвижкам присущи определенные недостатки:

- при интенсивной эксплуатации часто выходят из строя уплотнения;
- рабочие поверхности клина и седла устройства должны быть весьма точно подогнаны друг к другу;
- при повреждении поверхности клина (коррозия, задиры, глубокие царапины) нарушается герметизация арматуры, кроме того, это может привести к заклиниванию механизма;
- при высоких температурах запорный клин имеет свойство расширяться, что может привести к аварийным ситуациям, связанным с невозможностью регулирования потока рабочей среды.

Запорный элемент ножевой шиберной задвижки имеет сравнительно небольшую толщину и действует как обыкновенный нож.

В данной работе рассматривается шиберная задвижка DN 1200 PN 8,0 МПа с номинальным проходным диаметром 1200 мм и номинальным давлением 8,0 МПа под действием эксплуатационных нагрузок в условиях однократного статического и повторно-переменного нагружения.

В связи с отсутствием экспериментальных исходных данных для расчета кинетики повторно-переменного деформирования и дальнейшей оценки усталостной долговечности конструкции принято решение о замене материала корпуса задвижки на Сталь 20, механические характеристики которой при нормальной температуре (20°C), взятые из справочника [29], представлены в таблице 1.1.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						11
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

Таблица 1.1. Деформационные и прочностные характеристики Стали 20

$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	τ_B , МПа	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	ψ , %	δ , %	B , МПа	β	C	α
290	340	257	2,02	62	30	830	0,12	0,233	0,5

где

$\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести;

σ_B – временное сопротивление;

τ_B – временное сопротивление срезу;

E – модуль упругости;

ψ – относительное поперечное сужение;

δ – относительное удлинение при разрыве;

B, β, C, α – параметры уравнений кривых усталости по Морроу и Мэнсону-Коффину.

Сталь содержит 0,17-0,24 % углерода, 0,17-0,37 % кремния, 0,35-0,65 % марганца для увеличения прокаливаемости.

Общий вид данной задвижки показан на рисунке 1.2.

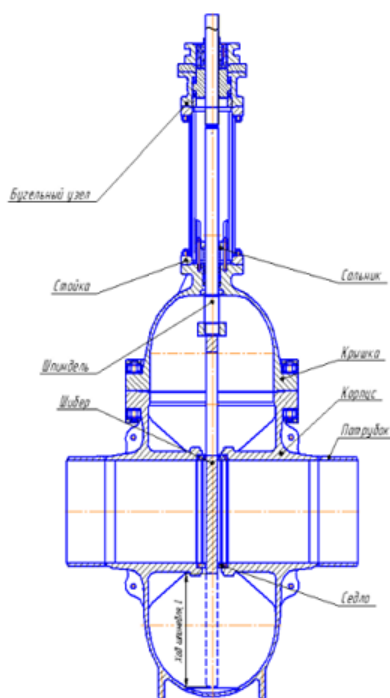


Рисунок 1.2. Общий вид конструкции задвижки шиберной
DN 1200 PN 8,0 МПа

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						12
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

Класс герметичности задвижки – «А» по ГОСТ Р 54808. Герметичность задвижки по отношению к внешней среде в соединении «корпус-крышка» обеспечивается резиновым кольцом, по шпинделю – двойным сальниковым узлом.

Герметичность затвора задвижки обеспечивается по принципу самоуплотнения. Основное уплотнение в затворе осуществляется посредством контакта «металл-полиуретан».

Конструкция характеризуется свободной заделкой уплотнительных полимерных колец в корпусе седла. Это значительно снижает нагрузки, испытываемые ими при работе задвижки, и способствует повышению долговечности уплотнительного элемента, а также гарантирует сохранение герметичности изделия на протяжении всего срока эксплуатации.

Установочное положение задвижки – вертикальное, приводом вверх.

В данной работе будем основываться на нормативной документации [33], которая устанавливает для задвижек шибберных номинальных диаметров DN от 200 до 1200 мм на номинальное давление PN от 1,6 до 12,5 МПа, предназначенных для эксплуатации на магистральных нефтепроводах, нефтепродуктопроводах и перекачивающих станциях, технические требования, требования безопасности и охраны окружающей среды, правила приемки, методы контроля и испытаний, транспортирование и хранение, указания по эксплуатации и гарантии изготовителя.

В связи с этим, для расчета на прочность корпусов задвижек магистральных трубопроводов, необходимо опираться на стандарт [12], который устанавливает нормы и методы расчета на прочность сосудов и аппаратов из углеродистых и легированных сталей, цветных металлов (алюминия, меди, титана и их сплавов), применяемых в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и смежных отраслях промышленности, работающих в условиях однократных и многократных нагрузок под внутренним избыточным давлением, вакуумом или наружным давлением, под действием осевых и поперечных усилий и изгибающих моментов, инерционных нагрузок, а также устанавливает коэффициенты запаса

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						13
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

прочности, допускаемых напряжений, модуля продольной упругости и коэффициентов прочности сварных швов. Нормы и методы расчета на прочность применимы, если свойства материалов, требования к конструкции, изготовлению и контролю отвечают требованиям [11] и другим нормативным документам. Если отклонения от геометрической формы, неточности или качество изготовления отличаются от требований нормативных документов, то при расчете на прочность эти отступления должны быть учтены соответствующей корректировкой расчетных формул.

Стандарт [50] устанавливает методику силового расчета задвижек, содержание и порядок определения основных усилий и моментов, необходимых для управления задвижкой.

Способы нормирования статической прочности корпусов и крышек трубопроводной арматуры, а также сильфонных крышек, корпусов и крышек приводных устройств, стоек и др. подобных деталей устанавливаются руководящим документом [51]. Методы расчета, применяемые для определения нагрузок, перемещений и напряжений не регламентируются. Допускается применять методики расчета, содержащиеся в отечественных и зарубежных нормативных документах и технической литературе. Расчеты могут выполняться также численными методами по программам персональных компьютеров, прошедшим аттестацию.

Нормативный документ [52] распространяется на трубопроводную арматуру и устанавливает способы нормирования статической прочности болтов и шпилек фланцевых соединений арматуры с трубопроводом или оборудованием, фланцевых соединений «корпус – крышка», а также фланцевых соединений стойки, приводных устройств и др. разъемных соединений трубопроводной арматуры.

Для определения предельно допустимого размер дефекта в нагруженной области конструкции следует ссылаться на руководящий документ [43], устанавливающий технические требования к контролю качества литых корпусных деталей,

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						14
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

работающих под давлением, трубопроводной арматуры при производстве на предприятиях, поставляющих изделия на объекты организаций системы «Транснефть», в том числе и ОАО «АК «Транснефтепродукт».

В работах [24, 31, 59, 60] отмечается, что в процессе эксплуатации оборудования и трубопроводов наблюдаются повреждения различного характера, которые сопровождаются утечками рабочей среды и наносят материальный и экологический ущерб. Опыт эксплуатации оборудования и трубопроводов позволил выявить ряд причин отказов запорной арматуры.

Разрушение запорной арматуры трубопроводов. Основное количество отказов запорной арматуры, как отмечают авторы работ [19, 39], связано с потерей герметичности из-за износа уплотнений, которые под действием сероводородсодержащей среды охрупчиваются, теряют эластичность и выкрашиваются. При потере герметичности крана сероводородсодержащая среда, воздействуя на крепеж (болты, шпильки, винты) крышек и боковых фланцев запорной арматуры, вызывает его сероводородное растрескивание. Разрушение крепежа происходит как по резьбе, так и по гладкой части стержня. Микротрещины располагаются преимущественно перпендикулярно оси детали и развиваются, как правило, по границам зерен. На рисунке 1.3 показаны картины разрушения шпилек (а) и корпуса задвижки (б) из стали Уранус 50 (08Х20Н12МЗБТЛ) ферритно-аустенитного класса.



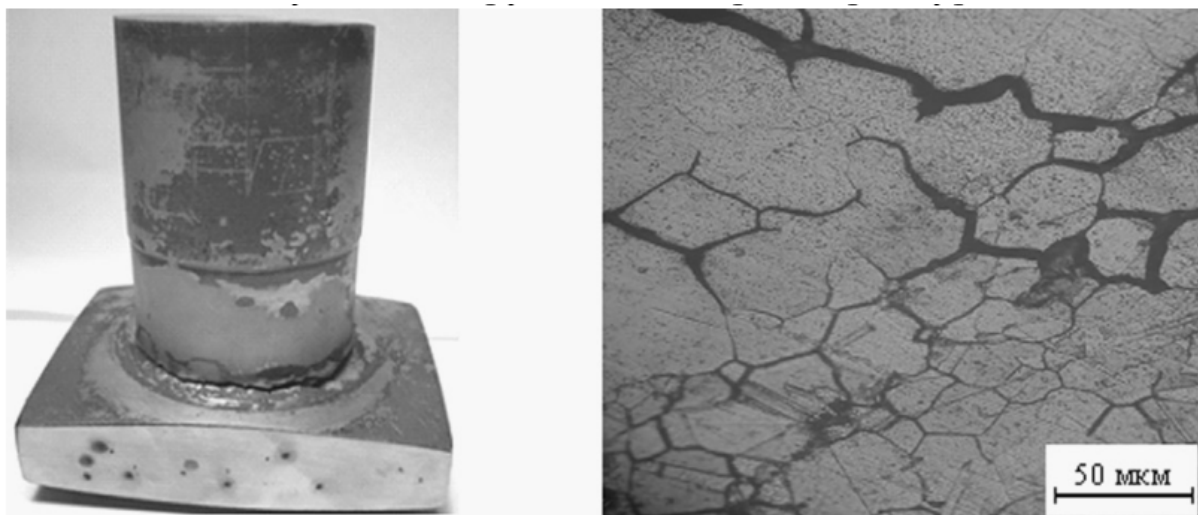
а) СР шпилек крана Ду 100 мм б) СР корпуса задвижки

Рисунок 1.3. Разрушение запорной арматуры вследствие сероводородного растрескивания (СР)

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		15

В корпусе задвижки возникают сквозные трещины вдоль образующей, параллельной оси штока. Разрушение корпусов задвижек носило хрупкий межкристаллитный характер и происходило вследствие развития усадочных трещин, образовавшихся в процессе кристаллизации отливки в форме. Развитию трещины способствовало охрупчивание металла, вызванное нарушением технологии литья и термической обработки отливок.

Разрушение задвижки вследствие отрыва «пятки» шпинделя (рисунок 1.4 а) было зафиксировано после 20 лет эксплуатации. Оно произошло в области галтели – перехода от шпинделя к пятке (зацепу) – в зоне концентрации растягивающих напряжений, где располагался очаг сероводородного растрескивания. Этому обстоятельству способствовало внецентренное приложение нагрузки на пятку шпинделя, что привело к возникновению совместного действия растяжения и изгиба. При достижении трещиной 60 % площади сечения шпинделя произошел его хрупкий долом. На оставшейся поверхности сечения шпинделя с противоположной стороны от очага разрушения также интенсивно зарождались и развивались трещины интеркристаллитного типа; их слияние с магистральной (рисунок 1.4 б) привело к обрыву пятки шпинделя задвижки.



а)

б)

Рисунок 1.4. Разрушение шпинделя задвижки

По данным проведенных экспертиз авторами были выделены наиболее распространенные предельные состояния трубопроводной арматуры:

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		16

- отсутствие герметичности по отношению к внешней среде (износ сальниковых узлов и сильфонных уплотнений);
- нарушение герметичности в затворе;
- изменение свойств материалов конструкции, определяющих ее прочность и плотность.

Авторами статьи [27] была предложена система выявления и ликвидации газовых и усадочных дефектов в литых заготовках запорной арматуры. Рассмотрено практическое использование разработанной методологии ликвидации брака отливок, а именно методика логического определения, диагностики и ликвидации дефектов усадочного происхождения.

Классификация дефектов, выявляемых при визуальном осмотре сосудов и аппаратов представлена в работе [4], в которой рассмотрены дефекты сосудов и аппаратов, выявляемых при визуально-измерительном контроле (ВИК), осмотре объектов экспертизы и технического диагностирования. Авторы считают, что эти методы неразрушающего контроля позволяют собирать основную информацию о дефектности изделия.

В работах [9, 10] сообщается о разработке автоматизированной системы диагностики литейных дефектов, позволяющей в конечном итоге предоставить пользователю список конкретных рекомендаций по ликвидации дефектов отливки.

Многими авторами отмечаются некоторые механизмы разрушения при повторно-переменном нагружении трубопроводной арматуры. Так, например, работа [3] посвящена исследованию цикличности магистральных трубопроводов, которая является одним из важнейших элементов прочностной оценки работоспособности перекачивающих систем. В этой работе отмечается, что значимым видом усталостного нагружения на магистральных нефтепроводах является малоцикловое воздействие и предлагается пользоваться блок-схемой для оценивания надежности на основании анализа величины цикличности нагружения.

В работе [40] анализируются причины заклинивания и обрывов штоков электроприводной арматуры. В результате, одним из факторов, приводящим к обрыву

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						17
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

запорного органа, являются усталостные трещины в металле. Усталостные трещины образовались в результате повторно-переменных напряжений, причиной которых явилась, как указывают авторы, «...вибрация обоймы клина в потоке рабочей среды во время нормальной эксплуатации». Отмечается, что образование усталостных трещин произошло вследствие появления в металле надрывов и микротрещин. Развитие их происходило по механизму циклической усталости.

Авторы [1] отмечают, что основным видом отказов являются усталостные разрушения. Принимая во внимание опытные данные, порядка 80% прочностных отказов связаны с усталостью материала. Поэтому в работе рассматривается задача оценки циклической долговечности механических элементов технических систем, подверженных повторно-переменным эксплуатационным нагрузкам.

Методика оценки усталости металла с учетом местных напряжений и деформаций в локальных областях материала в условиях концентрации напряжений рассмотрена в работа [46]. Авторы делают вывод, что предложенная методика в этой работе оценивает долговечность материала в локальной области до инициирования трещины и непосредственно связана с наличием неупругости.

Авторами [45, 47] показано, что наряду со статическими, магистральный трубопровод испытывает и циклические нагрузки с широким спектром частот, что может стать причиной возникновения малоциклового коррозионной усталости.

В статье [54] авторы привели основные результаты численного моделирования в программном комплексе ANSYS малоциклового усталости элементов конструкции неподвижной опоры DN 1000 для наземной прокладки трубопровода.

В настоящее время долговечность конструкции рассматривается с точки зрения кинетики роста усталостной трещины [14, 15]. Поэтому авторами [15] предложено исследование кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) материала в вершине трещины при циклическом изменении нагрузки методом конечных элементов (МКЭ). Решение нелинейно-упругой задачи было выполнено с использованием метода переменных параметров.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						18
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

В работе [25] рассмотрены усталостные разрушения деталей и конструкций нефтегазового оборудования под действием переменных нагрузок и коррозионных сред, представлены основные причины отказов и методы повышения работоспособности изделий.

Авторы статьи [57] отмечают, что, как правило, предельные многократно прикладываемые напряжения для наиболее широко применяемых при изготовлении нефтегазового оборудования низкоуглеродистых и низколегированных сталей до 2,5 раз меньше разрушающих напряжений однократного нагружения. Поэтому в данной работе рассматривается определение срока эксплуатации [35] нефтегазового оборудования при пульсирующем циклическом нагружении.

Оценка влияния пористости на НДС стальной плиты была изложена в работе [16]. Показано, что наличие искусственной пористости приводит к увеличению в 1,1-1,3 раза эквивалентных напряжений по сравнению с напряжениями в плите без пор.

В работе [36] рассматривается процесс долговременной эксплуатации трубопроводной системы 1-го контура интенсивным циклическим термомеханическим нагрузкам (пульсациям давления и температур рабочей среды). Из анализа разрушений трубопроводов ядерных энергетических установок выявлено, что одной из причин отказов является накопление термоусталостных повреждений в следствие ограничения перемещений трубопровода, жестко закрепленного в опорах. Расчет циклической долговечности проводился по критериям малоциклового усталости с использованием результатов упругопластических расчетов кинетики НДС по МКЭ.

Авторами [53] предлагается способ косвенной оценки остаточного резерва пластичности материала применительно к оборудованию нефтегазового комплекса (на примере нефтепровода из стали 17ГС после 20-летней эксплуатации в условиях Крайнего Севера).

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						19
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

Проблема прогнозирования индивидуального ресурса и срока службы трубопроводной арматуры и разработка для решения данной задачи вероятностной модели рабочего процесса рассмотрена в статье [34].

В статье [44] выполнен анализ закономерностей образования трещин при малоцикловом нагружении в широком диапазоне температур и предложен единый для стадии образования энергетический критерий усталостного разрушения металлических материалов.

Анализ отказов литых корпусных деталей запорной арматуры в эксплуатации свидетельствует, как отмечают авторы статьи [55], что образованию течи в большинстве корпусов задвижек предшествует развитие трещин из литейных дефектов (рисунок 1.5 а) или концентраторов напряжений (рисунок 1.5 б). Совместное влияние этих факторов было изучено в данной работе.

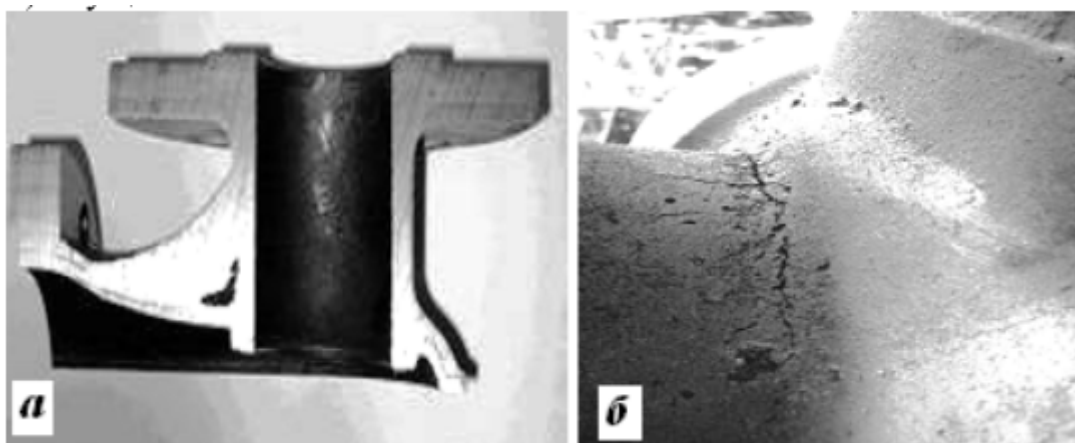


Рисунок 1.5. Дефекты в литом корпусе задвижки 30с41нж:
а – литейная раковина, б – трещина

В связи с этим для анализа причин отказов, расчета живучести и разработки мероприятия по повышению сопротивления развитию трещин в литых корпусах запорной арматуры исследовано влияние эксплуатационных факторов на характеристики циклической трещиностойкости сталей.

Авторами статьи [8] приведен краткий обзор патентов, направленных на совершенствование эксплуатационных показателей запорной трубопроводной арматуры.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						20
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

В работе [30] рассмотрено влияние ряда деструктивных конструкторско-технологических факторов на прогнозирование работоспособности и эксплуатационной надежности клапанно-седельных затворов «конус-острая кромка» на стадии эскизного конструирования трубопроводной клапанной арматуры.

Авторами [7] приводится описание и анализ методологии определения интервала повторных гидравлических испытаний участка нефтепровода с трещиноподобными развивающимися дефектами.

В работах [18, 28] рассматривается оценка остаточного ресурса конструкции при малоцикловом нагружении.

Нужно отметить, что вопрос численного анализа НДС конструкции с дефектами различной формы представляет особый интерес и рассматривается многими современными исследователями. Так работа [56] посвящена изучению влияния литейных дефектов в виде усадочных раковин, газовых пор и неметаллических включений на НДС в тонкостенных литых заготовках корпусных деталей. В статье [37] приведены результаты расчетного КЭ – анализа работы труб с несквозными трещинами полуэллиптической формы. В работе [6] рассмотрен вопрос моделирования НДС технологических трубопроводов при наличии в них вмятин и оценка распределения пластических деформаций, а также уровень поврежденности материала. Работа [5] посвящена расчету НДС и оценке силовых параметров разрушения в сварных швах с технологическими дефектами путем численного моделирования.

1.2 Подходы к моделированию пластичных материалов с различного рода дефектами

В ряде областей машиностроения все более широкое применение находят неоднородные несплошные материалы. Разрабатываются технологии, которые позволяют объединять в одном изделии области с совершенно разными свойствами, в частности, создавать отдельные зоны с заданной пористостью. Таким образом можно изготавливать, например, тепло- и звукоизолирующие листы металла с порами внутри и сплошным слоем снаружи, которые в дальнейшем скрепляются с

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						21
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

другими элементами конструкции. Детали, изготовленные из этого типа материалов, также обладают хорошими демпфирующими свойствами.

В то же время пористая структура материала ослабляет конструкцию, изменяя ее деформационные и прочностные свойства как при однократном, так и при циклическом нагружении. Расчет на прочность по номинальным напряжениям таких объектов в предположении отсутствия дефектов неизбежно приведет к ошибке «не в запас». Таким образом, оценка прочности и долговечности конструкций с учетом дефектов имеет важное практическое значение.

Различают пористые структуры с преднамеренным введением пустот в материал – так называемые металлические пены – и цельнолитые изделия с дефектами, возникшими в процессе изготовления или эксплуатации. Остановимся вначале на материалах первого типа.

Металлические пены все шире используются в производстве промышленных изделий благодаря низкому удельному весу, малой материалоемкости и уникальным механическим характеристикам.

Поначалу их применяли преимущественно в качестве фильтрующих элементов, тепло- и звукоизолирующих материалов. В настоящее время они все чаще являются элементами составных конструкций. Детали, изготовленные из этого типа материалов, находят широкое применение в машиностроении благодаря низкой плотности и хорошим демпфирующим свойствам. Способность пористых металлов эффективно поглощать энергию в процессе пластического деформирования позволяет использовать их для изготовления, например, бамперов автомобилей и элементов кузовов, так называемых «программируемых сминаемых зон». Металлические пены могут быть использованы в приводах и других агрегатах в качестве разрушающихся предохранительных элементов, рассеивающих энергию динамического воздействия и предотвращающих таким образом разрушение всей механической системы.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						22
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

Физические и механические свойства металлических пенопластов, в частности, низкая теплопроводность, ослабление вибрации, поглощение звука, огнестойкость, электромагнитное и радиационное экранирование обуславливают их преимущество перед обычными материалами со сравнимыми характеристиками. Грамотно спроектированные изделия из металлической пены обеспечивают более легкие и более жесткие элементы, чем сплошные стальные компоненты. Они позволяют получить конструкции с более высоким сопротивлением продольному изгибу и меньшим весом по сравнению с традиционными сплошными стальными. Так, сэндвич-панели с металлическим пенным сердечником обладают повышенным сопротивлением короблению и выпучиванию.

Методы исследования структуры реальной металлической пены

Структура пористой среды является одним из основных факторов, влияющих на ее свойства. Трудности построения адекватной математической модели для достоверного описания механических свойств при определенном объемном содержании пор (степени пористости) связаны как с неравномерностью их расположения, так и с различной формой пор.

Различают два типа пористых металлов: с открытыми и закрытыми порами. Материал с открытыми порами получают путем вспенивания расплавленного или полурасплавленного металла, с закрытыми порами – литьем с использованием удаляемого наполнителя. Пористость варьируется в пределах 30-60 % для деталей, подверженных силовым нагрузкам или используемых в качестве демпферов. Форма пор зависит от способа их формирования. Сферическая форма характерна для металлов с закрытыми порами, произвольная – с открытыми [17].

В работе [76] для создания КЭ модели использовали метод последовательного послойного секционирования для получения более подробной структуры материала (рисунок 1.6).

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						23
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

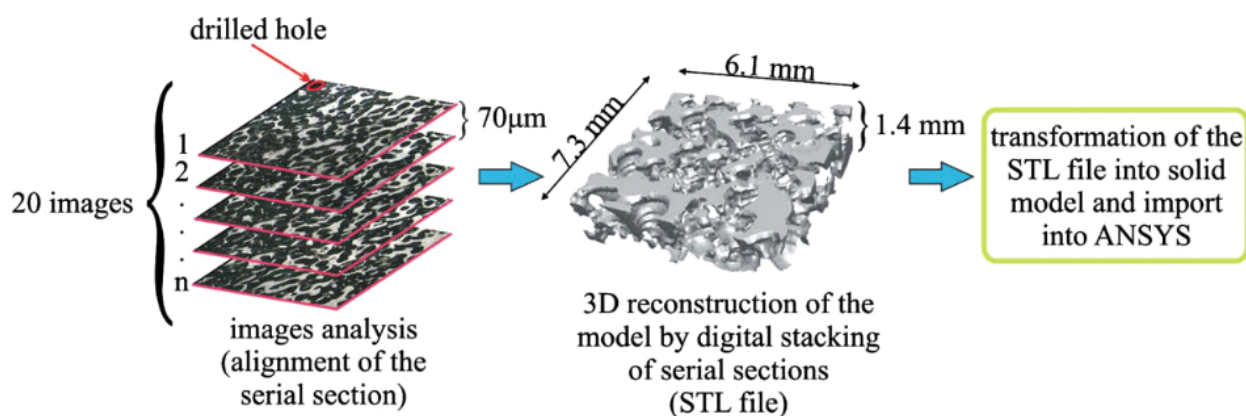


Рисунок 1.6. Метод последовательного послойного секционирования для получения 3D модели алюминиевой пены

Пенопласты с открытыми ячейками были изготовлены с применением импрегнирования полимера. В каждом рассматриваемом слое толщиной около 1 мм фиксировали постоянную область металлографической плоскости и производили запись ее цифрового изображения. Эта процедура повторялась для определенного количества слоев в зависимости от желаемой конечной толщины модели и расстояния между двумя последовательными сечениями. Сгенерированная трехмерная геометрическая модель алюминиевой пены, полученная в результате синтеза цифровых изображений, была соответствующим образом скорректирована для построения КЭ-модели среды.

В работе [81] было выполнено сравнение двумерной и трехмерной моделей, с использованием конечно-элементного подхода применительно к композиции из металлической титановой матрицы с дисперсным упрочнением в предположении, что частицы одного и того же размера равномерно распределены по объему матрицы. В рамках этого допущения построена модель элементарной ячейки, содержащий всего лишь одну частицу; таким образом, микроструктура среды сводится к набору повторяющихся блоков.

Б. Михайлидис (Michailidis V.N.) с соавторами [75] отмечают преимущества метода рентгеновской компьютерной томографии при моделировании структуры алюминиевой пены, а также эффективность использования методов с привлечением САПР. С помощью последних возможна реализация специальных структур,

таких, как додекаэдры, икосаэдры, тетракайдекаэдры (последняя, кстати, представляет обобщенную форму человеческой жировой клетки, а также другие базовые клеточные структуры), для моделирования реальной геометрии пористой среды средой, ей эквивалентной. Примененный авторами алгоритм Вороного (рисунок 1.7) позволяет разделить исходное многомерное пространство на более простые, удобные для анализа, подпространства.

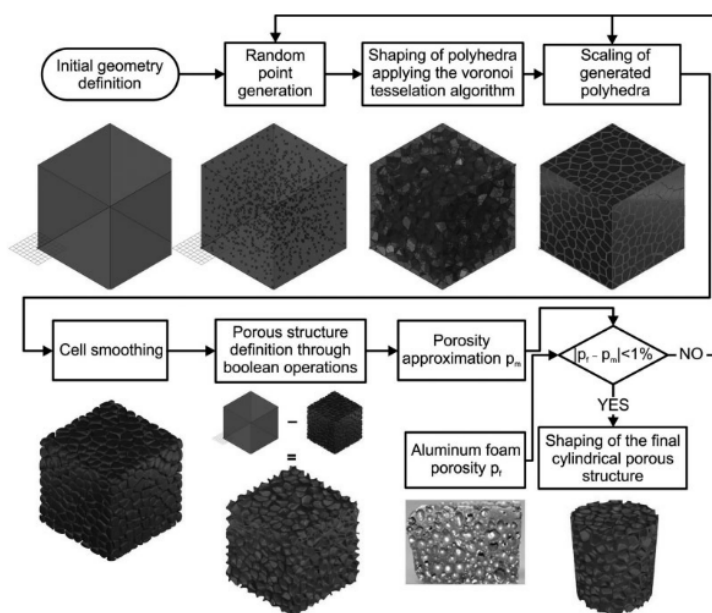


Рисунок 1.7. Применение алгоритма Вороного для создания модели с закрытыми пористыми ячейками

Исследованием, результаты которого представлены в статье [83], установлено, что для определения характеристик сложной пористой структуры эффективна теория фракталов. Понятие фрактала имеет отношение к исследованию структурных характеристик пористых сред, связанных с физическими, химическими и механическими свойствами. Для пористых металлических материалов фрактальная теория представляет собой новый эффективный метод изучения пористой структуры, которая позволяет создать мост между микроморфологией и макроэффективностью и позволяет описывать макроэффективность с микроморфологией – от качественного анализа до количественного. Однако количество работ, посвященных изучению пористой структуры с помощью фрактальной теории, весьма ограничено, особенно для материалов, полученных на основе металлических порошков

или металлических волокон. В данной статье рассмотрена теория описания и анализа морфологии пор металлических материалов, полученных из порошков нержавеющей стали, и вычислена фрактальная размерность с помощью разработанного авторами программного обеспечения, основанного на алгоритме поиска границы между порами и материалом матрицы.

Гент (Gent) и Томас (Thomas) [68, 69] впервые предложили модель упругой «паутинной сети» и модель структуры в виде куба. Они произвели оценку модуля упругости вспененного материала с открытыми ячейками и его напряженно-деформированного состояния, показав, что модуль упругости такого материала пропорционален относительной плотности тела.

Уоррен (Warren) и Крайник (Kraynik) [84] использовали модель тетраэдрической столбчатой структуры для определения упругих характеристик трехмерных пенопластов с открытыми ячейками. Результаты расчета показали, что изгиб столбчатой структуры является основным механизмом деформации вспененных материалов с тетраэдрической микроструктурой.

Сведения о применении и составе металлических пен, механических свойствах, методологии и способах моделирования содержатся в статье [74].

Описание деформационных и прочностных свойств пористых материалов

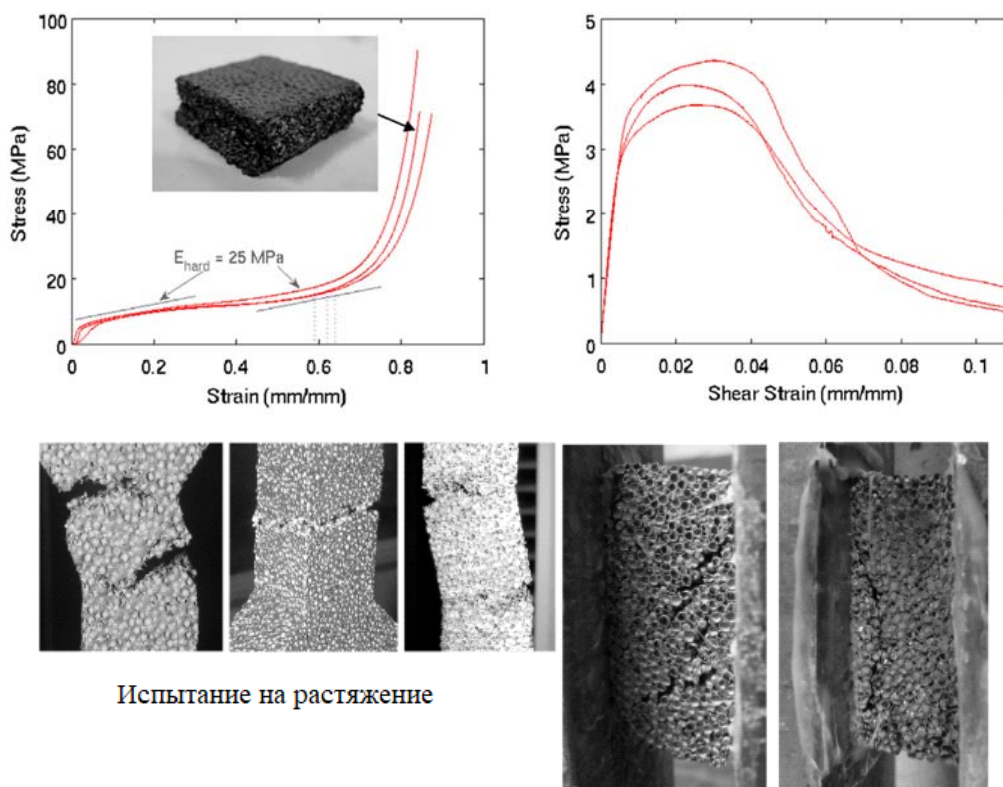
Как правило, используется прямой расчет напряженно-деформированного состояния элемента объема материала с множественными ха-

отично распределенными несплошностями разной конфигурации. Последние путем статистической обработки сводятся к вариациям структуры с квазислучайным распределением размеров и конфигурации дефектов. Процедура прогнозирования деформационных и прочностных свойств такой модельной среды корректируется после сопоставления с результатами экспериментов. В большинстве исследований, в частности в работах [20, 21, 26, 48, 49, 66], такой подход используется применительно к керамическим – классическим хрупким – материалам, обладающие сравнительно простыми закономерностями деформирования и разрушения, тем не

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						26
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

менее для его реализации привлекаются значительные вычислительные мощности, часто на уровне суперкомпьютера.

Моделирование пористой структуры пластичных материалов представляет задачу более сложную в связи с более сложными закономерностями механического поведения с учетом возможного неупругого деформирования при однократном и, особенно, при повторно-переменном нагружении. Ситуация усложняется различным характером поведением металлической пены при растяжении, сдвиге и сжатии (рисунок 1.8), когда при определенной нагрузке может меняться механизм деформирования вследствие искажения формы стенок пустот, сопровождаемого пластическим течением материала матрицы.



Испытание на растяжение

Рисунок 1.8. Кривые деформирования образцов стальной пены с номинально идентичными сферическими полостями, испытанных при сжатии в диапазоне уплотнения, с участками начального упругого нагружения, неупругого деформирования с небольшим упрочнением и резкого увеличения жесткости материала после начала компактирования. На фотографии показан уплотненный образец после нагружения до примерно 85 % деформации, соответствующей схлопыванию сферических полостей и небольшую асимметрию поперечных деформаций (сверху слева) и экспериментальные кривые деформирования при сдвиге (справа) [82]

В работе [85] изложен подход к численному моделированию алюминиевой пены на основе технологии обработки изображений в среде MATLAB и технологии сканирования методом рентгеновской компьютерной томографии. Метод направлен на получение точных результатов расчета путем реконструкции геометрической модели для заданной пористой среды. Подход был применен для расчета характеристик алюминиевой пены при сжатии. Материалом матрицы служил сплав ZL 102 с пористостью 56,41%, 56,71% и 58,02%. Авторами отмечается, что изучение характеристик сжатия алюминиевой пены было сосредоточено на таких факторах, как материал матрицы, относительная плотность среды, размер пор, скорость деформации, наличие микродефектов.

Билс (Beals) и Томпсон (Thompson) [64] определяли характеристики алюминиевой пены с неравномерным градиентом плотности, а затем сравнивали результаты с теоретическим прогнозом по модели Гибсона–Эшби (Gibson–Ashby). Как экспериментальные, так и расчетные данные свидетельствуют, что градиент плотности оказывает существенное влияние на характеристики в условиях сжатия.

В то же время Кэнэхаши (Kanahashi) с соавторами [71] показали, что размер пор практически не влияет на механическую прочность и характеристики поглощения энергии.

Свойства металлической пены значительно отличаются от исходного бездефектного материала и требуют новых подходов к моделированию. В частности, стальная пена при приложении нагрузки в виде гидростатического давления демонстрирует объемное сжатие без заметных пластических деформаций в отличие от сплошного материала, который подвержен сдвиговым деформациям и является пластически несжимаемым.

Механические свойства металлической пены зависят не только от материала матрицы, но и тесно связаны со структурой пористой среды. Одним из недостатков процесса производства пористых материалов является неравномерность распределения пор, связанная с невысокой воспроизводимостью процесса изготовления. Поэтому объяснимо широкое распространение методов исследования путем

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						28
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

численного моделирования подобных сред с равномерным и неравномерным расположением дефектов.

Среди используемых подходов следует отметить метод конечных элементов (МКЭ), к которому обращались многие исследователи [2, 23, 65, 70, 72, 73, 75 – 82]. Среди конститутивных численных моделей металлических пеноматериалов МКЭ является одним из наиболее перспективных, обеспечивающих при корректном применении вполне удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

Большое внимание уделяется формулировке условий пластического течения металлических пен. Так Дешпанде и Флеком (V.S. Deshpande and N.A. Fleck) [67] предложены две модели пластического течения изотропной среды, определяющие эволюцию поверхности текучести в пространстве главных напряжений – с постоянным соотношением полуосей эллипсоида (в отличие от цилиндра Мизеса) и модель кинетического типа с разными законами упрочнения, отвечающими гидростатической (шаровой) и девиаторной составляющим тензора напряжений. Важной особенностью пористых материалов является нарушение их исходной структуры в процессе деформирования, что предполагает отказ от гипотезы пластической несжимаемости вспененной среды. Авторы считают, что в рассматриваемой ситуации целесообразно использовать не инженерную, а логарифмическую деформацию и истинные напряжения с учетом коэффициента Пуассона, определяемого в терминах логарифмической деформации.

В работе Szyniszewski с соавторами [82] изучались условия начала пластического течения металлической пены на основе углеродистой стали (с содержанием углерода от 0,30 до 0,50 %). Экспериментально показано, что в рассматриваемых условиях поверхность текучести в пространстве главных напряжений, построенная с помощью модели Дешпанде–Флека более адекватна, нежели отвечающая традиционному критерию Мизеса. Их отличие, особенно заметное при малых значениях коэффициента Пуассона, постепенно уменьшается по мере стремления последнего к величине 0,5 (рисунок 1.9). Сетка–каркас отображает цилиндрическую

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						29
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

поверхность текучести Мизеса, соответствующую одной и той же диаграмме деформирования при линейном напряженном состоянии. Параметр $\alpha = \sqrt{\frac{9(1-2\nu_p)}{2(1+\nu_p)}}$ определяется коэффициентом Пуассона ν_p и характеризует «сжимаемость» материала: $\alpha = 0$ соответствует значению $\nu_p = 0,5$ (несжимаемый материал); $\nu_p = 0$ и $\alpha = 2,12$ указывают на высокую «сжимаемость». В этом случае в энергию деформирования вносят свой вклад не только девиационная, но и шаровая часть тензора напряжения.

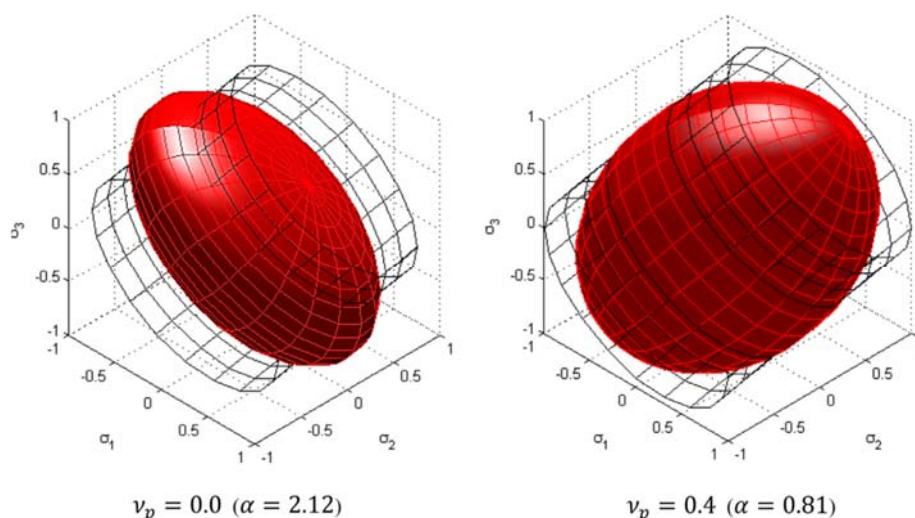


Рисунок 1.9. Поверхность текучести Дешпанде–Флека (красный цвет)

Заметим, что в активе этих авторов (Дешпанде и Флека) числится как двумерная, так и трехмерная модели изотропной металлической пены. В статье [67] было проведено сравнение этих моделей путем сопоставления зависимостей напряжения от деформации для пенопластов Alporas и Duocel при пропорциональной осесимметричной сжимающей нагрузке.

Рейс (Reyes) с соавторами [79] и Хансен (Hanssen) с соавторами [70] использовали усовершенствованную модель пластичности Дешпанде–Флека в сочетании с критерием разрушения при растяжении, определяющим параметром которого является максимальное главное напряжение; этот подход был реализован в пакете LS-DYNA. Вместе с тем, ряд авторов отмечает, что формулировка критерия разрушения в терминах деформаций предпочтительнее, чем в терминах напряжений.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист 30
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

Целью конечно-элементного анализа авторов работы [77, 80] являлось моделирование поведения пены в условиях сжимающей нагрузки и выявление связи между характеристиками материала и механическим поведением при сжатии. С этой целью было изготовлено несколько образцов пены методом порошковой металлургии (ПМ). Эта технология позволяет контролировать структуру пены и ее физические свойства путем изменения небольшого количества параметров. Для получения требуемых характеристик изготовленных таким образом образцов были выполнены сканирующая электронная микроскопия и анализ изображений с последующим численным моделированием, которое проводилось с помощью программного комплекса ABAQUS CAE. Для определения распределения напряжений в пене использовалась модель медно-матричных нанокompозитных пенопластов [80] с привлечением дисперсионного анализа (ANOVA).

Авторы работы [65] проводили исследование влияния размера, формы и распределения пор на механическое поведение структуры. Численное моделирование на основе сформированной структуры показало, что большие, нерегулярные и плотно сгруппированные поры способствуют значительной локализации деформации, что приводит к преждевременному разрушению при более низких плотностях среды. В результате конечно-элементного моделирования циклического нагружения установлено, что пластическая деформация постепенно, от цикла к циклу, развивается в углах пор и в областях с плотными группами пор, особенно для сталей повышенной пористости. Было выяснено, что прочность при растяжении, модуль упругости, напряжение в момент разрушения и усталостная прочность увеличиваются с уменьшением пористости. Снижение модуля упругости с увеличением пористости было предсказано аналитически. Посредством двумерного моделирования на основе микроструктур показано, что повышенные характеристики прочности при растяжении и сопротивления усталостному разрушению более плотных сталей определяются более равномерным распределением деформации в связи с более низким объемным содержанием пор, большей степенью однородности среды и формой пор, близкой к сферической.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						31
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

Что же касается конструкций, изготовленным литьем и возможных дефектов, сопровождающих данный процесс [42, 58], отмечается, что существующее программное обеспечение компьютерного моделирования процессов литья позволяет выполнить анализ большинства факторов, влияющих на образование литейных дефектов, получить данные об их распределении в теле отливки и оценить влияние варьируемых параметров на формирование дефектов [23].

Компьютерное моделирование производства литых деталей состоит из нескольких этапов:

- создание трехмерной твердотельной модели детали с помощью систем автоматизированного проектирования (CAD) – таких как, Autodesk Inventor, SolidWorks, Компас;
- моделирование собственно процессов литья, которое выполняется в соответствующих системах автоматизированного моделирования литейных процессов (CAM) – MAGMASoft (ФРГ), ProCAST (США, Швейцария), FLOW-3D (США), WinCAST (ФРГ), Poligon (Россия).

Авторами работы [2] предложена модель элементов литосварного изделия, учитывающая при расчете напряженного состояния литейные дефекты типа газовых пустот. Напряженно-деформированное состояние определяли расчетным путем с помощью пакета ANSYS. Дефекты в литой детали моделировали путем замены части материала пустотелыми фрагментами сферической формы, после чего производили КЭ-разбиение объекта со сгущением сетки в области дефектов. Сравнительные расчеты напряженного состояния элементов рамы большегрузного карьерного самосвала с учетом и без учета таких дефектов показали, что учет пористости качественно изменяет картину распределения напряжений. Вместе с тем влияние размеров пустот на изменение напряженного состояния оказалось не столь существенным.

Методика расчета напряженно-деформированного состояния за пределами упругости и определения условий разрушения [78] базируется на модели сплошной однородной среды, эквивалентной по своим деформационным и прочностным

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		32

свойствам исходной со множественными равномерно распределенными по объему тела несплошностями. В качестве таковых приняты пустоты правильной сферической формы, образующие регулярную структуру в виде икосаэдра, представленного набором правильных тетраэдров. Момент достижения предельного состояния по критерию нарушения сплошности в предположении вязкого разрушения при сложном напряженном состоянии общего вида при однократном статическом нагружении определяли с помощью деформационного критерия В. Л. Колмогорова. С использованием данного подхода в результате численных экспериментов на виртуальных образцах получены упругие постоянные и диаграммы деформирования модельной среды в зависимости от степени пористости для одной из марок конструкционных сталей. Установлено, что с увеличением пористости уменьшается ресурс пластичности образца и, как следствие, номинальное напряжение в момент разрушения. Применительно к массивному литому корпусу задвижки магистрального нефтепровода построены номограммы для определения фактического коэффициента запаса по предельной пластической деформации и соответствующему предельному напряжению в связи с размером дефектов, расстояния между ними и глубиной залегания дефектной структуры в стенке корпуса.

В работах Крембиргера (Kramberger) [72, 73] для пористого металла с водоотталкивающим эффектом (эффектом лотоса) была использована модель начала и развития повреждения (DIEM), примененная для оценки малоциклового усталости в режиме «жесткого» нагружения в условиях синусоидального циклического растяжения, сжатия и двухосного растяжения. Для четырех различных вариантов размещения пор были получены распределения количества циклов инициализации повреждения, а также развитие повреждения до частичного разрушения. Для реализации последнего в пакете ABAQUS использовалась методика «рождения и смерти элементов».

В результате обзора опубликованных работ, отнюдь не претендующего на полноту, стоит отметить, что изучению деформационных и прочностных свойств пористых материалов при повторно-переменном или циклическом нагружении – в

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						33
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

условиях, характерных для работы машиностроительных конструкций – уделяется совершенно недостаточно внимания. Отсюда вытекает актуальность принятого исследования и связанные с ней научная новизна (разработка методики определения параметров математических моделей деформационных и прочностных свойств как при однократном, так и циклическом нагружении) и практическая значимость – разработанный подход позволяет применять проверенные инженерной практикой закономерности, критериальные соотношения и методы расчета приемлемой трудоемкости.

Следует заметить, что корректное и обоснованное определение допустимой величины дефекта представляет весьма непростую задачу: необходимо выполнить численный анализ кинетики неупругого деформирования и развития рассматриваемого дефекта (поры, трещины) заданного начального размера и расположения в конкретном изделии для индивидуальной программы повторно-переменного нагружения, начиная с приемо-сдаточных испытаний (опрессовки) предприятием-изготовителем и заканчивая моментом выработки расчетного ресурса, с учетом деформационных и прочностных свойств материала данного изделия во всем диапазоне эксплуатационных температур при статическом и циклическом нагружении в рамках стохастического подхода. Следует признать, решение указанной задачи в такой постановке практически неосуществимо, в первую очередь, из-за неопределенности программы нагружения отдельного изделия и значительного объема экспериментальных данных о механических свойствах материала, которые следует получать для каждой плавки.

Таким образом, предпринимаемое исследование позволяет оценить влияние одиночного и группового дефектов на прочность корпуса задвижки в условиях однократного монотонного статического и повторно-переменного нагружения с помощью фактического коэффициента запаса по деформации и напряжению.

Тогда порядок расчетного исследования влияния размера и глубины залегания одиночного и группового дефекта в виде сферических полостей на усталостную

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						34
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

прочность корпуса рассматриваемой задвижки в терминах фактического коэффициента запаса по долговечности в условиях повторно-переменного воздействия эксплуатационной нагрузки может выглядеть следующим образом.

1. На основе результатов расчета номинального напряженно-деформированного состояния с учетом реальной диаграммы деформирования материала при заданной температуре с использованием «генеральной» сетки выявляется наиболее нагруженная зона.
2. Полагается, что предельно допустимый размер дефекта в этой области не превышает «нормативный» [43]. В качестве дефекта может быть рассмотрена одиночная и групповая несплошность в виде сферических полостей. Производится описание геометрии дефекта со сгущающейся сеткой в выделенной подконструкции. Критерий корректности – погрешность по напряжениям, не превышающая 5 % по отношению к опубликованным «упругим» решениям [32] или к известному из литературных источников [38] значению теоретического коэффициента концентрации.
3. Аналогично методу подконструкций вокруг дефекта выделяется представительный (конечный) объем, номинальное НДС которого установлено ранее проведенным расчетом всего объекта в целом с помощью «генеральной» сетки. Варьированием размера одиночного дефекта и расстояния между несплошностями группового дефекта с использованием ранее подобранной «локальной» сетки устанавливается связь $p_{и}^f(d, e)$ для одиночного и $p_{и}^f(h, e)$ для группового дефекта с учетом эксцентриситета его/их расположения. По мере роста и расстояния между дефектами подсчитывается значение фактического коэффициента запаса по предельной деформации $n_p = \frac{p_{и}^f}{p_{и}}$, соответствующее текущему НДС $\left(p_{и}^f = p_{и}^f \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{и}} \right) \right)$. Может оказаться, что при размерах дефекта, сопоставимых с размерами сечения требуется повторить п.1 (расчет номинального напряженного состояния с

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						35
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

использованием «генеральной» сетки). На этой основе может быть сформулирована соответствующая корреляционная зависимость $n_p = n_p(d_{поры}, e)$, $n_p = n_p(h, e)$ либо $n_\sigma = n_\sigma(d_{поры}, e)$, $n_\sigma = n_\sigma(h, e)$ и (или) построены номограммы. Величина фактического коэффициента запаса по предельной деформации позволит оценить, насколько ужесточены требования по предельно допустимым размерам дефектов, приведенные в РД [43].

4. Полагая, что величина фактического коэффициента запаса n_p для однотипных дефектов относится ко всему объекту – высоко- средне- и низконагруженным его зонам – могут быть рассчитаны размеры дефектов и в других, представляющих интерес, областях, что позволит дифференцировать требования к предельно допустимым размерам дефектов в них с сохранением заложенного в РД запаса – возможно, излишнего.
5. Оценку долговечности по критерию усталостной прочности производят на основе модели сплошной однородной упругопластической среды, эквивалентной по своим деформационным и прочностным характеристикам исходному материалу со множественными регулярно распределенными дефектами типа пор. Описание геометрии выполняется объемной конечно-элементной сеткой нерегулярной сгущающейся гексаэдрической конфигурации. Решается задача идентификации модели в детерминированной постановке – получения кривой однократного деформирования модельной среды в зависимости от степени пористости материала – базирующаяся на результатах, как минимум, трех (в случае аппроксимации диаграммы степенной зависимостью по Рамбергу-Осгуду) численных экспериментов. Один из них в предположении линейно упругого поведения материала (определение модуля упругости и коэффициента Пуассона), остальные – упругопластического.
6. Расчетами МКЭ кинетики циклического неупругого деформирования виртуальных пористых образцов с использованием кривых циклического дефор-

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						36
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

мирования и циклической кривой бездефектного материала, строятся замкнутые петли неупругого гистерезиса, соответствующие стабилизации циклического деформирования. По вершинам петель гистерезиса проводится циклическая кривая модельной среды, отвечающая стабильному циклу i -го блока нагружения. Достижение предельного состояния – нарушение сплошности элемента структуры – фиксируется с помощью критерия локального характера с учетом как усталостного, так и квазистатического повреждения. Суммирование повреждений осуществляется с помощью линейной гипотезы в деформационной трактовке.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						37
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

2 ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В БЕЗДЕФЕКТНОЙ КОНСТРУКЦИИ

2.1 Численный анализ напряженно-деформированного состояния нагруженной конструкции без учета внутреннего дефекта

Для разработки алгоритма оценки разрушения конструкции с дефектами типа пор и инородных включений необходимо вначале провести численный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) всего корпуса задвижки в целом без учета внутренних дефектов.

Численный анализ НДС рассматриваемой конструкции производился с использованием положительно зарекомендовавшего себя метода конечных элементов (МКЭ) как одного из наиболее универсальных инженерных методов, основные преимущества и недостатки которого были рассмотрены в расчетно-пояснительной записке к выпускной квалификационной работе [63].

Таким образом, в рамках данного подраздела будет выполнен анализ НДС исследуемой конструкции, который впоследствии послужит основой для расчета полей напряжений и деформаций в окрестности пор. Полученные таким образом закономерности в виде корреляционных зависимостей или номограмм позволят оценивать опасность конкретного дефекта, не прибегая каждый раз к трудоемкому и сложному анализу НДС за пределами упругости в зоне конкретных дефектов.

Наступление предельного состояния – нарушение сплошности – предполагается фиксировать с помощью так называемого деформационного критерия В. Л. Колмогорова, представляющего критерий вязкого разрушения в условиях статического однократного нагружения при сложном напряженном состоянии. Критерий может быть записан как в терминах интенсивностей деформаций, так и с учетом однозначной связи напряжения и деформации посредством кривой деформирования в терминах напряжений. Соответственно результаты расчета могут быть получены в форме фактического коэффициента запаса по деформации или (и) напряжению.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						38
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

В рамках данной части выпускной квалификационной работе (уровень магистратуры) задача численного анализа НДС конструкции в целом и анализа НДС в зоне группового дефекта гладкой формы решалась в упругопластической постановке методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS Mechanical.

Описание свойств материала Для описания механических свойств материала использовалась кривая деформирования Стали 20 в параметрах «истинное напряжение ~ логарифмическая деформация», поскольку при определении величин, отвечающих предельному состоянию (исчерпания ресурса пластичности при данном напряженном состоянии) деформации уже нельзя считать малыми. В этих условиях определенными преимуществами (простота, адекватность) обладает аппроксимация диаграммы деформирования по Рамбергу–Осгуду в виде

$$\bar{\sigma} = K p^m; \quad (2.1)$$

здесь $p = \ln(1 + \varepsilon_p)$ – логарифмическая пластическая деформация;

$\bar{\sigma} = \sigma \exp(p)$ – действительное напряжение;

ε_p – инженерная пластическая деформация;

K, m – так называемые коэффициент прочности и показатель упрочнения – постоянные материала при данной температуре и скорости деформирования.

Для Стали 20 при нормальной температуре приняты механические характеристики, приведенные в таблице 1.1.

Величина K может быть найдена по формуле [41]

$$K = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{0,2}}{0,002^m} + \frac{\sigma_B \cdot e^m}{m^m} \right), \quad (2.2)$$

m – показатель упрочнения, равный

$$m = \frac{\ln \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}} \right) + 0,056}{3,44} \quad \text{при} \quad \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}} \leq 1,32. \quad (2.3)$$

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						39
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

Исходя из соотношения

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

найдем показатель упрочнения

$$m = \frac{\ln\left(\frac{340}{290}\right) + 0,056}{3,44} = 0,061,$$

а затем подсчитаем коэффициент прочности K по формуле

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

В итоге уравнение диаграммы деформирования в указанных координатах принимает вид

$$\bar{\sigma} = 430 p^{0,061} \text{ МПа}. \quad (2.4)$$

Истинное сопротивление разрыву представляет собой напряжение, соответствующее ресурсу пластичности материала

$$p_f = \ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right); \quad (2.5)$$

$$\bar{\sigma}_f = K p_f^m. \quad (2.6)$$

Ресурс пластичности равен

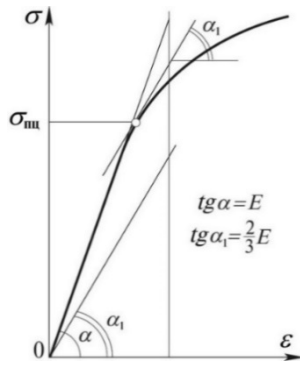
$$p_f = \ln\left(\frac{1}{1-0,62}\right) = 0,97,$$

а истинное напряжение в момент разрушения

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

Для построения диаграммы деформирования необходимо определить предел пропорциональности, отвечающий напряжению, при котором касательный модуль $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ становится в полтора раза меньше модуля упругости E (рисунок 2.1):

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						40
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		



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

Дифференцирование уравнения (2.1) с учетом допущения о малости деформаций: $\bar{\sigma} = \sigma$, $e = \varepsilon$ и использованием последнего условия приводит к выражению для расчета предела пропорциональности [41]:

Рисунок 2.1. К определению предела пропорциональности

$$\sigma_{\text{лп}} = K \left(\frac{2E}{3mK} \right)^{\frac{m}{m-1}}; \quad (2.7)$$

$$\sigma_{\text{лп}} = K \left(\frac{2E}{3mK} \right)^{\frac{m}{m-1}} = 430 \left(\frac{2 \cdot 2,02 \cdot 10^5}{3 \cdot 0,061 \cdot 430} \right)^{\frac{0,061}{0,061-1}} = 247 \text{ МПа}.$$

Соответствующая выражению (2.4) кривая деформирования представлена на рисунке 2.2 ($e = p + \bar{\sigma}/E$). Координаты расчетных точек, использованные при построении диаграммы деформирования, сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1. Координаты опорных точек на диаграмме деформирования
Стали 20

$e, \%$	$\bar{\sigma}, \text{МПа}$
0	0
0,184	270
0,345	294
0,754	315
1,7	333
3,3	348
6,3	363
9,7	373
18,4	388
26,4	396
40,7	407
53,3	415
97	429

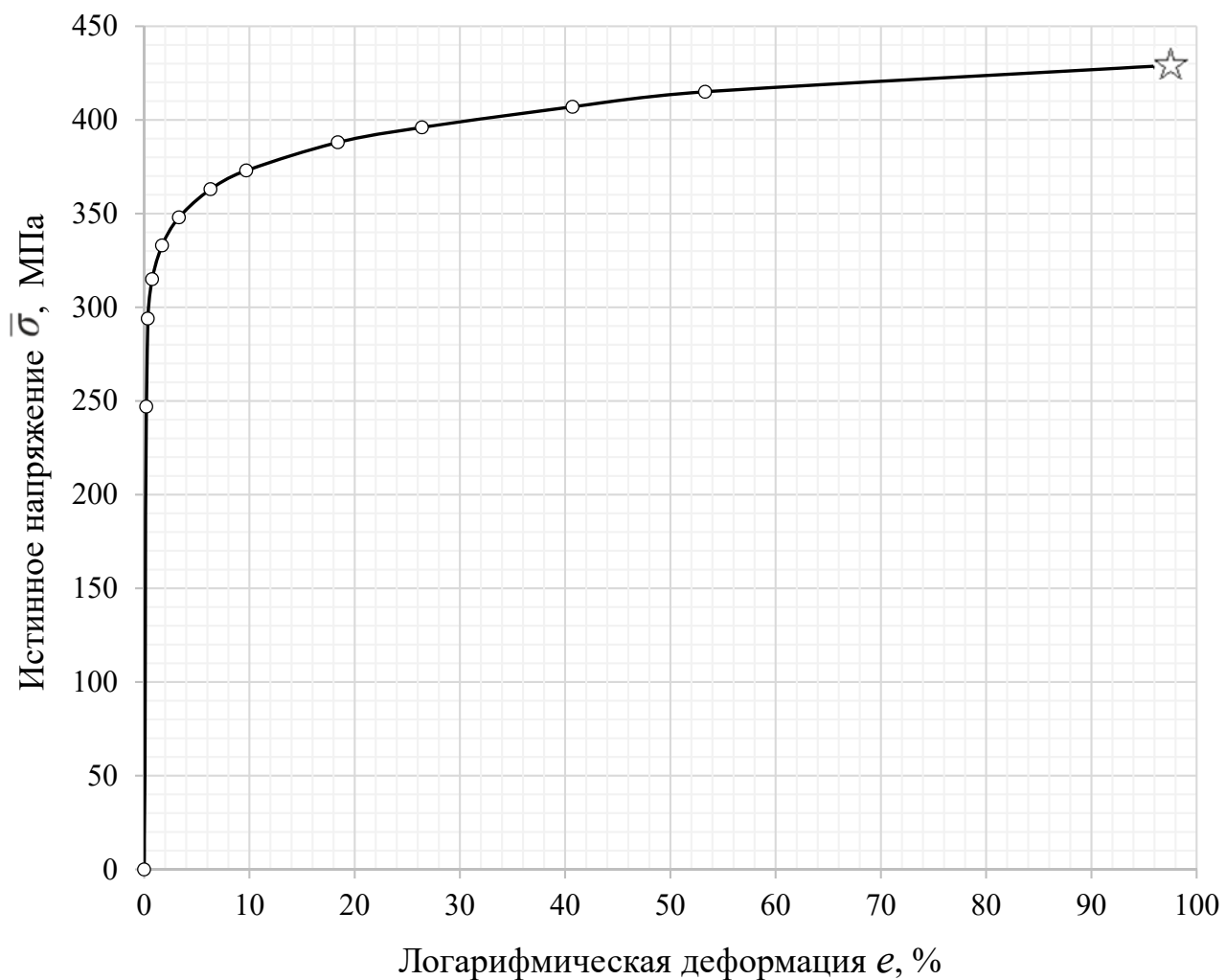


Рисунок 2.2. Диаграмма деформирования углеродистой Стали 20, аппроксимированная мультилинейной зависимостью

Соответствующая разрушению образца точка отмечена на рисунке 2.2 маркером.

Расчет бездефектного корпуса задвижки

Геометрическая модель задвижки предоставлена предприятием ООО «КОНАР». Приложенные нагрузки приняты такими же, как в техническом отчете «Расчет на прочность КН 18105 – 1200 РР», выполненном инженером Королевым. Конечно-элементная модель предоставлена доцентом кафедры «Техническая механика» В. А. Романовым (рисунок 2.3). Расчет проводился для максимально возможного в эксплуатации перепада давления $\Delta P = 8,0$ МПа .

С использованием объемной 20-узловой сетки конечных элементов SOLID186 и SOLID187 с тремя степенями свободы в каждом узле и модели материала с мультилинейным кинематическим упрочнением – модель МКIN, расчетом МКЭ получены поля напряжений и деформаций (рисунок 2.4) в бездефектном корпусе рассматриваемой шиберной задвижки DN 1200 PN 8,0 МПа в указанных выше условиях.

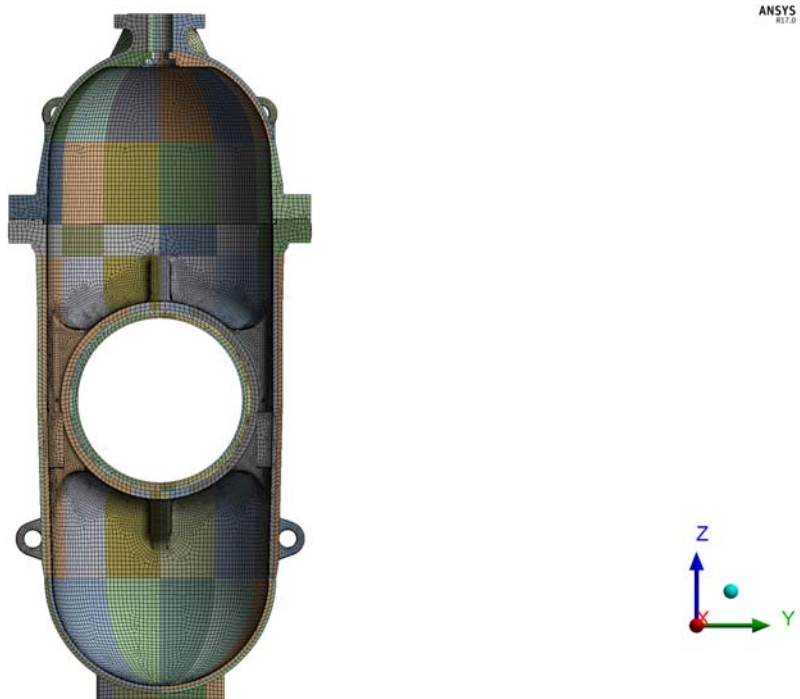
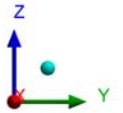
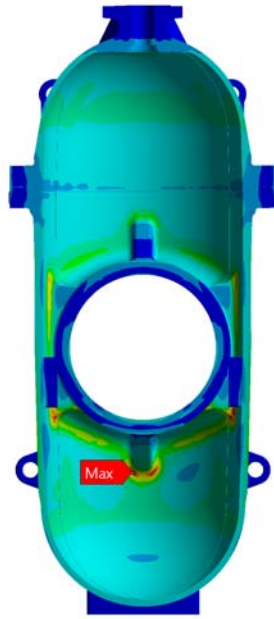
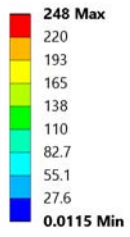


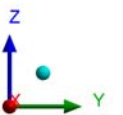
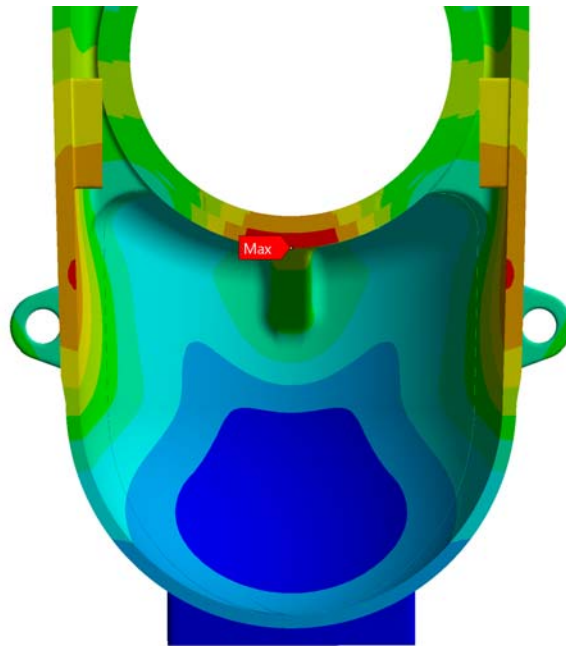
Рисунок 2.3. Конечно-элементная модель задвижки DN 1200 PN 8,0 МПа

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						43
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

B: Model
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1



B: Model
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1



					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		44

B: Model
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1

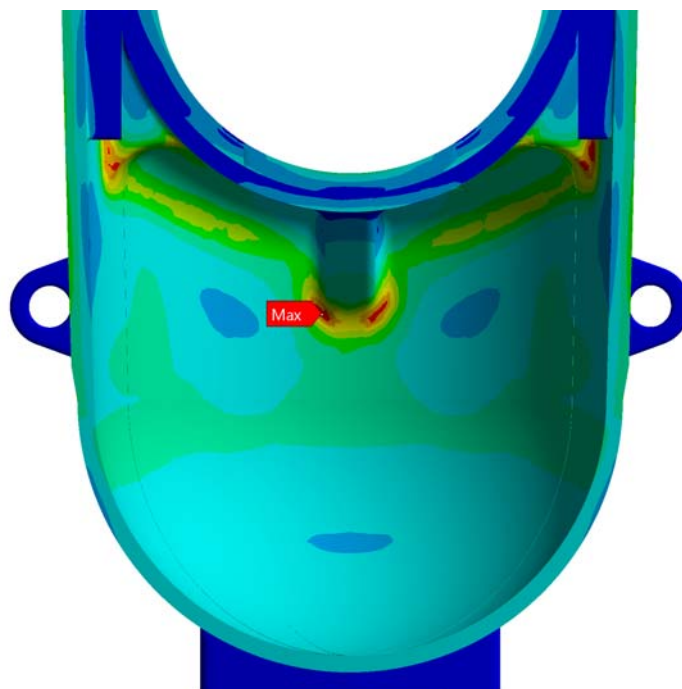
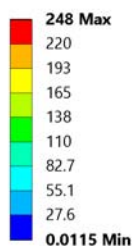


Рисунок 2.4. Поля напряжений и деформаций в корпусе задвижки без учета дефектов

В ходе численного анализа была выявлена наиболее нагруженная область в корпусе задвижки – корневая область нижнего ребра жесткости. В ней интенсивность напряжения достигает величины 248 МПа, что составляет 84 % предела текучести материала $\sigma_{0,2} = 294$ МПа .

В результате расчета были определены как отдельные компоненты напряженно-деформированного состояния, так и эквивалентные напряжения и деформации, вычисленные по теории удельной энергии формоизменения (Губера – Мизеса) для пластичного материала, для которого характерен вязкий характер разрушения.

Отметим, что поля напряжений и деформаций (см. рисунок 2.4) получились достаточно гладкими, без зон с резко выраженными пиковыми значениями. Это свидетельствует о качественной разбивке объекта конечными элементами.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						45
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

2.2 Подбор оптимальной сетки для расчета НДС конструкции с групповым гладким концентратором

Полагали, что предельно допустимый размер дефекта в наиболее нагруженной области конструкции не превышает величины, определяемой Руководящим документом [43]. В качестве дефекта были рассмотрены две сферические поры [61]. Описание геометрических параметров поры производили с помощью сгущающейся неструктурированной гексаэдрической сетки, составленной из 20-ти узловых конечных элементов второго порядка типа SOLID186 с тремя степенями свободы в каждом узле (в некоторых местах, где пакету не удавалось создать гекса-элементы, генерировались 10-ти узловые тетра-элементы второго порядка SOLID187, которые незначительно снижали точность вычисления энергии и полей перемещений и, как следствие, полей деформаций и напряжений в элементе), на примере прямоугольного образца (имитирующего стенку корпуса задвижки) при одноосном растяжении. Критерием корректности сетки служила погрешность по напряжениям, не превышающая 5 % по отношению к известным «упругим» решениям [32] или к значению теоретического коэффициента концентрации (ТКК), приведенному в справочнике [38]. В этом случае расчет МКЭ проводился для линейно упругого материала в условиях одноосного нагружения.

Конечно-элементная сетка сгущалась вблизи концентратора. Размер конечного элемента у концентратора – 0,25 мм, тогда как «генеральная» сетка вдали от концентратора имеет размер КЭ, равный 4 мм (рисунок 2.5). В ходе расчетного исследования варьировали расстояния h между центрами пор (рисунок 2.6), начиная с $h \approx d$ (где $d = 6$ мм – размер начальной несплошности) с шагом 1 мм до тех пор, пока взаимное влияние полей напряжений вокруг каждого концентратора не будет отличаться от такового для одиночного дефекта, сетка для которого была подобрана в выпускной квалификационной работе [63].

Поле эквивалентного напряжения в случае с двумя внутренними пустотелыми сферическими пустотами с расстояниями между центрами $h \approx d$ показано на рисунке 2.7.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						46
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

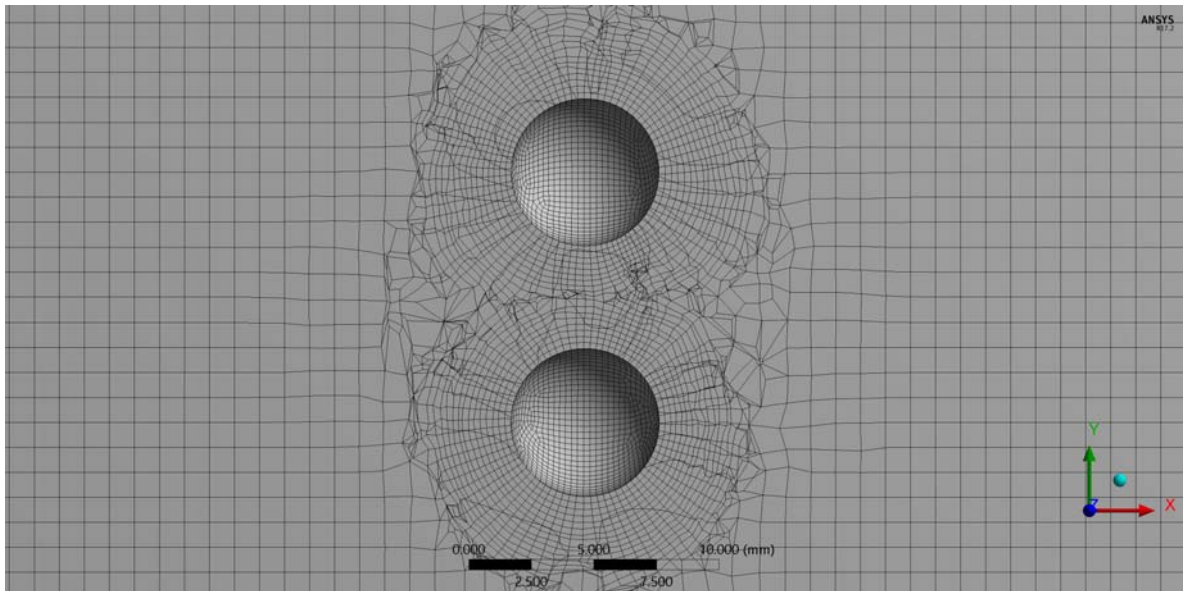


Рисунок 2.5. Конечно-элементная сетка вблизи концентраторов в виде двух пустотелых сфер с расстояниями между центрами $h = 2d$

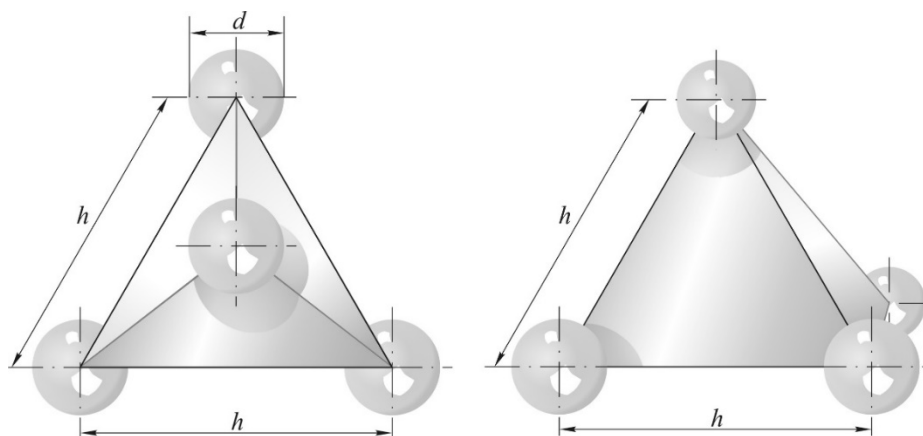


Рисунок 2.6. Геометрия расположения регулярного сферического дефекта в виде правильного тетраэдра

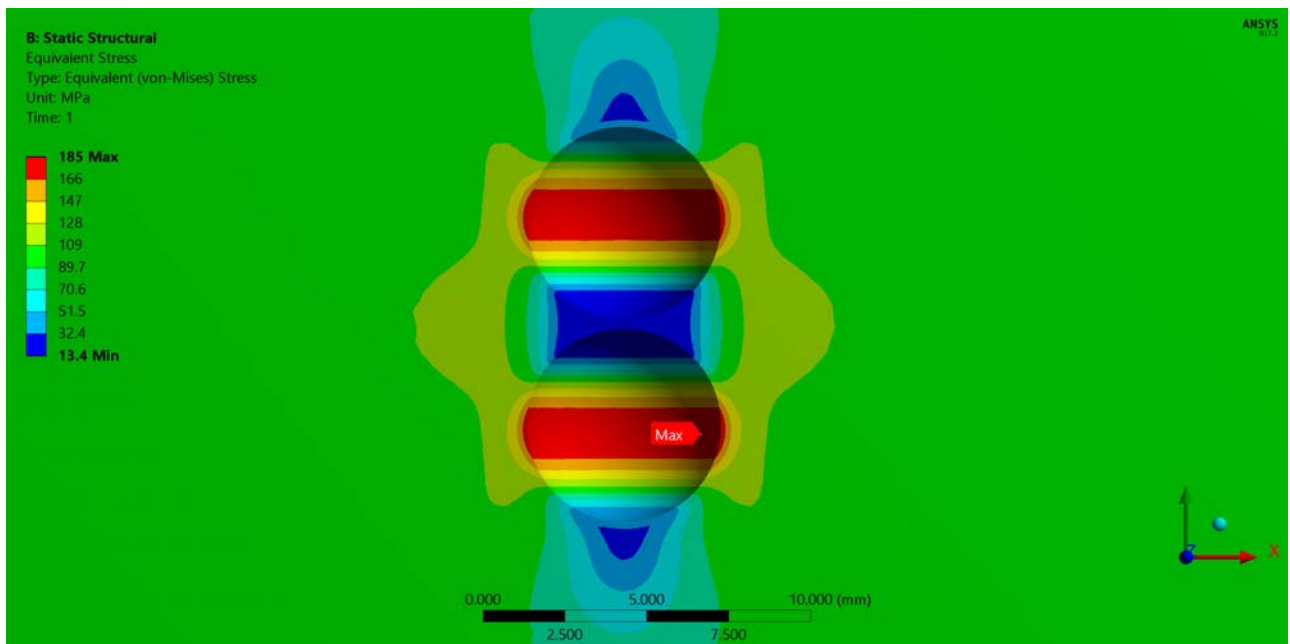
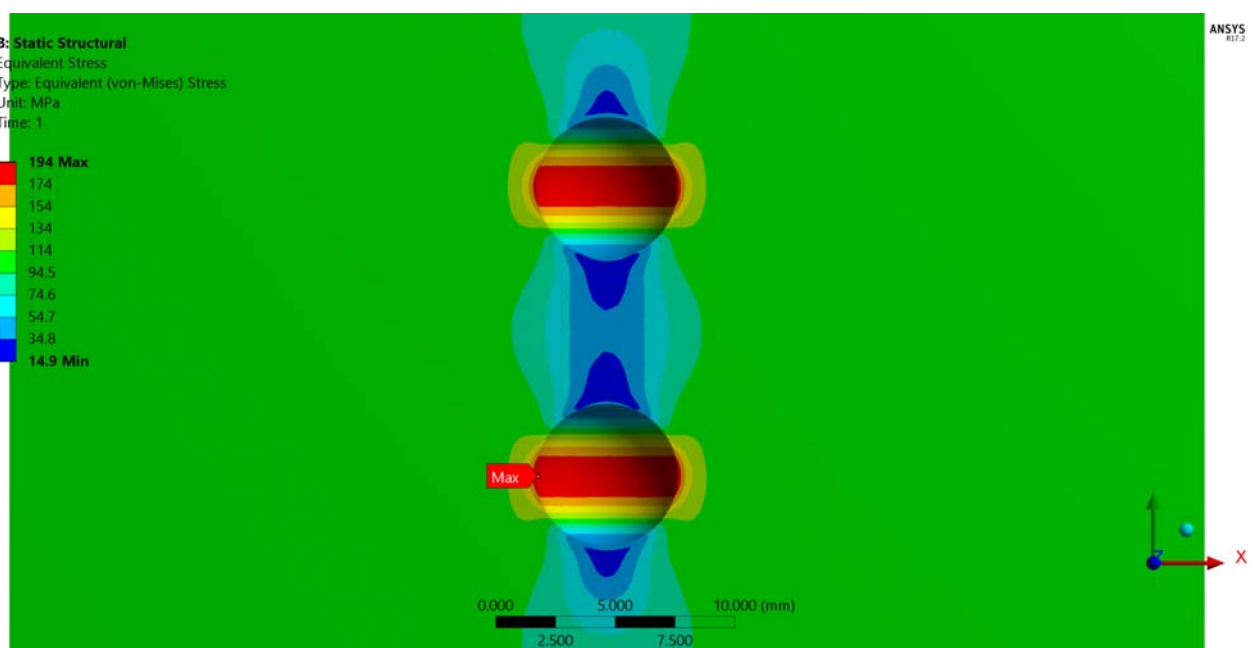


Рисунок 2.7. Поле напряжения вблизи концентраторов
в виде двух пустотелых сфер с расстояниями между центрами $h \approx d$

На рисунке 2.8 представлены результаты для расстояния $h = 2d$ и $h = 5d$.

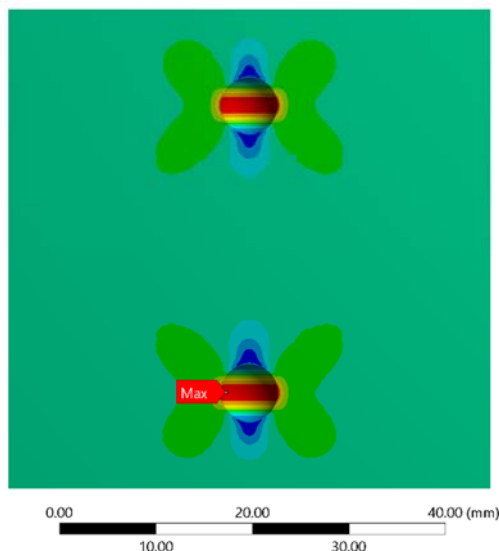
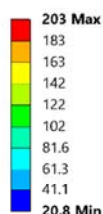


Расстояние между центрами сфер $h = 2d$

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						48
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

B: Static Structural
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1

ANSYS
 2012



Расстояние между центрами сфер $h = 5d$

Рисунок 2.8. Поля напряжений вблизи концентраторов в виде двух пустотелых сфер

О корректности разбиения сеткой КЭ судили по сходимости величины коэффициента концентрации напряжений к теоретическому решению, имеющемуся в справочнике [38] (рисунок 2.9).

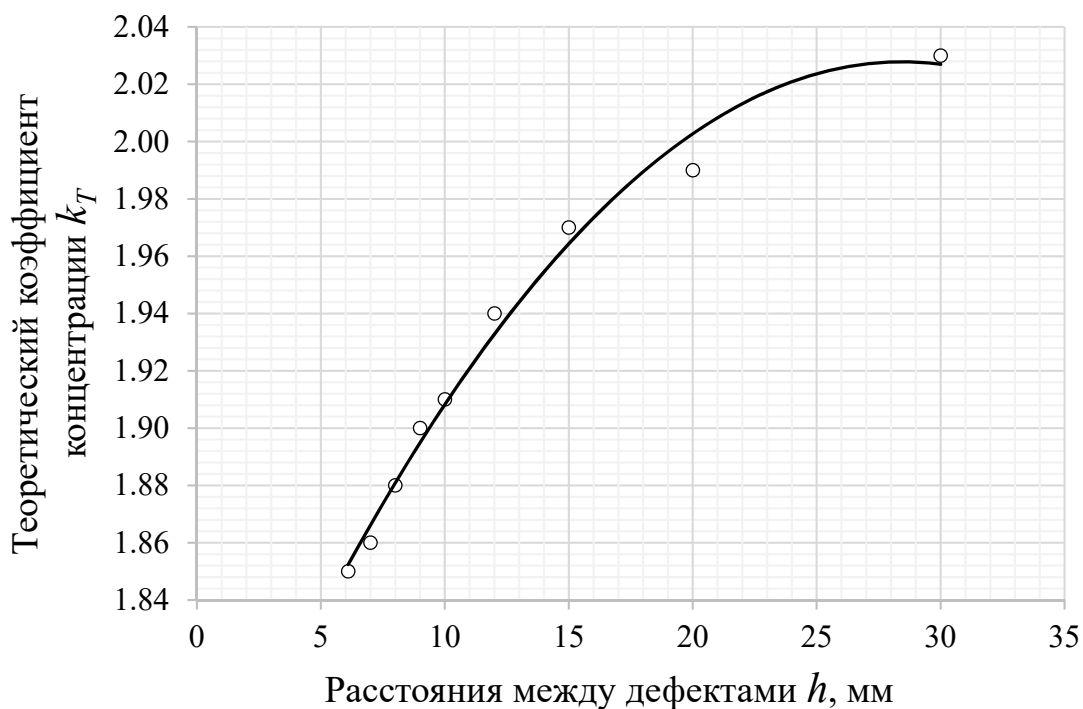


Рисунок 2.9. Сходимость упругого решения для двух сферических пустотелых дефектов по коэффициенту концентрации напряжений

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		49

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что такая КЭ сетка дает вполне удовлетворительный результат – погрешность по сравнению с аналитическим решением составляет 2,5 %, (теоретический коэффициент концентрации напряжений для двух сфер равен 1,99 при $d/h = 0,5$ (см. рисунок 2.8) [38], результат численного решения – 1,94), тогда как при достаточном удалении концентраторов друг от друга коэффициент стремится к значению 2,05 (численное решение – 2,03 [38]).

Аналогичным образом осуществлялся подбор КЭ сетки и для четырех сферических концентраторов, расположение которых показано на рисунке 2.10.

Поля эквивалентных напряжений в случае группового сферического дефекта, расстояние между центрами несплошностями которого $h \approx d$, представлены на рисунке 2.11. Результат для расстояния $h = 1,17d$ показан на рисунке 2.12.

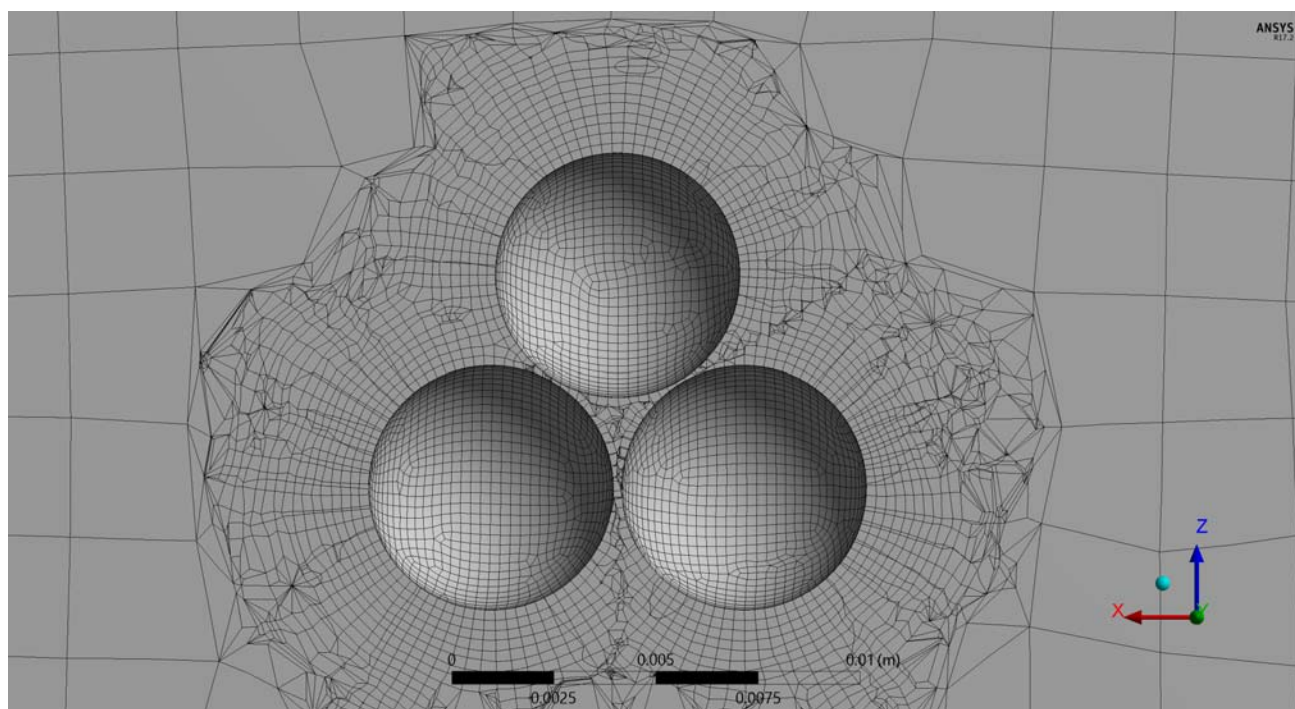
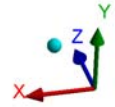
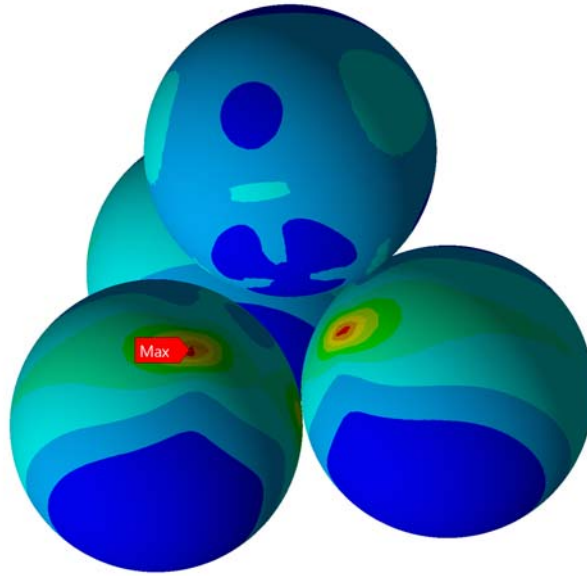
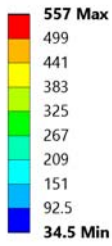


Рисунок 2.10. Конечно-элементная сетка вблизи концентраторов в виде четырех пустотелых сфер с расстояниями между центрами $h \approx d$

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		50

D: Elastic_solution
 Equivalent Stress_defects
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: Pa
 Time: 1

ANSYS
 8.1.2



D: Elastic_solution
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: Pa
 Time: 1

ANSYS
 8.1.2

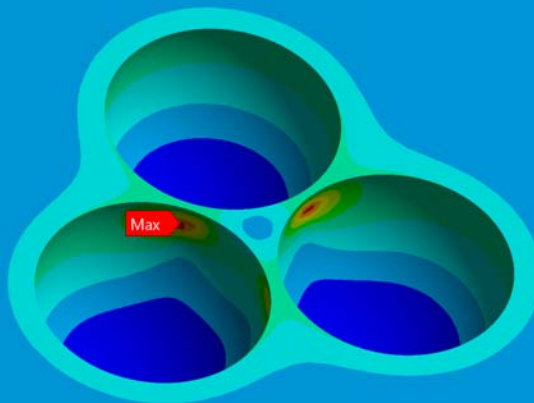
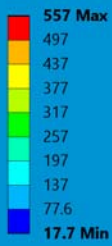


Рисунок 2.11. Поля напряжений вблизи концентраторов в виде четырех пустотелых сфер с расстояниями между центрами $h \approx d$

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						51
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

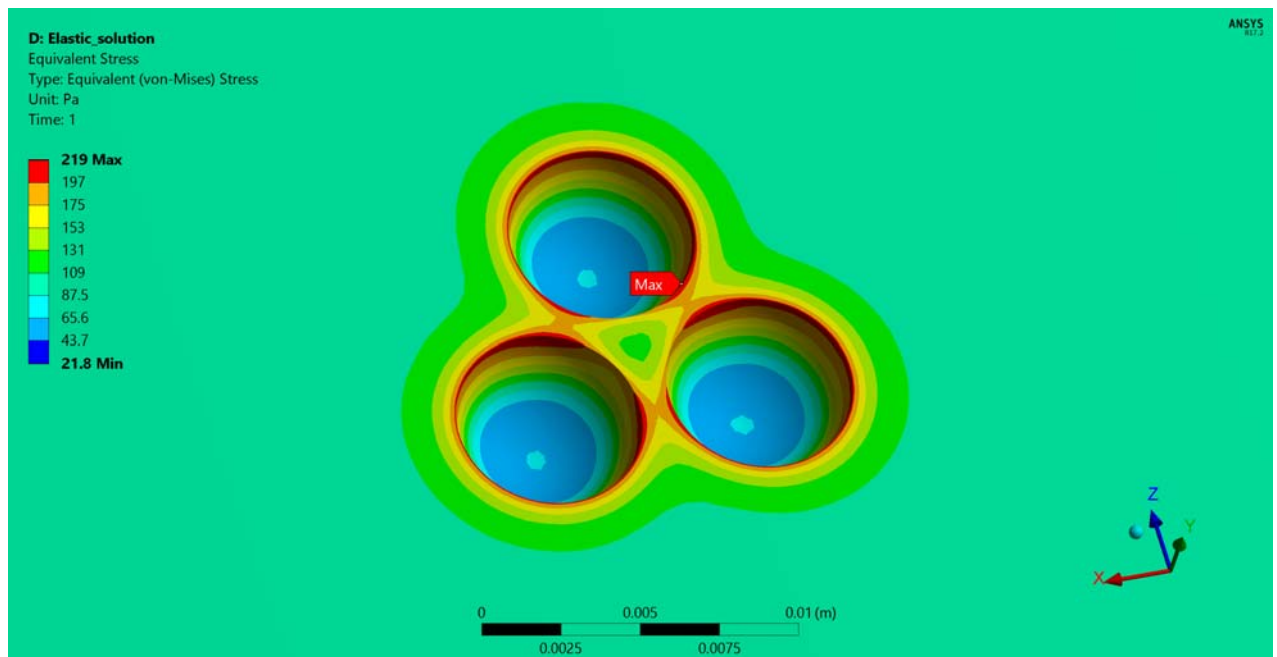


Рисунок 2.12. Поля напряжений вблизи концентраторов в виде четырех пустотелых сфер с расстояниями между центрами $h = 1,17d$

Подбор КЭ сетки для четырех сферических концентраторов, расстояние между центрами которых $h = 1,5d$, показан на рисунке 2.13. На рисунке 2.14 представлены результаты для расстояния между центрами $h = 1,5d$.

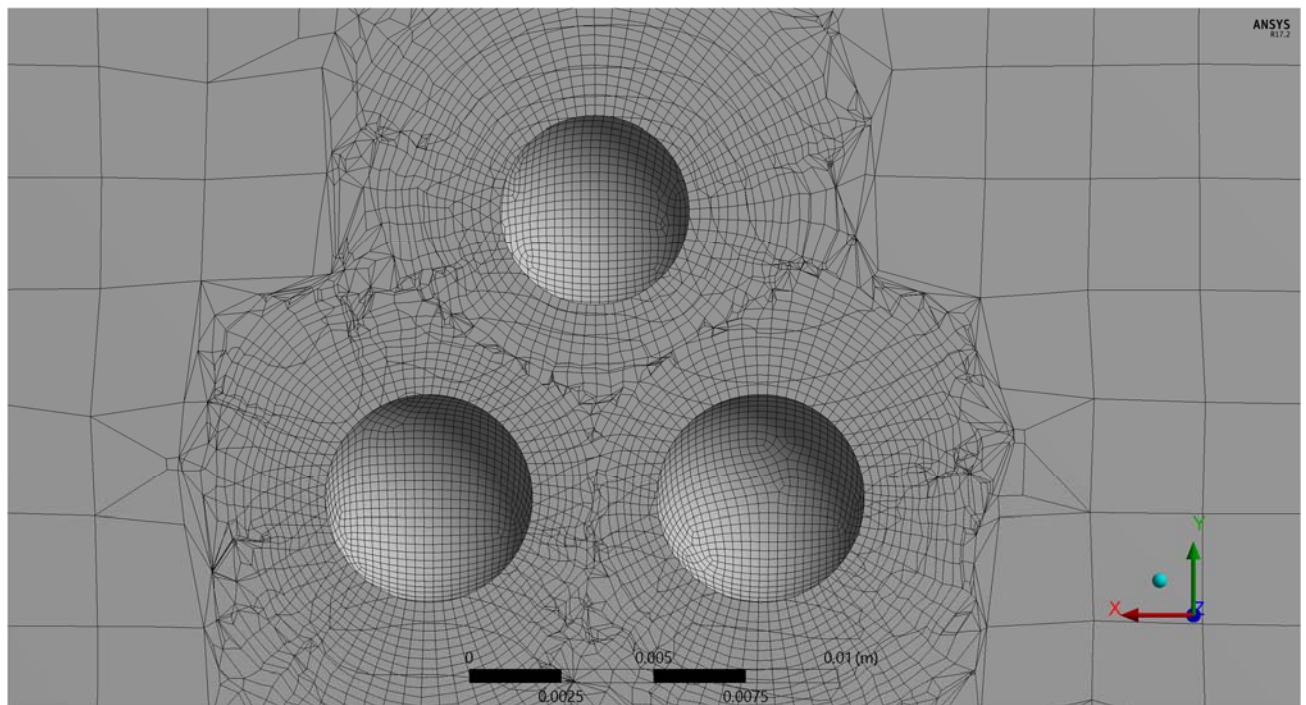
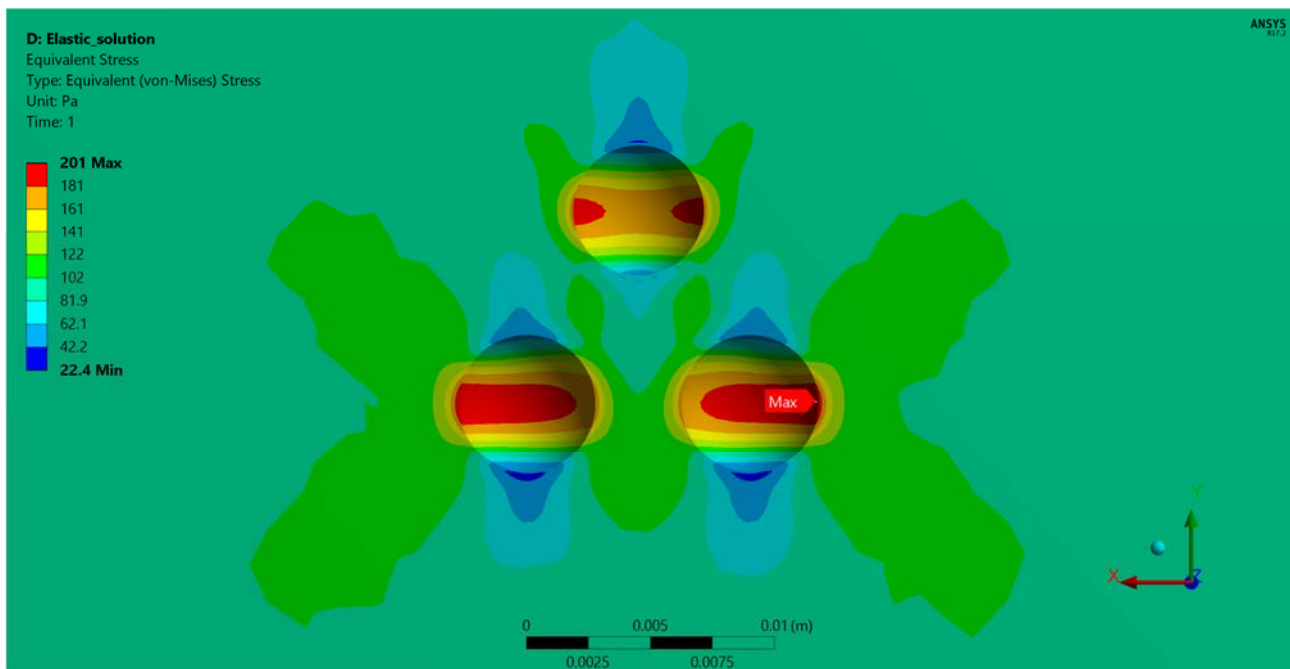
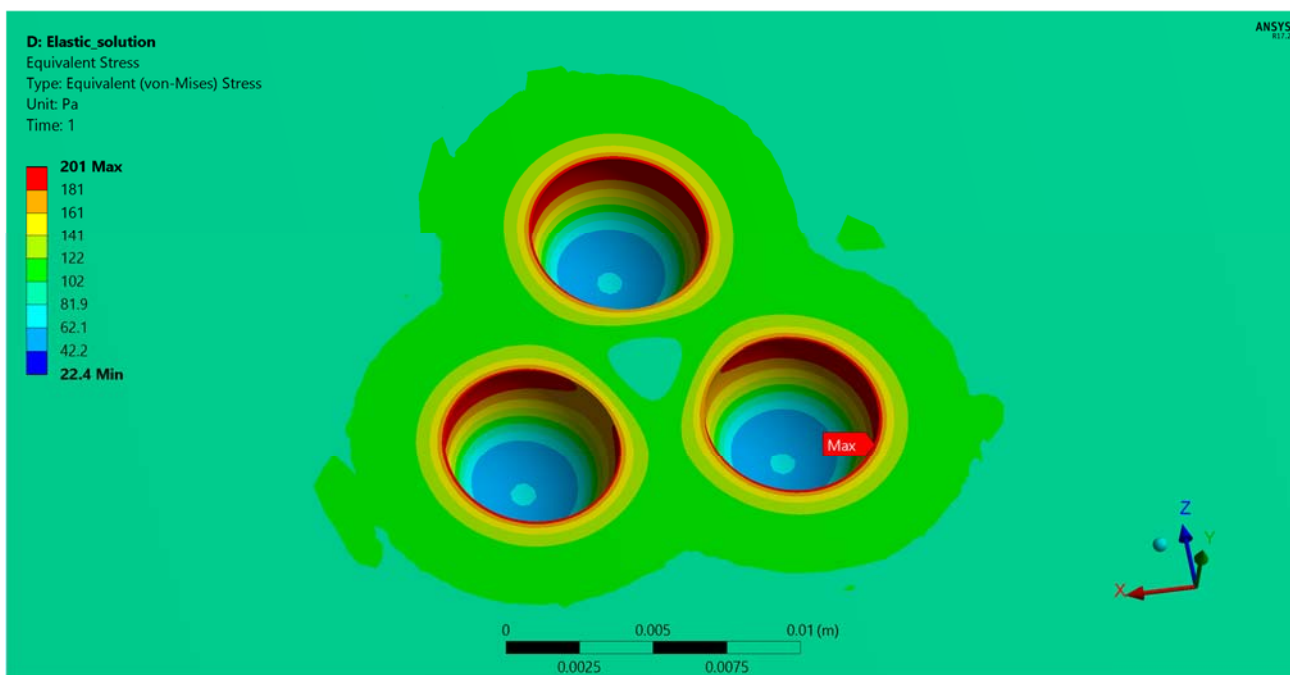


Рисунок 2.13. Конечно-элементная сетка вблизи концентраторов в виде четырех пустотелых сфер с расстояниями между центрами $h = 1,5d$



Вид спереди



Вид сверху

Рисунок 2.14. Поля напряжений вблизи концентраторов в виде четырех пустотелых сфер с расстояниями между центрами $h = 1,5d$

Полученная при упругом расчете конечно-элементная сетка проверялась и за пределами упругости, так как известно, что нелинейные расчеты более чувстви-

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		53

тельны к размеру конечного элемента: результат зависит, главным образом, от локального размера сетки в исследуемой области, например, в зоне концентрации напряжений.

На рисунке 2.14 продемонстрирована сходимость величины коэффициента концентрации напряжений. Как видно (рисунок 2.15), решение МКЭ медленно сходится к точному решению; сингулярность, т.е. резкое стремление к высоким значениям либо к бесконечности, незаметна. Однако с уменьшением размера конечного элемента ($<0,2$ мм) размерность задачи увеличивается, что приводит к значительному увеличению вычислительных затрат. В случае размера сетки $0,2$ мм ТКК принимает значение $\sim 4,7$ вместо $5,57$.

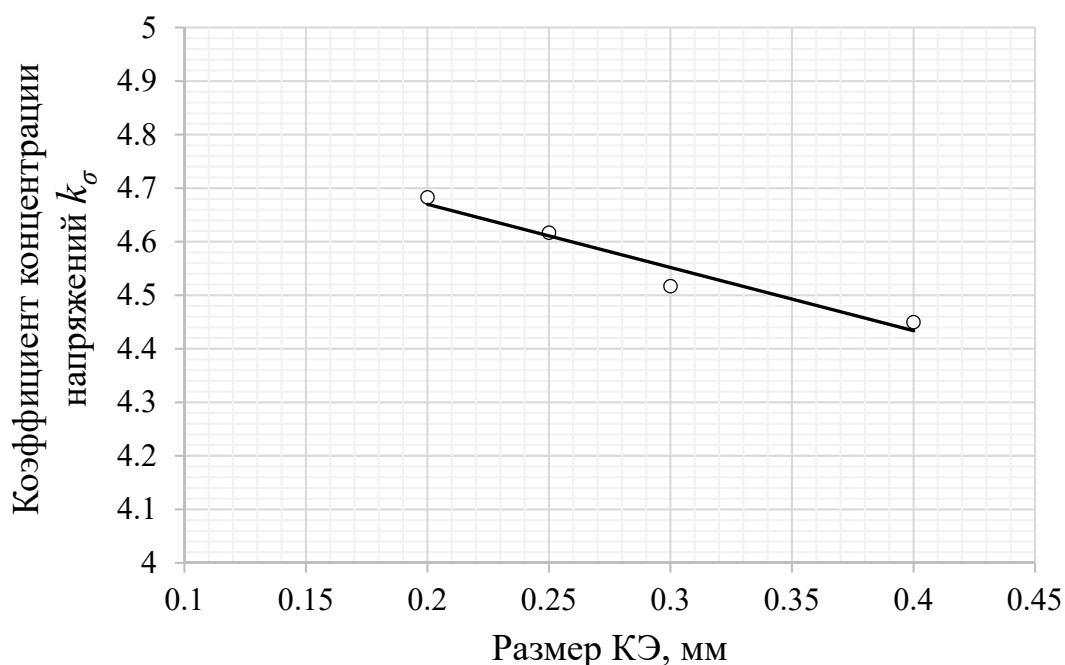


Рисунок 2.15. Сходимость неупругого решения для четырех сферических пустотелых дефектов по коэффициенту концентрации напряжений

Анализируя полученный результат, можно сделать вывод, что теоретический коэффициент концентрации напряжений, полученный численным путем, по мере увеличения расстояния между несплошностями приближается к значению ТКК для одиночной сферической полости, равному $2,05$ [38]. Следует отметить, что при $h \approx d$ возникают наибольшие напряжения в местах соприкосновения не-

сплошностей, коэффициент концентрации при этом равен $k_T = 5,57$ в случае упругого поведения материала, в случае неупругого с учетом реальной диаграммы деформирования – $k_\sigma = 4,7$; причем в области с пластической деформацией $p \approx 0,1\%$ на уровне напряжения в образце, близкого к пределу текучести материала, максимальное значение коэффициента концентрации деформаций достигает значения $k_\epsilon = 10,2$. Такое различие в коэффициентах концентрации напряжений k_T и k_σ объясняется тем, что в области концентрации в результате пластического течения происходит выравнивание главных напряжений, рост максимального напряжения замедляется и, как следствие, уменьшаются градиенты напряжений.

Таким образом, в подконструкции, включающей регулярный дефект в виде тетраэдра, рассмотренная выше ситуация окажется наиболее опасной. Численный анализ коэффициентов концентрации напряжений и сопоставление их с известными решениями свидетельствует, что подобранные на примере простых моделей КЭ сетки могут успешно использоваться для дальнейшего расчета НДС конструкции с такими дефектами в условиях упругопластической работы материала.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						55
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

3 ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДКОНСТРУКЦИИ С ДЕФЕКТАМИ

Как известно, метод подконструкций заключается в выделении интересующей (например, наиболее нагруженной зоны) конструкции и задании граничных условий для этого фрагмента путем переноса полученных расчетом общей «глобальной» модели перемещений на узлы подконструкции с мелкой дискретизацией расчетной области. Такой прием позволяет значительно сократить общее число КЭ и использовать более плотную, неравномерную сетку, что повышает точность расчета и снижает его трудоемкость. Предполагается, что особенности выделенной зоны, в частности, концентраторы напряжений, не вносят существенного возмущения в напряженно-деформированное состояние на границах такой подконструкции; выполнение данного условия должно контролироваться расчетчиком.

В соответствии со сказанным был выделен фрагмент корпуса задвижки (корневая область ребра жесткости) с наибольшим градиентом и величиной напряжений. На границы этой области наложены перемещения, полученные расчетом всей конструкции целиком с более крупной «глобальной» сеткой КЭ. Затем был выполнен расчет НДС (рисунок 3.1) выделенной подконструкции с более мелкой сеткой, которая также проверялась на сеточную сходимость по напряжениям (рисунок 3.2).

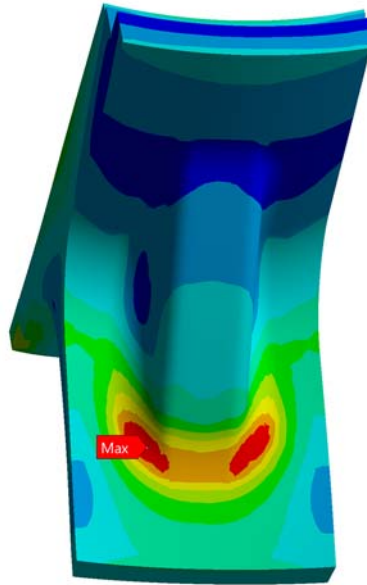
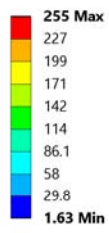
Как видно по графику (см. рисунок 3.2) при определенном размере КЭ напряжения сходятся к определенному значению, что говорит о приемлемом разбиении на конечные элементы и позволяет приступить к моделированию внутренних пор.

Полагали, что групповой пустотелый сферический дефект расположен в наиболее нагруженной зоне – с наибольшим первым главным напряжением.

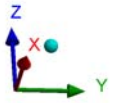
В ходе расчетного исследования варьировали расстояние между порами и эксцентриситет их расположения (глубину залегания относительно поверхности стенки корпуса). В соответствии с Руководящим документом РД-19.100.00-КТН-022-13 [43] размер начальной предельно допустимой несплошности был принят равным максимально допустимому – 6 мм. Последний определяют по результатам радиографического контроля (РК) при толщине стенки отливки $50 < S \leq 100$ мм.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		56

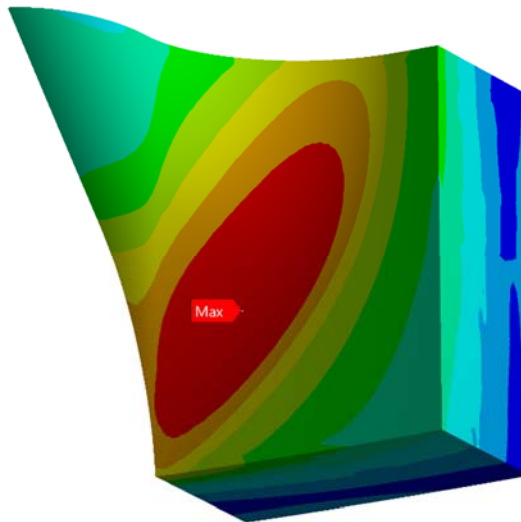
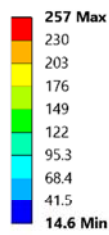
E: SubModel
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1



ANSYS
R17.2



G: SubModel - final
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1



ANSYS
R17.2

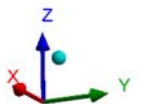


Рисунок 3.1. Применение метода подконструкции

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						57
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

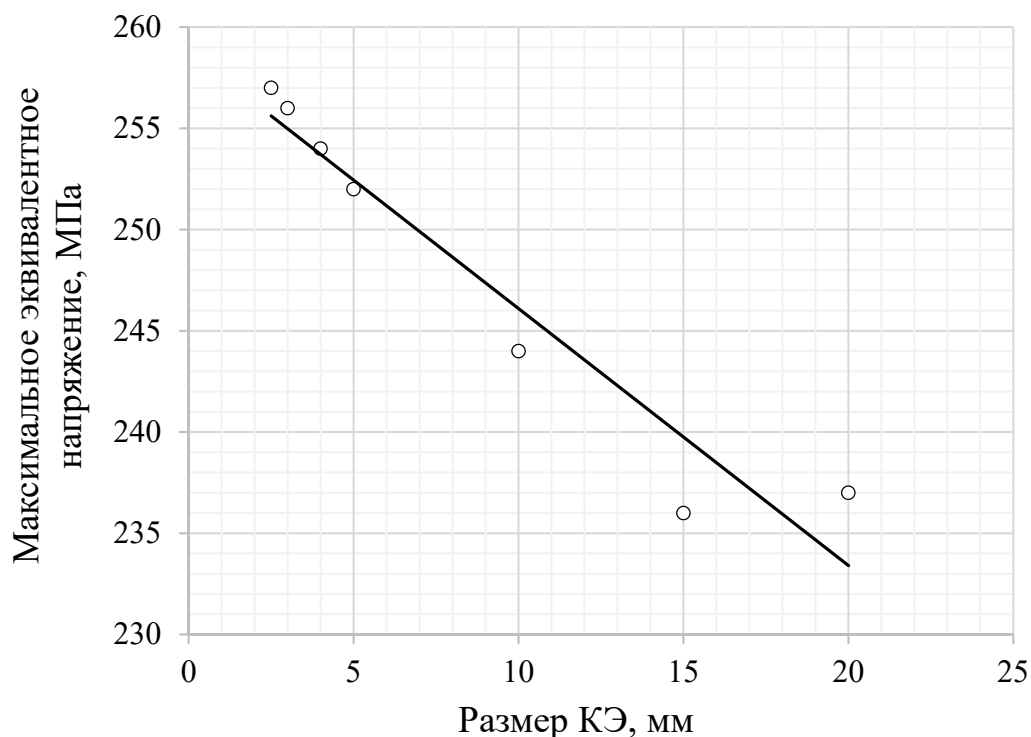


Рисунок 3.2. Проверка сходимости «упругого» решения

Расстояние между несплошностями увеличивали с шагом 0,5 мм до тех пор, пока перестало сказываться взаимное влияние полей напряжений вокруг каждого концентратора. По мере удаления пор друг от друга подсчитывали значение фактического коэффициента запаса по предельной деформации $n_p = \frac{p_{и}^f}{p_{и}}$, соответствующее

текущему напряженно-деформированному состоянию

$\left(p_{и}^f = p_{и} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{и}} \right) \right)$; здесь σ_0 – среднее напряжение; $\sigma_{и}$ – интенсивность). Варьирование

эксцентриситета расположения дефекта e относительно центрального положения производили в обе стороны (в сторону более нагруженной области – внутренней поверхности стенки – величина e считалась положительной, в сторону менее нагруженной области – внешней поверхности стенки – отрицательной). Модель группового сферического дефекта с расстоянием между полостями 6 мм показана на рисунке 3.3, на рисунке 3.4 – соответствующая конечно-элементная модель.

Как видно (см. рисунок 3.4), сетка имеет нерегулярную (неструктурированную) сгущающуюся гексаэдрическую геометрию, которая позволяет вполне удовлетворительно описывать поля напряжений и деформаций вблизи сферических концентраторов.

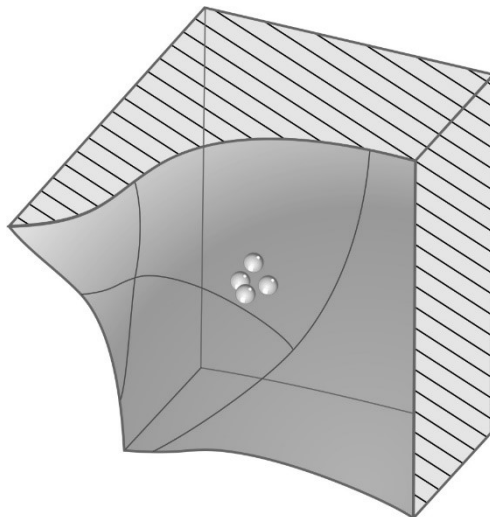


Рисунок 3.3. Модель внутреннего группового пустотелого сферического дефекта с расстоянием между порами 6,1 мм

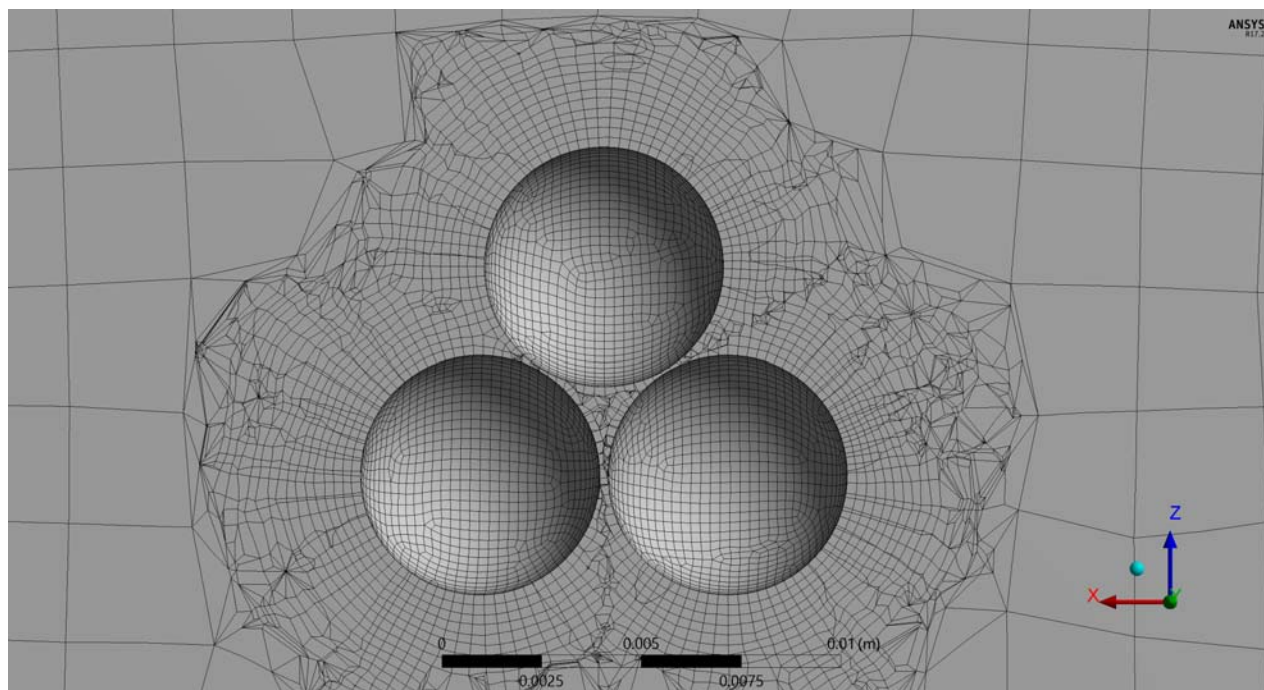
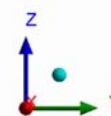
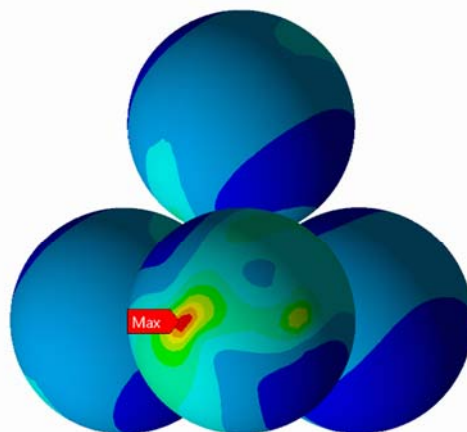
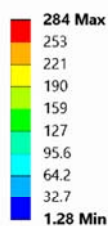


Рисунок 3.4. Конечно-элементная сетка вблизи группового сферического концентратора

На рисунке 3.5 приведены результаты расчета НДС в пограничном слое центрально расположенного ($e = 0$) группового сферического дефекта с расстоянием между несплошностями 6,1 мм.

K: Plastic_solution
 Equivalent Stress - defects
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1

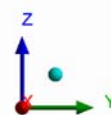
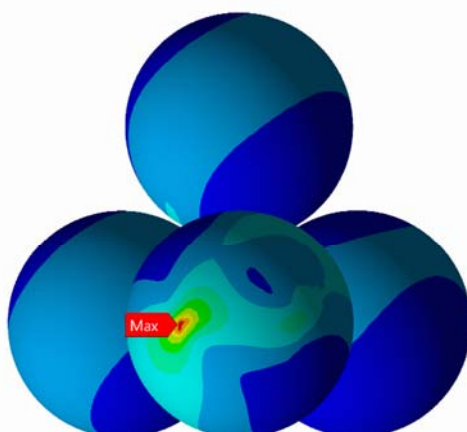
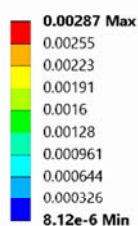
ANSYS
 13.2



Поле эквивалентного по Мизесу напряжения в пограничном слое группового дефекта

K: Plastic_solution
 Maximum Principal Plastic Strain
 Expression: EPPL1
 Unit: mm/mm
 Time: 1

ANSYS
 13.2

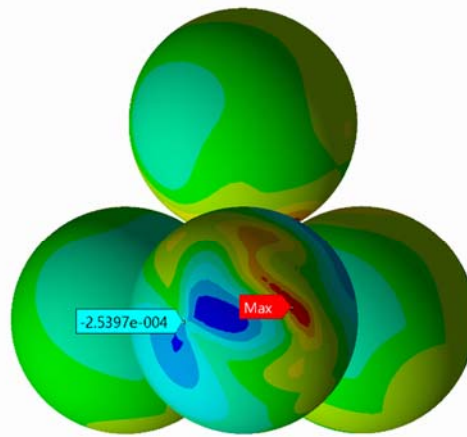


Распределение первой главной пластической деформации в пограничном слое группового дефекта

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		60

K: Plastic_solution
Middle Principal Plastic Strain
Expression: EPPL2
Unit: mm/mm
Time: 1

0.000289 Max
0.000208
0.000127
4.65e-5
-3.42e-5
-0.000115
-0.000196
-0.000277
-0.000357
-0.000438 Min

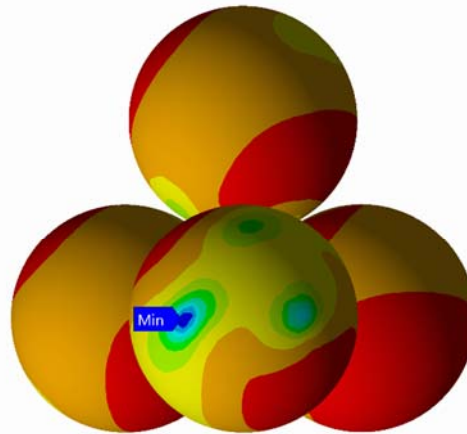


0.000 2.500 5.000 7.500 10.000 (mm)

Распределение второй главной пластической деформации
в пограничном слое группового дефекта

K: Plastic_solution
Minimum Principal Elastic Strain
Type: Minimum Principal Elastic Strain
Unit: mm/mm
Time: 1

-3.65e-6 Max
-7.94e-5
-0.000155
-0.000231
-0.000307
-0.000383
-0.000458
-0.000534
-0.00061
-0.000686 Min



0.000 2.500 5.000 7.500 10.000 (mm)

Распределение третьей главной пластической деформации
в пограничном слое группового дефекта

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						61
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

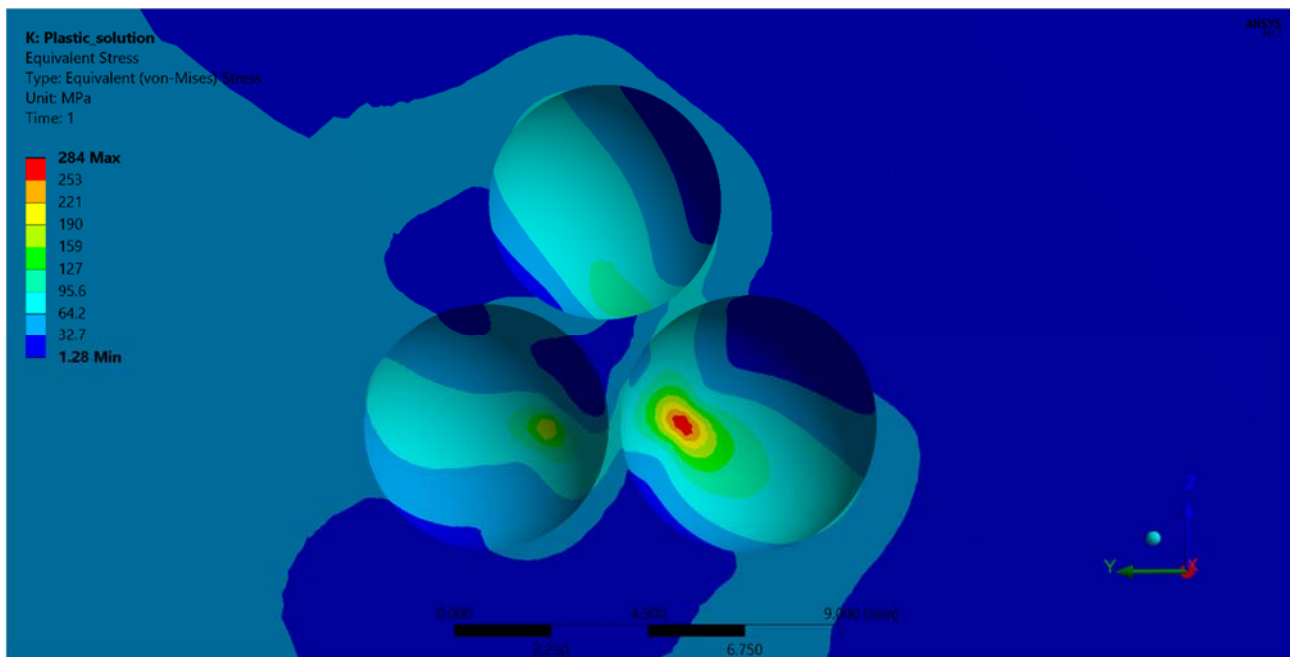


Рисунок 3.5. Поле напряжения вблизи группового сферического концентратора с расстоянием между несплошностями 6,1 мм при центральном расположении ($e = 0$)

Наступление предельного состояния – нарушение сплошности материала – определяли с помощью деформационного критерия В. Л. Колмогорова, представляющего критерий вязкого разрушения в условиях статического однократного нагружения при сложном напряженном состоянии. Критерий может быть записан как в терминах деформаций

$$\frac{p_{\text{н}}^f}{p_f} = a \exp\left(b \frac{\sigma_0}{\sigma_{\text{н}}}\right), \quad (3.1)$$

где $p_{\text{н}}^f$ – интенсивность логарифмической пластической деформации в момент разрушения;

$$p_f = \ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right) \text{ – ресурс пластичности материала при одноосном растяжении;}$$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \text{ – среднее напряжение;}$$

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \text{ – интенсивность напряжения;}$$

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		62

$$a = \left(\frac{\tau_B \sqrt{3}}{\bar{\sigma}_f} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad b = -3 \ln(a) \text{ – постоянные материала в рассматриваемых усло-}$$

виях;

τ_B – предел прочности при сдвиге;

$\bar{\sigma}_f \equiv S_k$ – истинное сопротивление разрыву,

так и, с учетом однозначной связи напряжения и деформации обобщенной кривой деформирования, в терминах напряжений

$$\frac{\sigma_{и}^f}{\bar{\sigma}_f} = \left[a \exp \left(b \frac{\sigma_0}{\sigma_{и}} \right) \right]^m. \quad (3.2)$$

Фактический коэффициент запаса по предельной логарифмической пластической деформации, которая, в свою очередь, зависит от так называемой жесткости напряженного состояния ($p_{и}^f = p_{и}^f \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{и}} \right)$), определяется по формуле

$$n_p = \frac{p_{и}^f}{p_{и}}. \quad (3.3)$$

Здесь $p_{и} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(p_1 - p_2)^2 + (p_2 - p_3)^2 + (p_3 - p_1)^2}$ – интенсивность логарифмической пластической деформации; $p_i = \ln(1 + \varepsilon_{pi})$, $i = 1, 2, 3$ – главные логарифмические пластические деформации; ε_{pi} – главные инженерные пластические деформации.

В виду отсутствия экспериментальных данных для Стали 20 при кручении, предел прочности при сдвиге примем $\tau_B = 0,6 \bar{\sigma}_f$.

Подсчитаем фактический коэффициент запаса по предельной деформации для внутреннего группового пустотелого сферического дефекта с расстоянием между несплошностями 6 мм при центральном ($e = 0$) его расположении.

Используя найденные ранее значения деформационных и прочностных характеристик материала

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						63
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

$$m = 0,061, p_f = 0,968, \bar{\sigma}_f = 429 \text{ МПа}, \tau_B = 257 \text{ МПа}, a = 1,88, b = -1,89$$

и используя полученные результаты расчета главных напряжений и главных пластических деформаций

$$\begin{aligned} \sigma_1 = 330 \text{ МПа}, \sigma_2 = 142 \text{ МПа}, \sigma_3 = 1,85 \text{ МПа} \\ p_1 = 0,00287, p_2 = -0,000254, p_3 = -0,00259 \end{aligned} ;$$

подсчитаем величины параметров

$$\sigma_{\text{н}} = 285 \text{ МПа}, \sigma_0 = 158 \text{ МПа}.$$

Параметр жесткости напряженного состояния есть

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_{\text{н}}} = 0,554.$$

Интенсивность логарифмической пластической деформации –

$$p_{\text{н}} = 3,16 \cdot 10^{-3}.$$

Интенсивность логарифмической пластической деформации в момент разрушения составит

$$p_{\text{н}}^f = 0,637.$$

Тогда фактический коэффициент запаса по предельной деформации будет равен

$$n_p = 201.$$

Подсчитывая фактический коэффициент запаса по предельному напряжению на основе указанного значения n_p , получим

$$n_{\sigma} = 1,38.$$

Корреляционные зависимости коэффициентов запаса по предельной деформации и напряжению в связи с расстоянием между несплошностями и эксцентриситетом группового сферического дефекта представлены в виде графика (рисунок 3.6), номограмм (рисунки 3.7, 3.8, 3.9), а также в виде поверхностей $n_p = n_p(h, e)$ (рисунок 3.10) и $n_{\sigma} = n_{\sigma}(h, e)$ (рисунок 3.11).

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						64
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

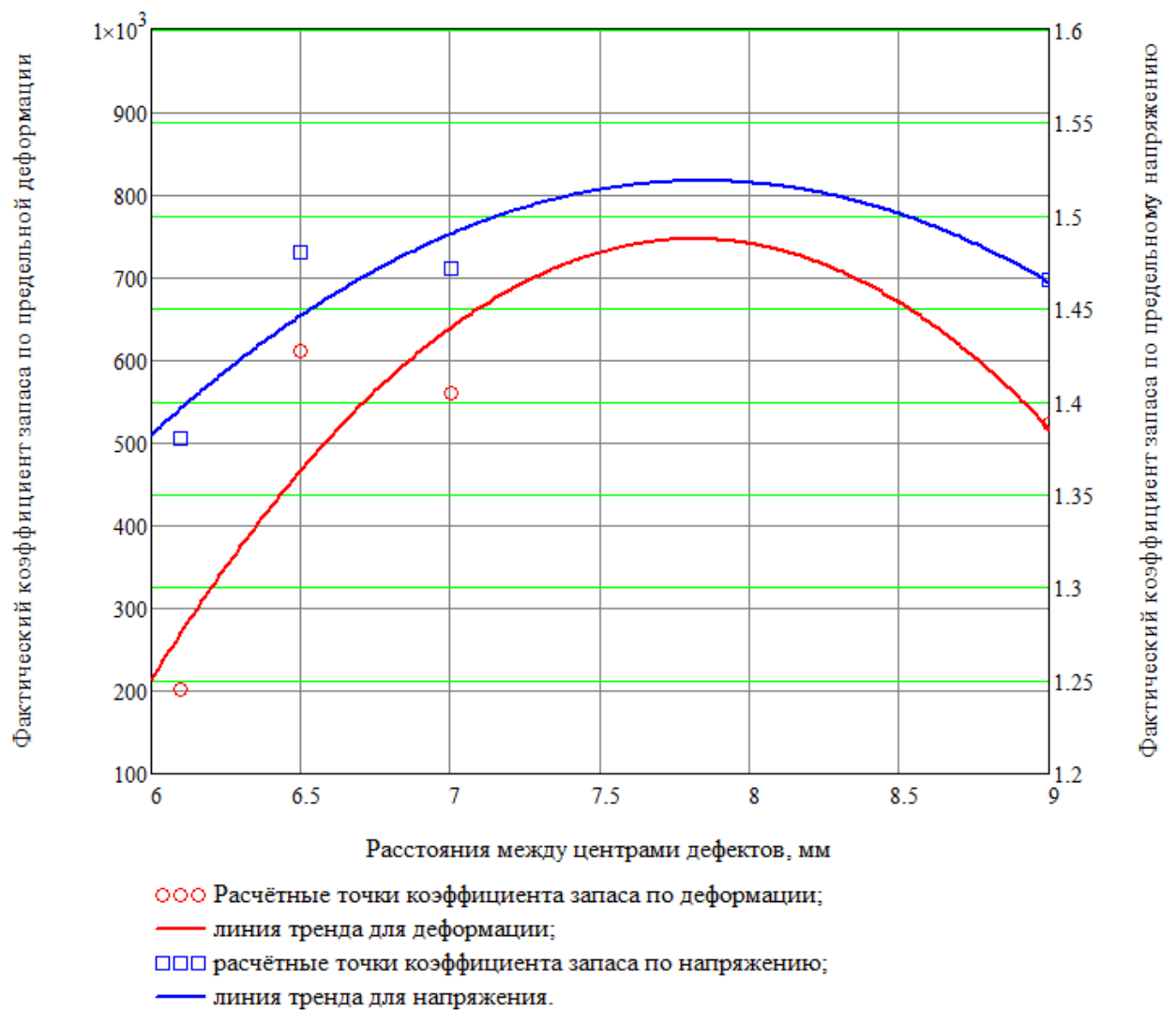


Рисунок 3.6. Зависимость фактического коэффициента запаса по предельной деформации и напряжению от расстояния центрально расположенного группового дефекта

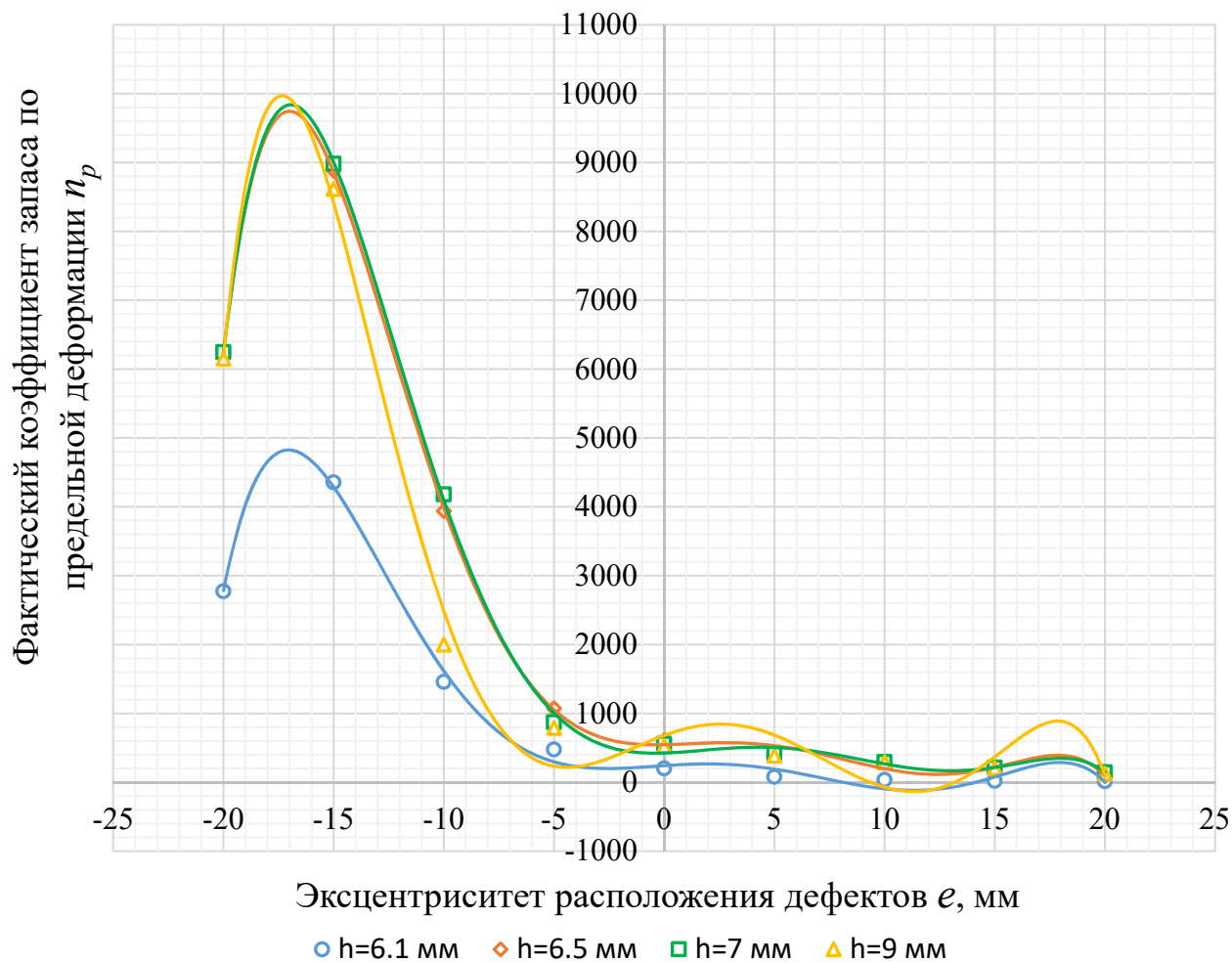


Рисунок 3.7. Зависимость фактического коэффициента запаса по предельной деформации от эксцентриситета расположения дефектов

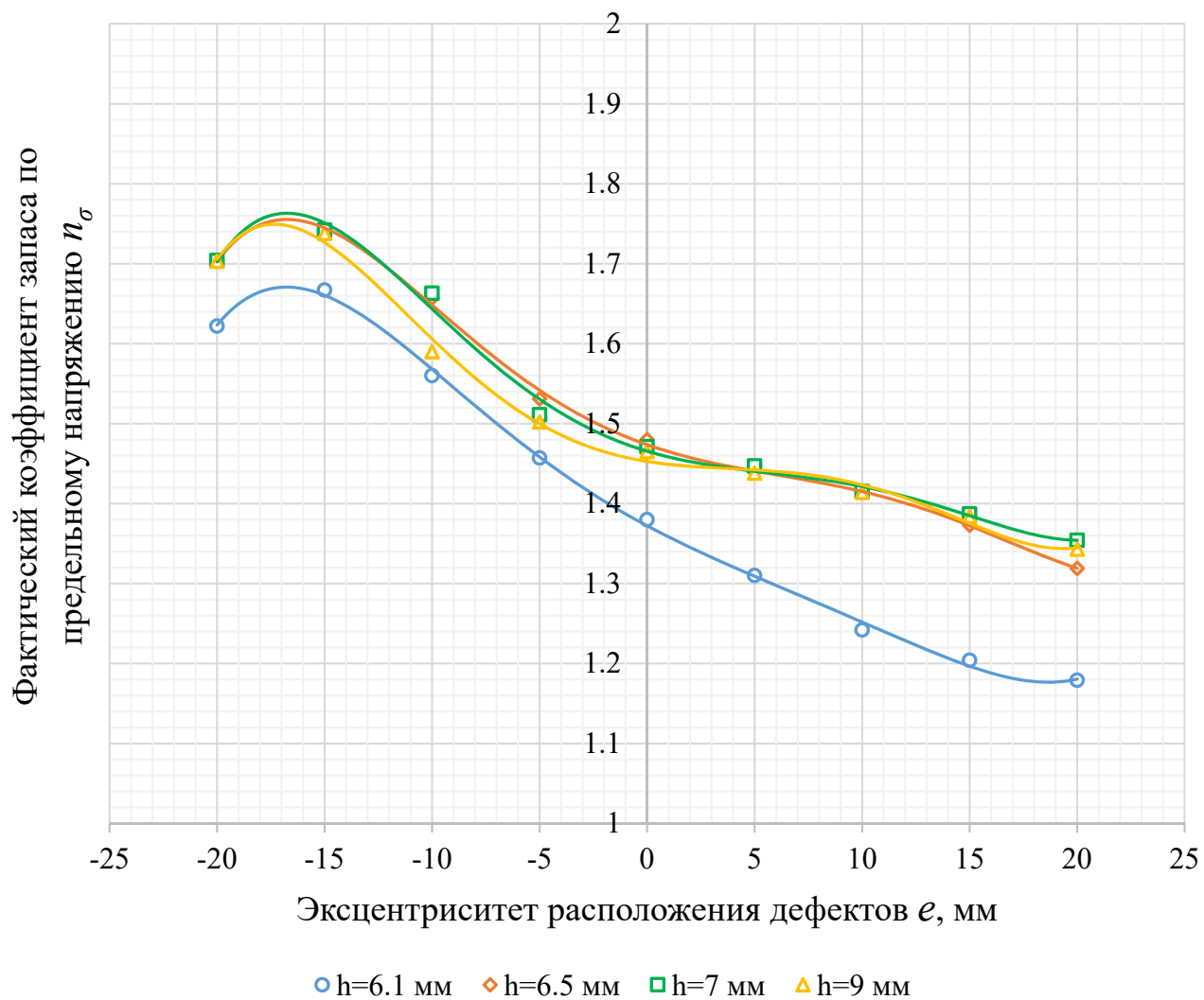


Рисунок 3.8. Зависимость фактического коэффициента запаса по предельному напряжению от эксцентриситета расположения дефектов

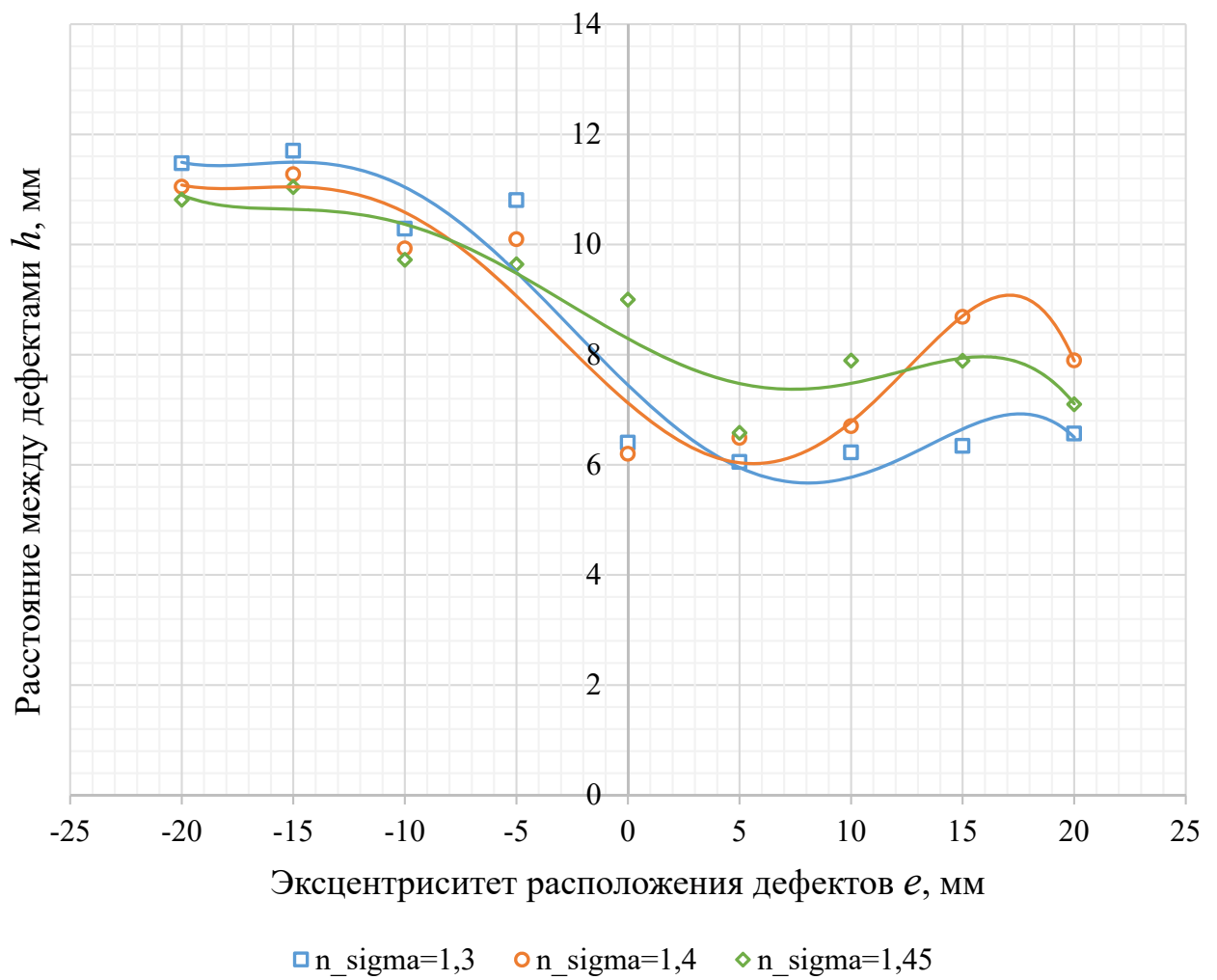


Рисунок 3.9. Зависимость расстояния между сферическими дефектами от эксцентриситета их расположения при фиксированных значениях коэффициента запаса по предельному напряжению, равному $n_{\sigma} = 1,3; 1,4; 1,45$

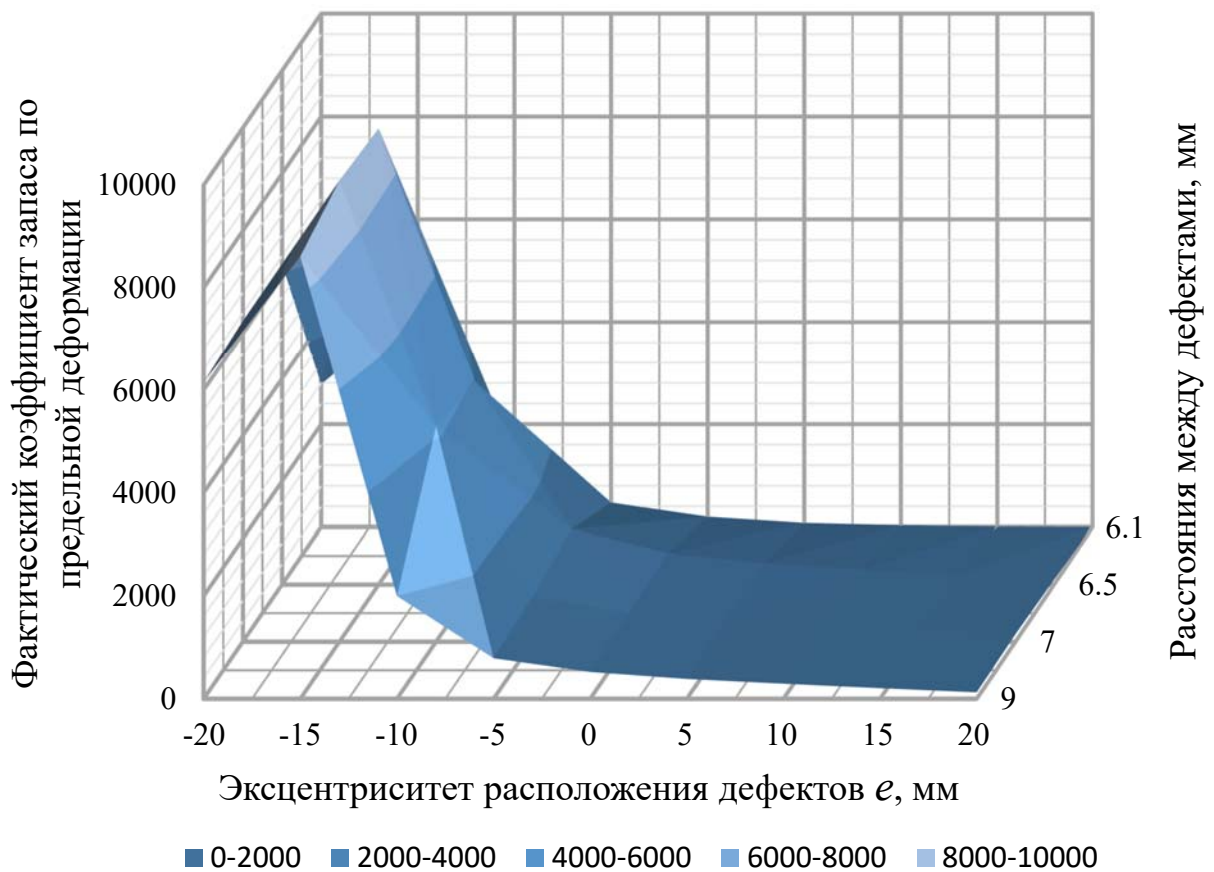


Рисунок 3.10. Поверхность, отражающая зависимость фактического коэффициента запаса по предельной пластической деформации от расстояния между дефектами и эксцентриситета расположения группового дефекта в виде тетраэдра

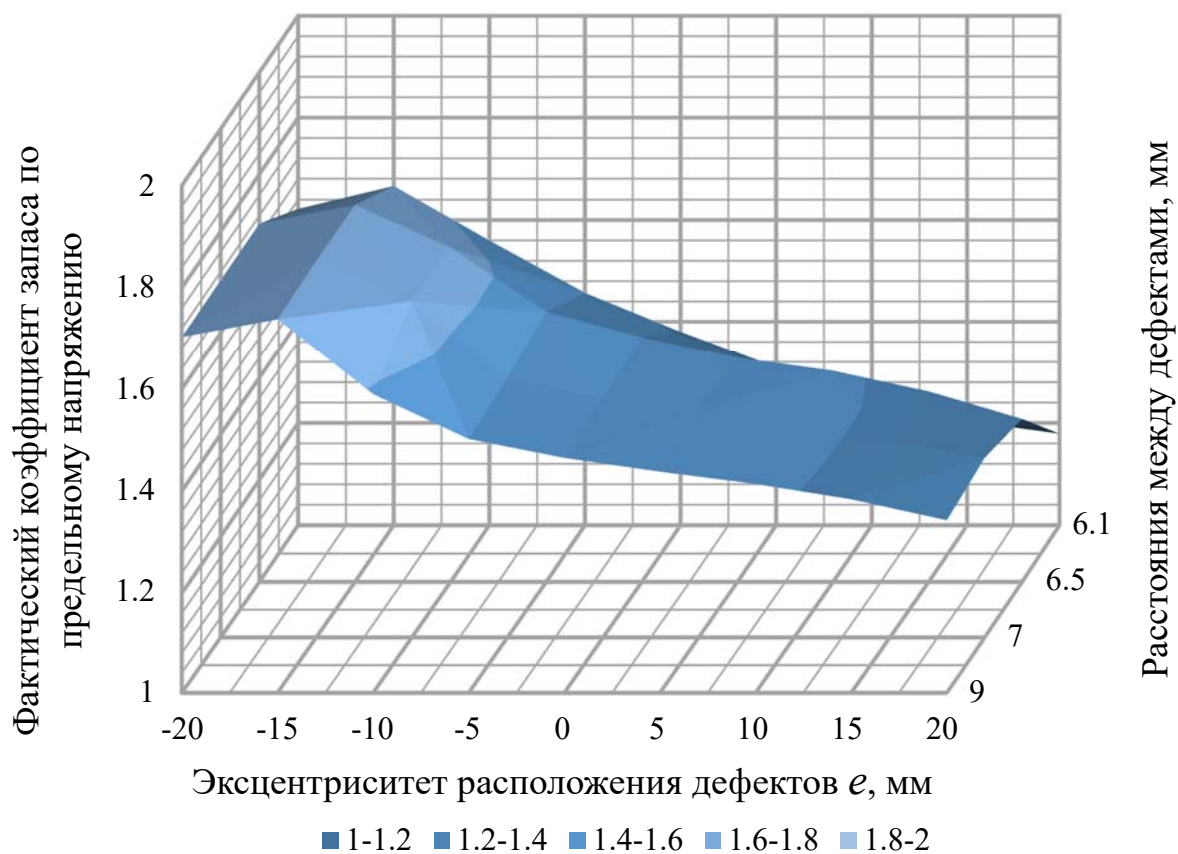


Рисунок 3.11. Поверхность, отражающая зависимость фактического коэффициента запаса по предельному напряжению от расстояния между дефектами и эксцентриситета расположения группового дефекта в виде тетраэдра

Из выполненных расчетов на подконструкции с внедренным групповым дефектом в виде тетраэдра со сферическими пустотами в его вершинах можно сделать вывод, что оценка работоспособности элементов конструкций с такого рода дефектами предполагает использование адекватных деформационных и прочностных характеристик, которые, очевидно, будут отличаться от соответствующих величин исходного сплошного материала не в лучшую сторону, что соответствует ошибке «не в запас». Разумеется, это обстоятельство должно учитываться как при проектировании, так и при оценке прочности готовых изделий. Несмотря на это, испытания образцов, содержащих дефекты, в заводских лабораториях обычно не проводятся, и уж тем более механические характеристики подобных материалов не приводятся в справочной литературе, где таковые можно обнаружить лишь для бездефектного материала.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		70

Таким образом, существует проблема прогнозирования деформационных и прочностных свойств среды с дефектами на основе характеристик бездефектного материала как при однократном (приемосдаточные заводские испытания), так и при циклическом (в процессе эксплуатации) нагружениях, так как оценку долговечности по критерию усталостной прочности обычно производят на основе модели сплошной однородной упругопластической среды. Одним из путей ее решения является разработка соответствующих математических моделей. С этой целью возникает потребность в моделировании среды, эквивалентной по своим деформационным и прочностным свойствам исходному материалу со множественными хаотично регулярно распределенными дефектами. Такой подход позволяет применять проверенные инженерной практикой закономерности, критериальные соотношения и методы расчета приемлемой трудоемкости.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						71
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕДЫ С РЕГУЛЯРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПОРАМИ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ОДНОРОДНОЙ СПЛОШНОЙ ИЗОТРОПНОЙ СРЕДОЙ

4.1 Идентификация модели среды с регулярно распределенными порами при однократном нагружении

Расчетная оценка прочностной надежности запорной арматуры магистральных трубопроводов производится, обычно, по двум критериям:

- прочности при однократном статическом нагружении (применительно, в частности, к приемо-сдаточным заводским испытаниям);
- долговечности при повторно-переменном воздействии в условиях эксплуатации.

В обоих случаях необходим расчет напряженно-деформированного состояния объекта с учетом неупругого поведения материала при однократном и повторно-переменном нагружении в сочетании с соответствующими критериями достижения предельного состояния. Такой анализ неизбежно приходится выполнять численно, например, МКЭ, с помощью получивших признание вычислительных пакетов. Вместе с тем, опыт свидетельствует, что прямой расчет напряженно-деформированного состояния тела со случайным образом распределенными по его объему порами даже при однократном, и, уж тем более, переменном, нагружении, весьма трудоемок и требует вычислительных мощностей на уровне суперкомпьютера.

В связи со сказанным предлагается методика определения параметров модели сплошной однородной среды, эквивалентной по своим деформационным свойствам исходному со множественными регулярно распределенными несплошностями материалу.

Подобный подход не является абсолютно новым, однако он использовался, главным образом, применительно к керамическим – классическим хрупким – материалам (см. раздел 1).

В отношении пластичных материалов возникает проблема получения диаграммы деформирования с учетом неупругого поведения и степени пористости

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						72
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

реального материала. Последнее обстоятельство в связи с прогнозированием механизма разрушения пористого пластичного материала требует учета размера и формы пор, их количество, расположения в объеме материала. В общем случае необходим стохастический (вероятностный) подход к данной проблеме, учитывающий хаотичное распределение пор в трехмерной постановке. В данной работе использован детерминированный подход к решению задачи о распределении пор по объему материала – исходная среда с дефектами схематизирована регулярной структурой, образованной набором элементов в форме правильного тетраэдра со сферическими пустотами в его вершинах (рисунок 4.1) [62]. Регулярная структура имеет вид икосаэдра, состоящего из 20 тетраэдров (13 пор – дальнейшее их увеличение не изменяет общую картину).

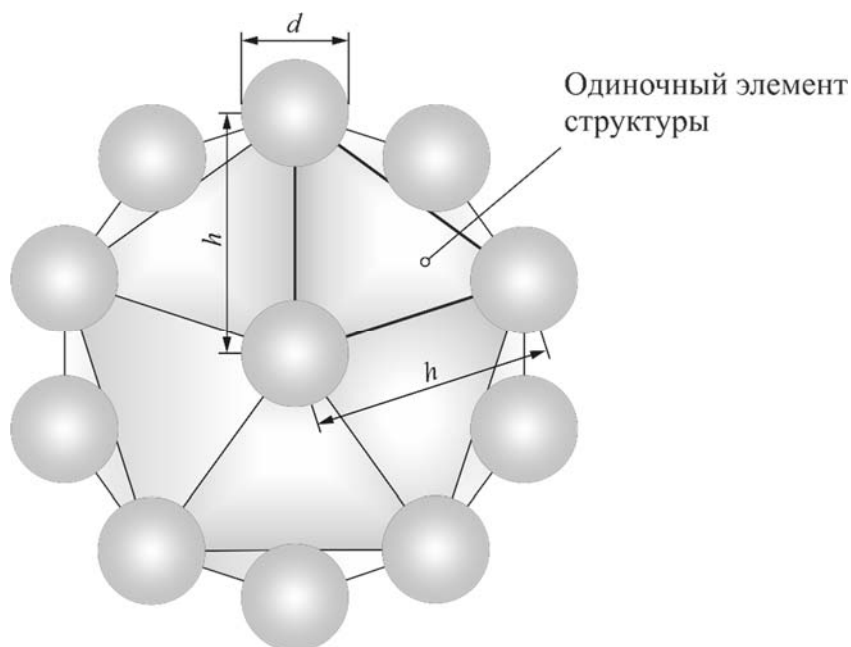


Рисунок 4.1. Регулярная структура и ее элемент – тетраэдр

Испытание виртуальных образцов производили в режиме силового нагружения (рисунок 4.2).

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						73
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

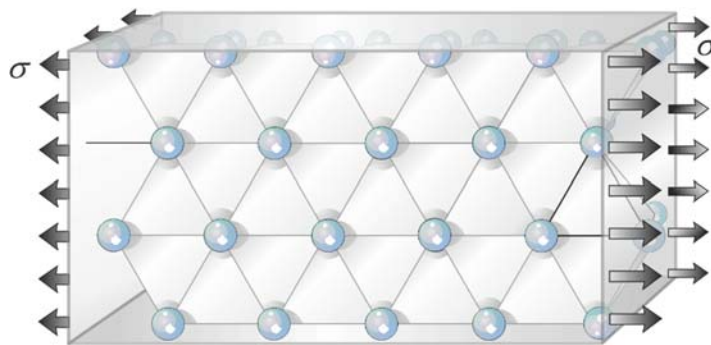


Рисунок 4.2. Схема нагружения виртуального пористого образца

Для дальнейшего конечно-элементного анализа построена геометрическая модель регулярной пористой структуры в форме икосаэдра со сферическими пустотами в вершинах тетраэдров, показанная на рисунке 4.3. Согласно этой геометрической модели, ячейка с дефектами представляет собой конфигурацию сферических пор с фиксированным диаметром d , центры четырех ближайших пор которой находятся в вершинах тетраэдра на одинаковом расстоянии h друг от друга.

В общем случае такая структура не является икосаэдрической [22] в виду того, что икосаэдр представляет собой комбинацию не тетраэдров, а многогранников, образованных набором из 20 пирамид, основанием каждой из которых является равносторонний треугольник со стороной h (см. рисунок 4.1). Радиус описанной сферы вокруг икосаэдра и длина бокового ребра (от вершины до центра икосаэдра) равняется соответственно

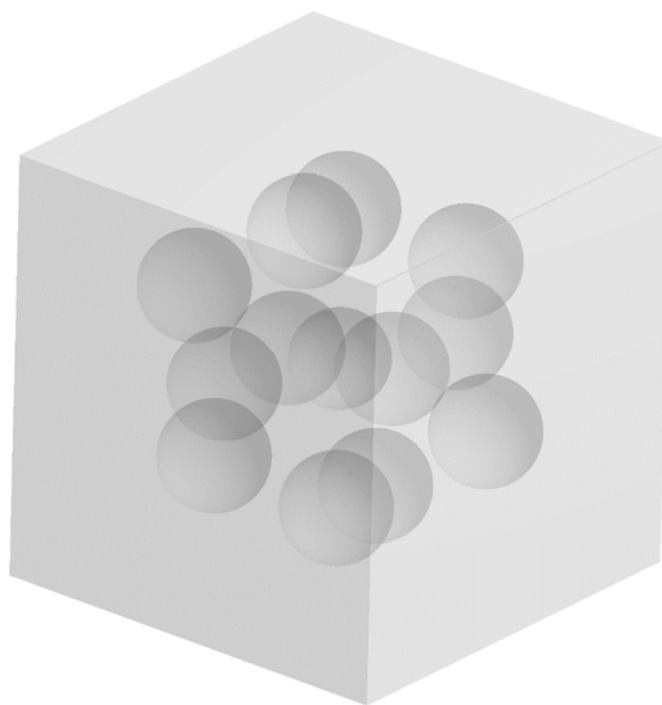
$$R = \frac{h\sqrt{2(5+\sqrt{5})}}{4} = 0,951h.$$

Будем считать, что икосаэдр, используемый в данной работе, составлен из правильных тетраэдров с размером сторон $R \approx h$. Чтобы центральная пора не накладывалась на соседние, будем полагать, что ее размер несколько меньше остальных, при сохранении одинакового расстояния между центрами пор. Такое допущение оправдано, так как влияет лишь на объемную долю пор (в дальнейшем – степень пористости), несколько снижая ее в модельной среде.

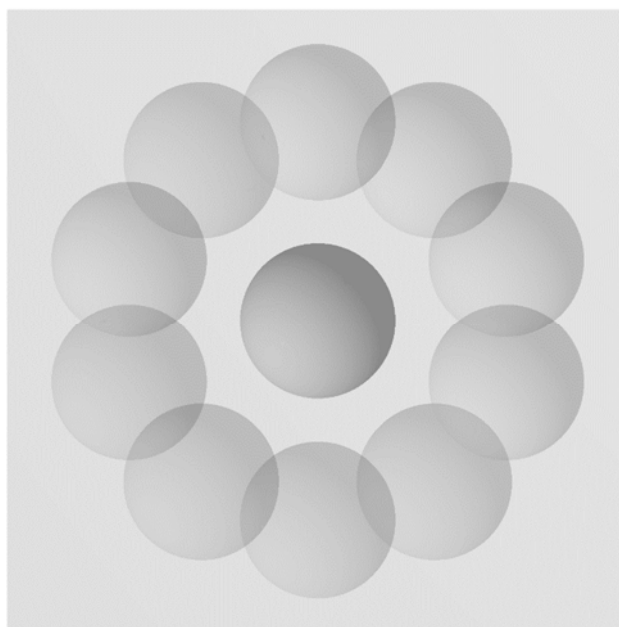
Следует отметить, что изменение механизма деформирования и разрушения вследствие искажения формы сферических пустот данным вариантом модели не

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						74
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

отражается, в связи с чем область ее корректного применения ограничивается материалами с так называемыми закрытыми порами и относительно небольшими значениями пористости.

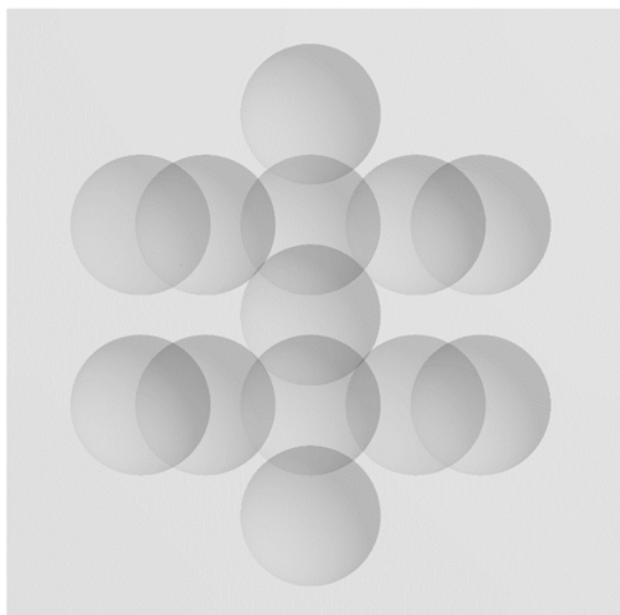


Модель регулярной пористой структуры в виде конечного набора тетраэдров со сферическими пустотами в вершинах тетраэдра



Вид сверху

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						75
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		



Вид слева

Рисунок 4.3. Модель регулярной пористой структуры в виде конечного набора тетраэдров со сферическими пустотами в вершинах тетраэдра и ее горизонтальная и фронтальная проекции

Описание геометрических параметров дефектов произведено с помощью сгущающейся вблизи пор неструктурированной гексаэдрической сетки (рисунок 4.4) на примере кубического образца при одноосном растяжении. Подбор оптимальной сетки, определяющей топологию расчетной области, был выполнен в подразделе 2.2 (см. рисунок 2.9 – сходимость решения). Сгенерированная конечно-элементная сетка обладает вполне удовлетворительным качеством по углам скошенности – одним из наиболее важных критериев качества сеточных ячеек, который определяет, насколько близка форма элемента к идеальной (равносторонний треугольник, прямоугольник), а также по качеству ортогональности ячеек и позволяет удовлетворительно описывать поля напряжений и деформаций вблизи концентраторов. Сгущение происходит локально, т.е. только вблизи концентраторов, поэтому размер такого конечного элемента в несколько раз меньше, чем размер элемента на периферии модели.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						76
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

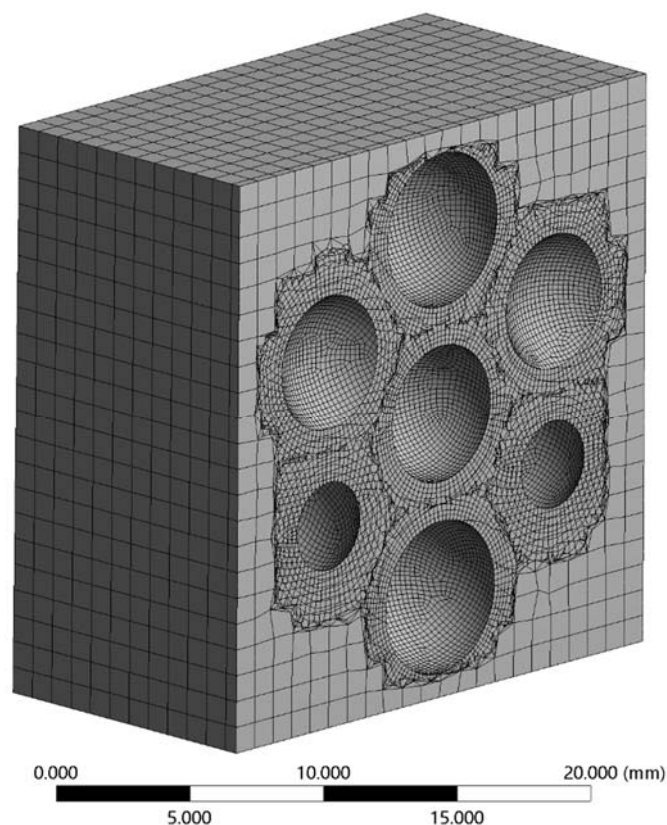


Рисунок 4.4. Конечно-элементная сетка вблизи множественных концентраторов в виде пустотелых сфер

Решена задача идентификации модели в условиях однократного нагружения – получена кривая деформирования в зависимости от степени пористости материала вплоть до момента разрушения модельной среды (возможная смена механизма деформирования вследствие искажения формы стенок газовых пузырьков, сопровождающегося пластическим течением материала матрицы, данной моделью не учитывалась) – базирующаяся на результатах, как минимум, трех (в случае аппроксимации диаграммы степенной функцией по Рамбергу–Осгуду) численных экспериментов. Один из них производится в предположении линейного упругого поведения материала – определение упругих констант модельной среды – модуля упругости и коэффициента Пуассона, остальные – упругопластического. Под степенью пористости понимается отношение объема сферических пустот к общему объему тела

$$P = \frac{V_P}{V_0}, \quad (4.1)$$

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		77

где V_P – объем сферических пустот в рассматриваемом объеме;

V_0 – общий объем рассматриваемого объекта.

На рисунке 4.5 приведены результаты расчета НДС модельной среды, соответствующей дефектному материалу со множественными регулярно расположенными сферическими порами ($P = 14\%$).

H: Elastic_solution
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1

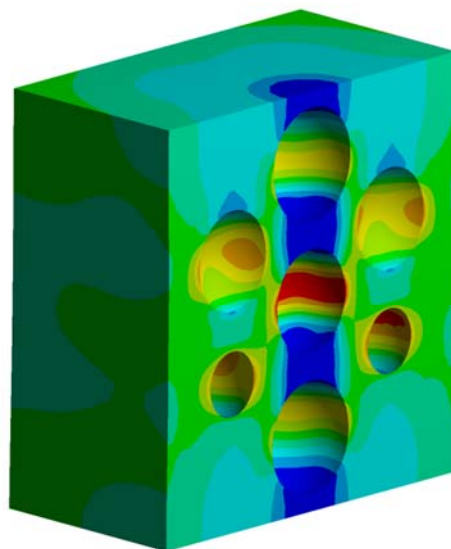
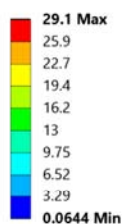


Рисунок 4.5. Поле интенсивности напряжения вблизи множественных регулярно расположенных сферических концентраторов (степень пористости $P = 14\%$)

Для определения зависимости модуля упругости от степени пористости $\tilde{E}(P)$ дефектного материала достаточно одного эксперимента – приложенное напряжение σ (см. рисунок 4.2) является напряжением эквивалентной среды, а ее деформация вычисляется по взаимному перемещению крайних сечений.

При описании зависимости модуля упругости пластичного дефектного материала при одноосном растяжении от степени пористости удовлетворительное соответствие численным данным обеспечивает следующее выражение:

$$\tilde{E} = E_0 \exp(-cP), \quad (4.2)$$

где E_0 – модуль упругости сплошного материала ($E_0 = 210$ ГПа);

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						78
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

P – степень пористости;

c – константа, определяемая методом наименьших квадратических отклонений.

На рисунке 4.6 представлены расчетные значения модуля упругости модельного материала в зависимости от степени пористости и аппроксимирующая кривая (4.2) (параметр $c = 0,024$ определен методом наименьших квадратических отклонений).

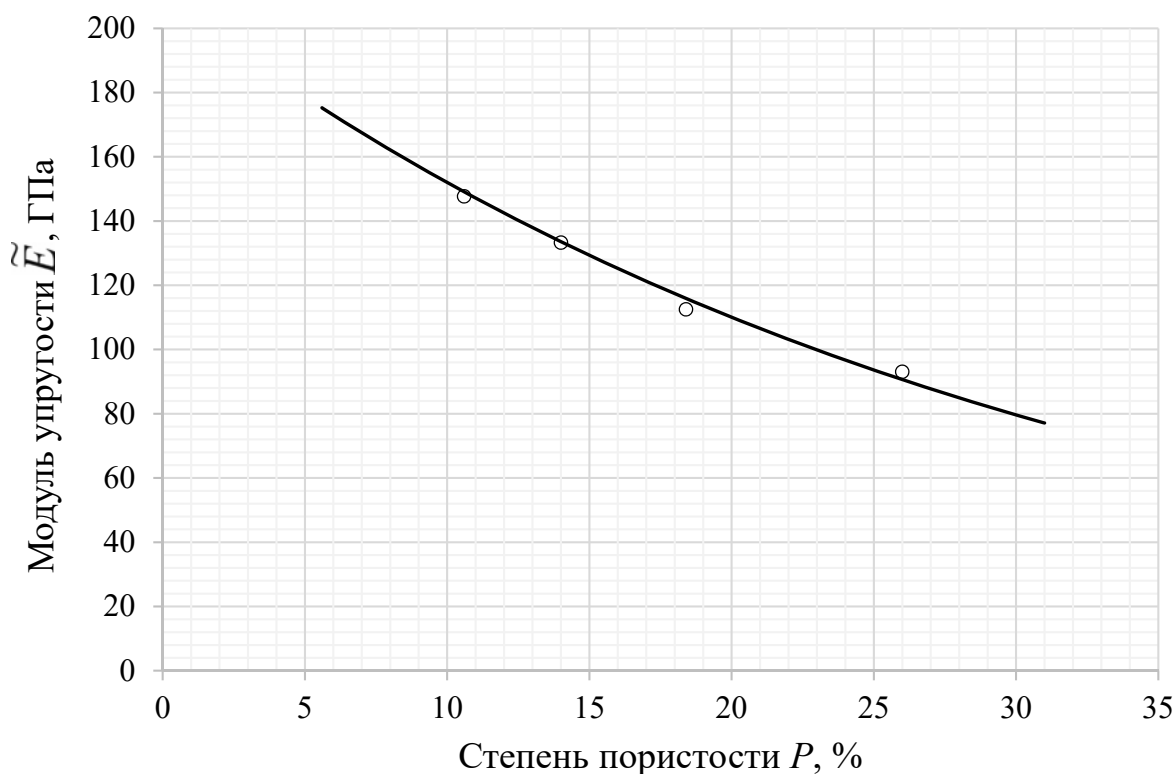


Рисунок 4.6. Влияние степени пористости среды на величину модуля упругости

Как видно (рисунок 4.6), при увеличении пористости модуль упругости снижается в связи с увеличением податливости среды, его изменение носит слабо нелинейный характер.

Коэффициент Пуассона $\tilde{\mu}$ в зависимости от степени пористости определяется традиционно – как отношение относительной поперечной деформации к относительной продольной. Полученная расчетная зависимость $\tilde{\mu}(P)$ показана на рисунке 4.7.

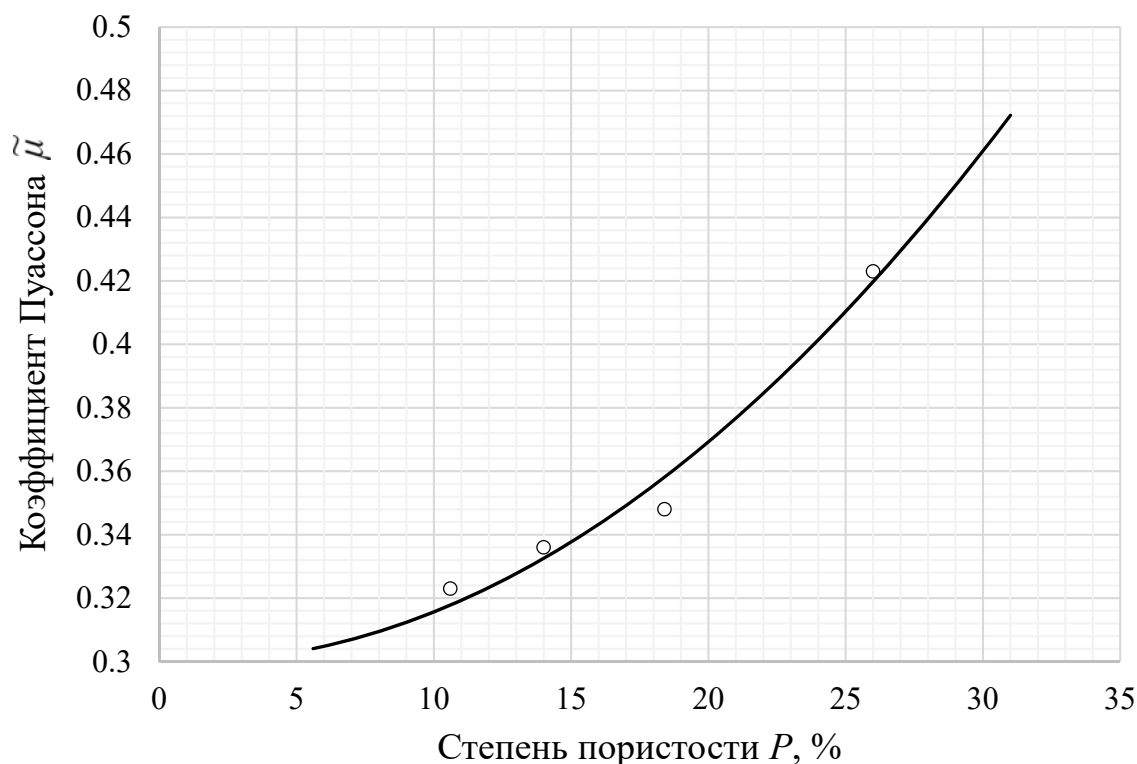


Рисунок 4.7. Влияние степени пористости среды на величину коэффициента Пуассона

При увеличении пористости коэффициент Пуассона возрастает и имеет выраженный нелинейный характер. По графику отчетливо видно, что при степени пористости ~ 32 % коэффициент Пуассона становится равным 0,5 (пластически несжимаемый материал), а при больших значениях пористости – превышает это значение. При анализе литературных источников не было обнаружено, чтобы коэффициент Пуассона для сплошного изотропного материала принимал значения равное или свыше 0,5; в этом случае объемный модуль упругости стремится к бесконечности или вовсе становится отрицательным. В ходе обзора литературы как отечественной, так и зарубежной, удалось найти ряд данных о влиянии пористости изотропного материала на коэффициент Пуассона [82].

Предельную (предшествующую нарушению сплошности) величину интенсивности пластической деформации в структурном элементе среды определяли, как и в разделе 3, с помощью деформационного критерия В.Л. Колмогорова.

В результате проведения серии неупругих расчетов были получены диаграммы деформирования, отвечающие разной степени пористости модельного материала. Граничные условия записывали в терминах напряжений (на поверхности модели задавали поверхностное давление с обратным знаком). В качестве исходной диаграммы деформирования сплошного однородного материала использовали зависимость вида (2.4)

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

Нагрузку увеличивали ступенями до значения, при котором деформации становились столь высокими, что пакет оказывался не способным найти сходящееся решение. В результате расчетов напряженно-деформированного состояния в параметрах «истинное напряжение ~ логарифмическая деформация» в точках (узлах) образца были определены главные логарифмические деформации. На рисунке 4.8 показаны диаграммы деформирования модельной среды в зависимости от степени пористости материала.

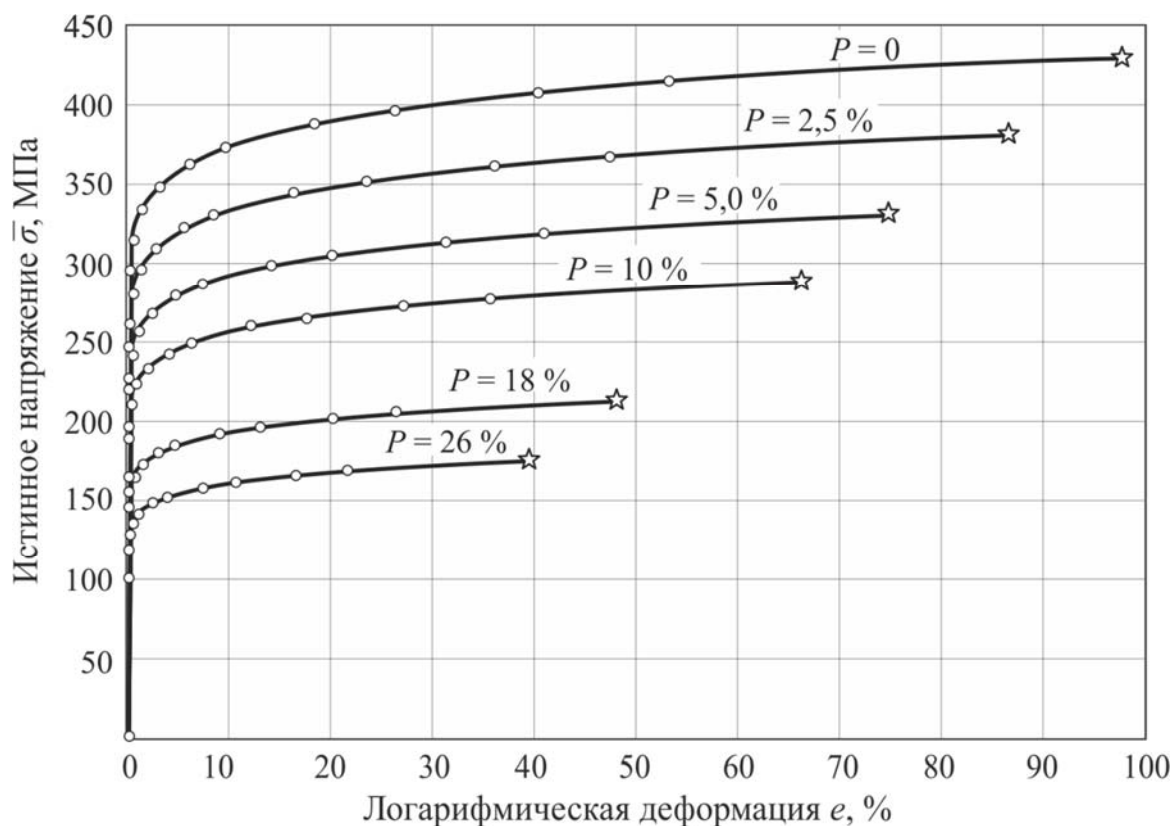


Рисунок 4.8. Диаграммы деформирования модельной среды в зависимости от степени пористости материала

Выколотыми показаны точки, полученные расчетным путем. Звездообразные точки соответствуют моменту разрушения.

Анализируя полученные таким образом диаграммы деформирования модельной среды, можно сделать вывод, что с увеличением пористости материала ресурс пластичности уменьшается, соответственно, уменьшается истинное напряжение в момент разрушения. При степени пористости 10 % истинное напряжение принимает значение примерно 300 МПа; для сравнения, истинное напряжение в момент разрушения исходного бездефектного материала составляет 430 МПа при ресурсе пластичности 97 %. Как видно, пористый материал ослабляет конструкцию, и предельному состоянию соответствует примерно на 30 % меньшее значение истинного напряжения в момент разрушения и примерно на 35 % меньшее значение ресурса пластичности.

Таким образом, влияние пористости при работе виртуальных образцов в режиме силового нагружения отражается, с одной стороны, за счет увеличения компонент напряженно-деформированного состояния вблизи концентраторов и изменения вида НДС, с другой. Последнее обстоятельство влияет на величину ресурса пластичности материала – чем оно жестче, тем ниже интенсивность деформации в момент разрушения.

Анализ кривых деформирования выявил важную с практической точки зрения особенность – их центральное подобие. Для проверки этого свойства проводили лучи из начала системы координат до пересечения с каждой кривой (рисунок 4.9).

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						82
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

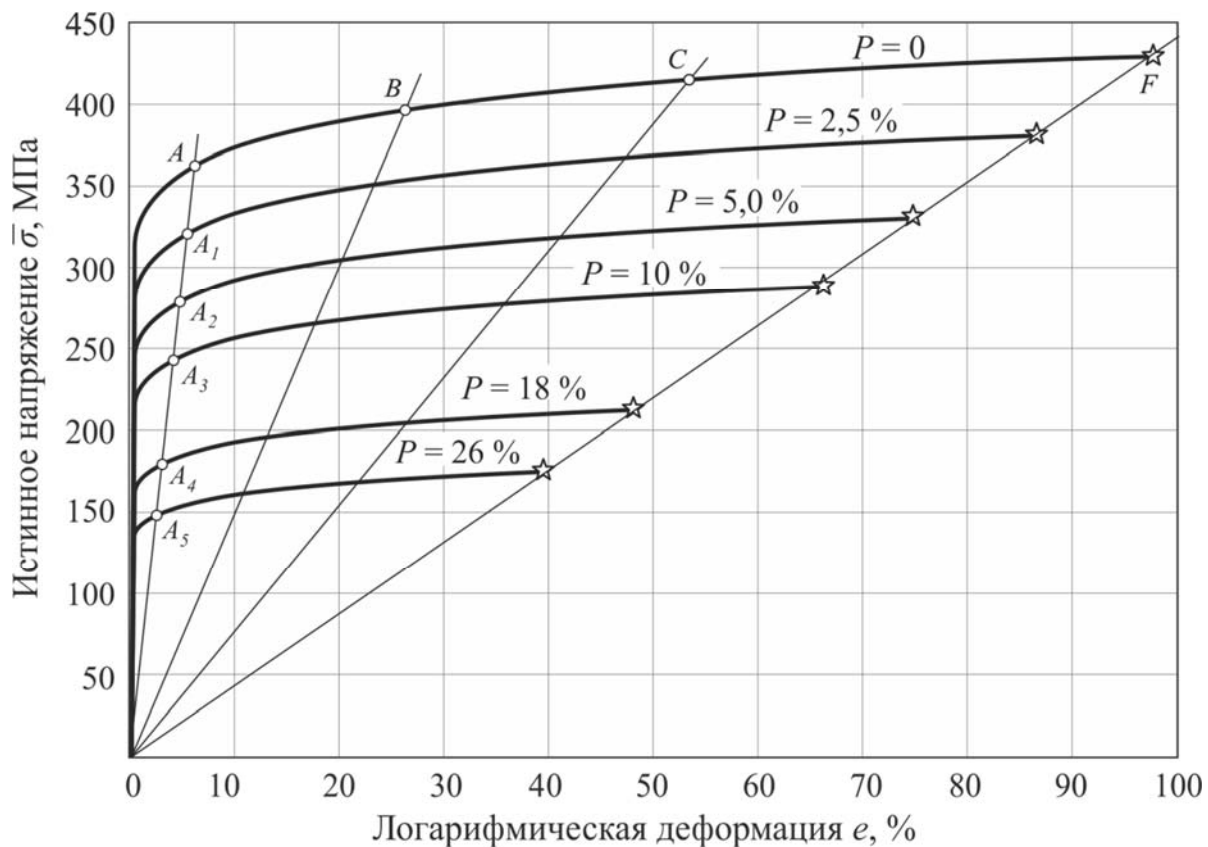


Рисунок 4.9. Иллюстрация принципа центрального подобия кривых деформирования

Центральное подобие кривых деформирования существует при условии [41]

$$\frac{OA_i}{OA} = \frac{OB_i}{OB} = \frac{OC_i}{OC} = \frac{OF_i}{OF}, \quad (4.3)$$

где $i=1, 2, 3, 4, 5$:

- 1 – степень пористости 2,5 %;
- 2 – степень пористости 5 %;
- 3 – степени пористости 10 %;
- 4 – степень пористости 18 %;
- 5 – степень пористости 26 %.

Расстояния от начала координат до соответствующей точки на бездефектной кривой имеют следующие значения:

$$OA = 75 \text{ мм}, \quad OB = 85 \text{ мм}, \quad OC = 110 \text{ мм}, \quad OF = 155 \text{ мм}.$$

Подобие бездефектной кривой и кривой при степени пористости 2,5 %:

$$OA_1 = 67 \text{ мм}, \quad OB_1 = 76 \text{ мм}, \quad OC_1 = 96 \text{ мм}, \quad OF_1 = 137 \text{ мм};$$

$$\frac{OA_1}{OA} = \frac{OB_1}{OB} = \frac{OC_1}{OC} = \frac{OF_1}{OF} = 0,893 = 0,894 = 0,873 = 0,884.$$

Подобие бездефектной кривой и кривой при степени пористости 5 %:

$$OA_2 = 55 \text{ мм}, OB_2 = 65 \text{ мм}, OC_2 = 85 \text{ мм}, OF_2 = 120 \text{ мм};$$

$$\frac{OA_2}{OA} = \frac{OB_2}{OB} = \frac{OC_2}{OC} = \frac{OF_2}{OF} = 0,733 = 0,765 = 0,773 = 0,774.$$

Подобие бездефектной кривой и кривой при степени пористости 10 %:

$$OA_3 = 50 \text{ мм}, OB_3 = 57 \text{ мм}, OC_3 = 73 \text{ мм}, OF_3 = 105 \text{ мм};$$

$$\frac{OA_3}{OA} = \frac{OB_3}{OB} = \frac{OC_3}{OC} = \frac{OF_3}{OF} = 0,667 = 0,671 = 0,664 = 0,677.$$

Подобие бездефектной кривой и кривой при степени пористости 18 %:

$$OA_4 = 36 \text{ мм}, OB_4 = 43 \text{ мм}, OC_4 = 55 \text{ мм}, OF_4 = 78 \text{ мм};$$

$$\frac{OA_4}{OA} = \frac{OB_4}{OB} = \frac{OC_4}{OC} = \frac{OF_4}{OF} = 0,48 = 0,506 = 0,5 = 0,503.$$

Подобие бездефектной кривой и кривой при степени пористости 26 %:

$$OA_5 = 29 \text{ мм}, OB_5 = 36 \text{ мм}, OC_5 = 46 \text{ мм}, OF_5 = 63 \text{ мм};$$

$$\frac{OA_5}{OA} = \frac{OB_5}{OB} = \frac{OC_5}{OC} = \frac{OF_5}{OF} = 0,387 = 0,424 = 0,418 = 0,406.$$

С удовлетворительной степенью точности полученные расчетные точки могут быть аппроксимированы нелинейной зависимостью вида

$$\theta(P) = 0,0008P^2 - 0,0423P + 1. \quad (4.4)$$

График функции центрального подобия показан на рисунке 4.10.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		84

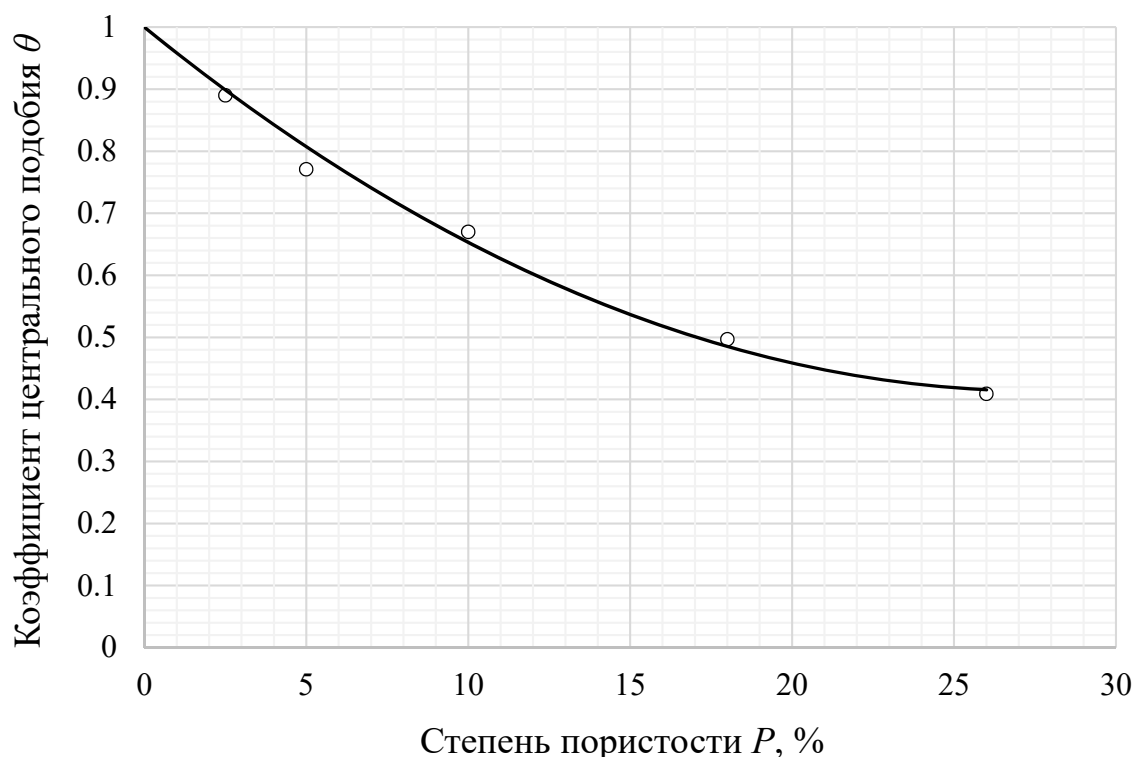


Рисунок 4.10. Зависимость коэффициента центрального подобия кривых деформирования от степени пористости материала

Таким образом, располагая одной, базовой, кривой (в качестве которой может быть принята исходная для бездефектного материала) и зависимостью коэффициента центрального подобия от степени пористости, нетрудно получить диаграмму деформирования материала любой степени пористости без проведения дополнительных расчетов.

Полученная корреляционная функция имеет слабо нелинейный характер, а при высоком содержании пор стремится к постоянному значению. Это говорит о том, что при больших значениях пористости разрушение будет происходить при близких значениях напряжения и деформации.

Следует иметь в виду, что данный подход с переходом от пористой среды к эквивалентной однородной сплошной учитывает влияние такого важного фактора как концентрация напряжений в пограничном слое дефектов и взаимное влияние полей напряжений в окрестности дефектов, что совершенно необходимо при моделировании пористой структуры. В противном случае моделью будет прогнозироваться заниженный результат при оценке прочности по критерию предельной

деформации в условиях однократного нагружения и завышенный – по долговечности в соответствии с критерием усталостного разрушения. В подразделе 2.2 было отмечено, что для одиночного элемента структуры в виде тетраэдра со сферическими пустотелыми порами в его вершинах в условиях упругого поведения материала теоретический коэффициент концентрации напряжений достигал величины 5,6 когда поры практически касались друг друга.

Как уже было сказано в начале раздела, для оценки работоспособности пористых объектов необходим расчет НДС с учетом неупругого поведения материала при однократном и повторно-переменном нагружении в сочетании с соответствующими критериями достижения предельного состояния. В связи с этим в подразделе 2.2 в условиях однократного нагружения были оценены как коэффициент концентрации напряжений с учетом неупругого поведения материала ($k_\sigma = 4,7$), так и коэффициент концентрации деформаций – $k_\varepsilon = 10,2$.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						86
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

4.2 Идентификация модели среды с регулярно распределенными порами при циклическом нагружении

Как известно, деформационные свойства сталей и сплавов при циклическом нагружении характеризуются кривой циклического деформирования и циклической кривой, которые удобно получать в «жестком» симметричном цикле в условиях блочного нагружения (схема *a* на рисунке 4.11; $n_{\text{стаб}}^i$ – количество циклов до стабилизации в i -ом блоке). Первая описывает траекторию точки состояния в координатах «изменение напряжения σ_* ~ изменение деформации ε_* ($\sigma_* = \sigma - \sigma_R$; $\varepsilon_* = \varepsilon - \varepsilon_R$; σ_R, ε_R – значения напряжения и деформации в момент последнего реверса (изменение знака скорости деформации) – в точках R_i).

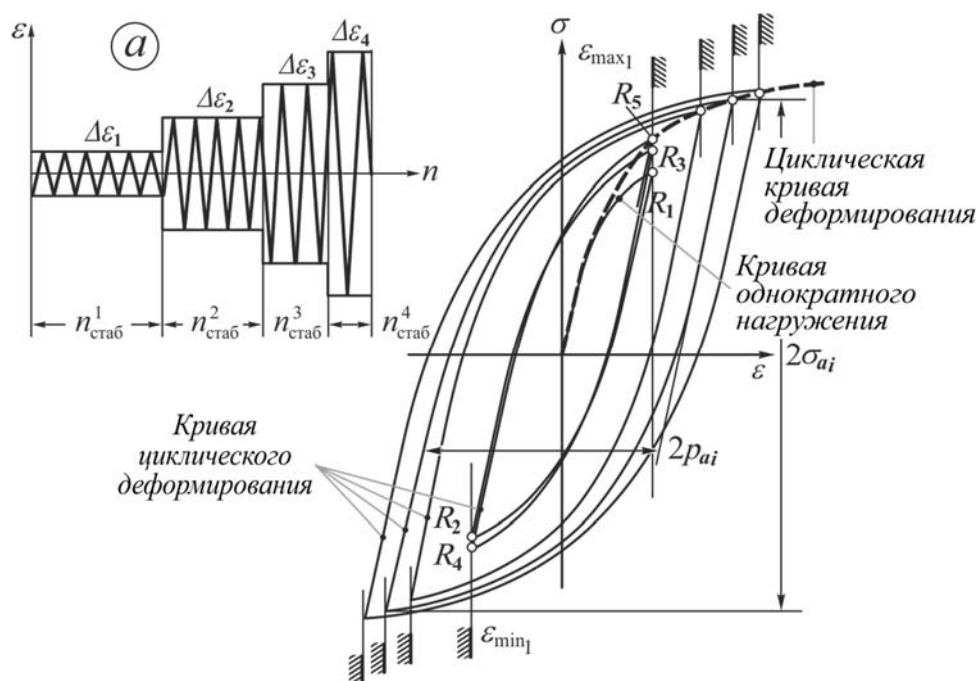


Рисунок 4.11. Построение циклической кривой на основе петель гистерезиса в стабильных циклах и программа блочного нагружения в режиме «жесткого» нагружения (схема *a*)

Начальным этапом является получение кривой циклического деформирования и циклической кривой исходного бездефектного материала – Стали 20, с тем, чтобы на их основе получить аналогичные деформационные характеристики при циклическом нагружении для материала с регулярно распределенными дефектами типа сферических газовых пузырьков.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		87

Кривая циклического деформирования и циклическая кривая взаимосвязаны; они обе определяются изотропным упрочнением материала. Диаграммы циклического деформирования $\sigma_*(\varepsilon_*)$, отвечающие стабильному состоянию материала при разных значениях размаха неупругой деформации Δp_i в цикле, представляют половины соответствующих петель неупругого гистерезиса, заключенные между двумя соседними точками реверса.

Уравнение кривой циклического деформирования в цикле с максимальным размахом Δp_{\max} имеет вид

$$\sigma_{*\max} = A p_{*\max}^n, \quad (4.5)$$

где $A = \frac{\sigma_{*\max}}{p_{*\max}^n}$ – «коэффициент прочности» в уравнении кривой циклического деформирования;

n – аналог показателя упрочнения материала в рассматриваемых условиях.

С учетом преобразований получим следующее выражение [41]:

$$\sigma_* = \sigma_{*\max} \left(\frac{p_*}{p_{*\max}} \right)^n = 2\sigma_{*a\max} \left(\frac{p_*}{2p_{*a\max}} \right)^n.$$

Уравнение кривой циклического деформирования для Стали 20 имеет следующий вид

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = A \left(\frac{\Delta p}{2} \right)^{0,12}. \quad (4.6)$$

Вместе с тем анализ экспериментальных данных [29] показал, что кривые циклического деформирования после стабилизации процесса деформирования в i -ом блоке не могут быть описаны универсальным законом $\sigma_{*\max} = A p_{*\max}^n$. Оказалось, что так называемый коэффициент прочности A нелинейно зависит от величины $p_{*\max}$ в цикле заданного размаха Δp неупругой деформации. Его переменность учитывали, выполнив аппроксимацию указанного соотношения степенной функцией.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						88
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

Зависимость коэффициента A от амплитуды пластической деформации Стали 20 представлена в графической (рисунок 4.12) и табличной (таблица 4.1) формах.

Таблица 4.1. Зависимость коэффициента A от амплитуды логарифмической пластической деформации Стали 20

$p_a, \%$	0,05	0,10	0,20	0,50	0,80	1,0	1,5	2,5	4,0	5,0
$\sigma_a, \text{МПа}$	201,9	236,8	277,8	342,9	382,1	402,2	441,5	496,6	553,3	582,4
$A, \text{МПа}$	925	998,6	1078	1192	1255	1286	1345	1423	1498	1536

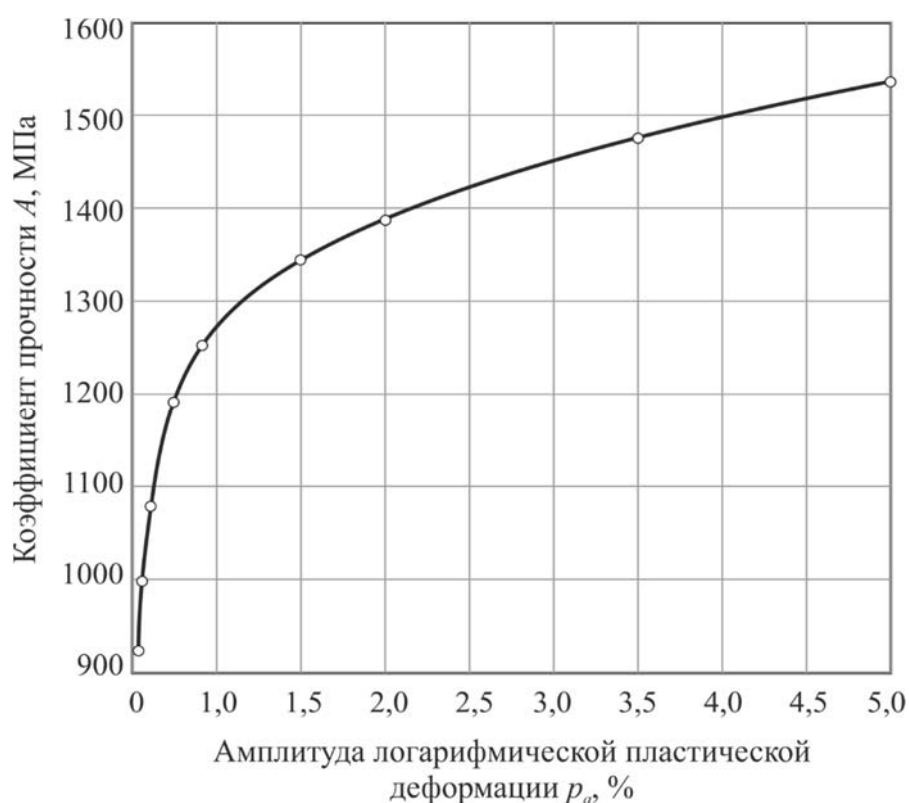
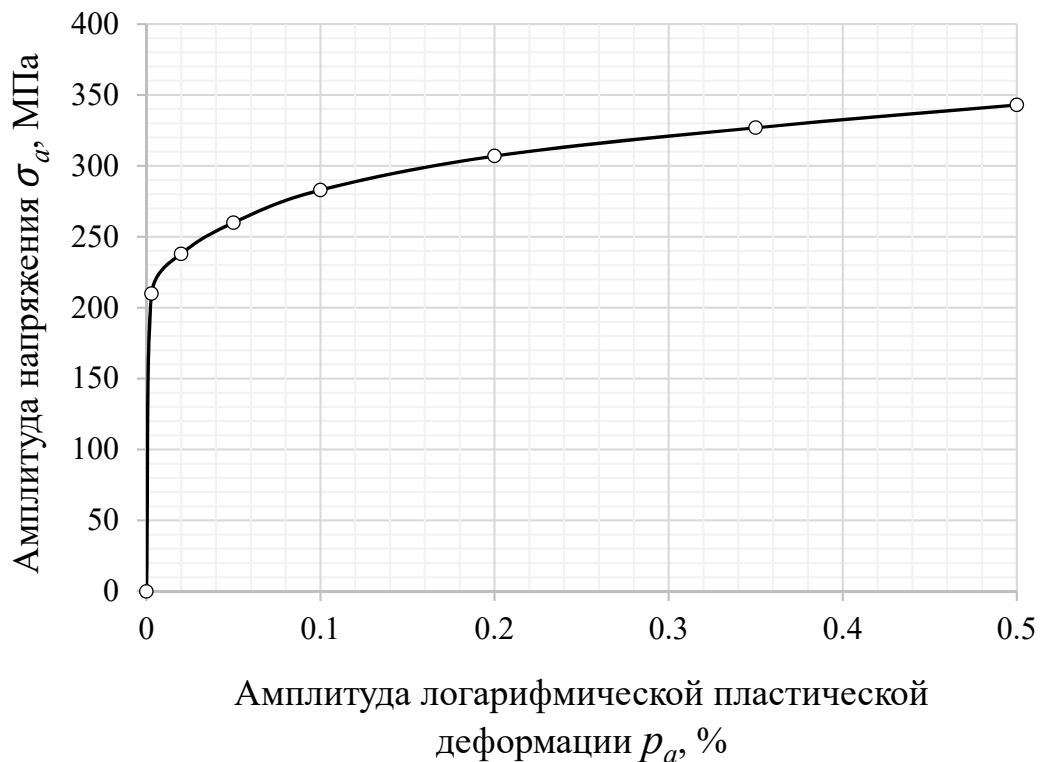


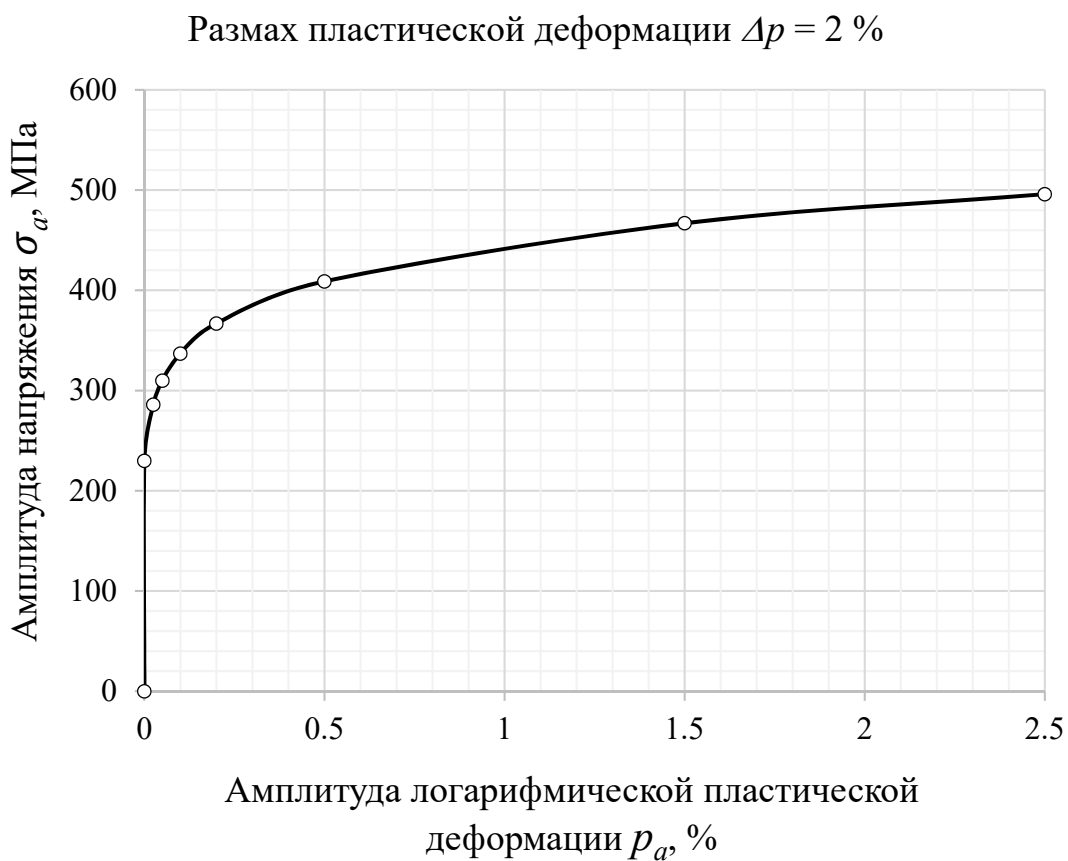
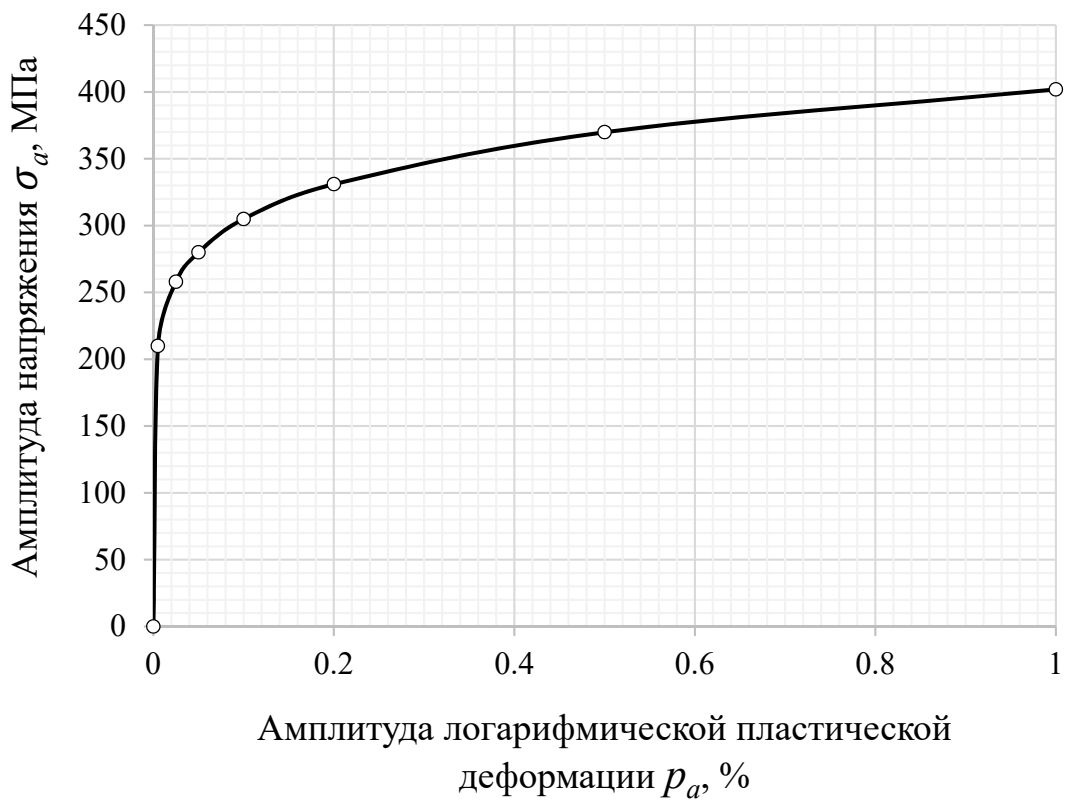
Рисунок 4.12. Зависимость коэффициента прочности A от амплитуды пластической деформации p_a в цикле заданного размаха Δp неупругой деформации

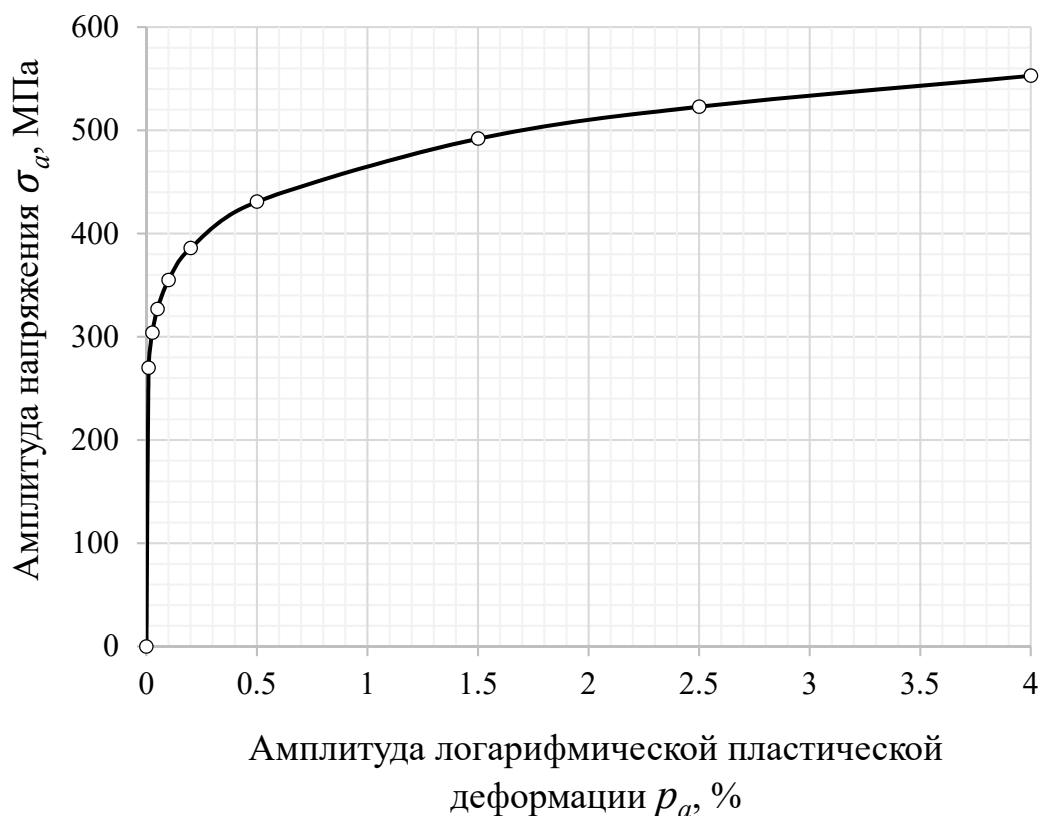
При рассматриваемых значениях пластической (полной) деформации логарифмическая и инженерная деформации практически одинаковы, следовательно, почти не отличаются друг от друга истинное и условное напряжения.

С учетом вышесказанного обстоятельства и с привлечением справочных данных [29] были построены кривые циклического деформирования для ряда размахов пластической деформации (см. таблицу 4.1; $\Delta\sigma = 2\sigma_a$, $\Delta p = 2p_a$), представленные на рисунке 4.13.



Размах пластической деформации $\Delta p = 1 \%$





Размах пластической деформации $\Delta p = 8 \%$

Рисунок 4.13. Кривые циклического деформирования бездефектного материала при ряде размахов пластической деформации Δp

Обработка обширного массива экспериментальных данных позволила установить, что и циклическую кривую можно аппроксимировать степенной зависимостью вида

$$\sigma_a = B p_a^k, \quad (4.7)$$

где B и k – постоянные материала.

Уравнение циклической кривой деформирования в симметричном цикле для конструкционной углеродистой Стали 20 имеет вид

$$\sigma_a = 1160 p_a^{0,23} \text{ МПа}. \quad (4.8)$$

Предел пропорциональности при циклическом нагружении $\sigma_{a \text{ пц}}$ можно определить по формуле [41]

$$\sigma_{a \text{ пц}} = B \left(\frac{2E}{3kB} \right)^{\frac{k}{k-1}}; \quad (4.9)$$

в симметричном цикле

$$\sigma_{a\text{шт}}^{-1} = 1160 \left(\frac{2 \cdot 2,02 \cdot 10^5}{3 \cdot 0,23 \cdot 1160} \right)^{\frac{0,23}{0,23-1}} = 181 \text{ МПа}.$$

Циклическая кривая конструкционной углеродистой Стали 20 в симметричном цикле представлена в графической (рисунки 4.14, 4.15) и табличной (таблица 4.2) формах ($e_a = p_a + \sigma_a/E$).

Таблица 4.2. Зависимость амплитуды напряжения от амплитуды логарифмической деформации для углеродистой Стали 20 в симметричном цикле

$e_a, \%$	$\sigma_a, \text{МПа}$
0	0
0,15	202
0,22	237
0,34	278
0,67	343
1,00	382
1,20	402
1,70	441
2,20	472
3,80	536
5,30	582

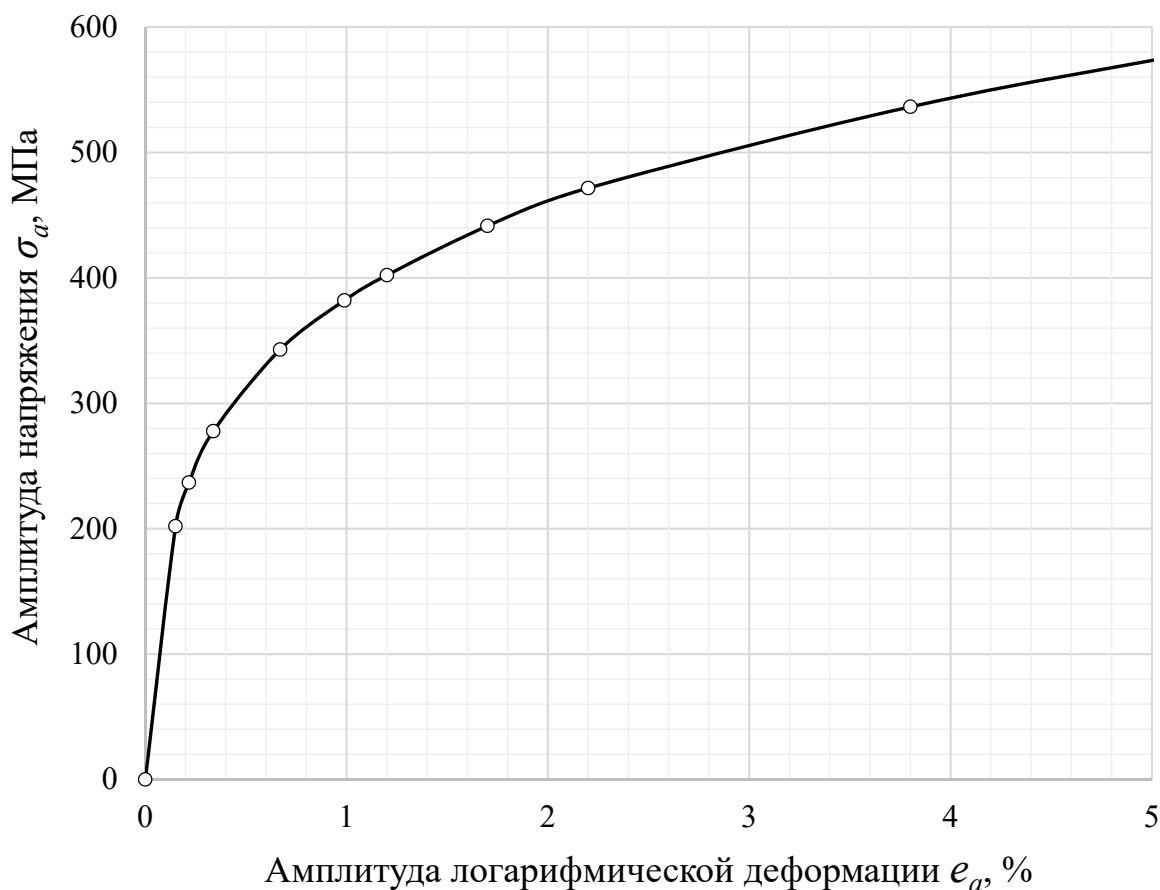


Рисунок 4.14. Циклическая кривая деформирования конструкционной углеродистой Стали 20 в симметричном цикле в диапазоне $0 \leq e_a \leq 5\%$ логарифмической деформации

Степень циклического упрочнения (разупрочнения) материала удобно оценивать, сравнивая циклическую кривую $\sigma_a(e_a)$ и кривую однократного нагружения $\bar{\sigma}(e)$. Сопоставление кривых приведено на рисунке 4.15.

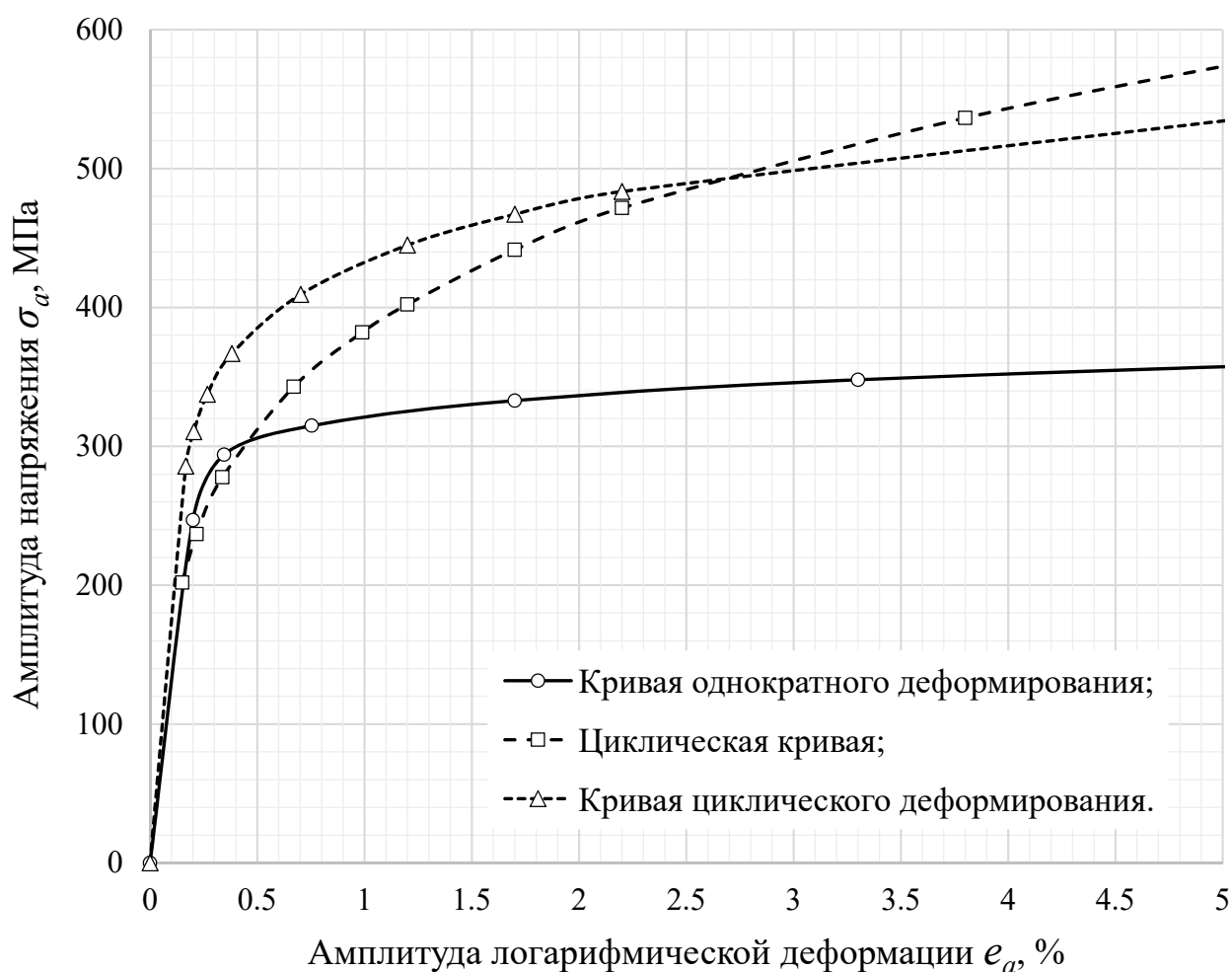


Рисунок 4.15. Сопоставление диаграммы деформирования при однократном нагружении с кривой циклического деформирования и циклической кривой Стали 20 в симметричном цикле в диапазоне $0 \leq e_a \leq 5\%$ логарифмической деформации

Анализируя полученные кривые (рисунок 4.15), можно сделать вывод, что циклическая кривая деформирования Стали 20 в симметричном цикле лежит ниже кривой однократного нагружения при малых ($p_a < 0,3\%$) и выше при бóльших амплитудах логарифмической деформации, что соответствует циклическому упрочнению материала в первом случае и упрочнению – во втором.

Отношение амплитуд напряжений для циклической кривой к напряжению при статическом деформировании при малых амплитудах деформации (в частности, при $p_a = 0,3\%$) в симметричном цикле равно $\sim 0,94$, что соответствует циклическому разупрочнению.

При больших амплитудах деформации (в частности, при $p_a = 5\%$) степень циклического упрочнения в симметричном цикле равна $\delta = 1,60$.

По мере роста амплитуды деформации материал сохраняет тенденцию к упрочнению в симметричном цикле нарастающим темпом.

Сопоставляя же кривые циклического и однократного деформирования, отметим, что сталь циклически упрочняется во всем рассматриваемом диапазоне деформирования.

Распространенным подходом к анализу циклического деформирования является использование принципа Мазинга, который в классической формулировке циклическое упрочнение не учитывает. В соответствии с этим принципом отношение амплитуды в произвольном цикле к максимальному напряжению в первом

полуцикле нагружения $\frac{\sigma_a^{стаб}}{\sigma_{max}^{(0)}} = 1$. В общем случае принцип Мазинга в отношении

кривых циклического деформирования несправедлив, а степень соответствия ему зависит от амплитуды деформации. При разных размахах, как было показано выше (см. рисунок 4.13), это отношение может значительно отличаться от единицы.

Численный эксперимент виртуальных образцов при циклическом нагружении

Численный анализ кривых циклического деформирования виртуальных со сферическими несплошностями образцов проводился в предположении, что в процессе циклического деформирования не изменяется механизм деформирования вследствие искажения их формы.

Граничные условия записывали в терминах перемещений (на поверхности модели задавали циклически изменяющиеся перемещения от $u_{max} = u$ до $u_{min} = -u$); нижняя грань образца зафиксирована; к верхней грани применена опция *Coupling*, которая подразумевает, что каждому узлу на поверхности присваивается одно и то же перемещение. Номинальная деформация $e_{ном}$ на поверхности вдали от концентраторов подсчитывается по заданному начальному перемещению. Программа нагружения показана на рисунке 4.16.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						96
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

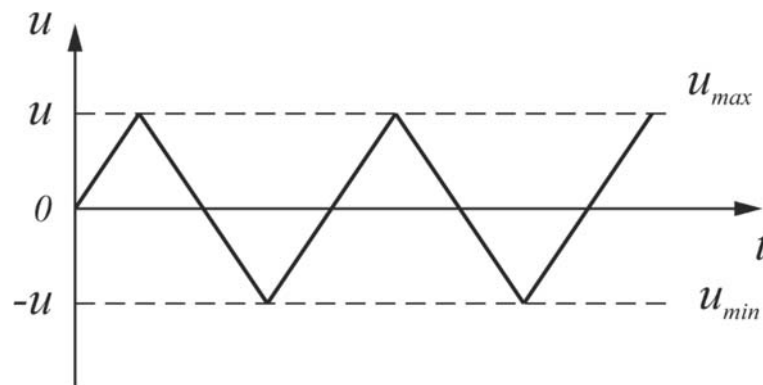


Рисунок 4.16. Схема нагружения образца в симметричном цикле изменения перемещения

Расчет производили с помощью конечно-элементной модели, построенной в подразделе 4.1 (рисунок 4.3). В качестве диаграмм циклического деформирования для разных размахов пластической деформации использовали кривые, показанные на рисунке 4.13. Для того, чтобы в модели виртуального образца получить определенный размах деформации с учетом физической нелинейности задачи, методом итерации подбиралось перемещение, которое впоследствии пересчитывалось пакетом в номинальную деформацию $e_a^{\text{НОМ}}$ (амплитуду номинальной деформации) – деформацию, соответствующую точке реверса.

Полученные в результате численных экспериментов кривые циклического деформирования для эквивалентной сплошной среды со степенью пористости $P = 10\%$ моделируемого материала приведены на рисунках 4.17–4.20. Расчет показал, что пористый материал стабилизируется в первом цикле в точке вдали от особенностей геометрии. Петля неупругого гистерезиса оказалась замкнутой в точке первого реверса. Дальнейшее нагружение в последующих циклах не представляет интереса, так как точка состояния будет воспроизводить предыдущую траекторию.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						97
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

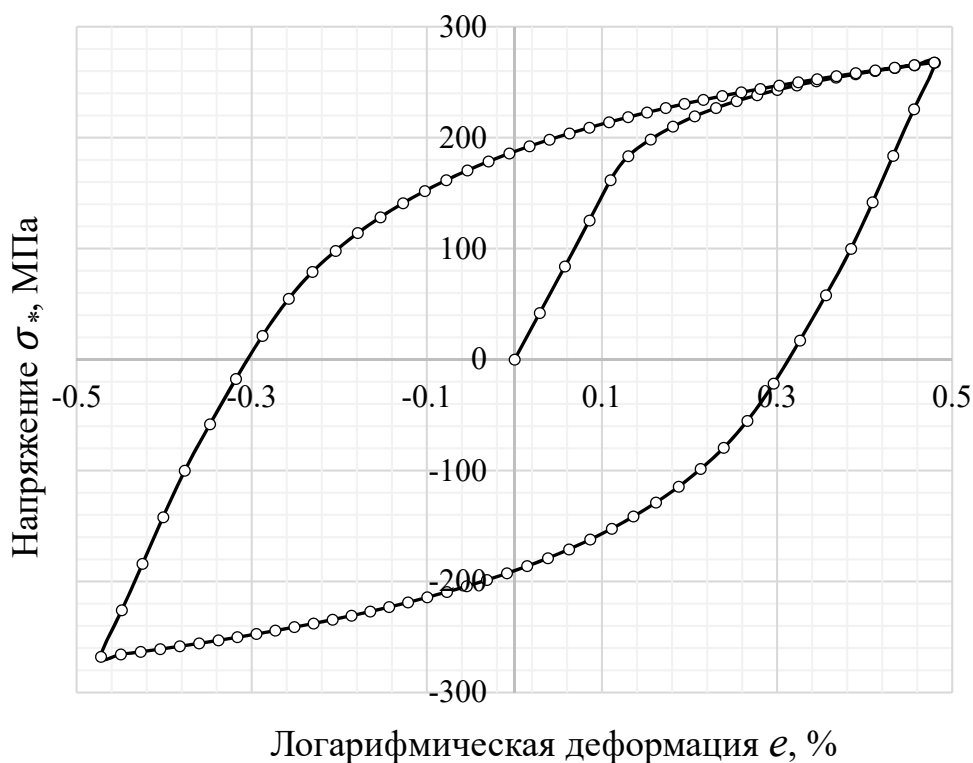


Рисунок 4.17. Кривая циклического деформирования материала со степенью пористости $P = 10\%$ при размахе пластической деформации $\Delta p = 1\%$

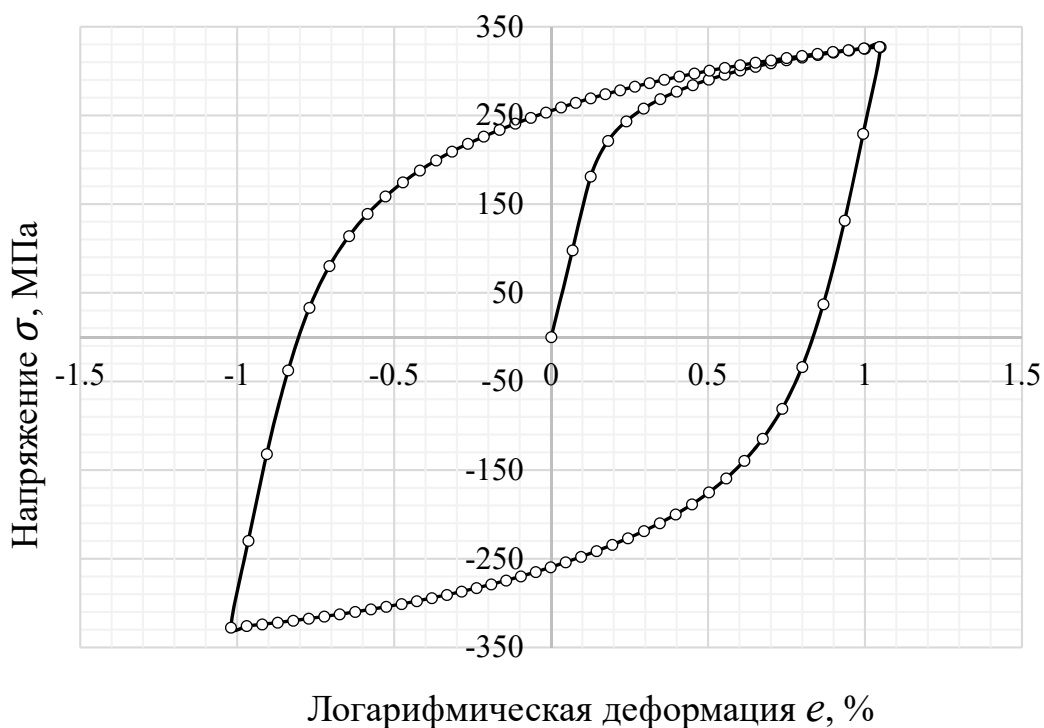


Рисунок 4.18. Кривая циклического деформирования материала со степенью пористости $P = 10\%$ при размахе пластической деформации $\Delta p = 2\%$

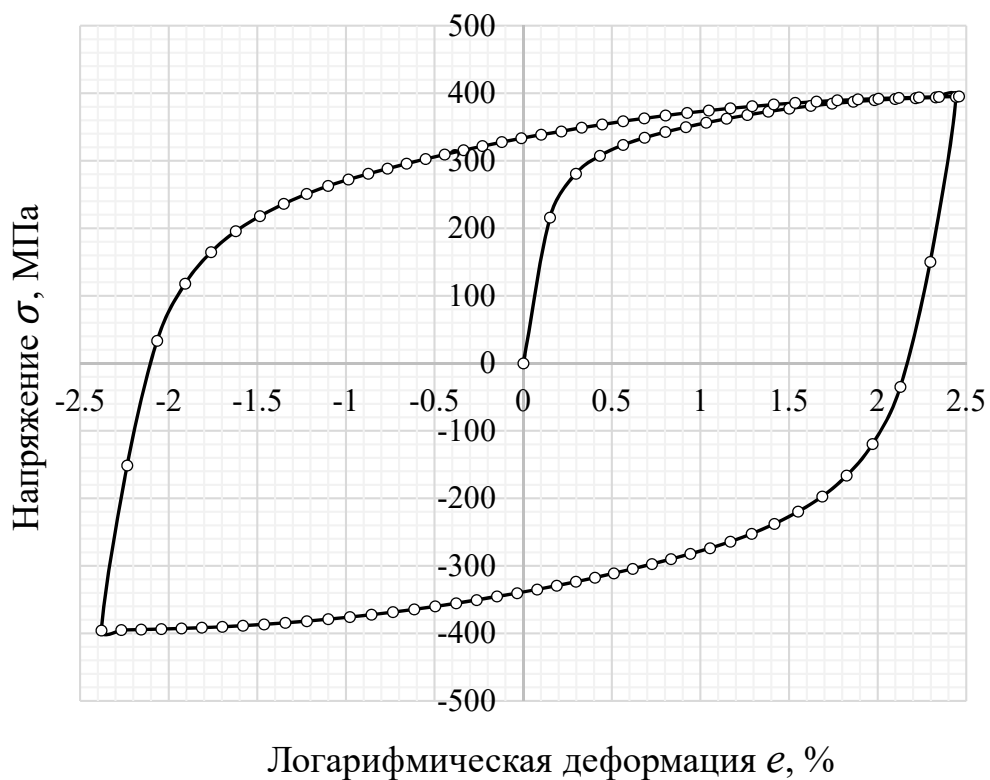


Рисунок 4.19. Кривая циклического деформирования материала со степенью пористости $P = 10\%$ при размахе пластической деформации $\Delta p = 5\%$

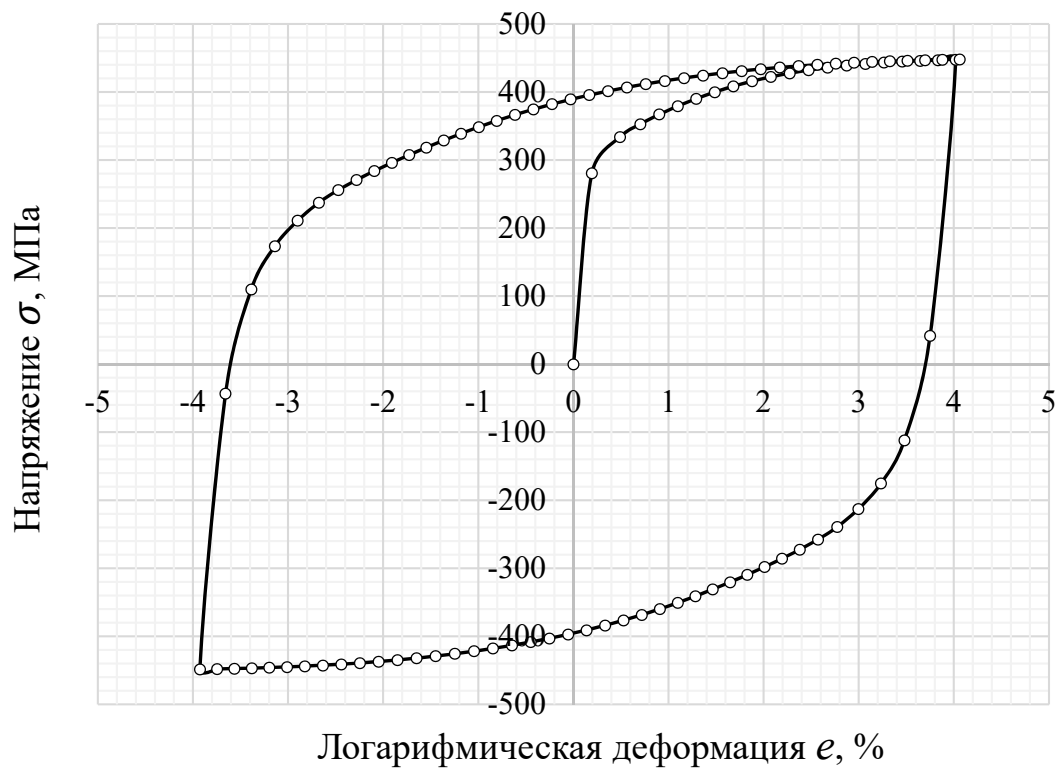


Рисунок 4.20. Кривая циклического деформирования материала со степенью пористости $P = 10\%$ при размахе пластической деформации $\Delta p = 8\%$

Полученные численным анализом кривые циклического деформирования сведены на одном графике; по вершинам петель гистерезиса построена циклическая кривая (рисунок 4.21).

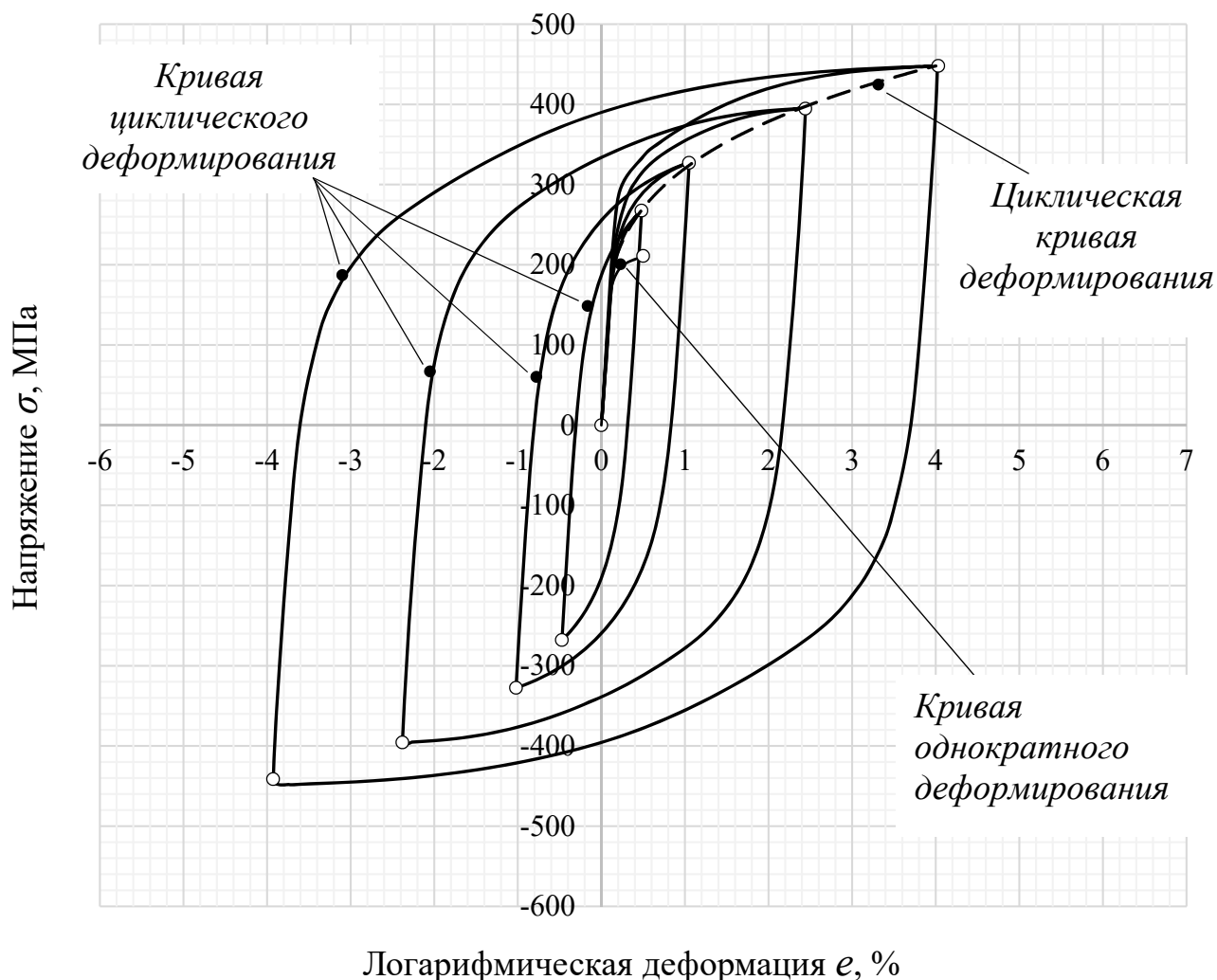


Рисунок 4.21. Кривая однократного нагружения, кривые циклического деформирования и циклическая кривая для эквивалентной сплошной среды со степенью пористости $P = 10\%$

Циклическая кривая деформирования эквивалентной сплошной среды со степенью пористости $P = 10\%$ показана отдельно на рисунке 4.22.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		100

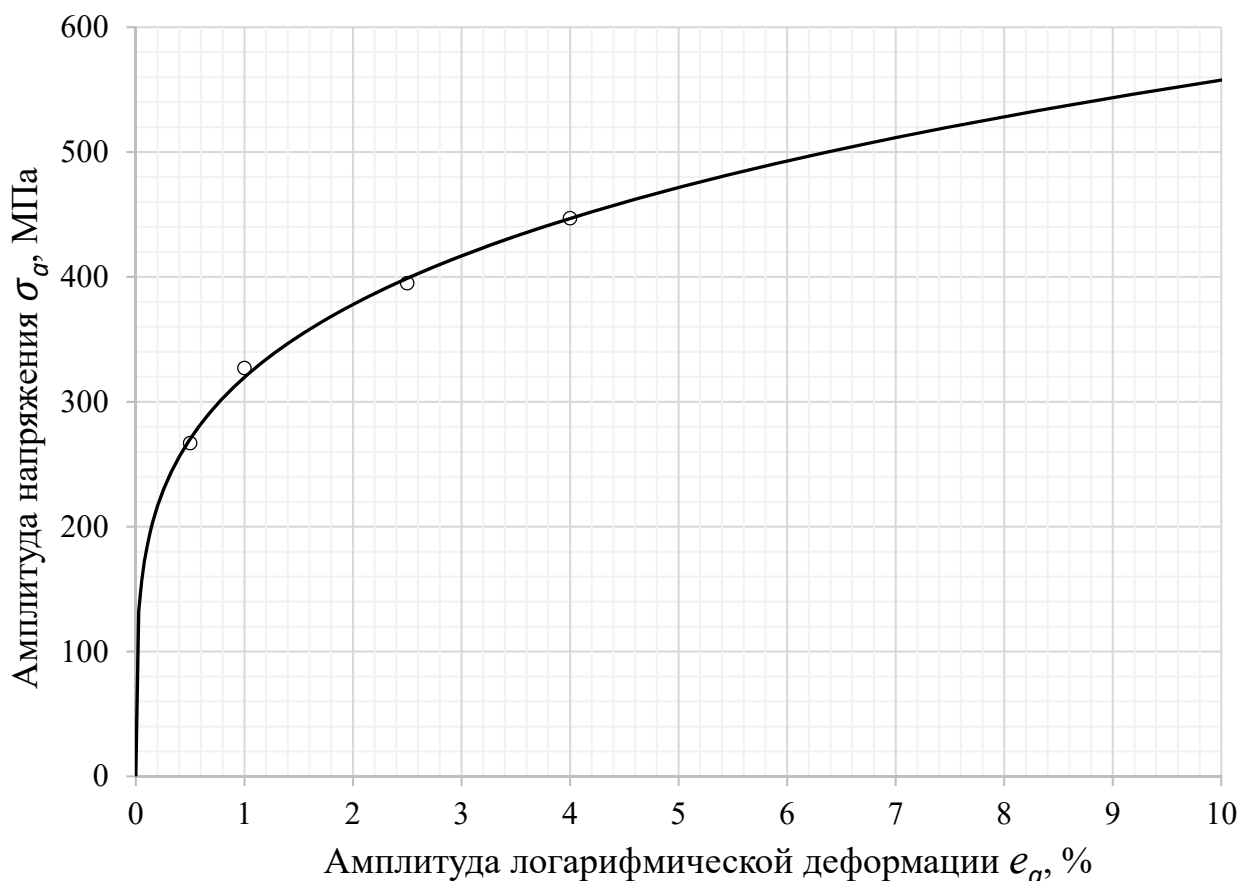


Рисунок 4.22. Циклическая кривая деформирования эквивалентной сплошной среды со степенью пористости $P = 10\%$

Уравнение циклической кривой деформирования эквивалентной сплошной среды, соответствующей степени пористости $P = 10\%$, в симметричном цикле для конструкционной углеродистой Стали 20 имеет вид

$$\sigma_a^{10\%} = 972 e_a^{0,242}, \text{ МПа.}$$

Предел пропорциональности при циклическом нагружении $\sigma_{a_{\text{пц}}}$ в симметричном цикле можно определить по формуле (4.9)

$$\sigma_{a_{\text{пц}}}^{10\%} = 972 \left(\frac{2 \cdot 2,02 \cdot 10^5}{3 \cdot 0,242 \cdot 972} \right)^{\frac{0,242}{0,242-1}} = 128 \text{ МПа.}$$

Аналогичным образом могут быть получены кривые циклического деформирования и циклические кривые для материала произвольной степени пористости. Например, для степени пористости $P = 1\%$ кривые будут иметь вид, показанный на рисунке 4.23.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						101
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

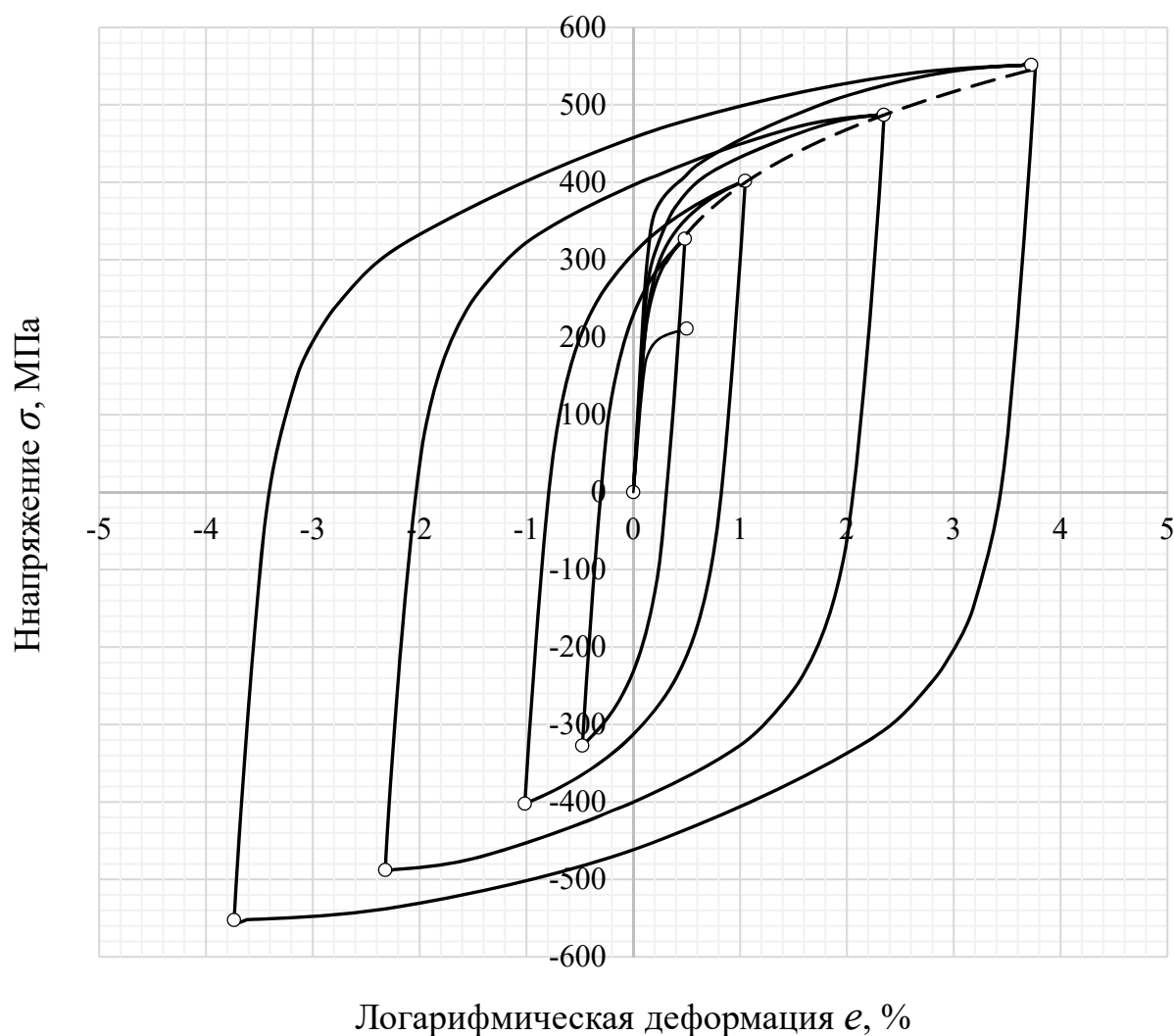


Рисунок 4.23. Кривая однократного нагружения, кривые циклического деформирования и циклическая кривая для эквивалентной сплошной среды со степенью пористости $P = 1\%$

Прочностные характеристики.

По результатам испытаний в режиме

Кривые усталости

жесткого нагружения определяется число

N_f циклов до разрушения, в данном случае, по критерию образования макротрещины (нарушения сплошности) при заданном размахе полной $\Delta\varepsilon$ или пластической Δp деформации. По достижении стабилизированного состояния в качестве параметров цикла фиксируется амплитуда σ_a или p_a .

Описание кривых усталости, характеризующих сопротивление разрушению при циклическом нагружении, в первом приближении было выполнено с помощью критерия локального характера на основе одной из простейших зависимостей

типа уравнения Мэнсона–Лэнжера с использованием усталостных характеристик бездефектного материала (см. таблица 1.1) –

$$e_a = \frac{B}{E} N_f^{-\beta} + C N_f^{-\alpha}, \quad (4.10)$$

где B , β , C , α – параметры уравнений кривых усталости по Морроу и Мэнсону-Коффину.

Наличие двух слагаемых отражает различный вклад повреждений, связанных с пластическим и микропластическим (макроупругим) деформированием материала.

Достижение предельного состояния структурного элемента фиксировали с учетом как усталостного, связанного со знакопеременным пластическим течением, так и квазистатического, определяемого односторонним накоплением деформации, повреждений с привлечением гипотезы линейного суммирования повреждений в деформационной трактовке [41] –

$$\omega_{\Sigma} = \omega + \omega_s = \omega_{кр};$$

$$\omega = \int_0^{N_f} \frac{dN}{N_{f0}(\Delta\sigma)}, \quad \omega_s = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} \delta p_i}{p_f} = \frac{p_{нак}}{p_f}, \quad (4.11)$$

где ω – усталостное повреждение;

ω_s – квазистатическое повреждение;

$\omega_{кр} = 1$ – критическое повреждение;

N_f – число циклов до разрушения;

$N_{f0}(\Delta\sigma)$ – число циклов до разрушения при симметричном нагружении в отсутствие одностороннего накопления деформации с той же амплитудой p_a пластической деформации, что и в несимметричном цикле;

$p_{нак} = \frac{p_{max} + p_{min}}{2}$ – накопленная к моменту разрушения деформация (средняя

пластическая деформация цикла, соответствует центру петли гистерезиса);

p_f – ресурс пластичности материала при однократном нагружении.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						103
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

В результате численного анализа определено число циклов до разрушения в опасной точке (области с наибольшей концентрацией напряжения). В качестве амплитуды деформации в уравнении Мэнсона-Лэнжера принята интенсивность амплитуды логарифмической деформации $e_a^{\text{инт}}$ в опасной точке элемента структуры, которая определяется следующим образом:

$$e_a^{\text{инт}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{a1} - e_{a2})^2 + (e_{a2} - e_{a3})^2 + (e_{a3} - e_{a1})^2}. \quad (4.12)$$

Здесь $e_{ai} = \ln(1 + \varepsilon_{ai})$, $i = 1, 2, 3$ – амплитуды главных логарифмических деформаций; ε_{ai} – амплитуды главных инженерных деформаций.

Численным расчетом кинетики неупругого циклического деформирования было обнаружено одностороннее накопление деформации в наиболее нагруженной локальной зоне около концентратора, происходящее в течение нескольких первых циклов нагружения до наступления стабилизации (с увеличением числа циклов более пяти петля перестает «вышагивать» – смещаться по оси деформации – и процесс деформирования стабилизируется), показанный на рисунках 4.24 и 4.25.

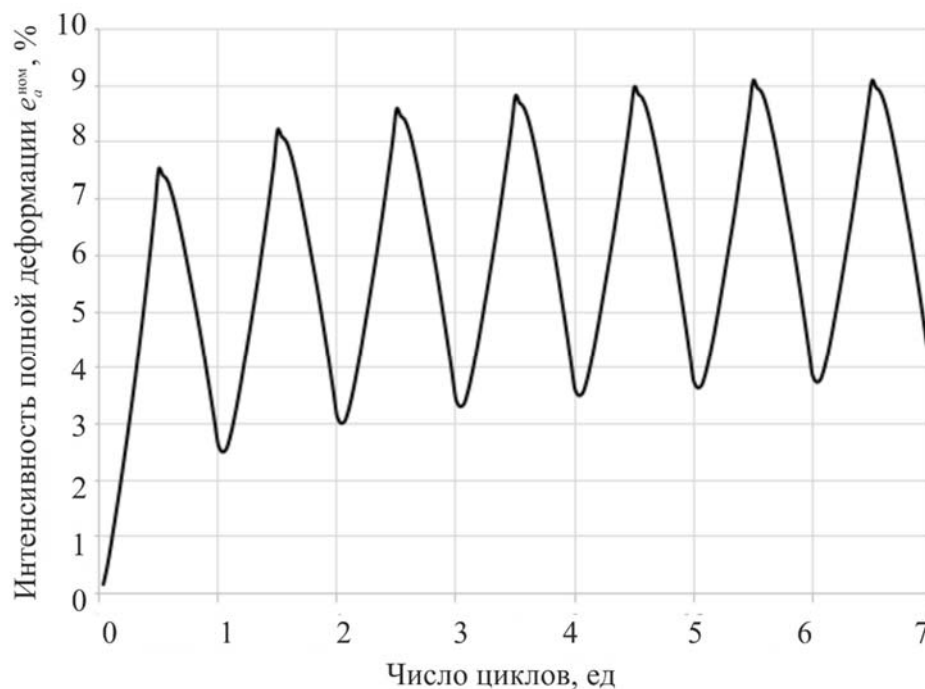


Рисунок 4.24. Зависимость интенсивности полной деформации от числа циклов до стабилизации процесса деформирования

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						104
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

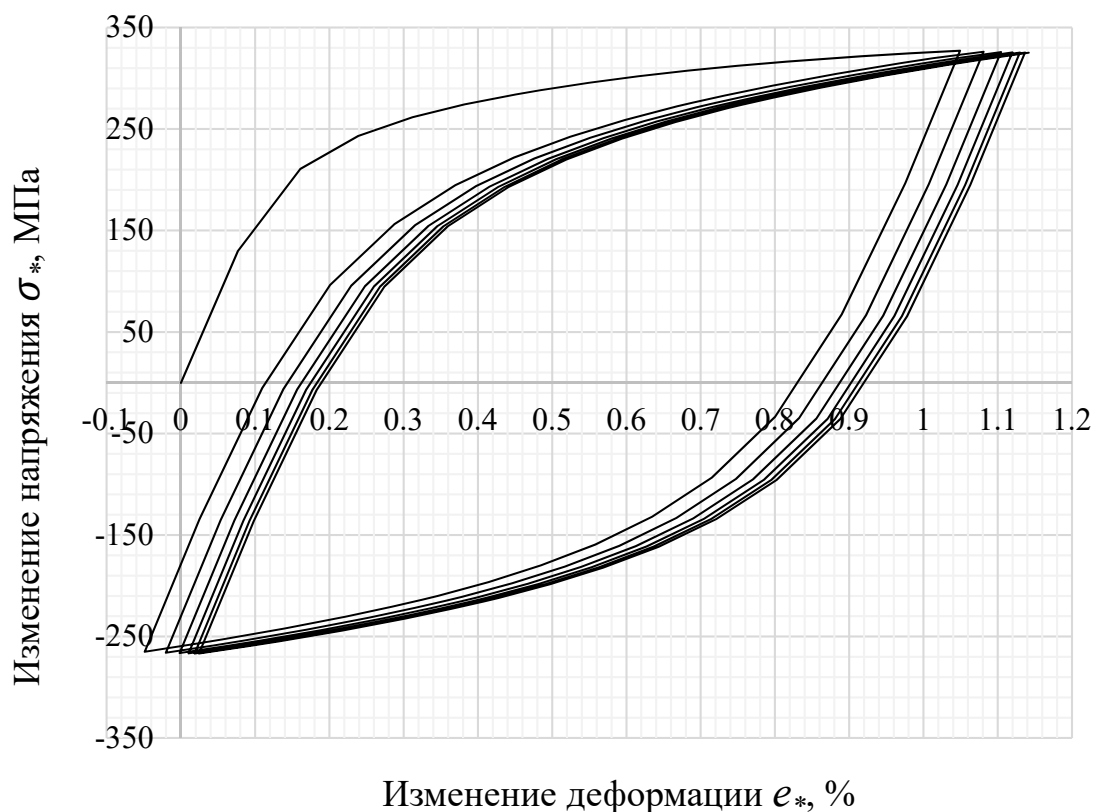


Рисунок 4.25. Процесс стабилизации циклического деформирования в опасной точке

Расчетные данные сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3. Расчетные данные для построения кривых усталости при различной степени пористости

$e_a^{\text{НОМ}}$, %	0,5	0,75	1	1,5	2,5	4
Степень пористости $P = 1\%$						
$e_a^{\text{ИНТ}}$, %	0,91281	1,529	2,2615	3,209	6,2891	10,804
N_f , ЦИКЛОВ	1009	310	131	62	15	4
Степень пористости $P = 5\%$						
$e_a^{\text{ИНТ}}$, %	1,176	2,1	3,0806	4,9	9,1252	16,227
N_f , ЦИКЛОВ	560	160	63	25	7	2
Степень пористости $P = 10\%$						
$e_a^{\text{ИНТ}}$, %	1,3836	2,357	3,7553	5,74	10,797	19,355
N_f , ЦИКЛОВ	388	120	44	18	4	1

Кривые усталости для эквивалентной сплошной среды со степенью пористости $P = 1; 5; 10 \%$ представлены на рисунке 4.26.

Заметим, что такой результат не противоречит полученному ранее (см. рисунки 4.17–4.20): некоторая асимметрия нагружения в отдельных точках взаимно компенсируется, и в целом по достижению стабилизации материала объект деформируется симметрично.

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что при высокой номинальной амплитуде $e_a^{\text{НОМ}} > 4 \%$ разрушение для материала со степенью пористости, равной 10% , следует ожидать уже в первом цикле. Следует заметить, что такой размах деформации ($\Delta p = 8 \%$) и степень пористости $P = 10 \%$ для реальной конструкции в типичных условиях эксплуатации следует считать весьма высокими, и вероятность их реализации крайне невелика. Что касается относительно небольшой степени пористости $P = 1 \%$ и размаха неупругой деформации в цикле $\Delta p = 1 \%$, то долговечность до образования малоциклового усталостной трещины составляет порядка 1000 циклов. Тем не менее, такой результат, в частности, для магистральной задвижки является недостаточным показателем долговечности. В ГОСТ Р [33] приводятся нормативные значения показателей надежности и безопасности для задвижек в зависимости от условий и параметров эксплуатации, так для линейной части магистрального трубопровода полный ресурс должен составлять не менее 2000 циклов, назначенный ресурс – 1000 циклов; для элементов перекачивающих станций полный ресурс – не менее 3000 циклов, назначенный ресурс – 1500 циклов.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						106
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

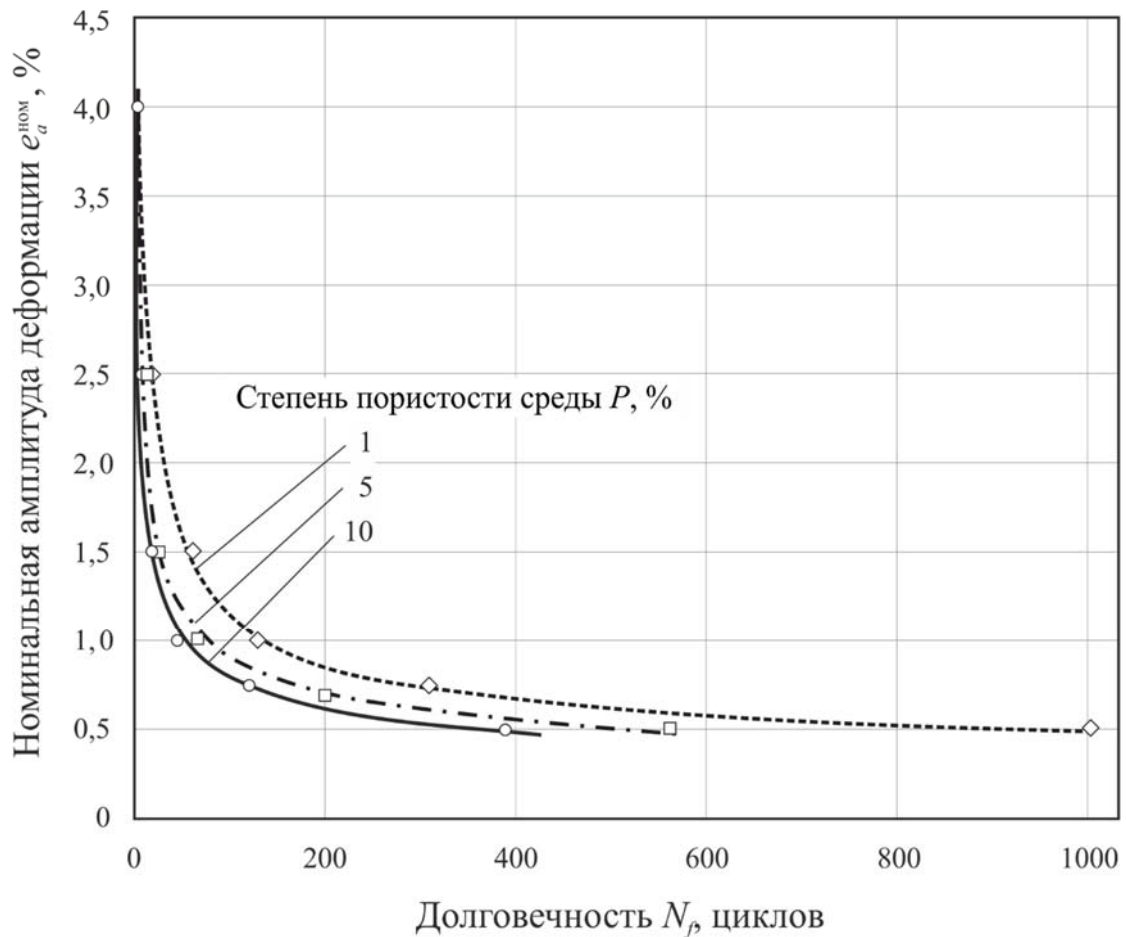


Рисунок 4.26. Прогноз числа циклов до разрушения в зависимости от амплитуды полной деформации эквивалентной сплошной среды при различной степени пористости моделируемого материала

Как итог отметим: результаты данного исследования могут быть использованы как для нормирования допускаемых размеров дефектов и их плотности, так и для назначения обоснованных коэффициентов запаса прочности по напряжению, деформации и долговечности реальной пористой среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате обзора конструкций задвижек и условий их эксплуатации выявлены основные причины выхода из строя основных элементов подобных конструкций.

Рассмотренные подходы к моделированию деформационных и прочностных свойств пластичных материалов с различного рода дефектами позволили установить, что разработка методики определения параметров математических моделей деформационных и прочностных свойств как при однократном, так и циклическом нагружении по-прежнему является актуальной задачей.

Реализованный подход, основанный на замене реального тела с дефектами эквивалентной ему по своим деформационным и прочностным характеристикам сплошной однородной изотропной средой обладает определенной научной новизной.

Его практическая значимость, помимо определения характеристик конкретного материала – конструкционной углеродистой Стали 20 – различной степени пористости, заключается в возможности использования проверенных инженерной практикой закономерностей, критериальных соотношении и методов расчета приемлемой трудоемкости.

2. Подобран критерий достижения предельного состояния объекта исследования – литого корпуса шиберной задвижки DN 1200 PN 8,0 МПа при однократном статическом нагружении при наличии групповых гладких (литейных) дефектов в виде сферических пустот. Для анализа гладких групповых дефектов подобного вида обосновано применение деформационного критерия В. Л. Колмогорова.
3. Построена конечно-элементная модель области тела со сферическими пустотелыми концентраторами. Оптимальная сетка трехмерных конечных элементов SOLID 186, 187 с тремя степенями свободы в каждом узле сформирована по результатам сопоставления значений теоретического коэффициента концентрации напряжений, полученных расчетом напряженно-деформированного состояния, со справочными данными.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						108
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

4. С использованием подобранной сетки конечных элементов с использованием реальной диаграммы деформирования Стали 20 получены поля напряжений и деформаций в бездефектном корпусе задвижки DN 1200 PN 8,0 МПа при однократном статическом воздействии, что позволило выявить наиболее опасные с точки зрения нагруженности зоны.
5. На основе метода подконструкций разработан алгоритм и выполнена серия расчетов напряженно-деформированного состояния в указанной области с групповым гладким дефектом с целью оценки влияния расстояния между дефектами и глубины залегания на прочность литого корпуса задвижки.
6. В результате анализа результатов расчета сформулированы зависимости фактического коэффициента запаса по предельной деформации и напряжению от расстояния между дефектами и глубины залегания группового дефекта, представленные в графической форме в виде номограмм и поверхностей.
7. Построена геометрическая модель регулярной пористой структуры в виде конечного набора тетраэдров со сферическими дефектами в их вершинах. На ее основе разработана конечно-элементная модель образца пористого материала. Обосновано использование ранее сформированной конечно-элементной сетки при анализе пористой структуры с множественными дефектами.
8. Получены зависимости упругих констант (модуля упругости и коэффициента Пуассона) модельной среды от степени пористости моделируемого материала.
9. Получены и проанализированы диаграммы однократного нагружения модельной среды в зависимости от степени пористости реального материала. Обнаружено, что с увеличением пористости материала ресурс пластичности уменьшается, соответственно, уменьшается истинное напряжение в момент разрушения. Анализ кривых деформирования выявил важную с практической точки зрения особенность – их центральное подобие. Получена зависимость коэффициента центрального подобия кривых деформирования от степени пористости материала.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						109
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

10. Получены и проанализированы кривые циклического деформирования и циклическая кривая бездефектного материала. Установлено, что так называемый коэффициент прочности в уравнении кривой циклического деформирования нелинейно зависит от величины амплитуды пластической деформации в цикле.
11. Проверена правомерность применения принципа Мазинга в отношении кривых циклического деформирования; оказалось, что степень соответствия ему зависит от амплитуды деформации.
12. Выполнен численный анализ кривых циклического деформирования виртуальных образцов со сферическими газовыми пузырьками; на его основе получены кривые циклического деформирования и циклические кривые эквивалентной среды, соответствующей материалу с различной степенью пористости, при ряде значений размаха неупругой деформации.
13. Выполнено описание кривых усталости в симметричном цикле эквивалентной сплошной среды при различной степени пористости моделируемого материала на основе одной из простейших зависимостей типа уравнения Мэнсона-Лэнжера. Численным расчетом кинетики неупругого циклического деформирования установлено, что в опасной точке в зоне концентрации наряду со знакопеременным пластическим течением присутствует и одностороннее накопление деформации, прекращающееся по истечении нескольких первых циклов нагружения. Долговечность определяли с учетом как усталостного, так и квазистатического повреждений с привлечением гипотезы линейного суммирования повреждений в деформационной трактовке.
14. Достоверность результатов исследования подтверждается использованием апробированных, доказавших свою состоятельность критериев прочности, известных вычислительных методов и стандартных пакетов численного анализа ANSYS, SolidWorks, Mathcad и Excel, а также анализом оценки сходимости численных решений.
15. Практическую значимость исследования представляет разработанная мето-

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						110
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

дика прогнозирования возможности эксплуатации элементов запорной арматуры с гладким групповым дефектом, размеры и расстояния которых превосходят нормативно допустимые. Небезынтересным для проектировщиков подобного оборудования могут оказаться поля напряжений и деформаций вблизи гладких дефектов.

16. Разработанная методика определения параметров математической модели сплошной однородной изотропной среды, эквивалентной по своим деформационным и прочностным свойствам пористой среде, при однократном и циклическом нагружении позволяет применять проверенные инженерной практикой закономерности, критериальные соотношения и методы расчета приемлемой трудоемкости для нормирования допускаемых размеров дефектов и их плотности, так и для назначения обоснованных коэффициентов запаса прочности по напряжению, деформации и долговечности реальной пористой среды.

17. В результате исследования установлено, что при определенном коэффициенте запаса ограничения на предельные размеры и расстояния между дефектами, регламентируемые нормативным документом РД-19.100.00-КТН-022-13, могут оказаться неоправданно жесткими.

Результаты проделанной работы докладывались на следующих конференциях:

- в виде стендового доклада на Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2017» (г. Севастополь, 2017 г.);
- доклад на Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург, 2018 г.).

По теме магистерской диссертации опубликованы одна статья и тезисы доклада:

- Poroshin V. Development of a model of a homogeneous continuous medium based on the material with defects in the form of hollows / V. Poroshin, A. Shlishevsky, K. Tsybulya // MATEC Web Conf. – 2017. – Т. 129– pp. 1–4 (Scopus и Web of Science);

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						111
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

- Порошин, В.Б. Прогнозирование деформационных и прочностных свойств пористых сред при однократном и циклическом нагружении / В.Б. Порошин, А.В. Шлишевский // IX Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»: сб. материалов. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2018. – С. 303.

Приняты к публикации статьи:

- The forecasting of deformational and strength properties of metals with uniformly scattered defects in form of spherical hollows at single and cyclic loading // журнал «Materials Today: Proceedings», индексируется в наукометрических базах Scopus (Q1) и Web of Science;
- Прогнозирование деформационных и прочностных свойств металлических материалов с равномерно распределенными замкнутыми порами при однократном и циклическом нагружении // «Вестник ПНИПУ. Механика», индексируется в базе Scopus.

Проект «Разработка методики расчетной оценки прочности и долговечности крупногабаритных литых конструкций с дефектами при однократном и повторно-переменном нагружении» стал одним из победителей в конкурсе студенческих научных проектов «Вперед к открытиям» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2017 г.).

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						112
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агошков О.Г. Инженерная оценка циклической долговечности элементов технических систем / О. Г. Агошков, В. С. Цепелев, Ю. А. Петренко // Технико-технологические проблемы сервиса – 2010. – Т. 1 – № 11– 54–57с.
2. Александров А.А. Оценка НДС литосварных рам большегрузных карьерных самосвалов с учетом дефектов литья / А. А. Александров, В. Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов – 2013. – Т. 1 – № 22– с. 20–24.
3. Бесеция Д.С. Определение цикличности магистрального нефтепровода / Д. С. Бесеция, К. А. Вансович // Труды I Всероссийской молодежной научно-технической конференции нефтегазовой отрасли/Сибирский Федеральный университет – 2014. – 1–5с.
4. Боераков А.Е. Классификация дефектов, выявляемых при визуальном осмотре сосудов и аппаратов / А. Е. Боераков, С. О. Гевлич, С. А. Пегишева // Технические науки – от теории к практике – 2013. – № 20 – 1–7с.
5. Будилов И.Н. Оценка повреждаемости как элемент промышленной безопасности опасных производственных объектов / И. Н. Будилов, Г. В. Кулясов, Ю. В. Лукащук, В. В. Шевела // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета – 2013. – Т. 17 – № 54 – 39–44с.
6. Будилов И.Н. Оценка прочности технологических трубопроводов при наличии дефектов механического происхождения / И. Н. Будилов, Г. В. Кулясов, Ю. В. Лукащук, В. В. Шевела // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета – 2013. – Т. 17 – № 1 – 57–62с.
7. Варшицкий В.М. Методология определения интервала повторных испытаний участка нефтепровода с трещиноподобными дефектами / В. М. Варшицкий, М. И. Валиев, О. А. Козырев // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов – 2013. – Т. 3 – № 11– 42–47с.
8. Васильев А.С. Совершенствование эксплуатационных показателей запорной трубопроводной арматуры / А. С. Васильев, Ю. В. Суханов, П. О. Щукин, О. Н. Галактионов // Инженерный вестник Дона – 2014. – Т. 30 – № 3– 1–11с.
9. Воронин Ю.Ф. Автоматизированная система диагностики и ликвидации литейных дефектов / Ю. Ф. Воронин, А. В. Матохина, Е. О. Сикорский, А. Б. Рогудеев // Известия волгоградского государственного технического университета – 2014. – Т. 21 – № 12 – 116–121с.
10. Воронин Ю.Ф. Эмпирическая методика снижения брака отливок / Ю. Ф. Воронин, В. А. Камаев, Н. А. Бойко // Управление большими системами: сборник трудов – 2008. – № 23 – 137–155с.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						113
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

11. ГОСТ Р 52630-2012: Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия / – 2013. – 110с.

12. ГОСТ Р 52857.1-2007: Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. / – 2013. – 38с.

13. Гуревич Д.Ф. Трубопроводная арматура. Справочное пособие / Д. Ф. Гуревич // Машиностроение – 1981. – 368с.

14. Гучинский Р.В. Прогнозирование развития четвертьэллиптической трещины усталости с помощью конечно-элементного моделирования накопления повреждений / Р. В. Гучинский, С. В. Петин // Институт проблем машиностроения РАН – 2015. – № 7– 890–900с.

15. Емельянов О.В. Влияние сжимающей части цикла знакопеременного нагружения на кинетику напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещины / О. В. Емельянов, Е. А. Зимонин, М. П. Пелипенко // Строительные конструкции, здания и сооружения – 2010. – Т. 2 – № 14– 111–115с.

16. Ермаков И.Н. Оценка влияния пористости на напряженно-деформационное состояние стальной плиты / И. Н. Ермаков // Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallургия – 2013. – Т. 13 – № 2– 125–132с.

17. Золотухин А.В. Численное моделирование свойств пористых металлов / А. В. Золотухин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики – 2011. – Vol. 1, № 7 – pp. 138–139.

18. Зорин Е.Е. Разработка метода оперативной диагностики и прогнозирования остаточного ресурса, основанного на регистрации накопленной поврежденности металлом конструкции в процессе длительного нагружения / Е. Е. Зорин // Известия Московского государственного технического университета МАМИ – 2013. – Т. 1 – № 15– 142–148с.

19. Иванов А.В. Техническое диагностирование трубопроводной арматуры / А. В. Иванов, Л. А. Акимов, В. Н. Лисицкий, В. В. Марков, Н. Н. Сулейманов // Современная наука актуальные проблемы и пути их решения – 2016. – Т. 23 – № 1 – 52–55с.

20. Игнатова А.В. Экспериментальное исследование и численное моделирование упругих характеристик и прочности пористой керамики/ А. В. Игнатова, О. А. Кудрявцев, С. Б. Сапожников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 4 – с. 121–137.

21. Калюлин С.Л. Расчет характеристик полей деформирования в компонентах гетерогенной среды со случайной структурой методом конечных элементов / С. Л.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		114

Калюлин, Р. Н. Сулейманов, М. А. Ташкинов, Р. Я. Газизов // Вестник ПНИПУ – 2014. – № 37 – с. 172–186.

22. Кирсанов Ю.А. Теплоотдача и сопротивление высокопористого материала / Ю. А. Кирсанов, Р. А. Назипов, Е. И. Иванова, С. Ю. Жукова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук – 2012. – Т. 14 – № 4–1 – 163–171с.

23. Кошелева Е.А. Диагностика дефектов литья с помощью компьютерного моделирования / Е. А. Кошелева, Н. Ю. Малькова, И. В. Марширов, А. А. Иванайский, И. И. Ползунова – 2016. – № 4– 189–190 с.

24. Кушнарченко В.М. Анализ причин отказов оборудования и трубопроводов / В. М. Кушнарченко, В. С. Репях, Е. В. Кушнарченко, Е. Ю. Чирков // Вестник Оренбургского государственного университета – 2010. – Т. 10 – № 116 – 153–159с.

25. Кушнарченко В.М. Усталостные разрушения деталей нефтегазового оборудования / В. М. Кушнарченко, Ю. А. Чирков, В. С. Репях, В. Г. Ставищенко // Вестник Оренбургского государственного университета – 2012. – Т. 4 – № 140– 271–279с.

26. Левандовский А.Н. Моделирование пористого материала методом конечных элементов / А. Н. Левандовский, Б. Е. Мельников, А. А. Шамкин // Строительство уникальных зданий и сооружений – 2017. – Т. 53 – № 2 – с. 61–77.

27. Лобачева О.В. Система выявления и ликвидации газовых и усадочных дефектов в литых заготовках запорной арматуры / О. В. Лобачева, А. В. Матохина, Ю. Ф. Воронин // Известия волгоградского государственного технического университета – 2010. – Т. 157 – № 2 – 60–65с.

28. Лукьянцев М.А. Оценка остаточного ресурса резервуаров при малоцикловом нагружении / М. А. Лукьянцев, Р. Г. Вильданов, Р. Р. Исхаков // Современные проблемы науки и образования – 2013. – № 6– 1–6с.

29. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: справочник / Д.А. Гохфельд, Л.Б. Гецов, К.М. Кононов и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 408 с.

30. Мулюкин О.П. Снижение влияния деструктивных факторов на работоспособность клапанно-седельных затворов «Конус-острая кромка» / О. П. Мулюкин, В. Л. Береснев, С. В. Путилин, В. А. Бугаков // Символ науки – 2016. – Т. 7– 73–83с.

31. Настека В.В. Напряженно-деформированное состояние металла корпусов фонтанной арматуры до и после наплавки / В. В. Настека, А. Ф. Коренякин, Н. Ф. Низамов, Е. Ю. Чирков, В. М. Кушнарченко, С. В. Каменев // Вестник Оренбургского государственного университета – 2013. – Т. 1 – № 150 – 212–218с.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						115
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

32. Нейбер Г. Концентрация напряжений / Г. Нейбер // Государственное издательство технико-теоретической литературы – 1947. – 205с.

33. ОТТ-23.060.30-КТН-246-08 Общие технические требования. Задвижки шиберные для магистральных нефтепроводов и нефтеперекачивающих станций ОАО «АК» Транснефть» // Стандартиформ – 2010. – 93с.

34. Панченко М.И. Вероятностная модель долговечности трубопроводной арматуры / М. И. Панченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки – 2011. – Т. 3– 37–45с.

35. Панченко М.И. Методика назначения срока службы трубопроводной арматуры / М. И. Панченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки – 2011. – № 4– 261–271с.

36. Пахомов В.А. Оценка ресурса трубопроводов ЯЭУ при ограничении перемещений в опорах с использованием критериев малоциклового усталости / В. А. Пахомов, О. В. Сарапов // Проблемы прочности и пластичности – 2005. – № 67–37–45с.

37. Перов С.Н. Коэффициенты интенсивности напряжений для труб с несквозными трещинами / С. Н. Перов, Ю. В. Скворцов, К. А. Цапурин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук – 2008. – Т. 10 – № 3 – 905–910с.

38. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений / Р. Петерсон // Мир – 1977. – 303с.

39. Плахотникова Е.В. Анализ причин нарушения работоспособности электроприводной запорной арматуры / Е. В. Плахотникова, Т. А. Елисеева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки – 2013. – № 11 – 352–361с.

40. Подрезова И.С. Анализ причин заклинивания и обрывов штоков трубопроводной электроприводной арматуры / И. С. Подрезова, Л. В. Шутова, Ю. Е. Ульянова, О. Ю. Пугачева, Ю. Н. Елжов // Глобальная ядерная безопасность – 2014. – Т. 4 – № 13– 32–37с.

41. Порошин, В.Б. Анализ предельных состояний конструкционных сталей и сплавов при статическом и циклическом нагружении: учебное пособие / В.Б. Порошин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2017. – 72 с.

42. Расщупкин В.П. Дефекты металла: Учебное пособие по дисциплине «Материаловедение и ТКМ» / В.П Расщупкин., М.С Корытов. – Омск: Изд-во СиБАДИ, 2006. – 37 с.

43. РД-19.100.00-КТН-022-13. Контроль качества литых деталей трубопроводной арматуры / – 2013. – 172с.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						116
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

44. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин (Часть 9) / А. Н. Романов // Вестник научно-технического развития – 2015. – Т. 12 – № 100– 42–62с.

45. Рудаков О.А. Разработка методики исследования коррозионной усталости сварных соединений магистральных газонефтепроводов / О. А. Рудаков, Е. А. Кривоносова, М. Х. Арипов, Е. С. Захарова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение – 2010. – Т. 12 – № 2– 58–63с.

46. Савкин А.Н. Оценка усталости в локальных областях металла с учетом развития неупругих явлений / А. Н. Савкин, А. А. Седов, П. В. Федченков // Известия волгоградского государственного технического университета – 2012. – Т. 9 – № 6– 125–130с.

47. Сильвестров А.С. Перспективные пути совершенствования современных методов диагностики магистральных трубопроводов / А. С. Сильвестров, А. Д. Анваров, В. А. Булкин // Вестник Казанского технологического университета – 2010. – № 9– 404–407с.

48. Слуцкер А.И. Влияние микропористости на прочностные свойства SiC-керамики / А. И. Слуцкер, А. Б. Синани, В. И. Бетехтин, А. А. Кожушко, А. Г. Кадомцев, С. С. Орданьян, А. Ф. И. Российской // Физика твердого тела – 2008. – Т. 50 – № 8 – с .1395–1401.

49. Соловьев А.Н. Определение упругих свойств армированных композиционных материалов на основе конечно-элементного моделирования / А. Н. Соловьев, Е. Н. Зиборов, С. Н. Шевцов // Вестник южного научного центра – 2016. – Т. 12 – № 2 – с. 3–10.

50. СТ ЦКБА 002-2003 Стандарт ЦКБА. Арматура трубопроводная. Задвижки. Методика силового расчета. / – 2003. – 69с.

51. СТ ЦКБА 003-2003 Стандарт ЦКБА. Арматура трубопроводная. Корпуса и крышки. Нормирование статической прочности. / – 2003. – 91с.

52. СТ ЦКБА 004-2003 Стандарт ЦКБА. Арматура трубопроводная. Болты и шпильки. Нормирование статической прочности. / – 2015. – 88с.

53. Столярчук А.С. Оценка реальной пластичности материала в процессе эксплуатации элементов нефтегазового комплекса / А. С. Столярчук, А. В. Коробов // Известия волгоградского государственного технического университета – 2008. – Т. 10 – № 2– 109–112с.

54. Суриков В.И. Применение метода конечных элементов при расчете на малоцикловую усталость элементов конструкции неподвижной опоры трубопроводов для участков надземной прокладки нефтепровода «Заполярье — НПС „Пур-

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						117
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

Пе«» / В. И. Суриков, В. В. Бондаренко, А. В. Коргин, М. Ю. Зотов, А. А. Богач // Вестник МГСУ – 2014. – № 2– 47–56с.

55. Татаринцев В.А. Влияние эксплуатационных факторов на циклическую трещиностойкость сталей литых корпусов запорной арматуры / В. А. Татаринцев, А. К. Толстошеев // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение – 2014. – Т. 1 – № 37– 102–107с.

56. Филимонов И.Е. Моделирование напряженно-деформированного состояния тонкостенных корпусных деталей с учетом литейных дефектов / И. Е. Филимонов, А. Г. Гордич, П. А. Прокудин // Вестник ЮУрГУ – 2011. – Т. 11 – № 31 – 44–48с.

57. Халимов А.Г. Определение безопасного срока эксплуатации оборудования с повреждениями при пульсирующем циклическом нагружении / А. Г. Халимов, А. А. Халимов // Нефтегазовое дело – 2011. – Т. 9 – № 3– 85–88с.

58. Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат, М.: 1990, 456 с.

59. Чирков Ю.А. Оценка напряженного состояния элементов оборудования скважин / Ю. А. Чирков, В. М. Кушнарченко, М. Р. Ишмеев // Вестник Оренбургского государственного университета – 2000. – № 3 – 95–97с.

60. Чирков Ю.А. Повреждения трубопроводов ОНГКМ и определение интенсивности их отказов / Ю. А. Чирков, Е. В. Кушнарченко, А. А. Бауэр, Д. Н. Щепинов, А. П. Фот // Территория Нефтегаз – 2008. – № 12– 46–49с.

61. Шлишевский А. В. Оценка прочности корпуса магистральной задвижки DN 1200 PN 8,0 МПа при однократном нагружении: отчет о НИР за 1 семестр/ А. В. Шлишевский. – Челябинск: ЮУрГУ, 2016. – 38 с. (На правах рукописи).

62. Шлишевский А. В. Оценка прочности корпуса магистральной задвижки DN 1200 PN 8,0 МПа при однократном нагружении: отчет о НИР за 2 семестр. – Челябинск: ЮУрГУ, 2017. – 16 с. (На правах рукописи).

63. Шлишевский, А.В. Влияние внутренних дефектов на прочность задвижки магистрального трубопровода.: выпускная квалификационная работа студента/ А.В. Шлишевский. – Ч., 2016. – 73 с.

64. Beals J. Density gradient effects on aluminium foam compression behaviour / J. Beals, M. Thompson // J. Mater. Sci. – 1997. – Vol. 32, № 13 – pp. 3595–3600.

65. Chawla N. Microstructure and mechanical behavior of porous sintered steels / N. Chawla, X. Deng // Mater. Sci. Eng. – 2005. – Vol. 390– pp. 98–112.

66. Clayton J.D. Mesoscale modeling of nonlinear elasticity and fracture in ceramic polycrystals under dynamic shear and compression / J. D. Clayton, R. H. Kraft, R. B. Leavy // Int. J. Solids Struct. – 2012. – Vol. 49 – № 18 – pp. 2686–2702.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						118
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

67. Deshpande V.S. Isotropic constitutive models for metallic foams / V. S. Deshpande, N. A. Fleck // J. Mech. Phys. Solids – 2000. – Vol. 48, № 6 – pp. 1253–1283.

68. Gent A.N. Mechanics of foamed elastic materials / A. N. Gent, A. G. Thomas // Rubber Chem. Technol. – 1963. – Vol. 36 – pp. 597–610.

69. Gent A.N. The deformation of foamed elastic materials / A. N. Gent, A. G. Thomas // J. Appl. Polym. Sci. – 1959. – Vol. 1, № 1 – pp. 107–113.

70. Hanssen A.G. Validation of constitutive models applicable to aluminium foams / A. G. Hanssen, O. S. Hopperstad, M. Langseth, H. Ilstad // Int. J. Mech. Sci. – 2002. – T. 44 – № 2 – 359–406c.

71. Kanahashi H. Effect of cell size on the dynamic compressive properties of open-celled aluminum foams. / H. Kanahashi, T. Mukai, T. G. Nieh, T. Aizawa, K. Higashi // Mater. Trans. – 2002. – Vol. 43, № 10 – pp. 2548–2553.

72. Kramberger J. Computational study of low-cycle fatigue behaviour of lotus-type porous material / J. Kramberger, M. Šraml, S. Glodež // Int. J. Fatigue – 2016. – T. 92 – 623–632c.

73. Kramberger J. Damage and failure modeling of lotus-type porous material subjected to low-cycle fatigue / J. Kramberger, K. Sterkuš, S. Glodež // Frat. ed Integrita Strutt. – 2016. – T. 10 – № 35 – 142–151c.

74. Lefebvre L.-P. Porous metals and metallic foams: current status and recent developments / L.-P. Lefebvre, J. Banhart, D. C. Dunand // Adv. Eng. Mater. – 2008. – Vol. 10 – № 9 – pp. 775–787.

75. Michailidis B.N. Mechanical response and FEM modeling of porous Al under static and dynamic loads / B. N. Michailidis, E. Smyrniaios, G. Maliaris, F. Stergioudi, A. Tsouknidas // Adv. Eng. Mater. – 2014. – Vol. 16, № 3 – pp. 289–294.

76. Michailidis N. An image-based reconstruction of the 3D geometry of an Al open-cell foam and FEM modeling of the material response / N. Michailidis, F. Stergioudi, H. Omar, D. N. Tsipas // Mech. Mater. – 2010. – Vol. 42, № 2 – pp. 142–147.

77. Parvanian A.M. The effects of manufacturing parameters on geometrical and mechanical properties of copper foams produced by space holder technique / A. M. Parvanian, M. Saadatfar, M. Panjepour, A. Kingston, A. P. Sheppard // Mater. Des. – 2014. – Vol. 53 – pp. 681–690.

78. Poroshin V. Development of a model of a homogeneous continuous medium based on the material with defects in the form of hollows / V. Poroshin, A. Shlishevsky, K. Tsybulya // MATEC Web Conf. – 2017. – T. 129 – pp. 1–4.

79. Reyes A. Constitutive modeling of aluminum foam including fracture and statistical variation of density / A. Reyes, O. S. Hopperstad, T. Berstad, A. G. Hanssen, M. Langseth // Eur. J. Mech. A/Solids – 2003. – T. 22 – № 6 – 815–835c.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						119
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

80. Sabzevari M. FE modeling of the compressive behavior of porous copper-matrix nanocomposites / M. Sabzevari, R. J. Teymoori, S. A. Sajjadi // Mater. Des. – 2015. – Vol. 86 – pp. 178–183.

81. Shen H. Finite element modeling of porous titanium / H. Shen, L. C. Brinson // Int. J. Solids Struct. – 2007. – Vol. 44 – pp. 320–335.

82. Szyniszewski S.T. The mechanical properties and modeling of a sintered hollow sphere steel foam / S. T. Szyniszewski, B. H. Smith, J. F. Hajjar, B. W. Schafer, S. R. Arwade // Mater. Des. – 2014. – Vol. 54 – pp. 1083–1094.

83. Tang H.P. Fractal dimension of pore-structure of porous metal materials made by stainless steel powder / H. P. Tang, J. Z. Wang, J. L. Zhu, Q. B. Ao, J. Y. Wang, B. J. Yang, Y. N. Li // Powder Technol. – 2012. – Vol. 217 – pp. 383–387.

84. Warren W.E. The linear elastic properties of open-cell foams / W. E. Warren, A. M. Kraynik // J. Appl. Mech. – 1988. – Vol. 55, № 2 – pp. 341–346.

85. Zhu X. A novel modeling approach of aluminum foam based on MATLAB image processing / X. Zhu, S. Ai, D. Fang, B. Liu, X. Lu // Comput. Mater. Sci. – 2014. – Vol. 82 – pp. 451–456.

					150403.2018.016.00. ПЗ ВКР	Лист
						120
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата		