

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

*На правах рукописи*



ВАЛИЕВ АЙБУЛАТ САЛАВАТОВИЧ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО УРОВНЯ НАКОПЛЕНИЯ  
УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СТАЛИ 09Г2С ПО ХАРАКТЕРУ  
ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Специальность 2.6.17. «Материаловедение»  
(отрасль наук – технические)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Кузеев Искандер Рустемович

Уфа 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ЯВЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ.....	11
1.1 Этапы исследования усталостных повреждений материалов и конструкций.....	11
1.2 Закономерности накопления усталостных повреждений .....	13
1.3 Малоцикловое нагружение .....	18
1.4 Анализ методов оценки предельного состояния оборудования, подверженного малоцикловому нагружению .....	20
1.5 Использование акустической эмиссии для исследования структурных изменений.....	26
Вывод по главе 1 .....	35
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	37
2.1 Выбор материала исследований .....	37
2.2 Оборудование и методика испытаний .....	39
Вывод по главе 2 .....	48
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАДИЙНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ МЦУ ПО ПАРАМЕТРАМ АЭ .....	49
3.1 Исследование параметров АЭ в процессе усталостных испытаний.....	49
3.2 Исследование параметров АЭ при статическом растяжении образцов, подверженных предварительному циклическому нагружению.....	52
3.3 Исследование параметров АЭ при внедрении индентора в процессе усталостных испытаний.....	67
Вывод по главе 3 .....	72
ГЛАВА 4 МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ....	74
4.1 Влияние МЦУ на зерна перлита.....	74
4.2 Влияние МЦУ на ферритную фазу .....	78

4.3 Влияние МЦУ на образование микропор в структуре .....	92
4.4 Исследования торцевой поверхности .....	96
4.5 Исследования поверхности разрушения.....	101
4.4 Выводы по главе 4.....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	111
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	130

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

Зарождение и развитие усталостных трещин в зонах концентрации напряжений вследствие длительных знакопеременных эксплуатационных нагрузок является одной из причин разрушений металлоконструкций и оборудования в нефтегазовой отрасли. Несмотря на многочисленные исследования закономерностей усталостных процессов в конструкционных сталях, разработанные методы повышения долговечности технологического оборудования, уровень аварийности опасных производственных объектов (ОПО) по данной причине остается высоким.

Одним из способов повышения надежности оборудования является своевременное обнаружение развивающихся дефектов и проведение ремонта. Поэтому особый практический интерес вызывают исследования, направленные на разработку способов прогнозирования момента возникновения критического состояния материала оборудования, подверженного знакопеременному нагружению, на ранних стадиях развития усталостных дефектов. Решению этих проблем посвящены исследования В.И. Иванова, О.В. Башкова, Н.А. Семашко, Д.Л. Мерсона [1-3], которые указывают на эффективность акустико-эмиссионного метода контроля (АЭК). Чувствительность АЭК к изменениям микроструктуры позволяет в режиме реального времени проводить исследование кинетики накопления повреждений на различных стадиях деформации материалов, что, безусловно, является одним из преимуществ данного метода над другими методами неразрушающего контроля.

Характерной чертой достижения критического уровня накопленных усталостных повреждений является резкое снижение механических свойств, что повышает риски разрушения материала оборудования в указанном периоде эксплуатации. В работе В.С. Ивановой ухудшение свойств материала при усталостном нагружении объясняется изменением механизма адаптации материала к приложенным нагрузкам за счет протекания структурных изменений.

Н.А. Махутовым установлено, что критическим состоянием образцов при усталостных испытаниях является момент страгивания магистральной трещины (период предразрушения), который происходит при исчерпании 70-80 % ресурса образца [4-6].

Помимо периода предразрушения, в работах Е.А. Наумкина и М.И. Кузеева [7,8] был выявлен экстремальный период накопления повреждений  $N_i/N_p=0,3-0,4$  ( $N_i/N_p$  - отношение количества циклов нагружения на момент измерения ( $N_i$ ) на количество циклов до разрушения ( $N_p$ ) косвенно характеризует уровень накопленных повреждений), в котором наблюдается резкое снижение механических и физических свойств конструкционных сталей. Так в трудах [8] установлено, что в данной области нагружения происходит снижение критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{IC}$ , что может привести к повышению вероятности преждевременного выхода из строя оборудования, работающего в условиях знакопеременного нагружения

Следует отметить, что наряду с большим количеством работ по исследованию процесса усталостного разрушения по характеру изменений физических и механических свойств материала [9,10], влияние знакопеременного нагружения на микроструктуру стали остается малоизученным, что не позволяет получить окончательной картины кинетики накопления усталостных повреждений. Исходя из вышеизложенного, актуальной задачей является исследование изменений зеренной структуры стали и параметров акустической эмиссии (АЭ) в ходе малоциклового нагружения для выявления критических периодов накопления повреждений.

### **Степень научной разработанности темы исследования**

Особенности механизма достижения предельного состояния при усталостном нагружении изложены в трудах В.С. Ивановой, В.Ф. Терентьева, В.В. Болотина, Н.А. Махутова, В.Е. Панина, А.А. Шанявского, Р.М. Шнейдеровича, О.В. Соснина, В.Е. Громова, И.Р. Кузеева, Д.Е. Бугая,

Е.А. Наумкина, С.С. Мэнсона (США), Л.Ф. Коффина (США), Ю. Мураками (Япония) и др.

Метод акустической эмиссии нашел широкое применение в исследованиях структурных изменений металлических материалов при различных видах нагружения. Механизмам возникновения и регистрации акустических сигналов, а также их интерпретации, посвящены исследования В.И. Иванова, Д.Л. Мерсона, А.Ю. Виноградова, О.В. Башкова, В.В. Носова, В. А. Барат, Г. Б. Муравина, Г.Л. Данегана (США), М. Отсу (Япония), Ё. Накамуры (Япония), К. Оно (США), М. Хэмстеда (США) и др.

Несмотря на многочисленные исследования свойств материала при малоциклового усталости (МЦУ), изменения микроструктуры и параметров АЭ в данной области нагружения остаются изученными фрагментарно.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 2.6.17. «Материаловедение» (отрасль науки – технические), в работе проводились исследования в следующих областях:

- установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий от действия механических нагрузок и внешней среды (пункт 5);

- развитие методов прогнозирования и оценка остаточного ресурса металлических, неметаллических и композиционных материалов (пункт 13).

### **Цель работы**

Выявление критического уровня накопления усталостных повреждений при малоциклового усталости на примере низколегированной стали 09Г2С на основе установления связи между характером накопления повреждений, регистрируемых методом АЭ, и изменениями на уровне зёрненной структуры материала.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и выполнены следующие **задачи исследования**:

1 Рассмотреть методы оценки предельного состояния материала, подверженного малоциклового усталости.

2 Исследовать изменения параметров АЭ в процессе накопления усталостных повреждений на образцах с плавным концентратором и определить наиболее информативные диагностические параметры.

3 Исследовать характер изменения микроструктуры стали 09Г2С, происходящих при малоцикловом нагружении в областях накопления повреждений, в которых повышается вероятность разрушения на примере соотношения среднего размера зерен феррита в продольном и поперечном направлениях, объемной доли и среднего размера зерен перлита, а также количества микропор.

4 Установить зависимость между изменениями микроструктуры и параметрами АЭ в критических областях накопления усталостных повреждений.

### **Научная новизна**

Установлено, что изменение параметров АЭ при малоцикловом нагружении для образцов из стали 09Г2С имеет нелинейный характер и описывается полиномиальными зависимостями с экстремумами на уровнях накопленных повреждений  $N_i/N_p=0,2-0,4$ ,  $N_i/N_p=0,5-0,6$  и  $N_i/N_p=0,7-0,8$ .

При достижении уровня накопленных повреждений  $N_i/N_p=0,2-0,4$  и  $N_i/N_p=0,7-0,8$  происходит снижение энергии импульсов акустических сигналов, что свидетельствует о накоплении критического уровня энергии материалом в данных периодах и для последующей релаксации внутренних напряжений сменяется механизм адаптации материала к внешнему нагружению. Результаты подтверждают теорию высвобождения накопленной энергии при смене механизма адаптации с последующим переходом в диссипативное состояние.

Обнаружено, что в стали 09Г2С при МЦУ интенсивность образования микропор увеличивается при достижении уровня повреждений  $N_i/N_p=0,3$ , средний размер зерен перлита увеличивается на всем протяжении циклического

нагружения. Средний размер зерен феррита в продольном и поперечном направлениях уменьшается вплоть до достижения  $N_i/N_p=0,7$ , при этом их соотношение (вытянутость зерен) меняется нелинейно с экстремумами при  $N_i/N_p=0,3$ ,  $N_i/N_p=0,5$ ,  $N_i/N_p=0,6$ , что свидетельствует об изменении микроструктуры.

### **Теоретическая значимость**

Полученные результаты расширяют представления о полиэкстремальном характере накопления повреждений в низколегированной стали при реализации циклического нагружения в малоциклового области усталости, что коррелирует с изменениями параметров АЭ и позволяет использовать новые диагностические признаки для выявления локализации предельного состояния конструкционной низколегированной стали на всем временном интервале нагружения.

### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость работы заключается в применении алгоритма определения критического уровня накопленных повреждений при МЦУ по параметрам АЭ, который использован независимой экспертной организацией ООО «Техническая диагностика» в качестве дополнительного метода контроля за состоянием технологического оборудования в процессе технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности.

Полученные результаты используются при проведении занятий по дисциплине «Оборудование и методы проведения испытания материалов» для бакалавров, обучающихся по направлению 15.03.02 – «Технологические машины и оборудование» на кафедре «Технологические машины и оборудование» УГНТУ.

### **Методология и методы исследований**

Методологическую основу исследований составляют стандартные и оригинальные методы оценки степени деградации конструкционной стали при МЦУ.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе использованы физические (амплитуда, количество и энергия сигналов АЭ) и структурные методы исследования накопления усталостных повреждений.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1 Результаты комплексных исследований параметров АЭ (амплитуда сигнала АЭ, количество и энергия импульса АЭ) при МЦУ и одноосном растяжении конструкционной стали 09Г2С.

2 Способ идентификации критического уровня накопленных повреждений при МЦУ на основе изменения зёрновой структуры (вытянутость зерна феррита, объемная доля перлита, максимальный разброс содержания перлита, количество микропор) и энергии импульса АЭ.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Исследования проводились на оборудовании, прошедшем государственную поверку. В работе применены методы и методики экспериментальных исследований, имеющие широкую апробацию. При анализе изменений параметров АЭ от уровня накопленных повреждений использованы три способа генерации акустических волн. Графические зависимости построены с учетом доверительных интервалов и теории ошибок эксперимента.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международной научно-технической конференции "Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Севастополь, 2018), Международной научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг" (Москва, 2018), 69-ой, 73-ей научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2018, 2022), XV Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (Уфа, 2022); Молодежной научно-практической конференции «Современная механика в цифровую эпоху: проблемы и перспективы» (Оренбург, 2022 г.).

**Публикации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 16 научных работах, в том числе 2 в ведущих рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

**Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 142 наименований. Работа изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 80 рисунков, 6 таблиц.

# ГЛАВА 1 ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ЯВЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

## 1.1 Этапы исследования усталостных повреждений материалов и конструкций

С началом промышленной революции в XIX веке возникли ряд проблем, связанных с преждевременным разрушением материалов оборудования в связи с развитием трещины. Чаще всего данный тип дефектов возникал в динамических машинах: паровых двигателях, локомотивах и насосах, которые подвергались многократным повторяющимся нагрузкам. Возникшая проблема требовала систематического решения [11].

Одним из первых исследований явления снижения прочности металлических материалов при циклическом нагружении является работы Ж.В. Понселе, который в 1839 году вводит термин «усталость» (понятие об «уставшем металле»).

В 1870 году немецкий инженер Август Вёлер публикует результаты испытаний на усталость железнодорожных осей. Автор обнаружил зависимость количества циклов до разрушения от амплитуды напряжения, в последующем Л. Шпангенберг изобразит зависимость, выявленной Вёлером, в графическом виде.

Фундаментальный шаг в отношении изучения усталости был сделан в начале XX века Юингом и Хамфри в 1903 г. [12]. Они провели микроструктурные исследования, в результате которых было выявлено, что развитие усталостной трещины начинается с полос скольжения.

С развитием авиастроения и военного машиностроения в XX столетии и увеличением машинного парка повысилась доля отказов, связанных с усталостными разрушениями. В связи с этим интенсивность исследований закономерностей МЦУ многократно увеличилась для обеспечения надежности оборудования, подверженного нагрузкам циклического характера [13].

В 1920 г. А.А. Гриффит (английский авиационный инженер) публикует результаты своих теоретических расчетов и экспериментов, объясняющие разрушение хрупких материалов, разработанных во время первой мировой войны. Гриффит предположил, что наблюдаемая в экспериментах низкая прочность на излом, а также зависимость прочности от размера, обусловлены наличием микроскопических дефектов в объемном материале [14]. Чтобы проверить гипотезу дефекта, Гриффит вводил искусственный дефект в свои экспериментальные образцы. Дефект представлял собой поверхностную трещину, которая была значительно больше других дефектов образца. Исследования показали, что произведение квадратного корня из длины дефекта «а» и напряжения при разрушении  $\sigma_b$  практически постоянно, что выражается уравнением:

$$\sigma_b \cdot \sqrt{a} = const. \quad (1.1)$$

С помощью этой классической новаторской работы о важности трещин Гриффит разработал предварительные основы механики разрушения.

Первый закон, который описывает скорость распространения усталостной трещины представляет собой эмпирическую формулу, предложенную П.С. Пэрисом в 1963 г. В тезисе [15] установлено, что распространение усталостной трещины может быть описано с использованием теории Ирвина для метода анализа напряжения трещины, для роста усталостной трещины следующим образом:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m, \quad (1.2)$$

где  $da/dN$  - скорость распространения усталостной трещины,

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$  – коэффициент интенсивности напряжения,

$C$  и  $m$  – константы, полученные экспериментально.

Вскоре это уравнение получило широкое распространение по всему миру и было названо законом Пэриса, которое предполагало, что скорость роста

усталостной трещины может быть коррелирована с использованием параметра интенсивности напряжения  $\Delta K$  [16].

До середины прошлого века усталость металла регистрировалась в основном или даже исключительно на графиках усталостной долговечности Вёлера (или  $S - N$ ). До середины XX века пластическая деформация не рассматривалась как важный параметр, характеризующий усталостную долговечность. Эта ситуация изменилась после того, как Коффин и Мэнсон независимо сформулировали закон усталостной долговечности, названный в честь обоих, в котором амплитуда пластической деформации  $\Delta \varepsilon_{pl}/2$ , а не амплитуда напряжения, была параметром, контролирующим долговечность.

$$\frac{\Delta \varepsilon_{pl}}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (1.3)$$

где  $\varepsilon'_f$  – коэффициент усталостной пластичности;

$c$  – показатель усталостной пластичности, который обычно находится в диапазоне от 0,5 до 0,6 [17].

Следующим этапом изучения явления усталостного разрушения являются исследования стадийности накопления повреждений при циклических нагружениях. Среди всех работ, необходимо отметить труды Дж. Полака, М. Клеснил, В.С. Ивановой, В.Ф. Терентьева, Н.В. Махутова, А.А. Шанявского, В.М. Горицкого [1, 4, 6].

## 1.2 Закономерности накопления усталостных повреждений

Концепция расчета усталостных повреждений берет начало в 1920-ых годах, когда впервые была опубликована идея линейного накопления усталостных повреждений [18]. В 1945 году Р.В. Майнером была предложена схожая гипотеза о линейных повреждениях (linear damage rule - LDR) [19], позже данная гипотеза

будет широко известна как правило Палмгрена-Майнера. Правило Майнера основано на гипотезе о том, что усталостное повреждение равно коэффициенту накопленного цикла, выраженному как:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i}, \quad (1.4)$$

где  $D$  – повреждения;

$n_i/N_i$  – отношение количества циклов на данный момент к количеству циклов до разрушения.

За счет своей простоты правило Майнера применяется в качестве отраслевого стандарта для расчета усталостной прочности металлических конструкций во многих странах. Так, данное правило используется в стандартах по проектированию стальных конструкций стран Европы (EN 1993-1-9:2005 [20]), Великобритании (BS 7608:2014 [21]), а также в качестве рекомендации в компании «DNV» (DNVGL-RP-C203:2016 [22]).

Однако, концепция Майнера имела ряд недостатков, одним из которых является отсутствие влияния уровня нагрузки. В 1948 году Ричард и Ньюмарк [23] представили концепцию кривой повреждения, связывающую повреждение с отношением циклов с целью преодоления недостатков LDR. Они предположили, что помимо количества циклов, уровень накопленных повреждений должен зависеть от величины напряжений. Исходя из данной гипотезы и наработок [24] было предложено правило нелинейного повреждения (nonlinear damage rule - NLDR). NLDR выражает повреждение как функцию мощности, которая зависит от нагрузки:

$$D = \sum \left( \frac{n_i}{N_i} \right)^{x(\sigma_i)}, \quad (1.5)$$

где  $x(\sigma_i)$  – функция амплитуды напряжения в момент времени.

Очевидно, что правило Майнера является частным случаем уравнения (1.5), где  $x$  равно единице для всех  $\sigma_i$ . На Рисунке 1.1. представлены две концепции: слева – линейное правило накопления повреждений, справа – нелинейное. Исходя из рисунка можно сделать вывод, что прогнозируемое количество циклов до разрушения меньше в случае нелинейного накопления повреждений [25].

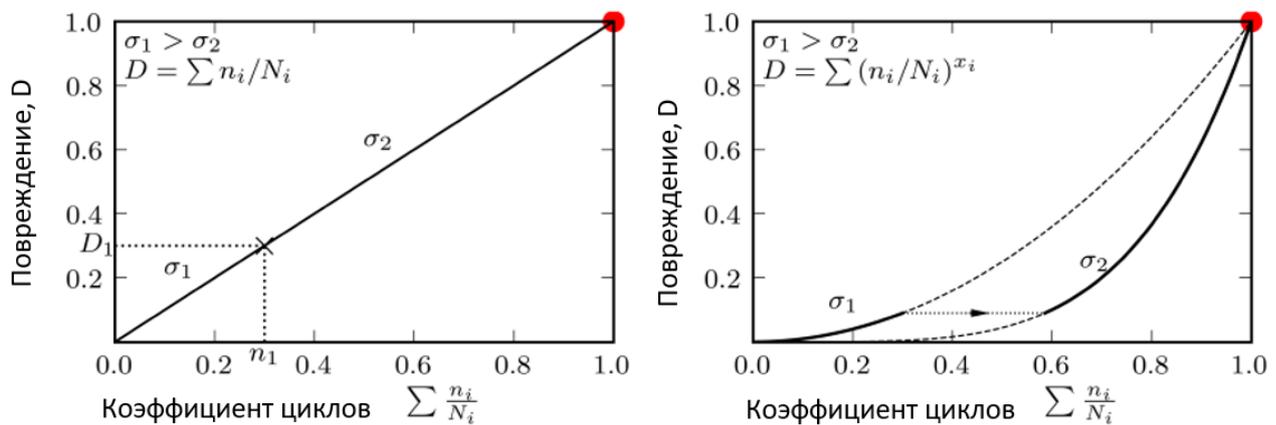


Рисунок 1.1 – Зависимости накопления повреждений по линейному (слева) и нелинейному правилам повреждения (справа) [25]

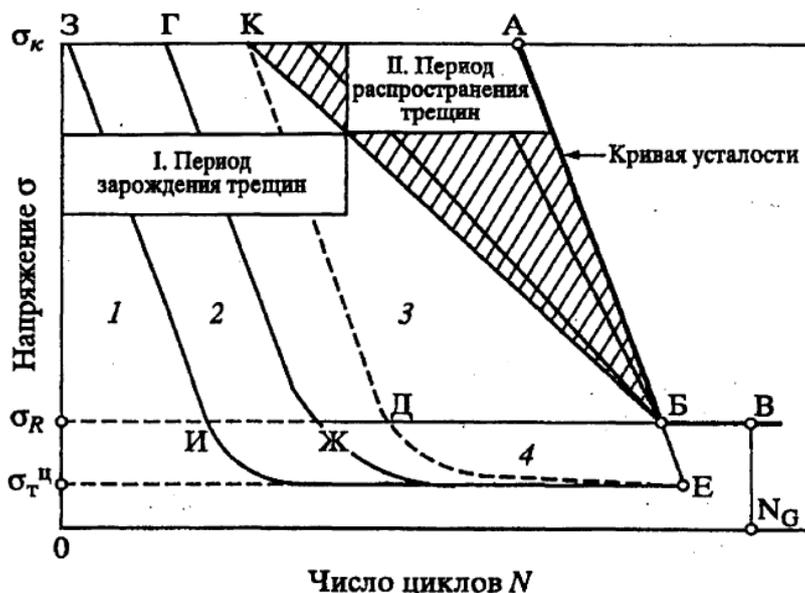
В 1954 году публикуется статья М. Хунтера и В. Фрике, в которой впервые предлагается разделить процесс усталостного разрушения на отдельные стадии:

- образование полос скольжения;
- появления микротрещин;
- объединение микротрещин;
- развитие магистральной трещины.

В качестве доказательств был проведен ряд усталостных испытаний на образцах из алюминиевого сплава 2024-T3 [26].

В монографии В.С. Ивановой усталость была представлена как четырехстадиный процесс [27]. Автором было предложено 4 периода развития усталостного разрушения:

- инкубационный (накопление микродефектов в кристаллической решетке);
- разрыхление (зарождением и развитием микротрещин);
- стабильный рост усталостной трещины;
- нестабильный рост усталостной трещины (Рисунок 1.2).



- 1 – циклическая микротекучесть; 2 - циклическая текучесть;  
 3 – циклическое упрочнение; 4 – область нестабильного роста трещины

Рисунок 1.2 – Обобщенная диаграмма накопления усталостных повреждений с основными стадиями [13]

Для малоуглеродистых сталей [1, 27] первая стадия имеет схожую природу с областью микротекучести при статическом растяжении. В данной стадии увеличивается плотность дислокаций на границах зерен, а также вблизи включений. В перлите и на границах между перлитом и ферритом зарождаются новые дислокации. На данном этапе происходит образование полос скольжения в благоприятно ориентированных поверхностных зернах. Выполненный рентгеноструктурный анализ [28] показал, что на приповерхностном слое металла пластическая деформация выше, чем во внутреннем объеме, при этом циклическое напряжение остается неизменным вне зависимости от роста циклов.

На стадии циклической текучести происходит постепенное увеличение числа поверхностных полос скольжения, интенсивное изменение дислокационной структуры металла (рост дислокаций с увеличением их плотности приводит к их объединению и сплетению). Следует отметить, что данная стадия наблюдается в металлах и сплавах, которые имеют физический предел текучести. При достижении конца стадии текучести наблюдается раскрытие петли гистерезиса и снижение действующего напряжения  $\sigma_a$ . Проход фронта Людерса-Чернова образует волнистый рельеф на одной трети всей рабочей поверхности образца [29].

К третьей стадии циклической усталости относится период появления поверхностных субмикротрещин размером 1...3 мкм в плоскости, перпендикулярной к приложенной нагрузке. Отличительной чертой стадии упрочнения (разупрочнения) от первых двух является изменение механических свойств. В зависимости от отношения предела прочности к условному пределу текучести ( $\sigma_b/\sigma_{0,2}$ ) происходит либо упрочнение, либо разупрочнение материала:

- $\sigma_b/\sigma_{0,2} < 1,2$  – циклическое разупрочнение;
- $\sigma_b/\sigma_{0,2} \geq 1,4$  – циклическое упрочнение;
- $1,2 \leq \sigma_b/\sigma_{0,2} < 1,4$  – может произойти либо упрочнение, либо разупрочнение.

Для стадии упрочнения также характерно увеличение плотности дислокаций и формирование самоорганизующихся дислокационных структур (СДС). Само явление упрочнения связано с взаимодействием дислокаций с различными видами барьеров (границы зерен, неметаллические включения и т.д.). При достижении критической плотности дислокаций ( $\rho \approx 10^{14} \text{ м}^{-2}$ ) происходит зарождение субмикротрещин [30,31]. В большинстве случаев субмикротрещины зарождаются на приповерхностных слоях, глубина которых соизмерима с размером одного зерна.

Механизмом зарождения микротрещин в условиях циклического нагружения могут служить разные процессы: слияние дислокаций, зарождение микротрещины на пересечении полос скольжения, взаимодействие двойников, механизм Коттрелла и т.д. Однако, основным механизмом зарождения усталостной трещины считается образование интрузий и экструзий в связи с локализованным скольжением при знакопеременном нагружении [32,33]. В работе [29] установлено,

что период зарождения микротрещин составляет  $N_i/N_p=0,8$  от всего ресурса образцов, подверженных циклической усталости.

Завершением стадии циклического упрочнения (разупрочнения) является развитие линий Френча (необратимых повреждений) с образованием устойчивых полос скольжения (УПС). Исследования М. Хемпеля показали, что при дальнейшем нагружении образцов из стали происходит резкое увеличение длины трещины.

Последней стадией усталостного разрушения является распространение усталостной трещины (РУТ), различают период стабильного РУТ (стадия Пэриса) [34,35] и нестабильного РУТ.

В последние годы наибольшее число исследований было направлено на изучение данной стадии. Развитие этих исследований стало возможным после того, как было показано, что скорость стабильного роста трещины определяется единственным параметром  $\Delta K$  - размахом коэффициента интенсивности напряжений. Обзор этих исследований дан в работах [36]. При РУТ у пластичных материалов на поверхности разрушения образуется бороздчатый или квазитороздчатый рельеф, в сталях со структурой феррит-перлит наряду с бороздками также наблюдается микрорельеф с межзерненным сдвигом [37,38].

### **1.3 Малоцикловое нагружение**

Как было указано в разделе 1.2 циклическая усталость делится на многоцикловую и малоцикловую. Согласно ГОСТ 25.502-79 малоцикловой усталостью (МЦУ) называется усталость, при которой разрушение происходит при упругопластической деформации [40].

Большой вклад в изучение области малоциклового усталости внесли Ю. Мураками, Н.А. Махутов, В.Ф. Терентьев, М.М. Гаденин, Л.Ф. Коффин, А.З. Воробьев, О.В. Соснин, В.Е. Громов, В.А. Стрижало, С.В. Серенсен, И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, Д.Е. Бугай, А.П. Гусенков, Р.М. Шнейдерович, С.С. Мэнсон, Б.Ф. Лангер, А.А. Шаньявский, Э.М. Гутман и др. [41-43].

Отличительной чертой МЦУ от многоциклового усталости является объем пластической деформации [44-46]. Так при традиционной усталости развитие микропластической деформации происходит вблизи развития усталостной трещины [47-49]. При МЦУ макропластическая деформация наблюдается на всей поверхности рабочей зоны образцов [50,51].



$\sigma_B$  – предел прочности;  $\sigma_{II}$  – напряжение разрыва;  $\sigma_K$  – критическое напряжение;  $\sigma_R$  – предел усталости;  $\sigma_{TII}$  – циклический предел текучести;

$N_0$  - критическое число циклов

Рисунок 1.3 – Кривая усталости [50]

Малоцикловая усталость характеризуется малым количеством циклов до разрушения (менее  $10^5$  циклов) с высокой амплитудой напряжений (от критического напряжения  $\sigma_K$  до предела прочности  $\sigma_B$ ), при этом частота нагружения ниже, чем при многоциклового усталости и в основном составляет менее 50 циклов в минуту [51].

По Рисунку 1.3 видно, что в области МЦУ имеется два участка:

I – участок циклической ползучести. Участок характерен для пластичных материалов, где разрушение происходит с образованием шейки в области излома (по механизму пластической текучести);

II – область МЦУ. На данном участке наблюдается зона усталостного излома на поверхности разрушения.

При циклической упругопластической деформации наблюдается образование резких полос скольжения, количество которых увеличивается в процессе циклического нагружения. Установлено, что глубина сдвига при МЦУ зависит от амплитуды нагружения. После проведения рентгеноструктурного анализа, авторами [52] было обнаружено, что ориентация зерен начинает меняться с первых циклов нагружения, что не характерно для многоциклового усталости.

В отличие от четырехстадийной многоциклового усталости при МЦУ выделяют 3 основные стадии. Первая стадия составляет 1 % от всей долговечности материала и характеризуется микроструктурными изменениями. На следующей стадии происходит зарождение и распространение микротрещин, которые образуют микроскопические блоки. Заключительная стадия начинается слиянием микротрещин и заканчивается развитием магистральной трещины вглубь материала с последующим разрушением [53-55].

#### **1.4 Анализ методов оценки предельного состояния оборудования, подверженного малоциклового нагружению**

Малоциклового усталости подвергаются большое количество конструкций и оборудования, примером могут служить разрушения металлоконструкций при землетрясении в Нортридже в 1994 г. [56] и в Ханшине в 1995 г. [57].

Для понимания природы МЦУ и точного прогнозирования остаточного ресурса в последние десятилетия было проведено большое количество исследований явления МЦУ. Значительная часть работ были посвящены модернизации соотношения Коффина-Мэнсона для инженерного проектирования стальных материалов. Так Л. Янг (и другие) [58] исследовали свойства и поведение при разрушении некоторых сталей с низким пределом текучести в области МЦУ, включая стали марок LY100, LY160 и LY225. В экспериментах использовался широкий диапазон амплитуд деформации от 0,5 % до 6 %, по результатам

исследований были скорректированы параметры соотношения Коффина-Мэнсона и модели Куроды. А.С. Милани (и другие) [59] исследовали характеристики малоциклового усталости цилиндрических образцов из стали S355, подвергнутых циклическим нагрузкам кручения. Данные исследования были сосредоточены на циклическом поведении разрушения и формуле прогнозирования срока службы, основанной на амплитудах пластической деформации.

Авторами [60] проведены исследования влияния усталостных повреждений на изменение микротвердости стальных трубопроводов при циклическом нагружении. Для выполнения поставленной задачи были изготовлены плоские образцы из труб и подвержены циклическому нагружению на изгиб. Значения микротвердости определялись методом Берковича. Зависимость микротвердости от уровня накопленных повреждений представлена на Рисунке 1.4.

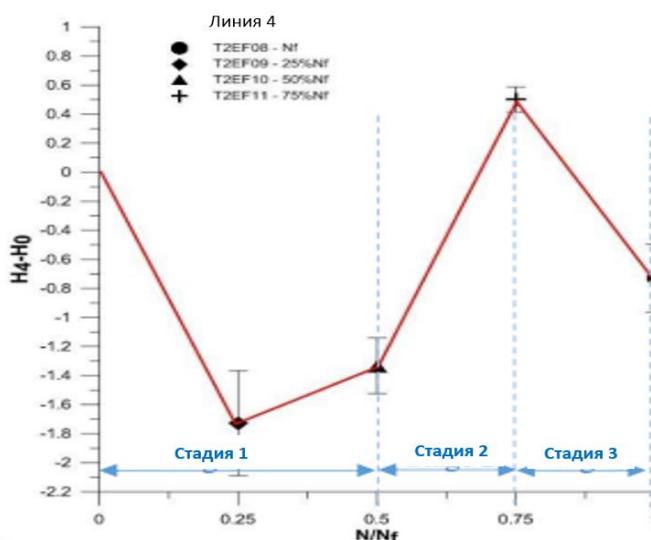


Рисунок 1.4 - Зависимость микротвердости по Берковичу от уровня накопленных повреждений [60]

В результате были получены 3 стадии накопления повреждений. Авторы связывают снижение микротвердости на стадии 1 с движением и размножением дислокаций, а также перестройкой исходной сети дислокаций. На ранних стадиях усталости происходят микроструктурные изменения, связанные с движением и

реорганизацией дислокаций, приводящие к уменьшению микродеформаций и, как следствие, к разупрочнению материала. На стадии 2 увеличение твердости связано с процессом зарождения и развития микротрещин. Размножение дислокаций и микродефектов приводят упрочнению материала. На стадии 3 снижение твердости (разупрочнение) можно объяснить релаксацией микронапряжений за счет зарождения и развития макротрещин, предшествующих окончательному разрушению [60].

Для мониторинга состояния материала при МЦУ многими авторами проводились исследование физических параметров, так Ксяопин Ма и др. [61] изучали изменение намагниченности после циклического нагружения, используя метод магнитной памяти. В сочетании с теорией магнитного заряда и моделью кумулятивной механики повреждений была установлена теоретическая связь между градиентом К кривых собственной магнитной утечки (self-magnetic leakage – SMFL) и кумулятивным пластическим повреждением D. Были проведены испытания МЦУ на растяжение-сжатие на плоских образцах из стали Q345B и Q345qC с измерением магнитной утечки (SMFL), на Рисунке 1.5 представлена зависимость градиента намагниченности К от уровня накопленных повреждений.

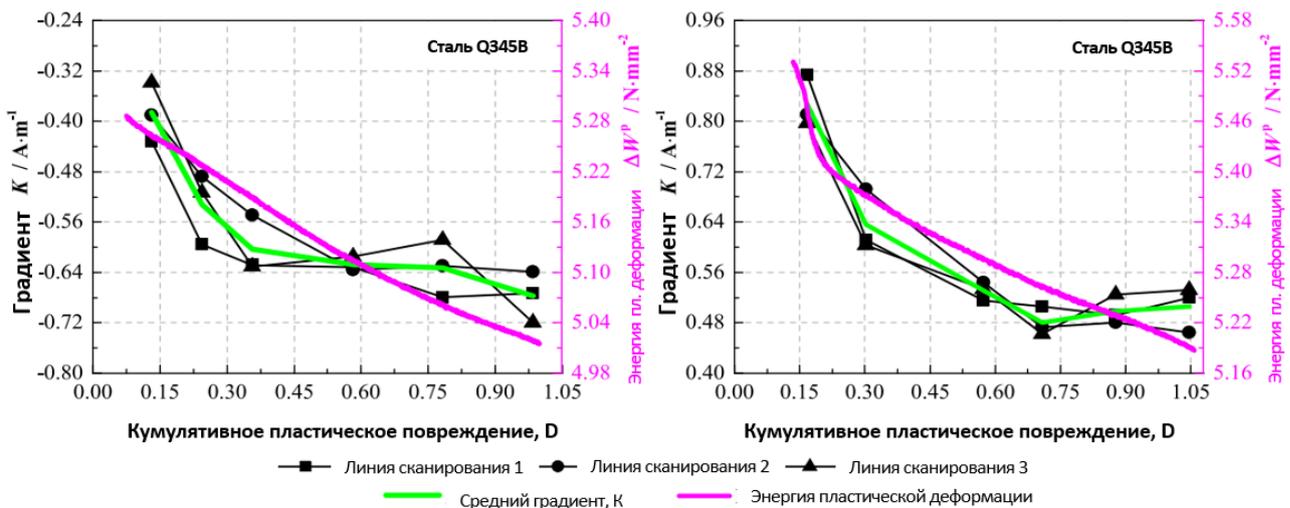


Рисунок 1.5 - Градиент К и энергия пластической деформации  $\Delta W_p$  при увеличении кумулятивного пластического повреждения D [61]

Путем сравнения экспериментальных и теоретических результатов и углубленного анализа размножения дислокаций была представлена полуколичественная корреляция, согласно которой  $K$  экспоненциально связана с  $D$ . Точность установленного теоретического соотношения была дополнительно проверена. Таким образом, было установлено, что метод магнитной памяти можно использовать в качестве теоретического анализа количественной характеристики кумулятивных пластических повреждений. По полученным зависимостям видно, что изменение градиента  $K$  от уровня накопленных повреждений происходит нелинейно, с экстремума при уровне повреждений 0,30 и 0,75. Эта работа демонстрирует, что кумулятивное пластическое повреждение может быть оценено полуколичественно через вариации кривой SMFL, что полезно для оценки усталостного повреждения конструкционной стали в условиях МЦУ [61].

Влиянию уровня накопленных повреждений на механические и физические характеристики материала посвящены множество отечественных работ. Так изучением периода достижения предельного состояния занимались Н.А. Махутов, И.Р. Кузеев, Е.А. Наумкин, Т.Р. Бикбулатов, А.А. Демченко, А.В. Самигуллин и т.д.

Автор [7] изучил эволюцию структуры материала при знакопеременном нагружении по изменению магнитных и мультфрактальных параметров. Данные исследования позволили определить стадию предразрушения материала при циклическом нагружении. В соответствии с проведенными опытами установлено, что в процессе первого цикла нагружения значение градиента напряженности постоянного магнитного поля резко снижается, при дальнейшем нагружении диаграмма выравнивается. Согласно данным мультфрактального анализа выявлено, что переход в предельное состояние стали 09Г2С происходит при достижении  $N_i/N_p = 0,77$ .

При эксплуатации технологического оборудования происходит нелинейное изменение свойства конструкционных материалов [62-64]. Так, при достижении уровня повреждений  $N_i/N_p=0,3$ ,  $N_i/N_p=0,7$ , происходит скачок значений, что свидетельствует о риске разрушения в данных промежутках эксплуатации. Для исследования экстремальных периодов циклического нагружения автор [7]

использовал такие параметры как среднее напряжение отклика электрического сигнала. Выявлено, что рост поверхностной энергии происходит вблизи зоны разрушения материала [7]. На Рисунке 1.6 проиллюстрирована зависимость поверхностной энергии от уровня накопленных усталостных повреждений.

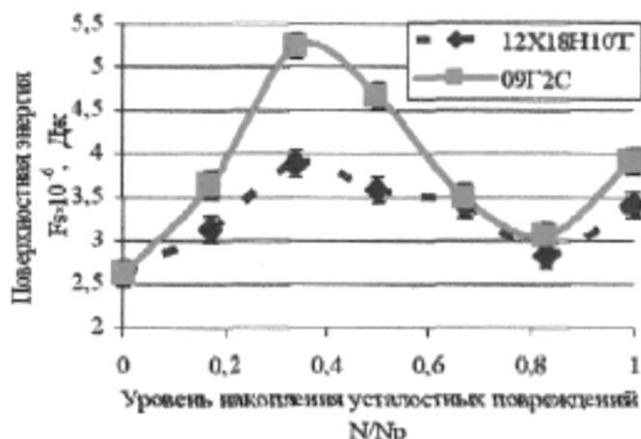


Рисунок 1.6 - Зависимость поверхностной энергии от уровня накопленных повреждений [7]

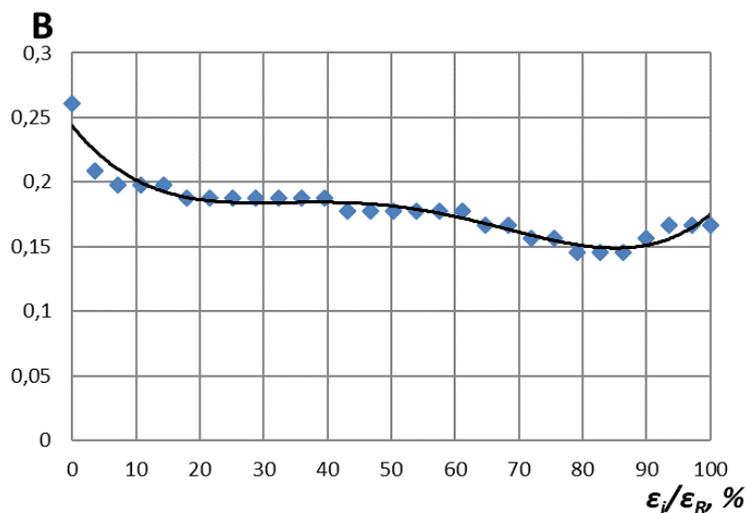


Рисунок 1.7 – Изменение относительного приращения амплитуды сигнала от уровня накопленных повреждений [66]

В своих исследованиях авторы [65,66] использовали вихретоковый метод контроля. Была проведена серия испытаний на усталостный изгиб образцов из стали 09Г2С с регистрацией параметров отклика электрического сигнала [67,68]. Выявлено наличие экстремума амплитуды сигнала при достижении уровня повреждений  $Ni/Np=0,80$ , данная зависимость представлена на Рисунке 1.7.

В работе [69] выявлено, что в ходе циклического нагружения существенных изменений в микроструктуре не происходит. Также установлено, что изменение дислокационной структуры в процессе знакопеременного нагружения приводит к изменению механических характеристик, коэрцитивной силы и скорости ультразвука. По полученным данным разработана методика оценки предельного состояния оборудования, подверженного малоцикловому нагружению.

Авторы [54, 70, 71] рассматривал зависимость изменения деформационного рельефа от уровня накопленных повреждений. В работе выполнен кластерный анализ по фрактальным признакам деформационной поверхности, по результатам которого выявлены 3 масштабных уровня адаптации материала: нано- ( $Ni/Np = 0,2-0,4$ ,) субмикро- и микроуровень ( $Ni/Np = 0,6-0,8$ ). Изменение фрактальной размерности при усталостных испытаниях представлено на Рисунке 1.8.

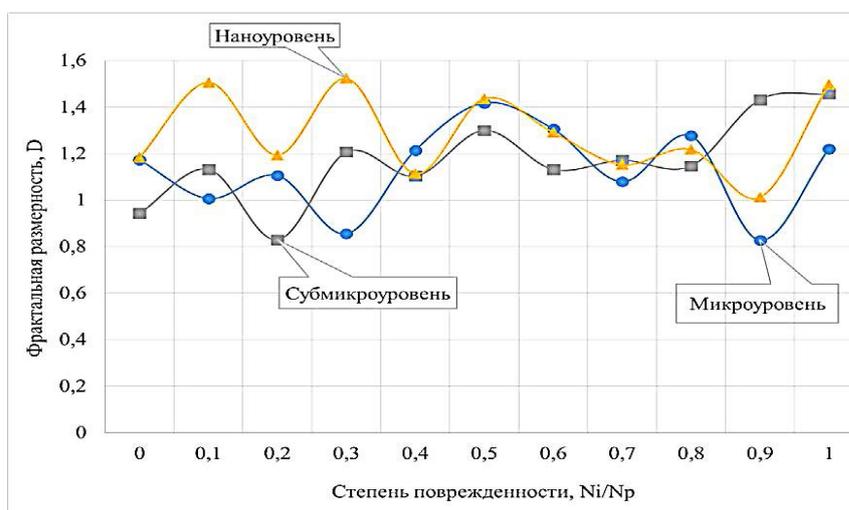
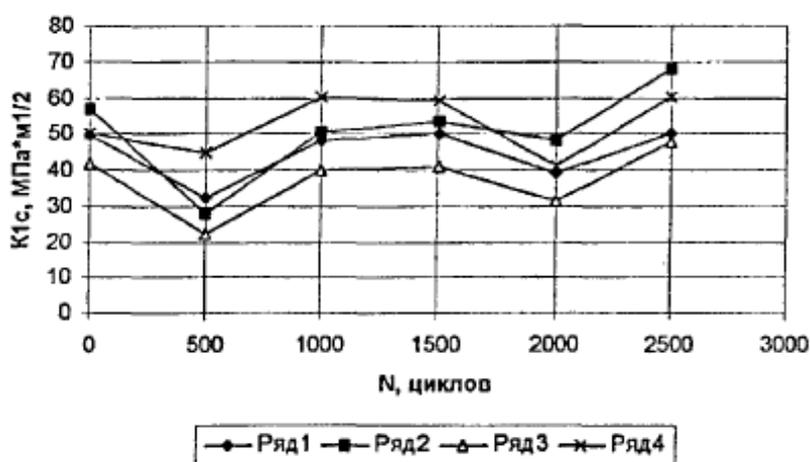


Рисунок 1.8 – Изменение фрактальной размерности от уровня накопленных повреждений [54]

В работе [8] изучался характер накопления усталостных повреждений в низколегированных конструкционных сталях 09Г2С и 16ГС, а также изменение коэффициента трещиностойкости  $K_{IC}$  в сварных швах реактора замедленного коксувания. Были получены полиэкстремальные зависимости  $K_{IC}$  от уровня накопленных повреждений при МЦУ. Автор выявил, что в области 500 и 2000-2500 циклов происходит резкое снижение трещиностойкости сталей 16ГС и 09Г2С. Первый минимум автор связал с механизмом формирования «ножевых» границ зерен, второй - с процессом порообразования.



ряд 1 – основной металл; ряд 2 – сварной шов; ряд 3 - зона термического влияния (ЗТВ); ряд 4 – основной металл

Рисунок 1.9 – Зависимость трещиностойкости образцов из стали 09Г2С от уровня накопленных повреждений при чистом изгибе [8]

### 1.5 Использование акустической эмиссии для исследования структурных изменений

Акустико-эмиссионный метод контроля (АЭК) является одним из методов неразрушающего контроля (НК) материалов конструкций и машин. Метод акустической эмиссии отличается от большинства других методов неразрушающего контроля двумя важными аспектами. Во-первых, источником

сигнала служат упругие волны, испускаемые при зарождении/ движении дефекта, т.е. АЭ является пассивным методом контроля. Вторым важным моментом заключается в том, что методы НК направлены на обнаружение существующих дефектов, а акустическая эмиссия выявляет развивающиеся дефекты в реальном времени [72], т.е. АЭ регистрирует сам процесс зарождения и развития дефектов.

Основными физико-механическими процессами, генерирующими акустические волны являются:

- трение поверхностей твердых тел;
- гидро- и аэродинамические явления при разгерметизации оборудования;
- структурные и фазовые превращения в материале;
- процессы механической обработки твердых тел [73].

Первым официальным исследованием АЭ в металлах является так называемый «крик олова», АЭ вызванная двойникованием чистого олова. После пионерских работ Яна Чохральского и Абрама Иоффе 1920-х годов систематическое исследование явления АЭ началось сразу после Второй мировой войны. В 1948 г. Уоррен Мейсон и его сотрудники исследовали изменение сигналов АЭ при деформации пластин из олова [74].

Наиболее значимым исследованием в рамках развития метода АЭК стала докторская работа Йозефа Кайзера 1950 г., в которой был выполнен анализ изменения параметров АЭ при формовании различных металлических и неметаллических образцов [75]. В результате исследований обнаружено явление необратимости, названное эффектом Кайзера.

В 1963 году Гарольд Л. Дунеган впервые использовал АЭ в рамках промышленной безопасности: выполнена проверка сосуда, работающего под избыточным давлением методом АЭ [72].

Метод акустической эмиссии нашел широкое применение в исследованиях структурных изменений металлических материалов при различных видах нагружения. Среди отечественных ученых исследованием параметров акустической эмиссии занимались В. И. Иванов, Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов, В. А. Грешников, В. А. Барат, О.В. Башков и др. Из зарубежных исследователей -

Г. Данегана, Лорда, М. Отсу, Ё. Накамуры, К. Вича, К. Оно, А. Грина, М. Хэмстеда и др. [76-79].

### 1.5.1 Особенности сигналов акустической эмиссии

Физическая природа акустической эмиссии основано на высвобождении упругой энергии при изменении структуры материала. Изменение структуры сопровождается выделением энергия в виде импульса, который распространяется в объеме материала в виде нестационарных упругих волн. Перпендикулярная к поверхности составляющая волны может регистрироваться пьезоэлектрическими преобразователями, которые устанавливаются на поверхность исследуемого материала. Электрический сигнал с преобразователя сначала предварительно усиливается, а затем поступает на вход измерительной системы, где снова усиливается и анализируется.

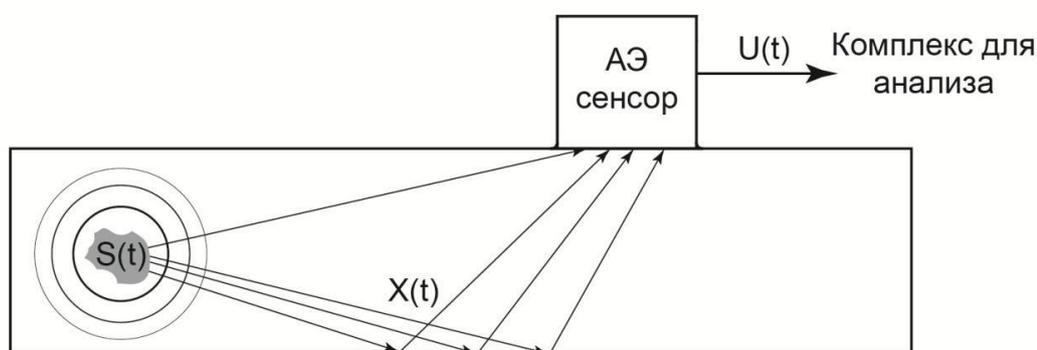


Рисунок 1.10 - Принципиальная схема распространения и регистрации сигналов АЭ [80]

Различают два основных типа сигналов АЭ: непрерывный и прерывистый. При непрерывном сигнале амплитуда остается стабильной в течение времени. Примером непрерывного сигнала являются микромеханизмы пластической деформации, как скольжение дислокаций или релаксация больших внутренних

напряжений: фазовые переходы, рекристаллизация и т.д. [81]. Генерация прерывистых сигналов носит импульсный характер, а выделяемая энергия на несколько порядков больше, чем у непрерывного сигнала. Характерными источниками прерывистых сигналов являются зарождение двойников, зарождение и распространение трещин. Помимо указанных сигналов имеются ложные сигналы такие как, трение или шум механизмов.

### 1.5.2 Основные термины и параметры сигналов акустической эмиссии

Событие АЭ представляет собой единый динамический процесс с выделением упругой энергии. Локальный процесс, создающий событие АЭ, называется источником акустической эмиссии. Сигналом АЭ является электрический импульс, регистрируемый на выходе преобразователя. В связи с тем, что при регистрации АЭ имеются источники шума на программном уровне необходимо устанавливать пороговый уровень шума. Началом события АЭ ( $t_s$ ) называется момент, когда сигнал АЭ впервые превышает пороговый уровень. Время, в течение которого не регистрируется акустический сигнал выше порога называется временем затишья ( $t_d$  - dead-time).

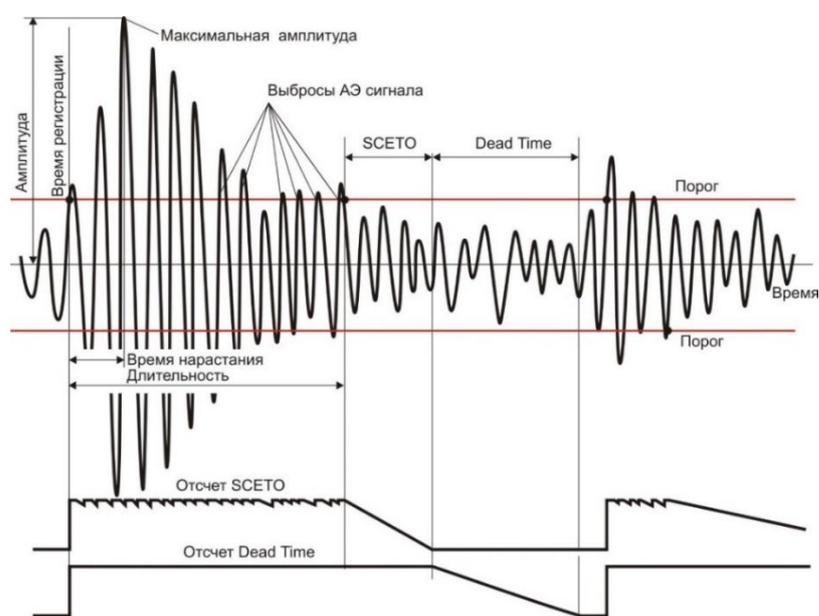


Рисунок 1.11 – Параметры акустического сигнала [72]

АЭ характеризуется следующими параметрами:

- амплитуда – самое высокое значение напряжения сигнала, измеряется в децибелах (дБ);
- счет событий - количество пиков амплитуды;
- энергия события – площадь под волной АЭ;
- продолжительность сигнала - интервал времени между превышением сигналом порогового значения и снижением до порогового значения [72].

Энергия события рассчитывается по следующей формуле:

$$E = \frac{1}{R} \int_{ts}^{te} V^2(t) dt, \quad (1.6)$$

где  $V$  — измеряемое напряжение;

$R$  — электрическое сопротивление установки, регистрирующая сигнал;

$t$  — время.

В современных исследованиях используют широкий набор параметров АЭ, однако в большинстве случаев применяется суммарный счет, энергия импульсов, скорость счета и амплитудное распределение, т.к. использование дополнительных параметров АЭ дает возможность более глубокого изучения структурных изменений материала, а также позволяет разработать новые методы неразрушающего контроля на основе АЭ с высокой чувствительностью к уровню накопленных повреждений.

### 1.5.3 Исследование малоциклового усталости методом акустической эмиссии

Для изучения усталостного разрушения и раннего обнаружения зарождения трещин используются ряд неразрушающих методов, таких как ультразвуковой, вихретоковый, рентгеновский, магнитный импеданс. Общим ограничением этих

методов является мониторинг в реальном времени. Акустическая эмиссия позволяет отслеживать накопление повреждений в режиме реального времени. В связи с тем, что акустические волны генерируются при развитии дефектов материала, АЭ использует информацию, предоставленную самим материалом, то есть является пассивным методом контроля.

Традиционные методы мониторинга АЭ с использованием пьезоэлектрических датчиков для регистрации высвобождаемой энергии упругой волны во время зарождения и роста трещины часто используются для контроля усталостных повреждений. Так, в исследовании Джохана Сингха [82] описывалась зависимость скорости счета от количества циклов нагружения в виде степенного закона, аналогичного закону распространения трещин Пэрис-Эрдогана [83]. Подобные законы были предложены для связи акустико-эмиссионного мониторинга и механики разрушения для прогнозирования скорости распространения трещины [84,85]. В работе Авраама Берковица [86] изучались характеристики усталостной трещины, такие как зарождение и распространение трещины на образцах из сплава марки INcoloy 901, по количеству импульсов АЭ и скорости счета.

Исследование Димитриуса Аггелеса [87] доказало, что длительность и время нарастания сигналов АЭ резко увеличиваются за несколько сотен циклов до окончательного разрушения. Установлено, что причиной изменения АЭ является сдвиг между режимами разрушения при циклическом нагружении. Нани Бабуа и др. [88] использовали АЭ для характеристики роста усталостной трещины стали RAFM, которая показывает неоднородность скорости, генерируемой АЭ в виде количества за цикл и энергии за цикл, что может соответствовать изменению циклической пластичности, закрытию трещины и межкристаллитному растрескиванию в переходном режиме. Пиковые амплитуды событий АЭ также использовались для мониторинга роста трещины в разных областях циклического нагружения.

В более поздних исследованиях были предложены различные методы идентификации роста усталостной трещины и ее стадий наряду с локализацией источника АЭ. Стефани Дешанель в работе [89] сообщает об обнаружении так называемых мультиплетов акустической эмиссии при циклическом нагружении

различных металлов и сплавов, повторяющихся в каждом цикле при почти одинаковом уровне напряжения. Эти мультиплеты, полученные путем взаимной корреляции параметров АЭ, отмечают медленное пошаговое распространение усталостной трещины в каждом цикле. В исследовании Менгйи Чайн [90] использовался алгоритм кластеризации полученных событий АЭ для идентификации различных стадий усталостного разрушения в стали.

В работах [91, 92] изучалась эволюция формы сигнала при росте усталостной трещины в тонкой алюминиевой пластине. Обнаружено, что сигнатуры роста усталостной трещины можно интерпретировать на основе эволюции форм волны АЭ. В другом исследовании они предложили использовать явление резонанса трещины для определения длины усталостной трещины по формам волны АЭ. Таким образом, исследование сигналов АЭ на основе формы волны позволило предоставить исчерпывающую информацию о возникновении повреждения, а также информацию о длине трещины.

Большой вклад в изучение МЦУ методом АЭ также внесли отечественные ученые, как В.А. Барат, Д.Л. Мерсон, О.В. Башков, А.Ю. Виноградов, В.И. Иванов и т.д.

Фундаментальные исследования по изучению природы АЭ выполнены учеными из Тольяттинского политехнического института под руководством Д.Л. Мерсона [93-95]. В работах [96-97] исследовано влияние отрыва дислокаций на параметры АЭ, экспериментально доказано, что пик генерации АЭ при статическом растяжении наблюдается в области перехода из упругой зоны в пластическую и связан с выходом дислокаций на поверхность.

М.Л. Линдеров [80] использовал метод АЭ с применением статистического метода кластерного анализа спектральной плотности для исследования усталостного разрушения в ТРИП/ТВИП сталях. В результате были выделены отдельные группы сигналов при циклическом нагружении, что свидетельствует о возможности разделять и изучать кинетику отдельных процессов при МЦУ в реальном времени.

Е.В. Васильев [96] изучал изменение свойств магнитных сплавов при статическом растяжении и циклическом усталости. Автором установлено, что при сжатии образцов происходит зарождение дефектов, а при растяжении выявлена упругая релаксация. Выявлена высокая корреляция между данными акустической эмиссии с прямыми визуальными наблюдениями. Данные результаты подтверждают возможность использования АЭК как инструмента контроля за состоянием магнитных сплавов.

В работе [97] был применен метод индентирования со снятием параметров АЭ для оценки степени усталостных повреждений при МЦУ. Авторами была построена зависимость энергии АЭ от частоты. Параметры акустической эмиссии регистрировались в течение всего времени внедрения индентора, при этом выявлено, что с повышением количества циклов нагружения увеличивается количество высокочастотных сигналов. Предложенный способ регистрации параметров АЭ позволяет создать методику оценки состояния металла трубопроводов.

Д.В. Черновым [98] (под руководством В.А. Барат) была проведена серия испытаний по циклическому нагружению металлических образцов до усталостного разрушения для исследования закономерностей АЭ при развитии усталостных трещин в низкоуглеродистых сталях. В качестве параметров АЭ были выбраны значения амплитуды сигнала и временного интервала, в результате были получены зависимости, представленные на Рисунке 1.12.

По полученным результатам  $\log_{10}(\Delta t_{0,75}/T)$  и  $\log_{10}(\sum um)$  автор выделил 4 кластера, соответствующие развитию усталостных дефектов. Предложенный подход позволяет выделить стадии стабильного (от 0 до 0,6) и ускоренного (от 0,95 до 1) роста дефекта.

В работе под руководством Л.Р. Ботвиной [99] изучены изменения параметров АЭ и напряженности остаточного магнитного поля при испытаниях на статическое растяжение образцов с различным уровнем усталостных повреждений. Предварительное циклическое нагружение привело к увеличению прочности стали, а также к изменением параметров АЭ. Выявлены четыре стадии развития

поврежденности при статическом растяжении. Установлена чувствительность акустической эмиссии к уровню накопленных повреждений [99].

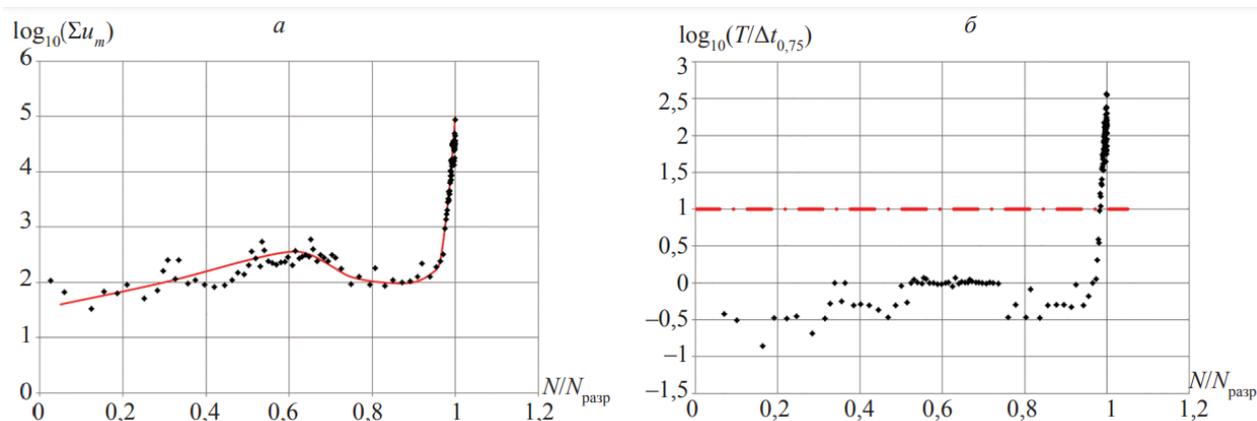


Рисунок 1.12 – Зависимость амплитуды (а) и временного интервала АЭ (б) от параметра нагрузки  $N/N_{\text{р}}$ , зарегистрированные при лабораторном испытании [98]

О.В. Башков [100] применил метод АЭ в качестве инструмента для исследования структурного состояния поликристаллических материалов при различных схемах нагружения. Используя данный метод автор выделил 5 стадий деформации при пластической деформации алюминиевого сплава Д16 и арможелеза.

В.В. Носов [101-103] использовал метод АЭ в качестве инструмента для определения прочностных характеристик конструкционных материалов, а также для определения прочности сварных соединений [104,105].

Несмотря на внушительное количество работ посвященных исследованию закономерностей изменения акустической эмиссии при усталостных испытаниях, многие задачи остаются нерешенными. Одной из них является изучение области нагружения  $N_i/N_{\text{р}} = 0,3-0,4$  в которой происходит скачкообразное изменение физических и механических свойств, в том числе и параметров АЭ.

## Вывод по главе 1

1 Проведенный обзор литературных источников показал, что проблема усталостного разрушения является особо актуальной. Помимо оборудования ОПО, малоцикловому нагружению подвергаются металлоконструкции мостов и зданий в сейсмически активных территориях, узлы различных видов транспорта (поезда, самолеты, автомобили). Основной целью ученых различных отраслей является увеличение надежности ответственных узлов конструкций и оборудования, работающих в условиях знакопеременного нагружения.

Для решения вышеуказанной задачи необходимы фундаментальные знания природы разрушения. В многочисленных исследованиях показано, что усталостное разрушение является многостадийным процессом, так в работах В.С. Ивановой выявлены 4 стадии накопления повреждений.

2 Кроме микроструктурного анализа в качестве инструмента изучения структурных изменений при МЦУ применяют различные виды неразрушающего контроля, как магнитный, вихретоковый, электрический, акустический и т.д.

А.Ю. Виноградовым установлено, что акустическая эмиссия является наиболее чувствительным методом контроля к накоплению усталостных повреждений. Результаты исследований показали, что наиболее информативными параметрами АЭ являются амплитуда сигнала, количество и скорость импульсов, а также энергия импульса. Современные методы АЭК позволяют проводить кластерный анализ и автоматическую фильтрацию сигналов, что дает возможность группировать типы сигналов на протяжении всего времени исследований и выявлять периоды развития различных видов дефектов (дислокационное скольжение, развитие микротрещин, двойникование и т.д.).

3 В работах М.И. Кузеева и Е.А. Наумкина был выявлен экстремальный период накопления повреждений равный  $N_i/N_p=0,3-0,4$  от общего ресурса образцов, в котором наблюдается резкое снижение механических и физических свойств сталей. Так, в исследованиях М.И. Кузеева установлено, что в данной области нагружения происходит снижение критического коэффициента

интенсивности напряжений  $K_{IC}$ , что может привести к повышению вероятности преждевременного выхода из строя оборудования, работающего в условиях знакопеременного нагружения. В настоящее время отсутствуют исследования, направленные на изучение данной экстремальной зоны при МЦУ методом акустической эмиссии.

## ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Выбор материала исследований

Для исследования необходимо было выбрать марку стали, которая имеет широкое применение в нефтегазовой отрасли и используется в качестве материала для изготовления трубопроводов, оборудования подверженных усталостному нагружению. В работе [64] был проведен анализ использования различных марок стали в ОАО «Уфанефтехим», установлено, что одним из наиболее распространённых материалов для изготовления оболочковых конструкций, деталей оборудования и трубопроводов является низколегированная сталь 09Г2С. Стоит отметить, что данная марка стали нашла широкое применение и в газопереработке. Так, на заводе по сжижению природного газа сталь 09Г2С применяется в качестве материала для адсорберов осушки, удаления кислых газов, удаления ртути, которые подвергаются циклическому нагружению в зависимости от режима эксплуатации (режимы адсорбции, осушки и регенерации).

Таким образом, в качестве материала исследований была выбрана низколегированная сталь 09Г2С. Основные характеристики стали (механические свойства и химический состав) представлены в Таблицах 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 – Механические свойства стали 09Г2С

Механические свойства			
Механические свойства	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %
Сертификат	515	395	27,5
ГОСТ 19281-89	Не менее 490	Не менее 355	Не менее 21

Таблица 2.2 – Химический состав стали 09Г2С

Массовая доля элементов								
Химические элементы	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S
	не более			не более				
Сертификат	0,09	0,57	0,162	0,03	0,04	0,05	0,011	0,022
ГОСТ 19281-89	0,12	0,5-0,8	1,3-1,7	0,3	0,3	0,3	0,035	0,04

Для проведения усталостных испытаний были изготовлены 50 плоских образцов с плавным концентратором из листового проката толщиной 4 мм (направление проката вдоль образца). Форма и размеры образцов соответствовали ГОСТ 25.502-79 «Методы механических испытаний. Метод испытаний на усталость» [40]. Эскиз и общий вид образца представлены на Рисунке 2.1.

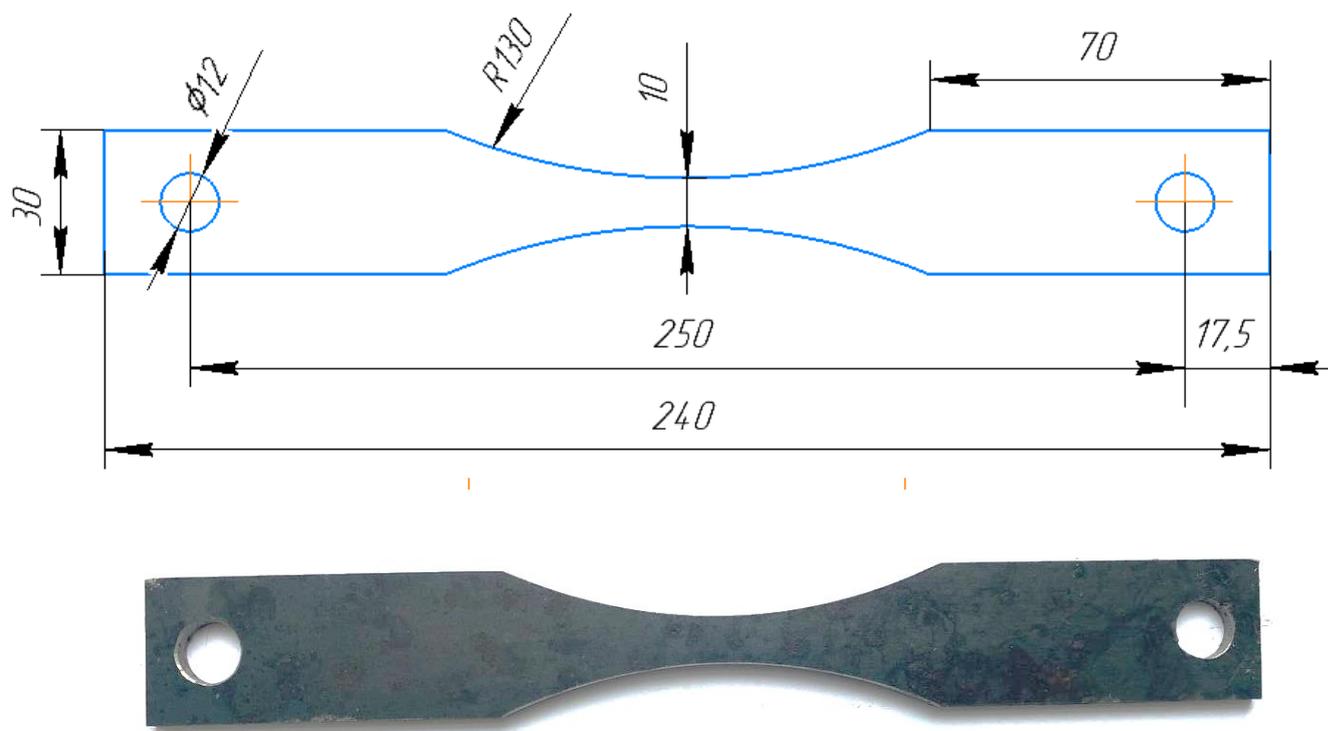


Рисунок 2.1 – Эскиз и общий вид образца

Изготовление образцов проводилось серийно, по 10 образцов для сведения к минимуму геометрических отклонений. С целью недопущения термического влияния при фрезерной обработке, на протяжении всего процесса изготовления образцы охлаждались специальной эмульсией.

После изготовления, проводился визуальный контроль каждого образца на наличие дефектов в виде вмятин, рисок, сколов и т.д.

## **2.2 Оборудование и методика испытаний**

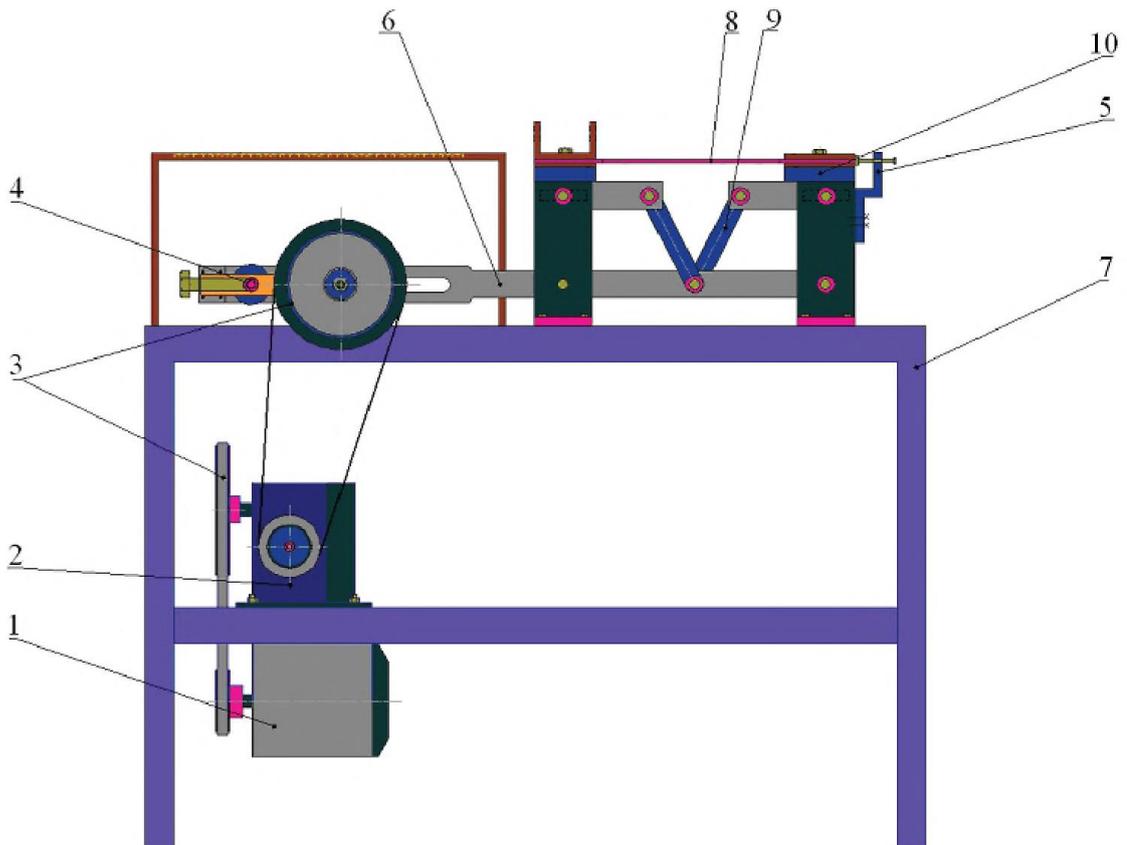
Исследование параметров акустической эмиссии от уровня накопленных повреждений проводилось в 3 этапа:

- 1) регистрация АЭ в процессе усталостных испытаний;
- 2) регистрация АЭ при статическом растяжении образцов, предварительно подверженных циклическому нагружению;
- 3) регистрация АЭ при внедрении индентора в процессе усталостных испытаний.

### **2.2.1 Стенд для усталостных испытаний**

Для проведения усталостных испытаний на чистый симметричный изгиб применен стенд для усталостных испытаний, изготовленный на кафедре «Технологические машины и оборудование» УГНТУ. Схема установки представлена на Рисунке 2.2.

Стенд нагружает образцы с частотой 16 циклов в минуту, что является достаточным для исключения нагрева образцов. Также на данном стенде имеется возможность регулирования величины прогиба. В исследованиях прогиб был выбран таким образом, чтобы количество циклов нагружения до разрушения составляло не менее 2000 циклов. Для подтверждения корректности выбранного уровня прогиба, проведены испытания по полного разрушения образцов. Разрушение образцов происходило в области 2300 циклов.



1 - электропривод; 2 - редуктор; 3 - ременные передачи;  
 4, 5 - регуляторы; 6 - коромысло; 7 - основа; 8 - образец;  
 9 - узел нагружения; 10 – оснастка для крепления образца

Рисунок 2.2 - Схема стенда для усталостных испытаний  
 на чистый симметричный изгиб

### 2.2.2 Стенд для испытаний при статическом растяжении

Для проведения испытаний на статическое растяжение образцов с различным уровнем усталостных повреждений использовалась динамометрическая разрывная машина ИР5113 (общий вид представлен на Рисунке 2.3).

Преимуществом данной машины над машинами с сервогидравлическим приводом является низкий шум электромеханического привода. Так, перед

проведение испытаний по регистрации параметров АЭ, был проведен эксперимент по измерению порогового шума на двух типах разрывных машин:

- Instron 8801 с сервогидравлическим приводом (порог шума составил 43 дБ);
- ИР5113 с электромеханическим приводом (порог шума составил 23 дБ).

Результаты эксперимента подтвердили обоснованность выбора оборудования для испытаний.



Рисунок 2.3 – Динамометрическая разрывная машина ИР5113

### 2.2.3 Стенд для испытаний внедрения индентора

Для проведения второго этапа испытаний в качестве привода для внедрения индентора использовался твердомер Роквелла Wilson Hardness 574Т (общий вид твердомера представлен на Рисунке 2.4). Индентор представляет собой металлический шар из твердосплавного материала. Усилие внедрения был выбран

таким образом, чтобы полученные отпечатки индентора не влияли на долговечность образца при циклическом нагружении.



Рисунок 2.4 – Общий вид твердомера Роквелла Wilson Hardness 574T

#### 2.2.4 Регистрация параметров АЭ

Для регистрации параметров АЭ в процессе испытаний использовалась акустико-эмиссионная система "МАЛАХИТ АС-15А". Данный прибор является многоканальной цифровой автоматизированной системой регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии в реальном времени. В качестве приемника акустической эмиссии применяются первичные преобразователи (ПАЭ). В комплект каждого канала входят: блок связи с персональным компьютером, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и блок аналоговых измерений [106].

Принцип действия системы «МАЛАХИТ» основан на регистрации упругих волн, которые генерируются при возникновении и/или распространении дефектов внутри материала. Упругие волны на поверхности материала принимаются ПАЭ, акустический сигнал преобразуется в электрический с усилением в 34 дБ (для

исследования применялись преобразователи ДР6). В блоке АЦП сигнал акустической волны, поступающий с ПАЭ, преобразуется в цифровой формат.

Определение координат источников АЭ проводится по разности прихода сигнала на преобразователи. Обработка данных происходит в специальной программе «Малахит АС-15А», который выдает результаты измерений в виде таблицы и графиков (интерфейс программы сбора и обработки акустико-эмиссионных (АЭ) данных «Малахит АС-15А» представлен на Рисунке 2.5).

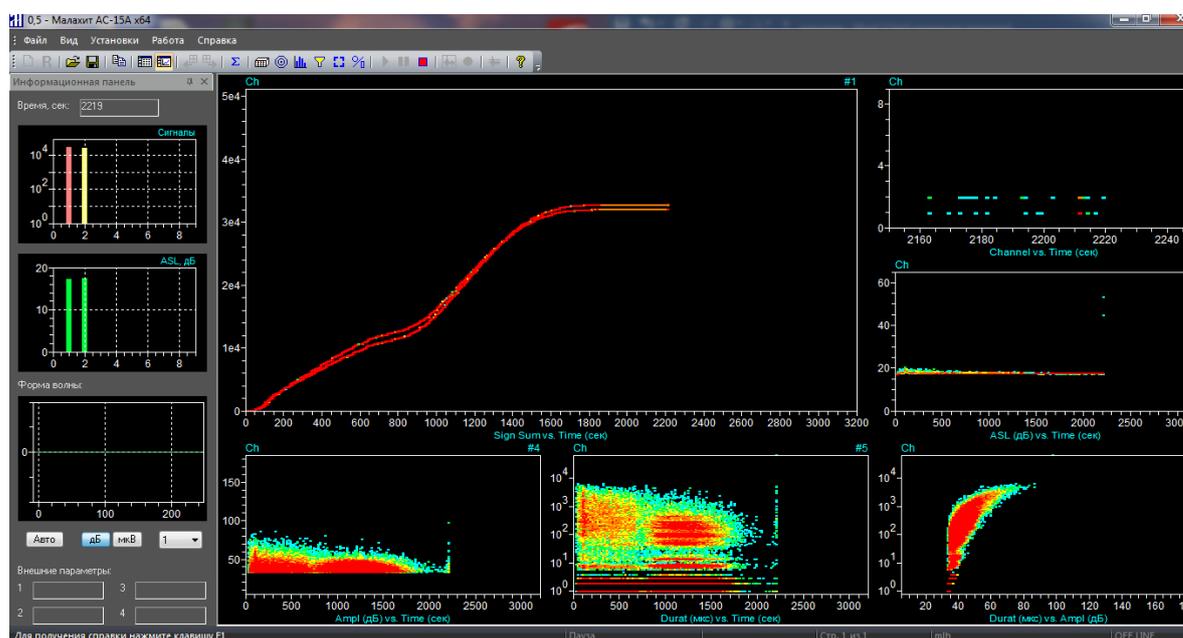


Рисунок 2.5 - Интерфейс программы сбора и обработки акустико-эмиссионных (АЭ) данных «Малахит АС-15А»

В программном комплексе имеется возможность устанавливать, как автоматические, так и фиксированные пороги АЭ. Форма волны фиксируется на каждом канале [107].

Перед началом исследований были установлены следующие аппаратные параметры измерительных каналов (согласно рекомендации фирмы «Диатон») [108]:

- пороговый уровень срабатывания – 24 дБ (пороговый уровень внешних шумов, которые регистрируются прибором);

- интервал контроля конца (ИКК) регистрации сигналов АЭ - 3000;
- интервал контроля пика (ИКП) - 100;
- интервал контроля длительности (ИКД) регистрации сигналов АЭ – 200;

Для определения скорости распространения упругих волн использовалось специализированное программное обеспечение «МАЛАХИТ Ф». Данная программа позволяет регистрировать форму сигнала, уровень затухания. Скорость упругих волн определялась в автоматическом режиме, при этом один преобразователь использовался в качестве излучателя упругих волн, второй в качестве приемника, порог регистрации сигнала составил 24 дБ. В результате был получен сигнал, со скоростью волны 4167 м/с, форма волны представлена на Рисунке 2.6.

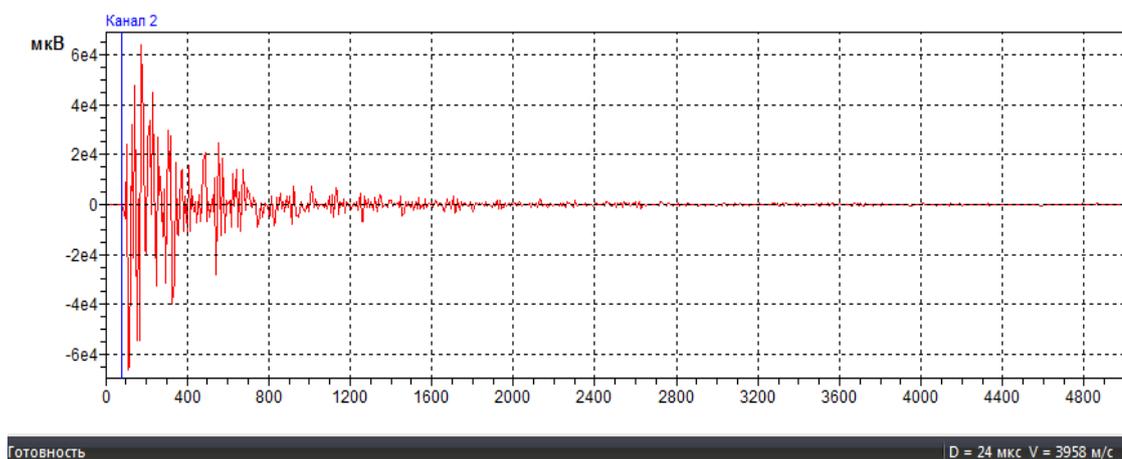


Рисунок 2.6 – Форма волны в линейном масштабе при режиме «излучатель»

С учетом плоской формы образца для регистрации параметров АЭ использовались два преобразователя ДРБИ АТ с коэффициентом усиления 34 дБ. ПАЭ располагались на расстоянии 90 мм друг от друга, что позволяло свободно крепить исследуемые образцы на стенде для усталостных испытаний, либо на разрывной машине. В качестве контактной среды использовался медицинский вазелин, который часто применяется для контакта при проведении неразрушающего контроля (УЗД, АЭК, УЗК). Для закрепления преобразователей на поверхности образцов использовались металлические хомуты.

## 2.2.5 Оборудование для исследования микроструктуры материалов

Для проведения микроструктурного анализа были подготовлены шлифы. Данный процесс включает в себя следующие этапы: подготовка поверхности образца путем шлифования и полирования, травление.

Шлифование образца выполняется с использованием наждачной бумаги различной зернистости, начиная с зернистости P180 и заканчивая зернистостью P2500. Номер зернистости определены согласно ГОСТ Р 52381-2005 [109]. Полученный шлиф полировался ручным способом на бархатной ткани, в качестве полировальной смеси использовались алмазные пасты зернистостью 10 и 3. После каждого этапа полирования, поверхность образцов промывалась дистиллированной водой.

Для выявления микроструктуры образцов из стали 09Г2С использовали 5-типроцентную азотную кислоту [110]. Травление выполнялось в течение 20 секунд, после чего поверхность промывалась дистиллированной водой и обрабатывалась этиловым спиртом.



Рисунок 2.7 – Микроскоп Axio Scope A1

Микроструктурный анализ стали 09Г2С был выполнен с использованием микроскопа Axio Scope A1, представляющий собой лабораторно-исследовательский комплекс для решений рутинных и научно-исследовательских

задач в различных областях науки и техники [111]. Axio Scope A1 имеют систему смены увеличения  $1x \div 4x$ . На Рисунке 2.7 изображен микроскоп, на котором проводился микроструктурный анализ.

Количественный анализа снимков микроструктур (количество микропор, объемная доля перлита), полученных микроскопом, выполнен в программе Thixomet PRO [112].

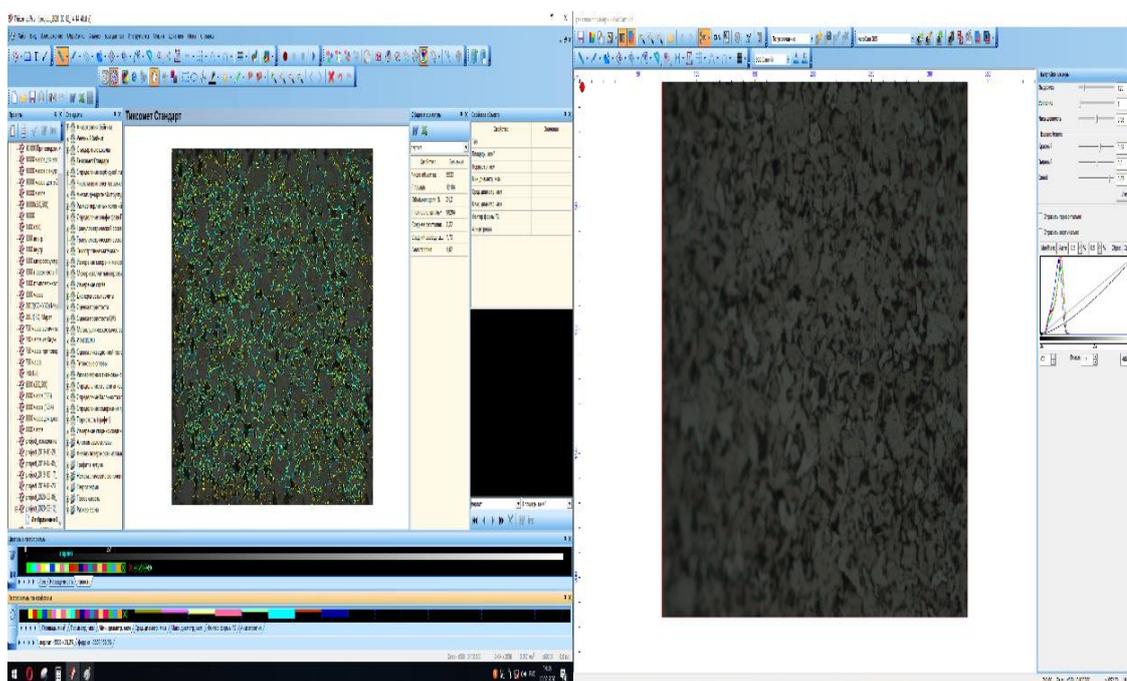


Рисунок 2.8 – Рабочее окно программы Thixomet PRO

Измерение среднего размера проводилось в программном комплексе «Image-Pro Plus 6.0», в соответствии с ГОСТ 5639-82 [113]. Снимки, полученные с помощью микроскопа Axio Scope A1, импортировались в программу. Проводилось масштабирование изображения путем сравнения с эталонным маркером. Далее наносили секущие линии в различном направлении, чтобы общее количество пересекаемых зерен было больше 300 (на Рисунке 2.9 представлен принцип определения размеров зерна в программе «Image-Pro Plus 6.0»).

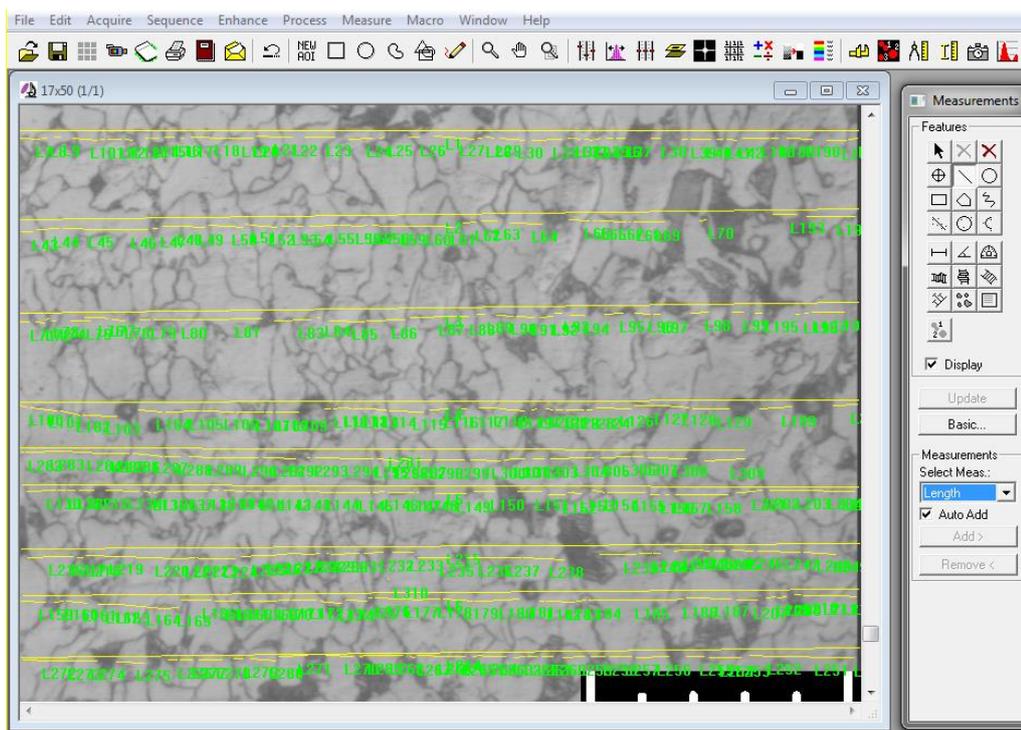


Рисунок 2.9 - Принцип определения размеров зерна  
в программе «Image-Pro Plus 6.0»

Для наглядного представления влияния уровня накопленных повреждений на характер излома были проведены исследования поверхности разрушения на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-6610LV (Рисунок 2.10)



Рисунок 2.10 - Растровый электронный микроскоп JEOL JSM-6610LV

## Вывод по главе 2

1 Объектом исследования выбраны плоские образцы с плавным концентратором напряжения из листового проката толщиной 4 мм. Форма и размеры образцов соответствовала ГОСТ 25.502-79.

Материалом исследования выбрана марка стали 09Г2С в связи с ее широким применением в нефтегазовой области в качестве материала для изготовления трубопроводов, оболочковых конструкций и узлов металлоконструкций.

2 В целях исследования закономерностей изменения параметров АЭ при малоцикловой усталости была выбрана акустико-эмиссионная система "МАЛАХИТ АС-15А". Для получения достоверных результатов и зависимостей использовались 3 метода записи АЭ:

- регистрация АЭ в процессе усталостных испытаний (использовался стенд для усталостных испытаний);
- регистрация АЭ при статическом растяжении образцов с различным уровнем накопленных повреждений;
- регистрация АЭ при внедрении индентора в процессе усталостных испытаний (в качестве привода использовался твердомер Роквелла).

3 Для проведения микроструктурного анализа использовался оптический микроскоп AXIO Scope.A1 с программным обеспечением Thixomet PRO.

4 Изучение поверхности разрушения испытанных образцов проводилось на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-6610LV.

## **ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАДИЙНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ МЦУ ПО ПАРАМЕТРАМ АЭ**

Исследования изменения параметров АЭ при малоцикловой усталости проводились в три этапа. На первом этапе образцы подвергались циклическому нагружению (по схеме чистого симметричного изгиба) с регистрацией параметров АЭ. На втором этапе были выполнены испытания на растяжение образцов, предварительно подверженных циклическому нагружению. Параллельно со статическим растяжением проводилась регистрация параметров АЭ. На третьем этапе проводились усталостные испытания с регистрацией АЭ при внедрении твердосплавного индентора.

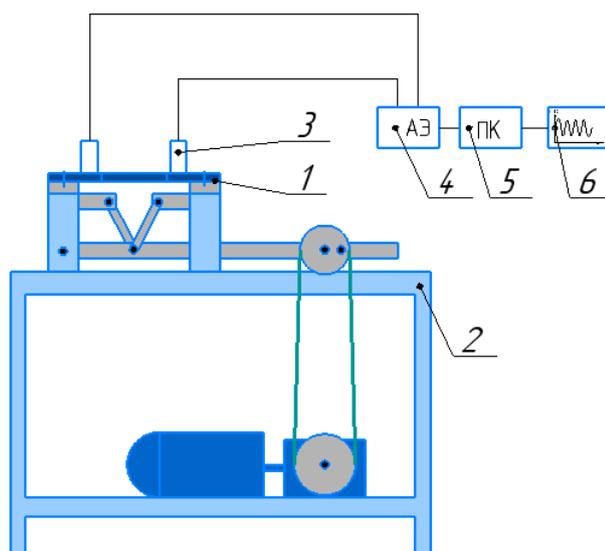
### **3.1 Исследование параметров АЭ в процессе усталостных испытаний**

#### **3.1.1 Методика проведения исследований**

Для проведения первого этапа исследований использовалась установка для чистого симметричного изгиба плоских образцов. Прогиб был выбран таким способом, чтобы образцы могли выдержать не менее 2000 циклов нагружения.

В связи с тем, что электродвигатель и редуктор стенда для усталостных испытаний являются дополнительным источником шума, образцы в период записи АЭ нагружались в ручном режиме, путем переключения штока привода с редуктора на маховик.

Регистрация параметров АЭ выполнялась при первых трех циклах и через каждые 230 циклов (10 % от ресурса образца). В качестве прибора для измерения параметров акустической эмиссии (суммарная амплитуда сигнала (А, дБ), число сигналов (событий) АЭ, энергия импульса (Е, мкВ<sup>2</sup>·мкс)) была выбрана акустико-эмиссионная система "МАЛАХИТ АС-15А", блок-схема измерений параметров АЭ при циклическом нагружении представлена на Рисунке 3.1.



- 1 – образец; 2 – установка для проведения усталостных испытаний;  
 3 – преобразователь АЭ; 4 - АЭ система "МАЛАХИТ АС-15А»;  
 5 – компьютер; 6 – диаграммы параметров АЭ

Рисунок 3.1 - Блок-схема измерения параметров  
 АЭ при циклическом нагружении

Время каждого испытания составляло 120 секунд:

- 0-30 секунд – период нагружения образца с нулевого до максимального верхнего положения;
- 31-60 секунд – период снятия нагрузки с максимального верхнего до нулевого положения;
- 61-90 секунд – период нагружения образца с нулевого до максимального нижнего положения;
- 91-120 секунд – период снятия нагрузки с максимального нижнего до нулевого положения.

### 3.1.2 Результаты исследований

По полученным данным испытаний первого этапа были построены зависимости суммарного количества сигналов (счета) АЭ и суммарной энергии

импульсов, зависимости представлены на Рисунках 3.2 и 3.3.

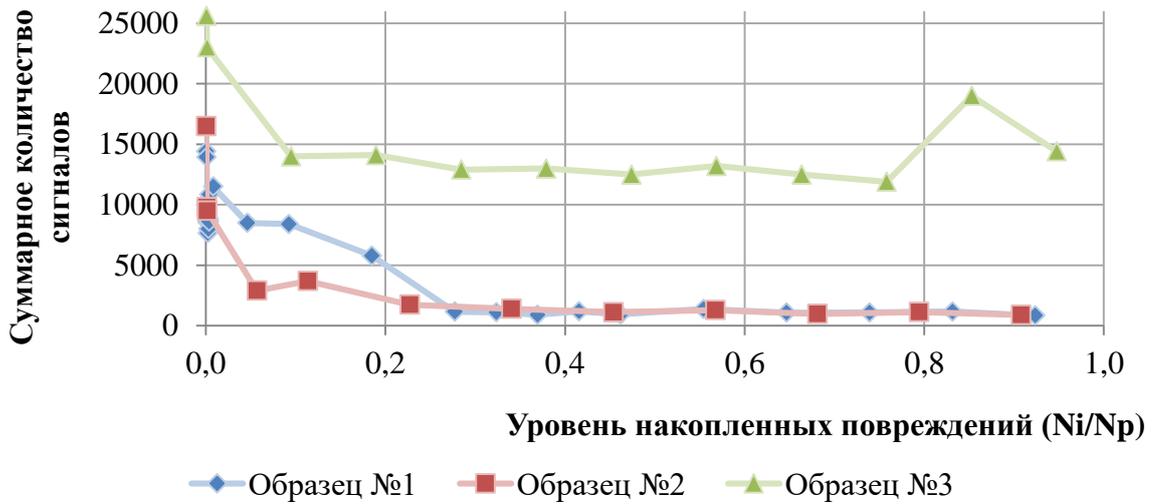


Рисунок 3.2 - Зависимость суммарного количества сигналов АЭ от уровня накопленных повреждений

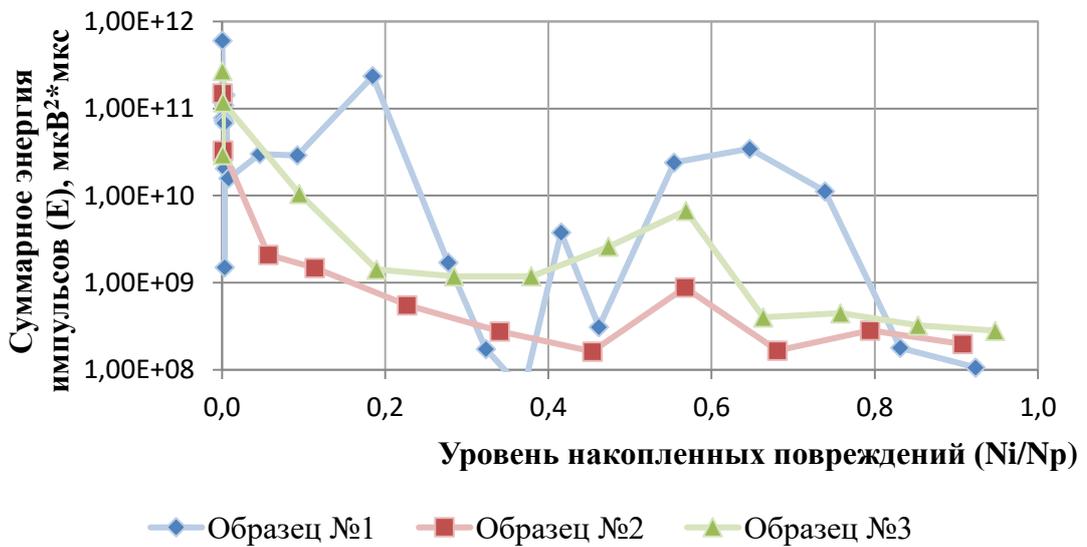


Рисунок 3.3 - Зависимость суммарной энергии импульсов АЭ от уровня накопленных повреждений

По данным, представленным на Рисунке 3.2 можно констатировать, что количество зарегистрированных сигналов для образца №3 имеют большие

значения суммарного счета количества сигналов, чем для других испытанных образцов. Это связано с тем, что испытания проводились при более низких уровнях порогового шума (20 дБ вместо 24 дБ) для выработки рекомендаций к выбору измерительной аппаратуры, при этом характер изменения измеренного параметра идентичен. Для всех 3 образцов характерно уменьшение количества сигналов до уровня накопленных повреждений  $N_i/N_p = 0,25-0,4$ , при этом наиболее резкий спад сигналов происходит в первых циклах нагружения, что характерно для реализующегося эффекта Кайзера [114-116].

Суммарная энергия импульсов АЭ также снижается на начальном этапе циклического нагружения, однако, после уровня повреждений  $N_i/N_p = 0,25-0,4$  происходит увеличение энергии сигналов при стабильном их количестве, что свидетельствует об изменении механизма адаптации материала к приложенным нагрузкам. Возникает генерация дефектов нового типа с большей энергией.

### **3.2 Исследование параметров АЭ при статическом растяжении образцов, подверженных предварительному циклическому нагружению**

#### **3.2.1 Методика проведения исследований**

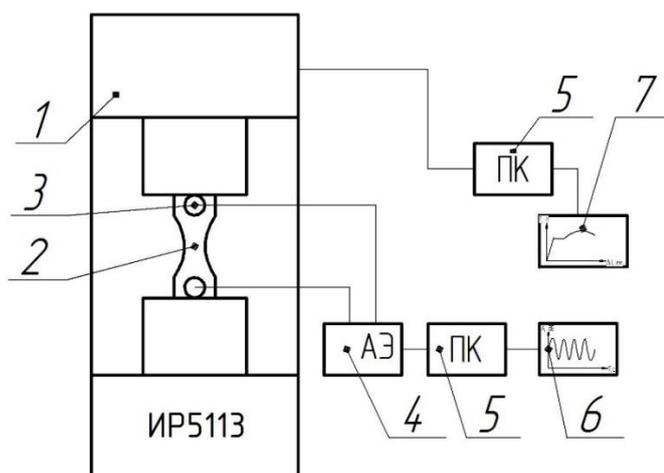
На втором этапе проводились исследования параметров АЭ при статическом растяжении образцов с различным уровнем накопленных повреждений. Данные исследования позволяют оценить влияние усталостных повреждений на механические свойства стали, на параметры АЭ, провести корреляцию полученных результатов, а также оценить изменения параметров АЭ при достижении критического состояния образцов.

С целью генерирования усталостных дефектов образцы предварительно подвергались циклическому нагружению от 0 до 2070 циклов с шагом в 230 циклов на установке для чистого симметричного изгиба. Параметры циклического нагружения образцов представлены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры циклического нагружения плоских образцов

№ образца	$N_i/N_p$	N, кол-во циклов
1	0,2	460
2	0,3	690
3	0,4	920
4	0,5	1150
5	0,8	1840
6	0,9	2070

Образцы, после накопления необходимого уровня деформаций, подвергались испытанию на статическое растяжение с непрерывной записью акустического сигнала. Для проведения работы использовалась динамометрическая разрывная машина ИР5113-100-11, для измерения параметров сигналов АЭ применялась акустико-эмиссионная система "МАЛАХИТ АС-15А" (блок-схема измерения параметров АЭ при растяжении представлена на Рисунке 3.4). Для корректного разделения этапов накопления повреждений при растяжении была выбрана минимальная скорость нагружения 0,3 мм/мин.



- 1 - динамометрическая разрывная машина ИР5113; 2 – образец;  
 3 – преобразователь АЭ; 4 - АЭ система "МАЛАХИТ АС-15А»;  
 5 – компьютер; 6 – диаграммы параметров АЭ; 7 – диаграмма растяжения

Рисунок 3.4 - Блок-схема измерения параметров АЭ

при статическом растяжении

### 3.2.2 Влияние малоциклового нагружения металла оборудования на его механические свойства

Для оценки влияния уровня накопленных повреждений на механические свойства исследуемых образцов было решено построить диаграммы изменения предела прочности и работы разрушения от степени деградации структуры.

Прочностные характеристики материала рассчитываются в соответствии с ГОСТ 1497-84 [117].

Общий вид формулы для расчета прочностных характеристик имеет вид:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{S_0}, \quad (3.1)$$

где  $P_i$  – усилие в соответствующей точке на диаграмме растяжения;

$S_0$  – площадь поперечного сечения исходного образца в рабочей зоне,  $S_0=40 \text{ мм}^2$ .

Для предела прочности формула (3.1) приобретет вид:

$$\sigma_T = \frac{P_{\max}}{S_0}, \quad (3.2)$$

где  $P_{\max}$  – максимальная нагрузка на диаграмме растяжения.

Значения максимальной нагрузки при растяжении с различным уровнем накопленных повреждений были определены по диаграмме растяжения образцов с различным уровнем усталостных повреждений (Рисунок 3.5) и представлены в Таблице 3.2.

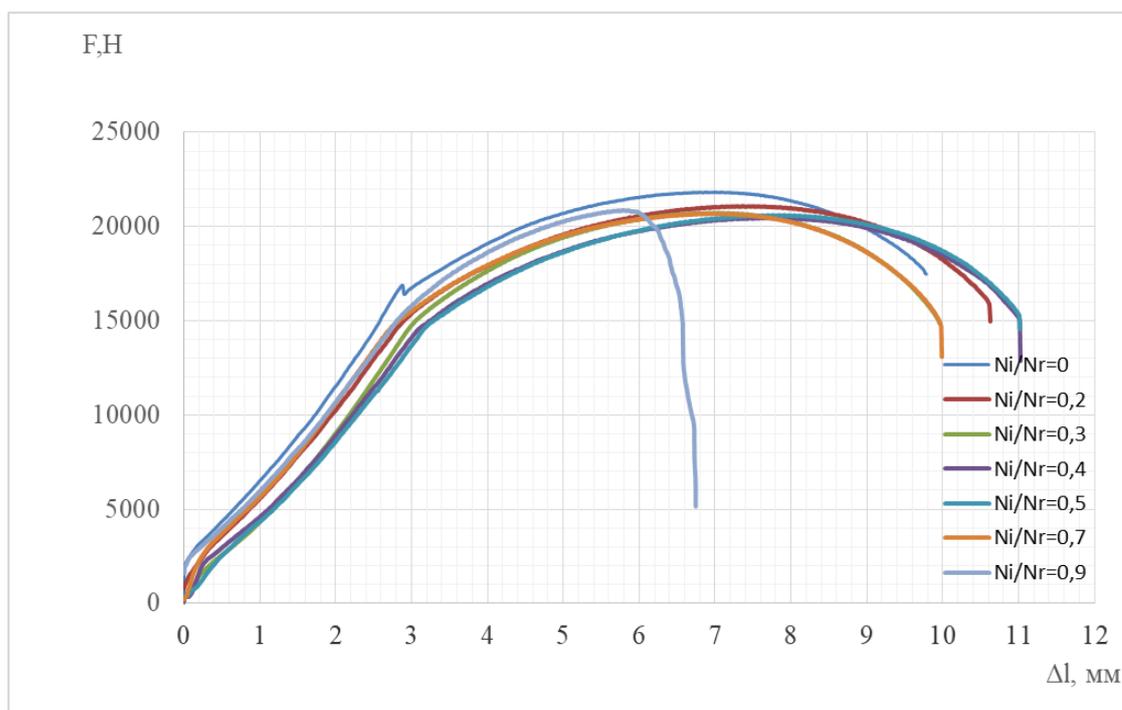


Рисунок 3.5 – Диаграммы растяжения образцов с различным уровнем усталостных повреждений

Таблица 3.2 – Значения максимальной нагрузки при растяжении образцов с различным уровнем накопленных повреждений

Ni/Np	P <sub>max</sub>	Ni/Np	P <sub>max</sub>
0	20650	0,6	21150
0,1	20610	0,7	21100
0,2	21040	0,8	21020
0,3	21820	0,9	20940
0,5	21870		

По значениям Таблицы 3.2 были посчитаны пределы прочности для каждого образца и построена диаграмма изменения предела прочности от степени деградации структуры, которая представлена на Рисунке 3.6.

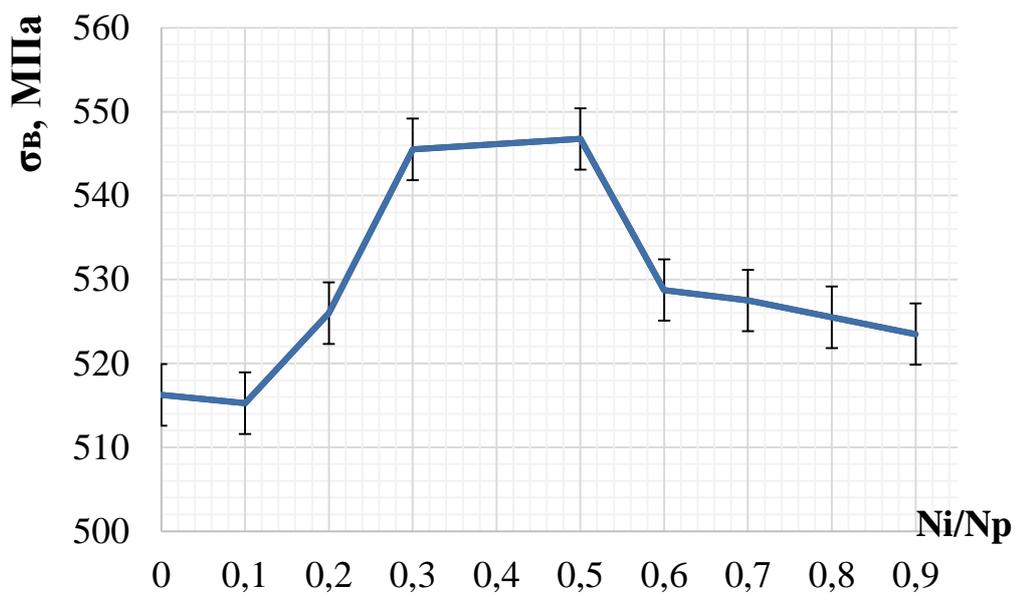


Рисунок 3.6 - Зависимость изменения предела прочности от уровня накопленных повреждений

Работа разрушения определяется площадью, ограниченной кривой растяжения и осью абсцисс (Рисунок 3.7) и рассчитывается по формуле:

$$A_P = \int_0^{\varepsilon_p} \sigma_i \cdot d\varepsilon_i. \quad (3.3)$$

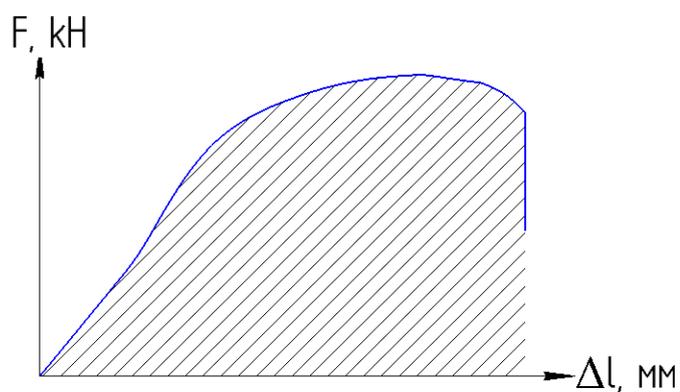


Рисунок 3.7 – Схема определения работы разрушения через диаграмму растяжения

По формуле (3.3) были определены работы разрушения для каждого образца, которые представлены в Таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Работа разрушения образцов с различным уровнем накопленных повреждений

Ni/Np	$A_p$ , Дж
0	174,44
0,2	175,39
0,3	176,61
0,4	177,69
0,5	176,54
0,7	175,86
0,9	160,07

По полученным значения в Таблице 3.3 была построена зависимость изменения работы разрушения от уровня накопленных повреждений (Рисунок 3.8).

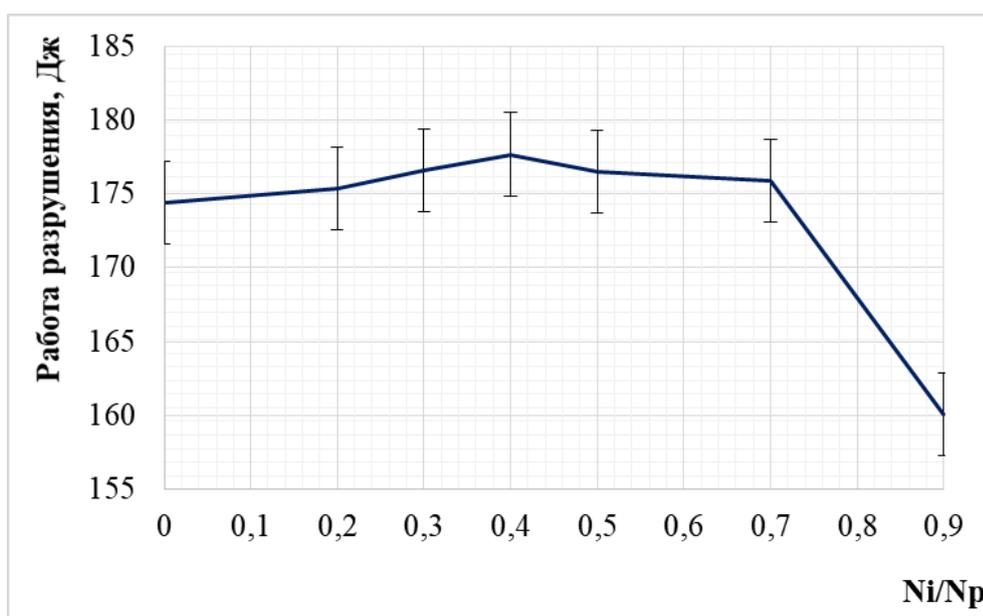


Рисунок 3.8 – Зависимость работы разрушения при растяжении от уровня накопленных повреждений

Из Рисунка 3.8 следует, что наибольшая работа разрушения соответствует  $N_i/N_p=0,4$ . При сравнении с работой при  $N_i/N_p=0,5$  разница составила 0,64 %, в связи с этим отклонение при уровне накопленных повреждений  $N_i/N_p=0,4$  рассматривается как погрешность. Тогда изменение работы сопоставимо с изменением предела прочности и описывается с такой же закономерностью: на промежутке  $N_i/N_p=0...0,5$  происходит увеличение значений с дальнейшим спадом.

Уменьшение механических характеристик на промежутке  $N_i/N_p=0...0,5$  было рассмотрено в работе Лахтина Ю.М. [118], в которой спад описывается как изменение механизма адаптации к накоплению повреждений, период характеризуется тем, что происходит образование ячеистой структуры.

При достижении уровня повреждений  $N_i/N_p=0,7...0,9$  происходит резкий спад значений, что связано с зарождением и развитием магистральной трещины.

### 3.2.3 Влияние малоциклового нагружения металла на параметры акустической эмиссии

В процессе испытания регистрировались сигналы на всем интервале циклического нагружения образца до момента разрушения. Снимались следующие параметры АЭ:

- суммарная амплитуда сигнала (А, дБ);
- энергия импульса (Е,  $\text{мкВ}^2 \cdot \text{мкс}$ );
- число сигналов (Signal).

Изменения параметров АЭ при статическом растяжении с наложением диаграммы растяжения для образцов с различным уровнем накопленных повреждений представлены на Рисунках 3.9-3.12.

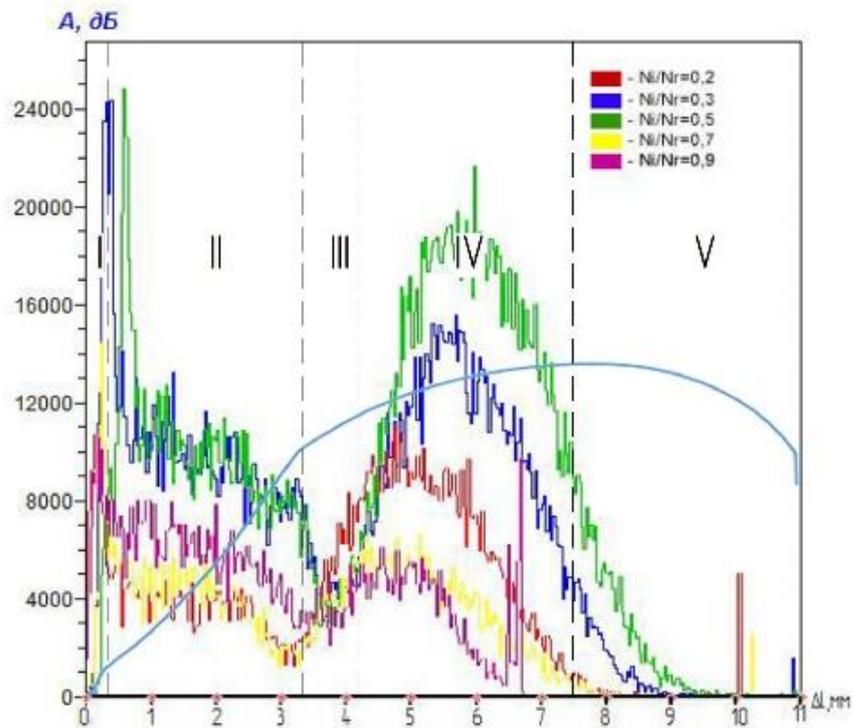


Рисунок 3.9 - Изменение амплитуды импульсов ( $A$ , дБ) при растяжении для образцов с различным уровнем повреждений

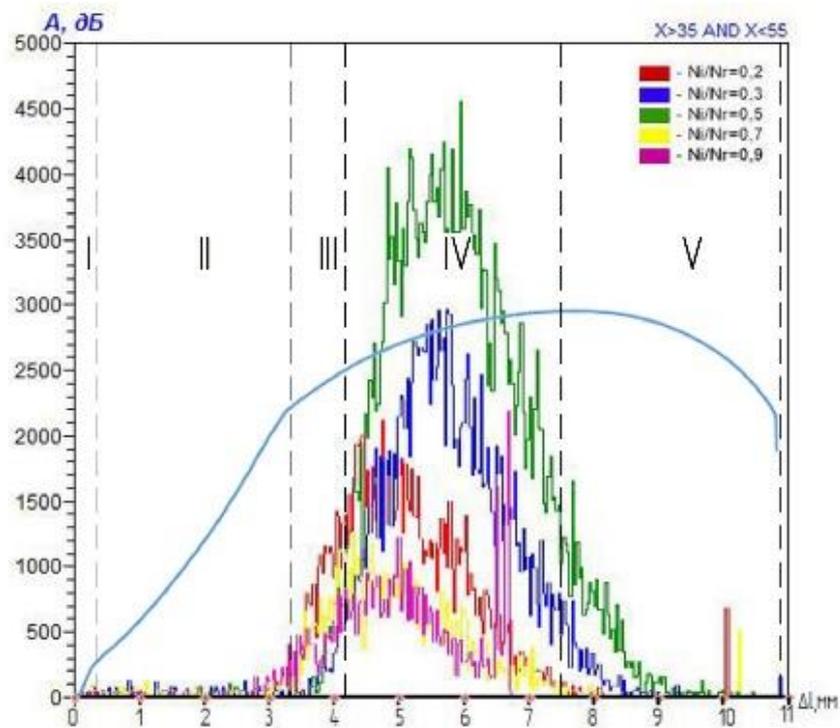


Рисунок 3.10 - Изменение амплитуды импульсов ( $A$ , дБ) при растяжении для образцов с различным уровнем повреждений в зоне концентратора

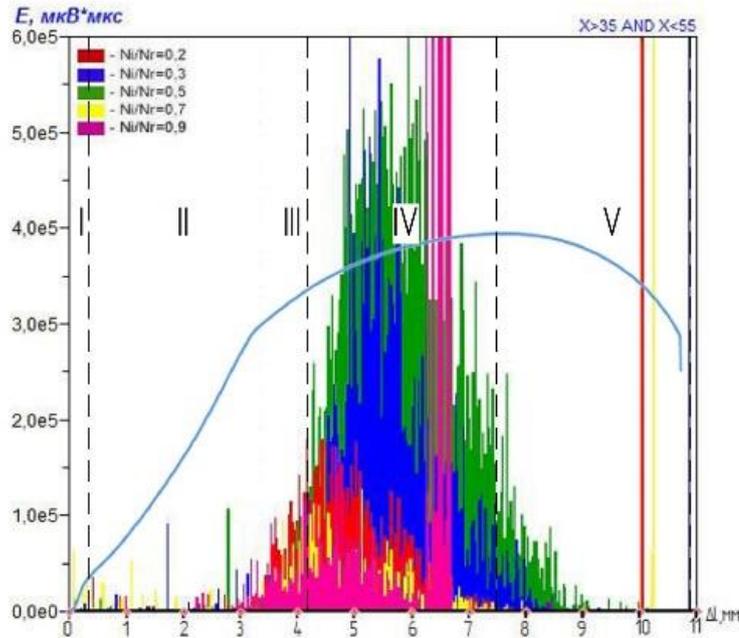


Рисунок 3.11–Изменения энергии импульса при растяжении для образцов с различным уровнем повреждений

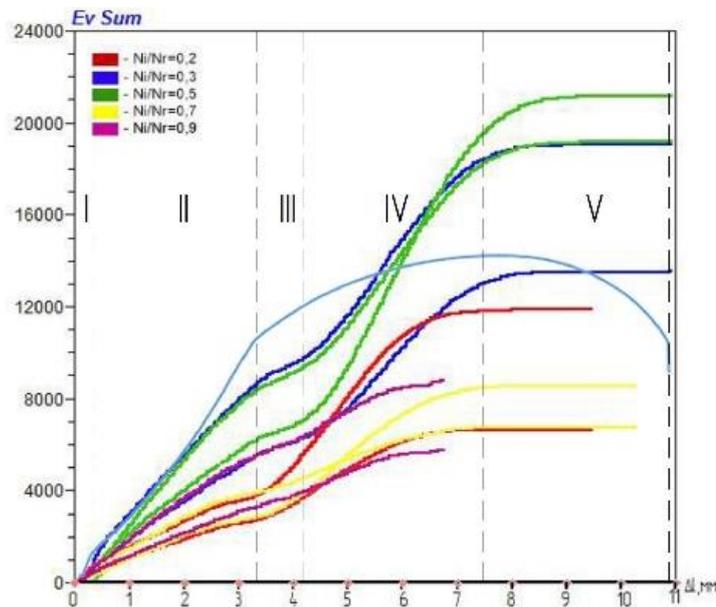


Рисунок 3.12 – Изменения числа сигналов при растяжении для образцов с различным уровнем повреждений в зоне концентратора

Из представленных зависимостей, включающие кривую деформации и параметры сигналов АЭ в процессе деформации до разрушения образца, возможно выделить пять стадий эволюции дефектной структуры стали 09Г2С [119].

Первый участок ( $\Delta l = 0 \dots 0,3$  мм) соответствует чисто упругой деформации. Пластические сдвиги в микрообластях почти отсутствуют. На всех параметрах наблюдается отсутствие импульсов АЭ. Иногда наблюдаются единичные импульсы (данное явление связано с трением в захватах).

Второй участок ( $\Delta l = 0,3 \dots 3,5$  мм) соответствует микропластической деформации на макроупругом участке кривой растяжения. На этом этапе протекают упругие деформации с неоднородными пластическими в отдельных локальных объемах материала. На этом промежутке наблюдается минимальная амплитуда сигнала (Рисунок 3.8), а также всплески с небольшой энергией, связанные с дислокационными сдвигами и двойникованием, описание которых представлены в работах Н.А. Семашко и О.В. Башкова [100].

Третий участок ( $\Delta l = 3,5 \dots 4,5$  мм) соответствует стадии предтекучести. Основным отличием данного участка является интенсивная генерация дислокаций, их взаимодействия между собой и с другими барьерами [120]. Стадия предтекучести характеризуется резким ростом интенсивности АЭ. При достижении условного предела текучести интенсивность генерации АЭ максимальна. На данном этапе деформирования наблюдается процесс трещинообразования на микроуровне.

Четвертый участок ( $\Delta l = 4,5 \dots 7,5$  мм) соответствует процессами интенсивной пластической деформации с последующим упрочнением. Данный этап характеризуется повышенной активностью сигналов АЭ. В.В. Рыбин [121] описывает данный период как участок, в котором плотность дислокаций повышается до критического значения с последующим образованием микротрещин.

Пятый участок ( $\Delta l = 7,5 \dots 10$  мм) соответствует участку долома на диаграмме растяжения. Период описывается резким спадом всех параметров АЭ. На данном этапе происходит развитие магистральной трещины и разрушение материала. Полученные результаты находятся в согласии с результатами исследований В.И. Иванова [122].

Таким образом, установлено, что механические характеристики во всем промежутке деформирования коррелирует с акустической.

По полученным результатам построены зависимости изменения суммарного значения параметров АЭ в процессе испытания от степени деградации материала: амплитуды импульсов, энергии и количества сигналов за все время испытания от уровня накопленных повреждений (Рисунки 3.13-3.16).

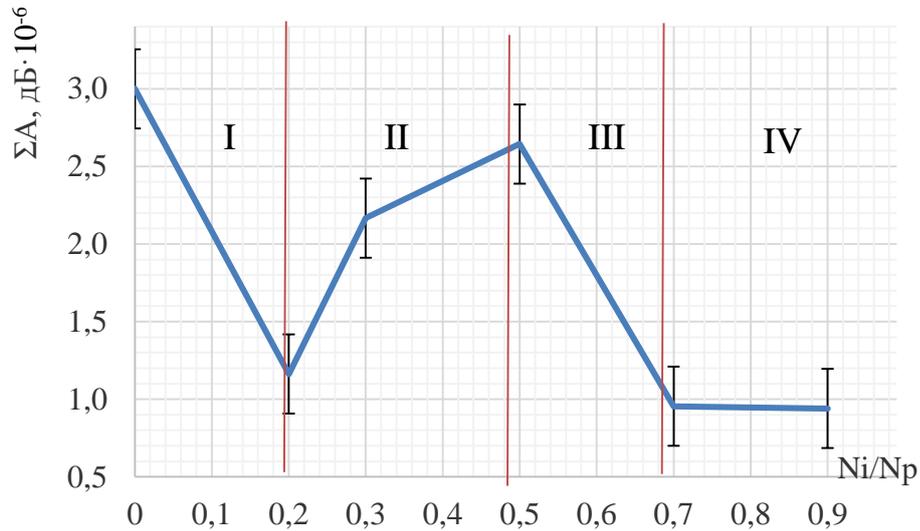


Рисунок 3.13 - Зависимость суммарного значения амплитуды импульсов от уровня накопленных повреждений

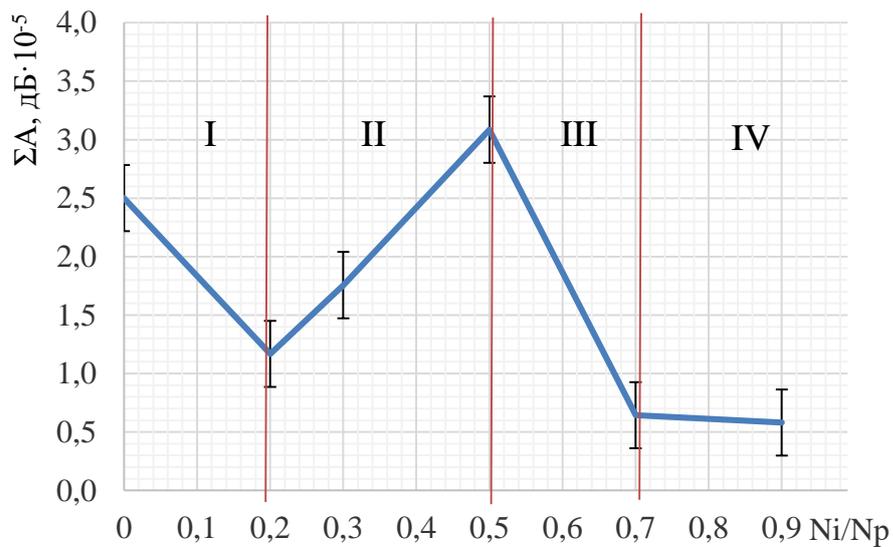


Рисунок 3.14 - Зависимость суммарного значения амплитуды импульсов от уровня накопленных повреждений в зоне концентратора

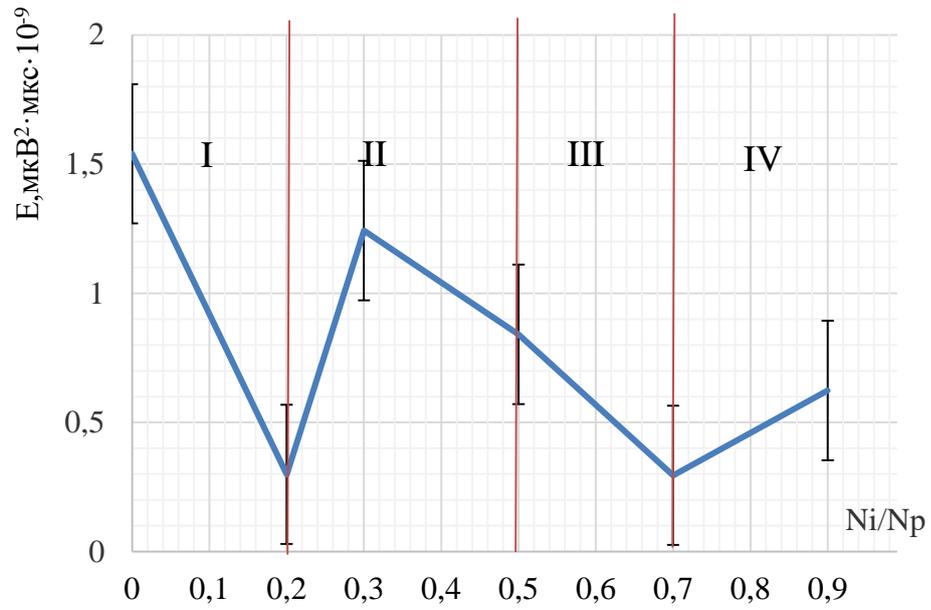


Рисунок 3.15 – Зависимость суммы энергии импульса от уровня накопленных повреждений

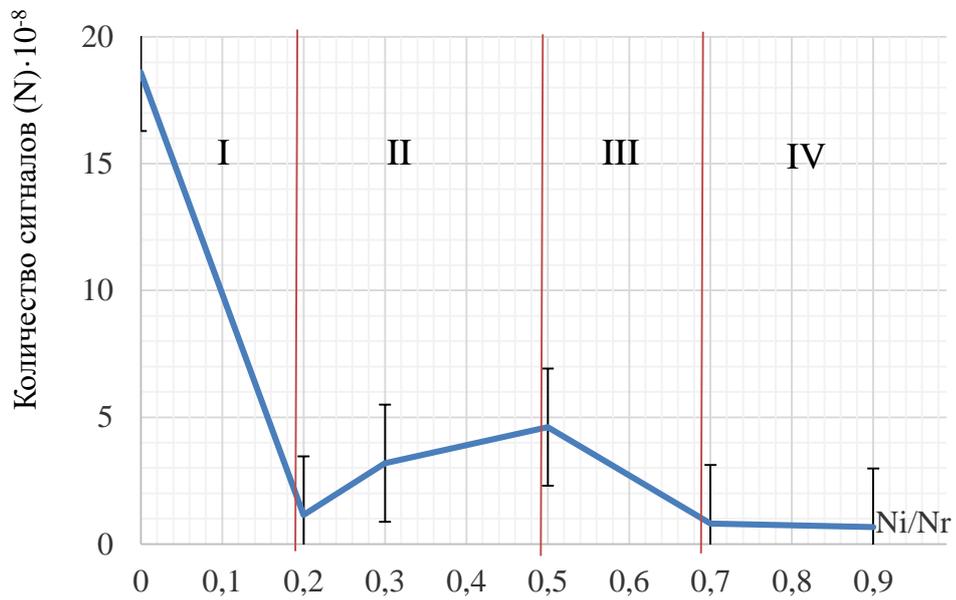


Рисунок 3.16 – Зависимость суммы числа сигналов от уровня накопленных повреждений

Анализ полученных зависимостей позволяет констатировать, что изменение параметров АЭ от уровня накопленных повреждений имеет ожидаемый характер и позволяет выделить четыре последовательных стадии деградации материала:

- циклическая микротекучесть - первая стадия, характеризуется резким спадом значений параметров АЭ. Данное явление связано началом адаптации структуры материала, которая описана в работах В.И. Иванова и В.А. Барат [122].

- зарождение и развитие микротрещин. В промежутке  $N_i/N_p=0,2-0,5$  происходит постепенное увеличение параметров АЭ, что связано с активным накоплением дефектов в виде дислокаций, при этом начинается развитие дефектов типа микротрещины.

- развитие микротрещин до размеров макротрещин – на данном участке происходит снижение активности АЭ,

- стадия разрушения (долома) сопровождается излучением акустических сигналов всех типов.

Результаты изменения параметров АЭ имеют близкую корреляцию с результатами изменения механических свойств образцов. Экстремумы в зависимости суммарной энергии в областях накопленных повреждений  $N_i/N_p = 0,2$ ,  $N_i/N_p = 0,7$  свидетельствуют о смене механизмов адаптации в рассматриваемых областях нагружения.

### 3.2.4 Влияние скорости деформации на параметры АЭ

С целью определения влияния скорости растяжения на значения параметров акустического сигнала, была проведена серия испытаний со скоростью растяжения 0,4 мм/мин. Сравнительные диаграммы параметров АЭ представлены на Рисунках 3.17-3.20.

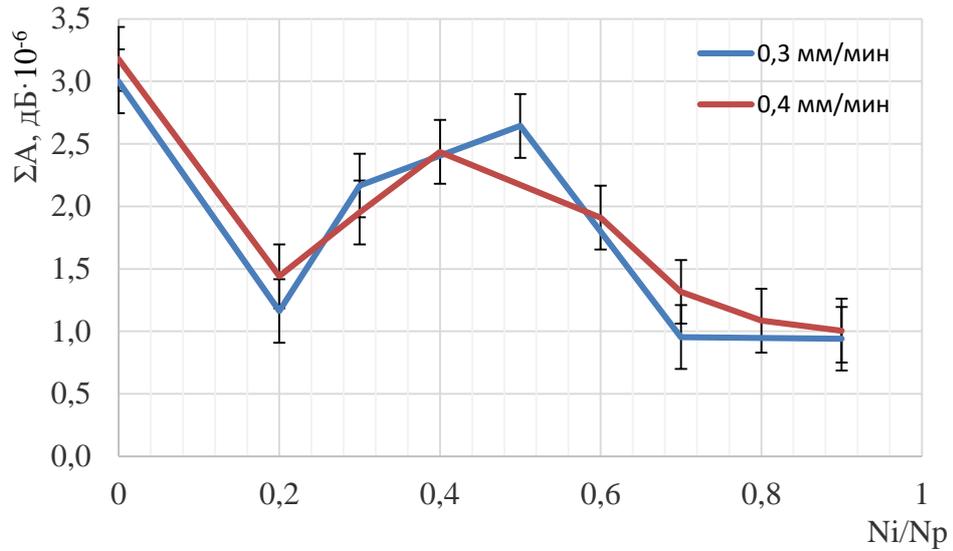


Рисунок 3.17 - Зависимость суммарного значения амплитуды импульсов от уровня накопленных повреждений при различных скоростях деформирования

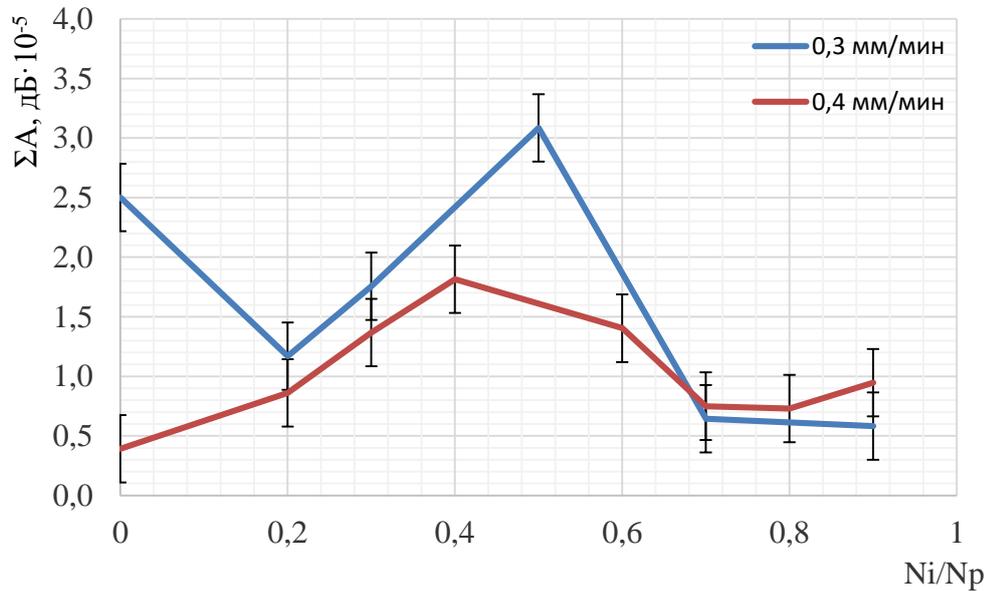


Рисунок 3.18 - Зависимость суммарного значения амплитуды импульсов от уровня накопленных повреждений в зоне концентратора напряжения при различных скоростях деформирования

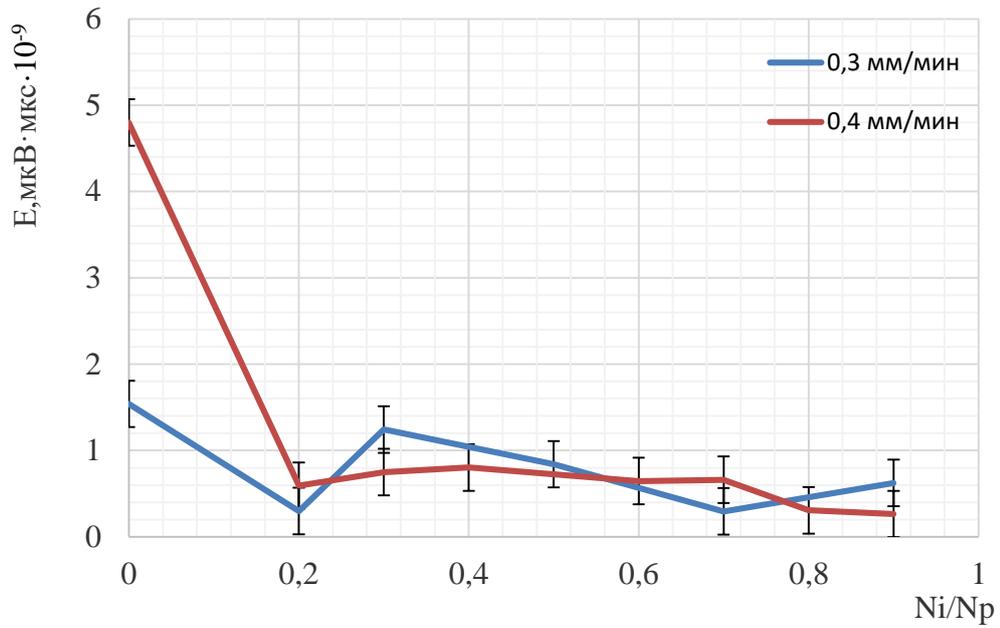


Рисунок 3.19 - Зависимость суммарного значения суммы энергии импульса от уровня накопленных повреждений при различных скоростях деформирования

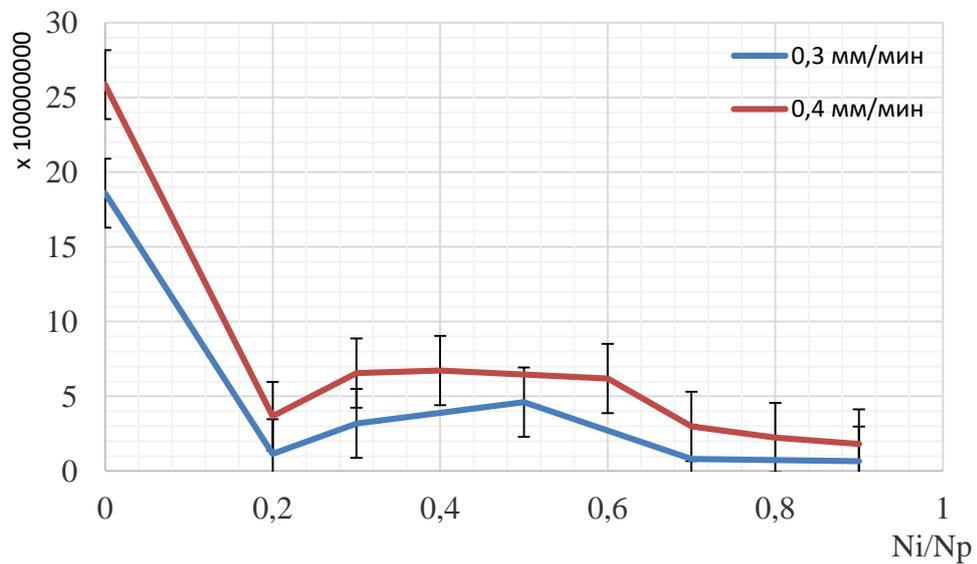


Рисунок 3.20 - Зависимость суммарного значения суммы числа сигналов от уровня накопленных повреждений при различных скоростях деформирования

При сравнении зависимостей параметров АЭ от уровня накопленных повреждений с различными скоростями нагружения видно, что изменение скорости деформирования влияет незначительно на значение сигналов акустической эмиссии. Зависимость параметров АЭ при растяжении со скоростью 0,3 мм/мин более наглядна, с ярко выраженными точками экстремумов по сравнению с 0,4 мм/мин.

### **3.3 Исследование параметров АЭ при внедрении индентора в процессе усталостных испытаний.**

#### **3.3.1 Методика проведения исследований**

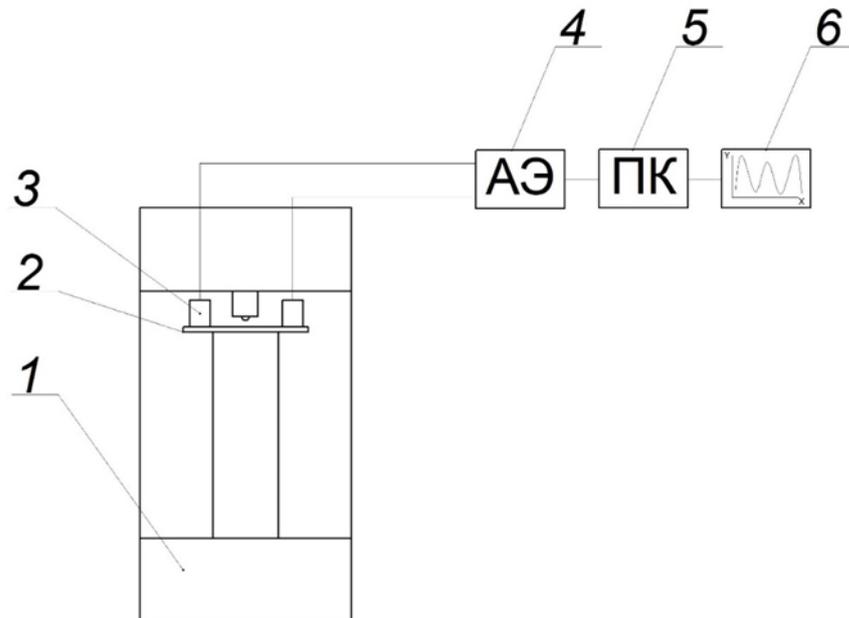
Известно, что при внедрении индентора в металл происходит генерация акустических сигналов. Представляет интерес проследить влияние процесса накопления усталостных повреждений на характер АЭ сигналов при индентировании наконечника. С этой целью были выполнены усталостные испытания по схеме чистого симметричного изгиба.

Для измерения параметров АЭ после каждых 230 циклов (10 % от общего ресурса) образцы снимались с установки. Для генерации акустических волн использовался метод внедрения твердосплавного сферического индентора (подобный подход использовался авторами [123, 124] для оценки состояния металлов после термообработки).

В качестве привода использовался твердомер Роквелла, внедрение индентора проводилось равномерно в течение 30 секунд с параллельным снятием сигналов акустической эмиссии с помощью системы Малахит АС-15А (блок-схема измерений параметров АЭ представлена на Рисунке 3.21).

Анализ исследований работ [80, 100] показал, что основными параметрами акустической эмиссии являются амплитуда сигнала, суммарный счет и энергия сигнала. Для исследований были выбраны суммарные значения данных параметров в различный промежуток времени внедрения индентора (от 5 до 30

секунд с шагом 5 секунд). На Рисунке 3.22 представлены зависимости суммарных значений параметров АЭ (с интервалом в 5 секунд) от уровня накопленных повреждений.



1 – стационарный твердомер Роквелла с шарообразным индентором;

2 – образец; 3 – Преобразователь акустической эмиссии;

4 – акустико-эмиссионная система «МАЛАХИТ АС-15А»;

5 – компьютер; 6 – диаграммы параметров акустической эмиссии

Рисунок 3.21 - Блок-схема измерения параметров акустической эмиссии

### 3.3.2 Результаты исследования

В качестве анализа изменения структуры материала при малоцикловой усталости по параметрам акустической эмиссии были построены зависимости суммарной амплитуды, количества сигналов и суммарной энергии сигналов АЭ от уровня накопленных повреждений. Данные зависимости представлены на Рисунках 3.22-3.24.

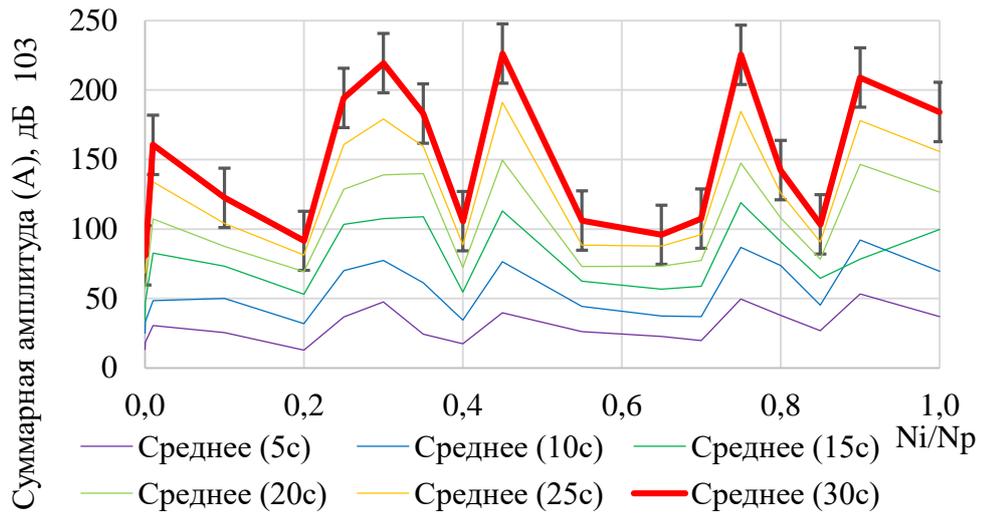


Рисунок 3.22 - Зависимость суммарной амплитуды сигнала акустической эмиссии в различных моментах времени от уровня накопленных повреждений

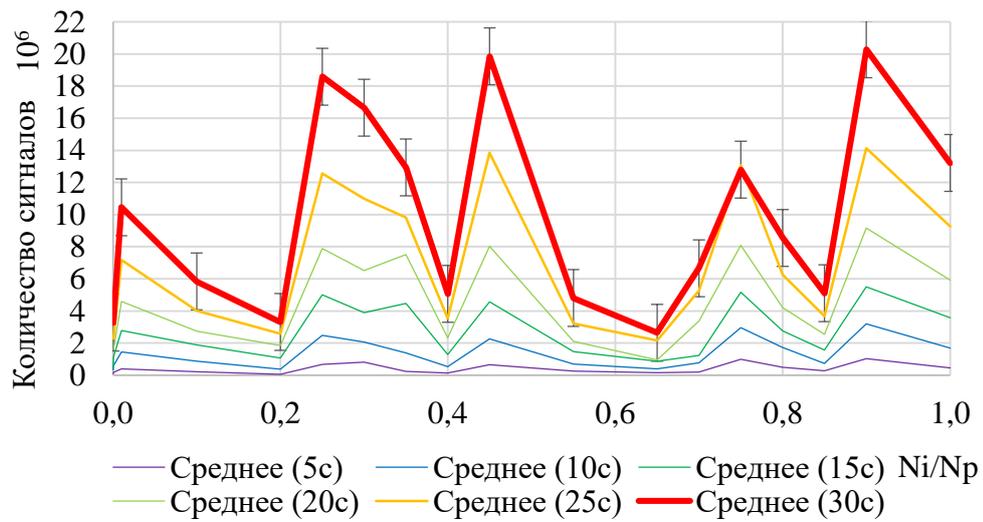


Рисунок 3.23 - Зависимость количества сигналов акустической эмиссии в различных моментах времени от уровня накопленных повреждений

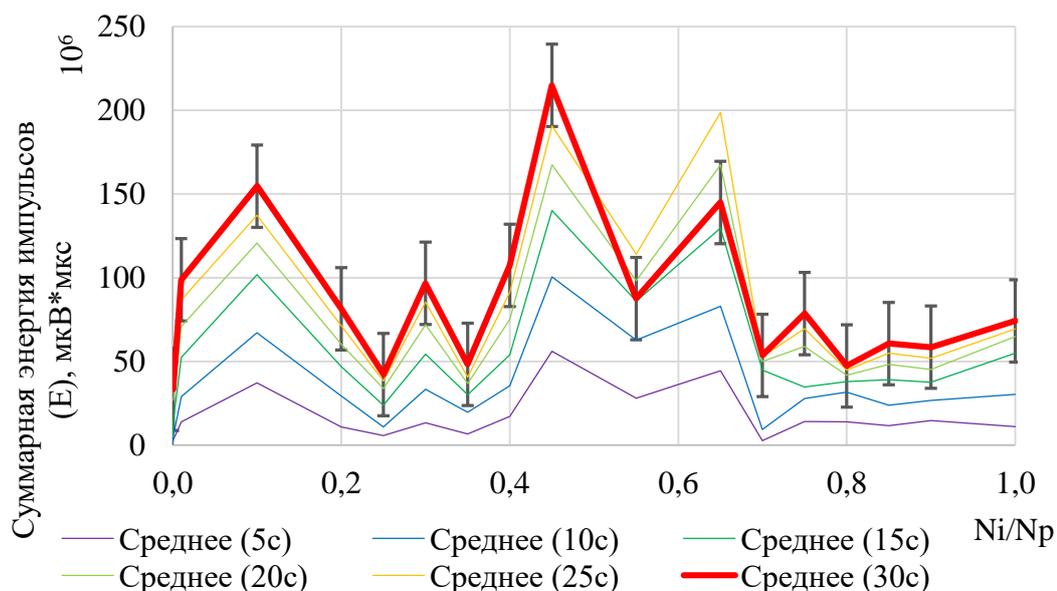


Рисунок 3.24 - Зависимость суммарной энергии сигнала акустической эмиссии в различных моментах времени от уровня накопленных повреждений

Полученные зависимости позволили выявить, что наиболее информативной является зависимость количества сигналов АЭ от уровня накопленных повреждений. В диаграмме возможно выделить 4 периода накопления повреждений [125]:

- 1) снижение количества сигналов АЭ ( $Ni/Np=0-0,25$ );
- 2) резкий рост количества сигналов АЭ ( $Ni/Np=0,25-0,45$ );
- 3) снижение количества сигналов АЭ ( $Ni/Np=0,45-0,7$ );
- 4) плавное увеличение сигналов АЭ ( $Ni/Np=0,7-1,0$ );

Вышеуказанная зависимость начинает наблюдаться при первых секундах внедрения индентора в образцы (5 с) и с продолжением внедрения индентора данные периоды становятся более выраженными.

При  $Ni/Np=0,2$  накопленных повреждений наблюдаются неактивные показатели суммарной амплитуды и количества сигналов (Рисунок 3.22-3.23), так как здесь происходит механизм адаптации материала под пластической деформацией и установление равновесия между искажением кристаллической решетки металла и полем напряжений в рабочей зоне образца. Далее происходят

переменные скачки, которые имеют стадийный характер. В частности, всплески в области  $N_i/N_p = 0,2-0,3$  усталости связаны с накоплением дислокаций, обуславливающее зарождение микротрещин, увеличение сигналов о которых свидетельствует область  $N_i/N_p = 0,4-0,55$ . Стадия, где микротрещины развиваются в макротрещины, характеризуется небольшими экстремумами суммарных амплитуд и количества сигналов, а максимальные значения установлены в зоне долома, т.е. при  $N_i/N_p = 0,9$ .

Суммарная энергия изменяется также нелинейно с наименьшими значениями в стадии разрушения (Рисунок 3.22). Это можно объяснить тем, что рост макротрещины до критического размера сопровождается образованием и ростом новых поверхностей, в области которой, как было описано выше, наблюдались наибольшие амплитуды колебаний. Наибольшие же значения энергии импульсов акустической эмиссии, в свою очередь, зарегистрированы в области накопления дислокаций и образования микротрещин.

Полученные зависимости количества сигналов АЭ от уровня накопленных повреждений согласовываются с результатами исследований, полученными В.С. Ивановой, В.Ф. Терентьевым, О.В. Башковым. Первая стадия, характеризуется резким спадом значений параметров АЭ, что фиксирует начало процесса адаптации структуры материала. На второй стадии происходит постепенное увеличение параметров АЭ, что связано с перестройкой дислокационной структуры и образованием субмикротрещин. Далее происходит рост и объединение субмикротрещин до трещины критической длины (стадия 3). Стадия 4 связана с нестабильным ростом магистральной трещины, с характерными для этой стадии сигналами АЭ.

При совместном использовании методов индентирования и измерения акустических сигналов также можно идентифицировать характерные стадии жизненного цикла испытываемых образцов.

### Вывод по главе 3

1 В данной главе проведены исследования изменения параметров АЭ при малоцикловогой усталости. В связи с тем, что АЭ является пассивным методом контроля в качестве источников генерации упругих волн использовались 3 метода:

- 1) непосредственная регистрация АЭ в процессе усталостного нагружения по схеме чистого изгиба;
- 2) регистрация АЭ при статическом растяжении образцов;
- 3) регистрация АЭ при внедрении индентора в процессе усталостных испытаний.

В качестве исследуемых параметров АЭ были рассмотрены суммарные значения амплитуды, количества сигналов и энергия импульсов.

Выявлена близкая корреляция полученных результатов, так в период  $N_i/N_p=0-0,2...0,3$  происходит снижение показаний всех параметров. Данное явление связано с эффектом Кайзера и микротекучестью.

В период  $N_i/N_p=0,2-0,5$  происходит увеличение энергии импульсов, при этом значительного увеличения количества сигналов не наблюдается. Это свидетельствует о том, что происходит испускание сигналов с высокой энергией (дислокационный характер). Данный период соответствует периоду циклического упрочнения.

Далее следует период развития (стабильного роста) усталостной трещины, данный период характеризуется спадом акустической активности. Завершающим этапом является нестабильный рост усталостной трещины (излучение сигналов АЭ всех типов, включая регистрацию сигналов АЭ типа макротрещин).

При достижении уровня накопленных повреждений  $N_i/N_p = 0,2-0,4$  и  $N_i/N_p = 0,7-0,8$  происходит снижение энергии импульсов, что свидетельствует о том, что в данных зонах материал накапливает критический уровень энергии и для последующей релаксации напряжений происходит смена механизмов адаптации материала к внешнему нагружению с последующим высвобождением накопленной энергии.

2 Проведен анализ изменения параметров АЭ при статическом растяжении, выявлены пять стадии эволюции дефектной структуры стали 09Г2С: участок чистой упругой деформации, участок микропластической деформации, участок предтекучести, участок текучести и самоупрочнения и участок долома.

3 Проведен анализ работы разрушения, предел прочности при статическом растяжении образцов с различным уровнем накопленных повреждений. Установлено, что после циклического нагружения, максимальные напряжения предела прочности металла наблюдаются при  $N_i/N_p = 0,5$ . Данное явление обусловлено тем, что на промежутке  $N_i/N_p = 0...0,5$  происходит постепенное упрочнение металла за счет накопления дислокаций. Также выявлено, что при достижении уровня накопленных повреждений  $N_i/N_p = 0,7$  происходит резкое снижение удельной работы разрушения, что связано с началом распространения усталостной трещины.

4 Изучено влияние скорости нагружения при статическом растяжении на параметры акустической эмиссии – при скорости нагружении 0,3 мм/мин и 0,4 мм/мин.

## ГЛАВА 4 МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

### 4.1 Влияние МЦУ на зерна перлита

В исследованиях под руководством В.Е. Громова [126] выявлены структурные изменения в перлите стали 60ГС2 при усталостных испытаниях, в связи с чем особый интерес вызвало изучение перлита стали 09Г2С при МЦУ.

Исследование структуры образцов было осуществлено согласно ГОСТ 5639-82 [113] и ГОСТ 8233-56 [127] с использованием анализатора изображения Thixomet PRO, установленного на базе оптического микроскопа AXIO Scope.A1 фирмы Zeiss.

В процессе усталостных испытаний отслеживали характер изменения зерен перлита по следующим параметрам: объемная доля, средний размер зерен и количество зерен на единицу поверхности. Микроструктура фиксировалась после каждых 230-ти циклов нагружения с предварительной полировкой и травлением. На Рисунке 4.1 представлена микроструктура исходного образца с выделенными зернами перлита.

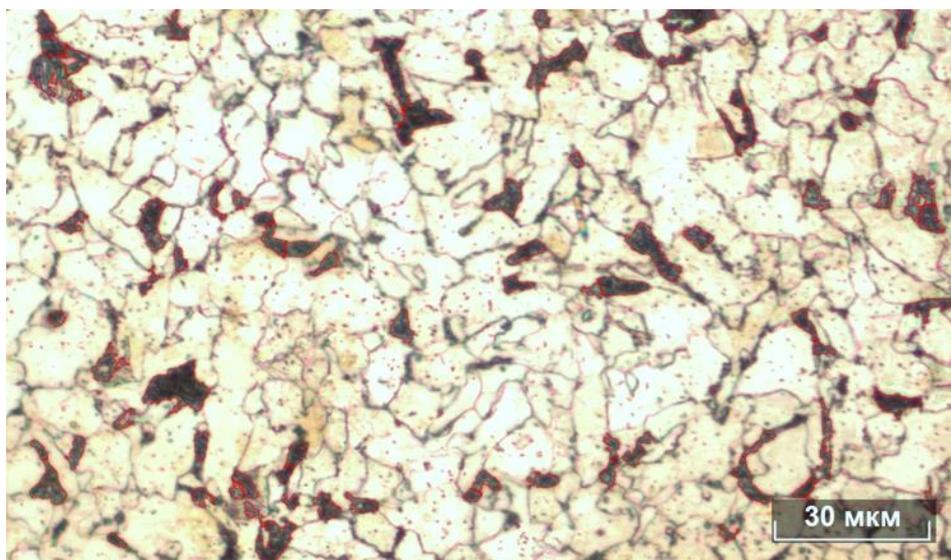


Рисунок 4.1 – Микроструктура исходного образца с выделенными зернами перлита

Зависимости микроструктурных параметров от уровня накопленных повреждений представлены на Рисунках 4.2-4.4.

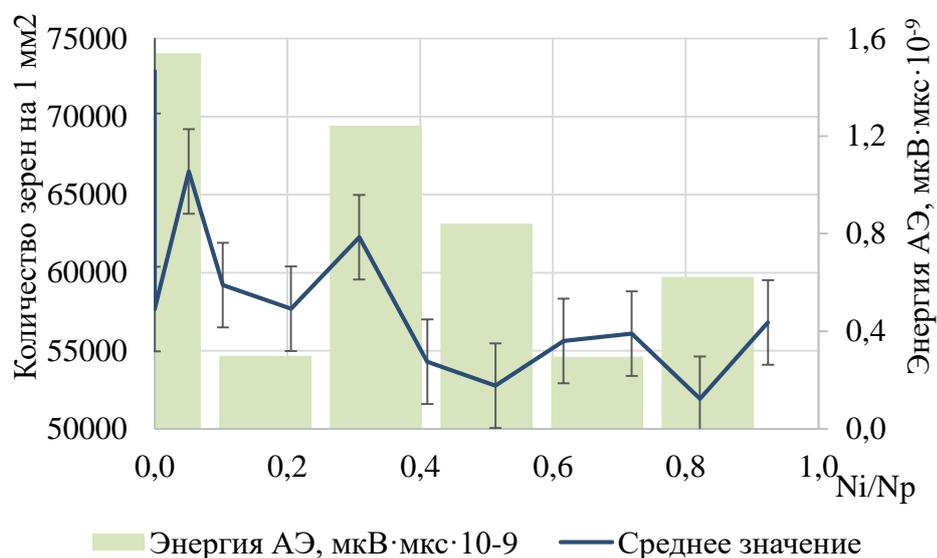


Рисунок 4.2 - Зависимость удельной плотности перлита от уровня накопленных повреждений с наложением изменения суммарной энергии АЭ при МЦУ

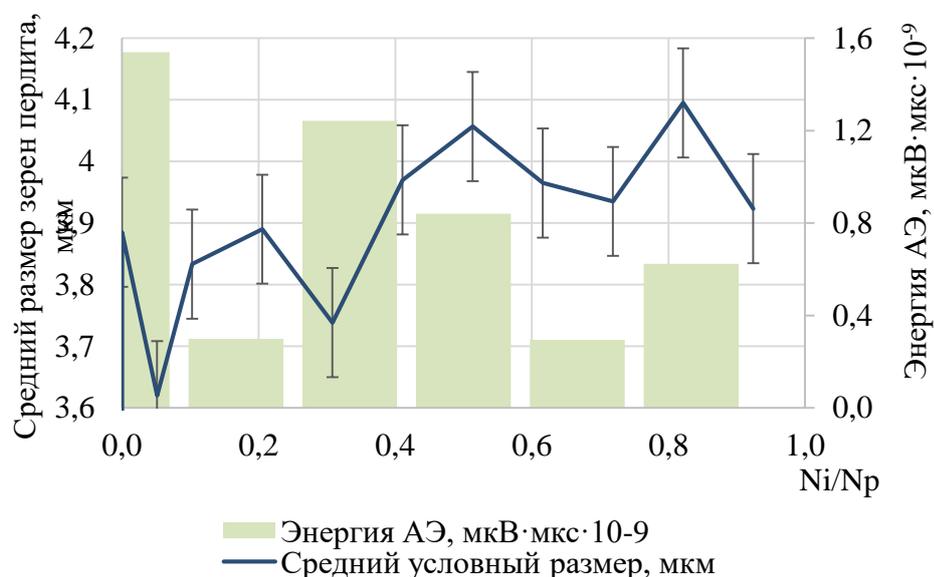


Рисунок 4.3 - Зависимость среднего размера зерна перлита от уровня накопленных повреждений с наложением изменения суммарной энергии АЭ при МЦУ

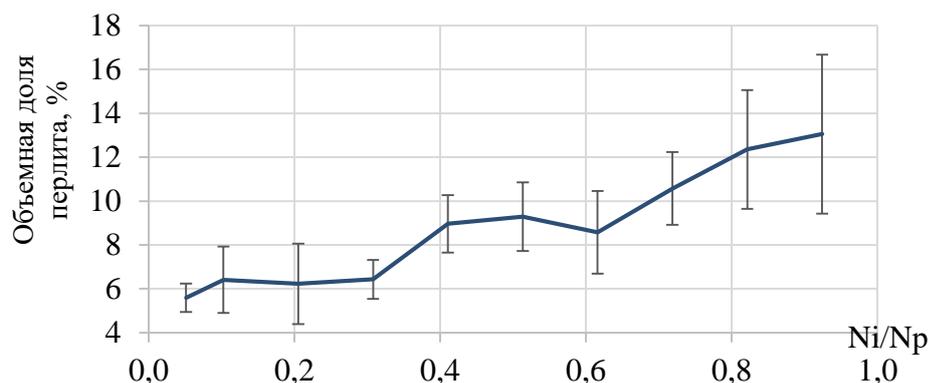


Рисунок 4.4 - Зависимость объемной доли перлита в структуре стали 09Г2С от уровня накопленных повреждений

По зависимостям среднего условного размера зерна и удельной плотности видно, что при достижении уровня накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,3$  происходит уменьшение размера зерна с последующим плавным его увеличением до момента разрушения. В работе [128] выявлено, что при циклическом воздействии на сталь У10 происходит сфероидизация дисперсных цементных пластин перлита и укрупнение (коалесценция) карбидов. Данное явление авторы [128] связывают с тем, что тонкопластинчатый перлит обладает высоким уровнем внутренних микронапряжений и повышенной дефектностью цементита и, в процессе циклического нагружения, происходит динамическое старение перлита, что приводит к дроблению и сфероидизации пластин.

Предполагается, что в стали 09Г2С высокий размах напряжений при МЦУ приводит к перегреву в локальных областях, что вызывает частичное разрушение пластин цементита с образованием глобулярного перлита [129]. Известно, что сфероидизация протекает активней в перлитах с меньшим размером зерна. При этом стоит отметить, что разрушение мелких зерен перлита может вызвать растворение пластин цементита. Растворение мелких зерен при стабильном количестве крупных приводит к увеличению среднего размера зерна перлита и уменьшению их количества, полученные результаты подтверждаются зависимостями, полученные в работе [126].

Полученная тенденция роста среднего размера зерна перлита, а также скачкообразное изменение в области накопленных повреждений 0,3, свидетельствует о внутренних структурных изменениях в перлите и являются косвенным показателем фазовых превращений в перлите.

Особый интерес вызвала зависимость объемной доли перлита от уровня накопленных повреждений. Также была построена зависимость максимального разброса значений содержания перлита от уровня накопленных повреждений, которая представлена на Рисунке 4.5.

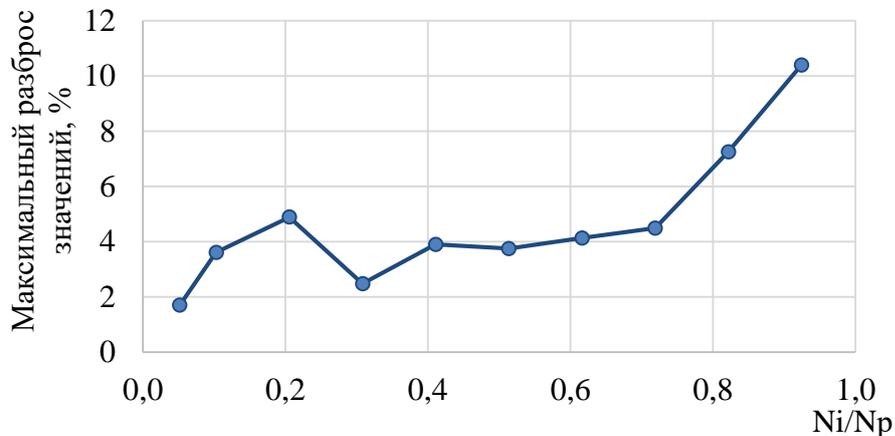


Рисунок 4.5 - Зависимость максимального разброса содержания перлита от уровня накопленных повреждений

Полученные результаты показывают, что при достижении уровня повреждений  $Ni/Np = 0,7$  происходит увеличение разброса показаний. В исследованиях Н.А. Махутова [130] уровень  $Ni/Np = 0,7$  описывается как граница перехода разрушения материала с микроуровня на макроуровень, в данной точке происходит слияние микротрещин и страгивание магистральной трещины. Предполагается, что на данном этапе происходят локальные изменения структуры материала с релаксацией напряжений в одних областях и увеличением в других, находящихся на пути развития магистральной трещины. Разность внутренних напряжений приводит к увеличению разброса показаний.

## 4.2 Влияние МЦУ на ферритную фазу

В данном разделе исследовалось влияние накопления усталостных повреждений на средний размер зерен феррита. Исследования проводились в 2 этапа: на первом этапе проводили микроструктурный анализ поверхности образцов при нагружении на чистый симметричный изгиб, на втором – анализ образцов с различным уровнем накопленных повреждений после статического растяжения. Результаты анализа должны подтвердить закономерности измерения параметров АЭ при МЦУ, выявленных в главе 3.

В работах [131] установлено, что механическое поведение материалов возможно определить размерами зерна. Зависимость предела текучести  $\sigma_T$  от размера зерна была впервые выявлена Холлом и Петчем. Согласно полученным результатам была создана формула зависимости:

$$\sigma_T = \sigma_i + k_y \cdot \sqrt{\frac{l}{d}}, \quad (4.1)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести, МПа;

$d$  – размер зерна;

$\sigma_i$  и  $k_y$  – коэффициенты, зависящие от температуры испытаний и скорости нагружения.

Исходя из формулы Холла-Петча, определена зависимость предела выносливости от размера зерна, уравнение имеет вид:

$$\sigma_R = \sigma_{iR} + k_R \cdot \sqrt{\frac{1}{d}}, \quad (4.2)$$

где  $\sigma_{iR}$  и  $k_R$  – коэффициенты для данного сплава.

Эмпирическим способом установлено, что зависимость пределов выносливости и прочности от размера зерна имеет линейный характер для малоуглеродистых сталей.

Однако, в работе В.С. Ивановой и В.Ф. Терентьева [132] по изучению зависимости предела выносливости от среднего размера зерна установлено, что уравнение (4.2) справедливо только в определенных диапазонах нагружения.

#### 4.2.1 Изменение среднего размера зерна при чистом симметричном изгибе

Принцип проведения исследований аналогичен изучению структуры перлита: анализ осуществлялся согласно ГОСТ 5639-82 [113] с использованием анализатора изображения Thixomet PRO. Однако, в процессе анализа среднего размера зерен выявлено отклонение при выделении границ зерен (на Рисунке 4.6 показано автоматическое определение границ зерен программой Thixomet PRO).

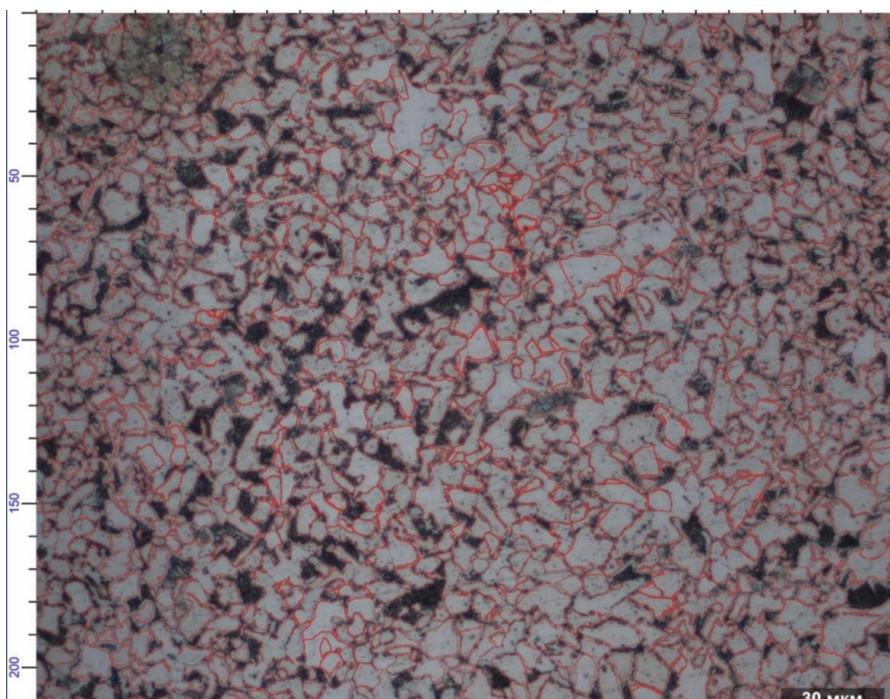


Рисунок 4.6 – Автоматическое определение границ зерен программой Thixomet PRO

С целью определения корректности подсчета зерен компьютерным методом был проведен сравнительный анализ определения среднего размера зерна феррита ручным (методом случайных линий) и компьютерным методами.

В результате выявлено значительное отклонение между методами анализа среднего размера зерна. Данное отклонение связано с тем, что границы зёрен выявлены нечетко, что приводит к ошибочной обработке изображения при компьютерном методе анализа. В связи с большим отличием между методами измерения, расчет среднего размера зерна производился ручным способом.

Для детального изучения структурных измерений при МЦУ принято решение определить средний размер в продольном и поперечном направлениях, а также проанализировать изменение вытянутости зерен феррита. На Рисунках 4.7-4.9 представлены микроструктура исходного образца при уровне накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,3, 0,7$ .

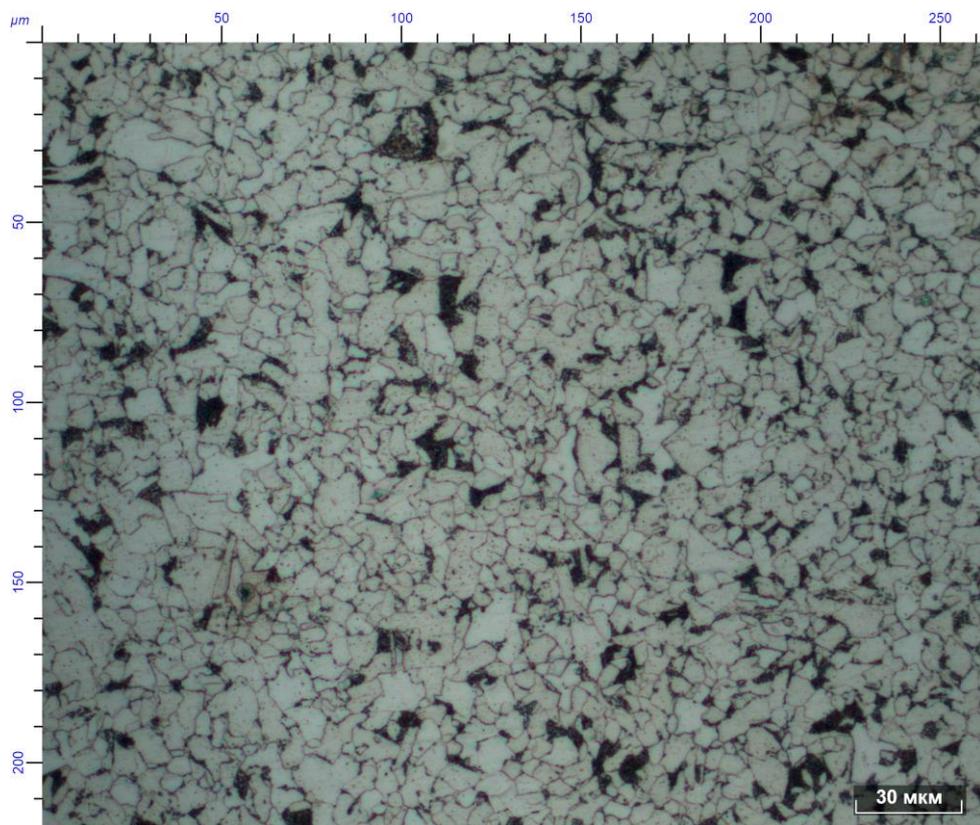


Рисунок 4.7 - Микроструктура исходного образца

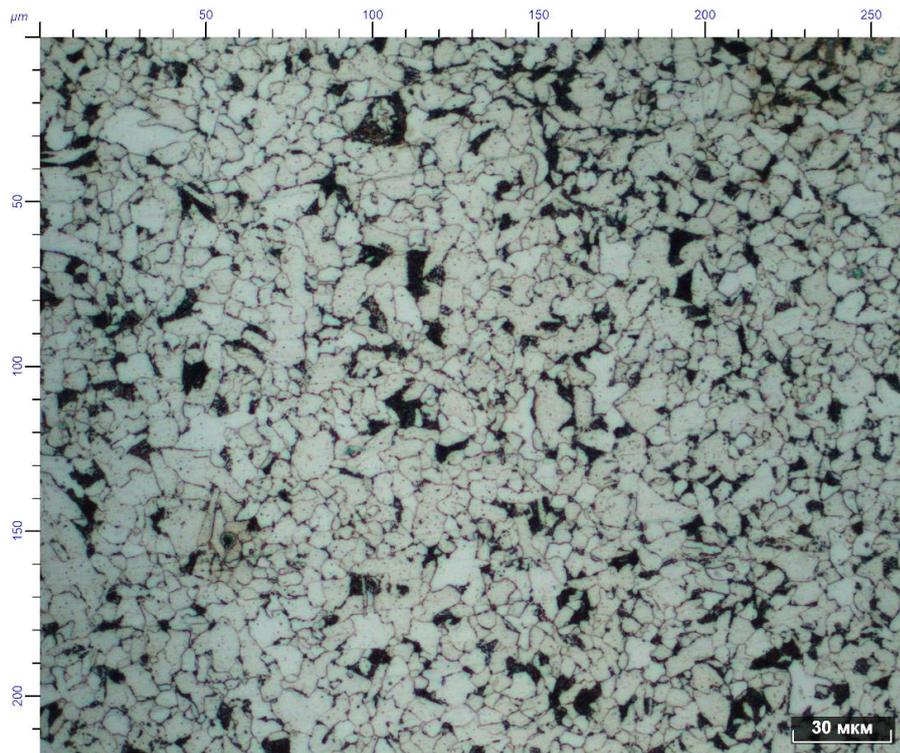


Рисунок 4.8 – Микроструктура образца при уровне накопленных повреждений

$$Ni/Np = 0,3$$

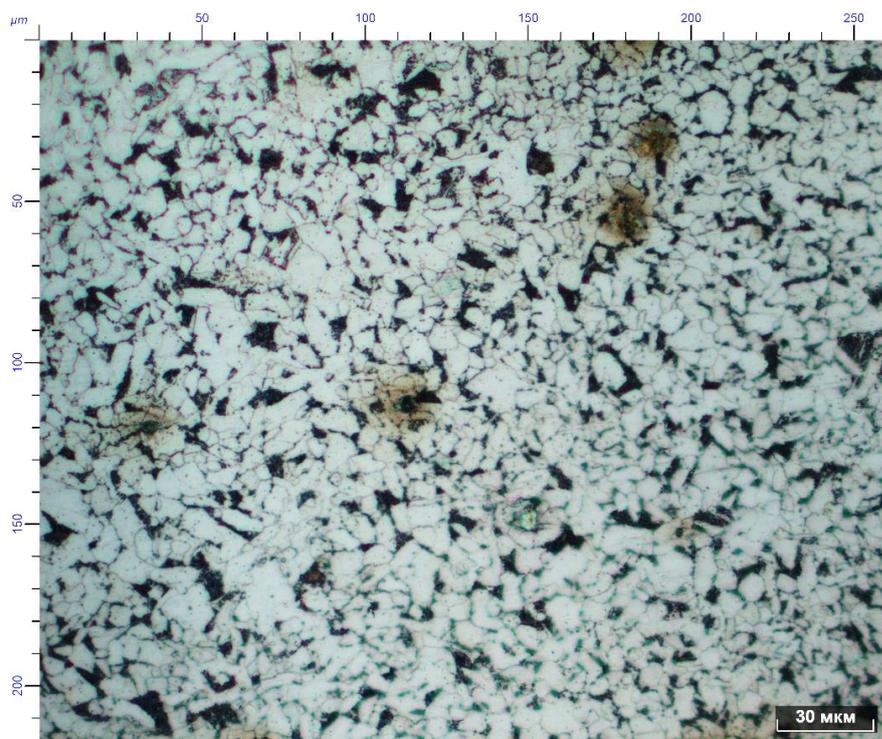


Рисунок 4.9 – Микроструктура образца при уровне накопленных повреждений

$$Ni/Np = 0,7$$

Измерение среднего размера проводилось в программном комплексе «Image-Pro Plus 6.0», в соответствии с ГОСТ 5639-82 [113]. Для определения среднего размера зерна, база данных с длинами зерен импортировалась в программу «Excel», где подвергалась анализу с помощью описательной статистики. Результат анализа базы данных в программе «Excel» представлен в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результат анализа базы данных в программе «Excel»

Среднее	4,269
Стандартная ошибка	0,180
Медиана	3,185
Мода	1,694
Стандартное отклонение	3,159
Дисперсия выборки	9,982
Эксцесс	7,739
Асимметричность	2,089
Интервал	25
Минимум	0,423
Максимум	25,424
Сумма	1310,800
Счет	307
Наибольший(1)	25,424
Наименьший(1)	0,423
Уровень надежности (95,0 %)	0,354

Исходя из полученных данных, были построены зависимости среднего размера зерна феррита в продольном ( $N_x$ ) и поперечном ( $N_y$ ) направлениях к вектору нагружения и вытянутости зерна от уровня накопленных повреждений при усталостных испытаниях на чистый симметричный изгиб (зависимости представлены на Рисунках 4.10-4.12). Вытянутость зерна рассчитывалась как отношение среднего размера зерна в продольном направлении на средний размер зерна в поперечном направлении. Значение коэффициента вытянутости:

- $N_x/N_y = 1$  - размеры в продольном и поперечном направлениях одинаковы;
- $N_x/N_y > 1$  - зерно вытянуто в продольном направлении;
- $N_x/N_y < 1$  - зерно вытянуто в поперечном направлении.

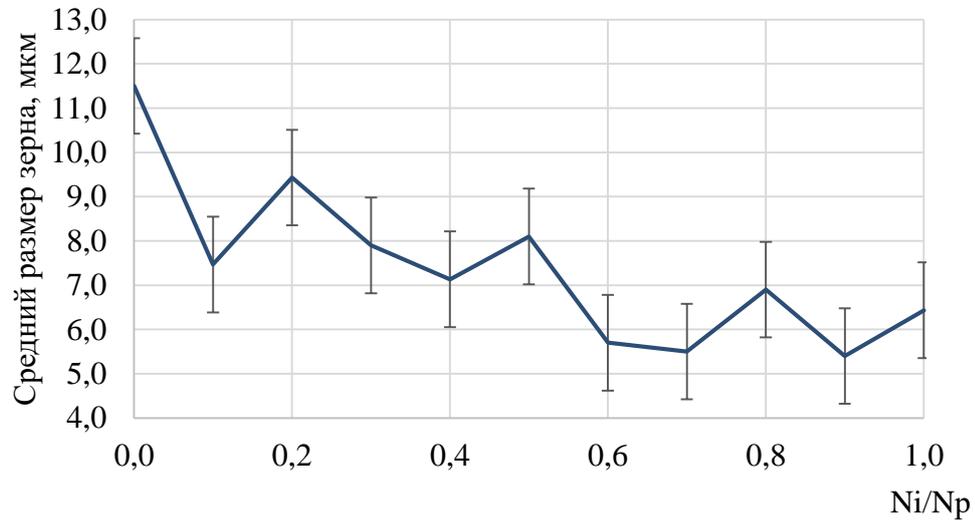


Рисунок 4.10 – Зависимость среднего размера зерна феррита в продольном направлении от уровня накопленных повреждений

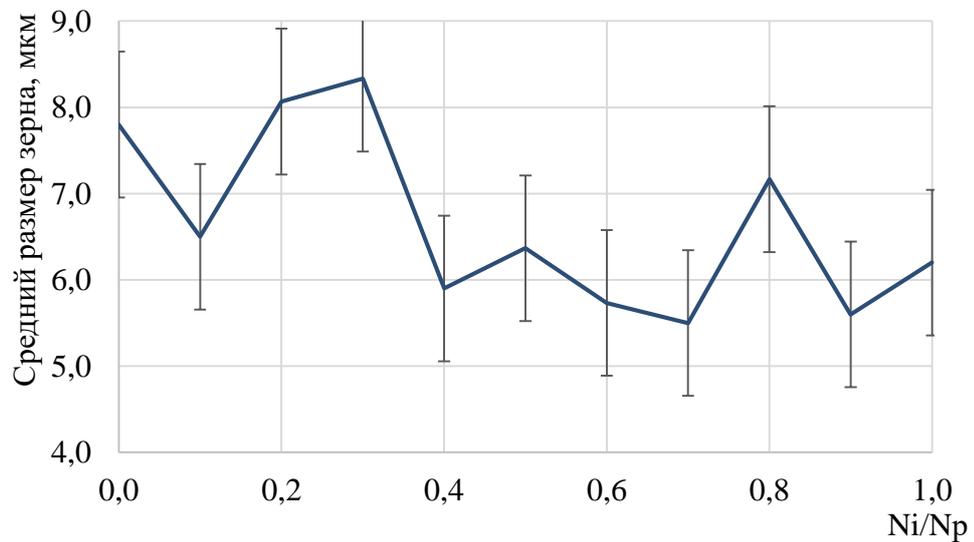


Рисунок 4.11 – Зависимость среднего размера зерна феррита в поперечном направлении от уровня накопленных повреждений

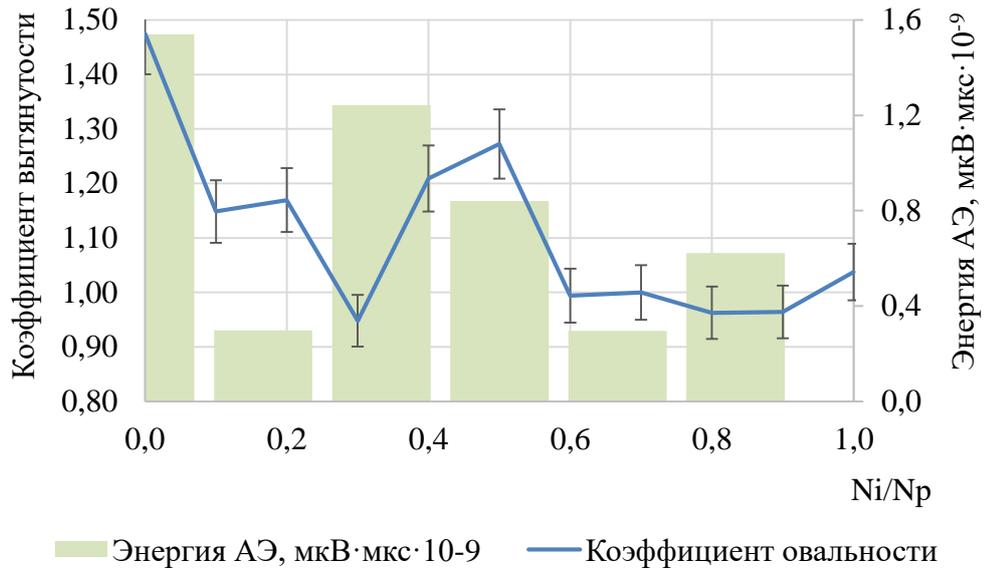


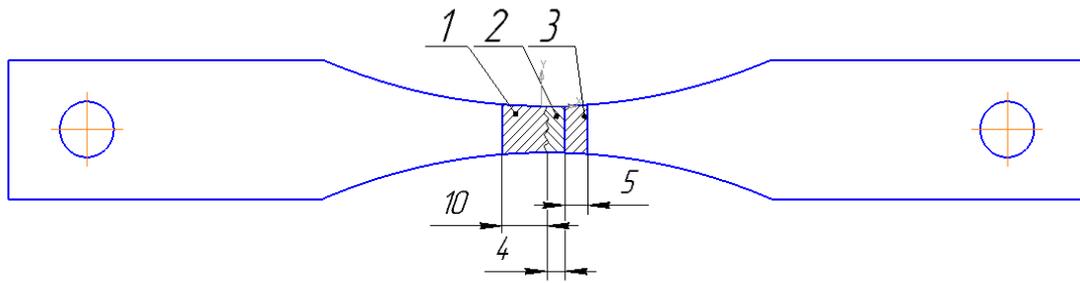
Рисунок 4.12 – Зависимость вытянутости зерна феррита от уровня накопленных повреждений с наложением изменения суммарной энергии АЭ при МЦУ

Анализ результатов показал, что зерна исходного образца имеют вытянутую форму, что связано с технологией изготовления листового проката. С увеличением количества циклов происходит уменьшение соотношения средних размеров зерна в продольном и поперечном направлениях, что свидетельствует о внутренних перестройках в структуре стали [133]. Повышение вытянутости после  $Ni/Np=0,3$  косвенно свидетельствует о накоплении критического уровня энергии в данной области с последующим его высвобождением (смена механизма адаптации материала к внешнему нагружению).

#### 4.2.2 Изменение среднего размера зерна с различным уровнем накопленных повреждений после статического растяжения

Для проведения исследований были вырезаны мини-образцы из разрушенных, эскиз раскроя представлен на Рисунке 4.13.

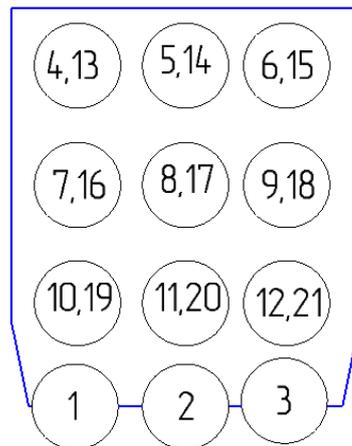
Шлифовка образца производилась на шлифовальной машине Gripo с последующей ручной полировкой.



- 1 – для микроструктурного анализа верхней поверхности;  
 2 – для фактографического анализа;  
 3 – для микроструктурного анализа торцевой поверхности

Рисунок 4.13 – Раскрой разрушенного образца

Для определения причин изменения параметров АЭ после статического растяжения образцов с различным уровнем накопленных повреждений были произведены микроструктурные исследования поверхности в 21 точках образца (в области разрушения, на расстоянии 0,5, 4,0, 8,0 мм от разрушения) с помощью оптического микроскопа Neophot-21, схема расположения мест измерения представлены на Рисунке 4.14.



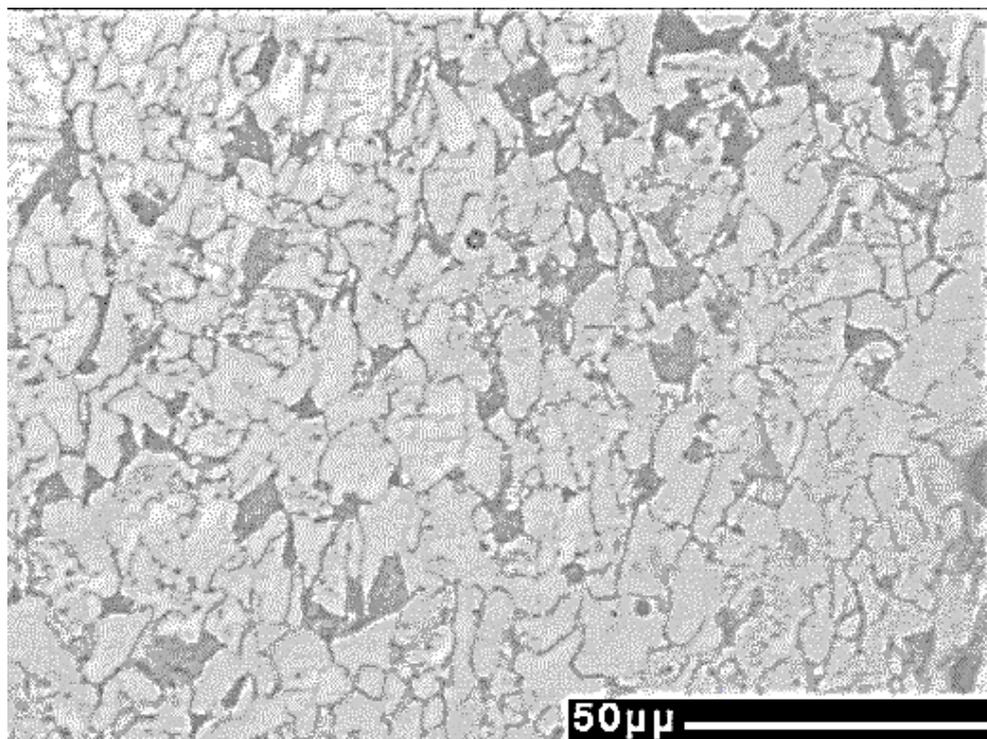
1,2,3 – при увеличении  $\times 5$ ; 4-12 – при увеличении  $\times 20$ ;

13-21 – при увеличении  $\times 50$

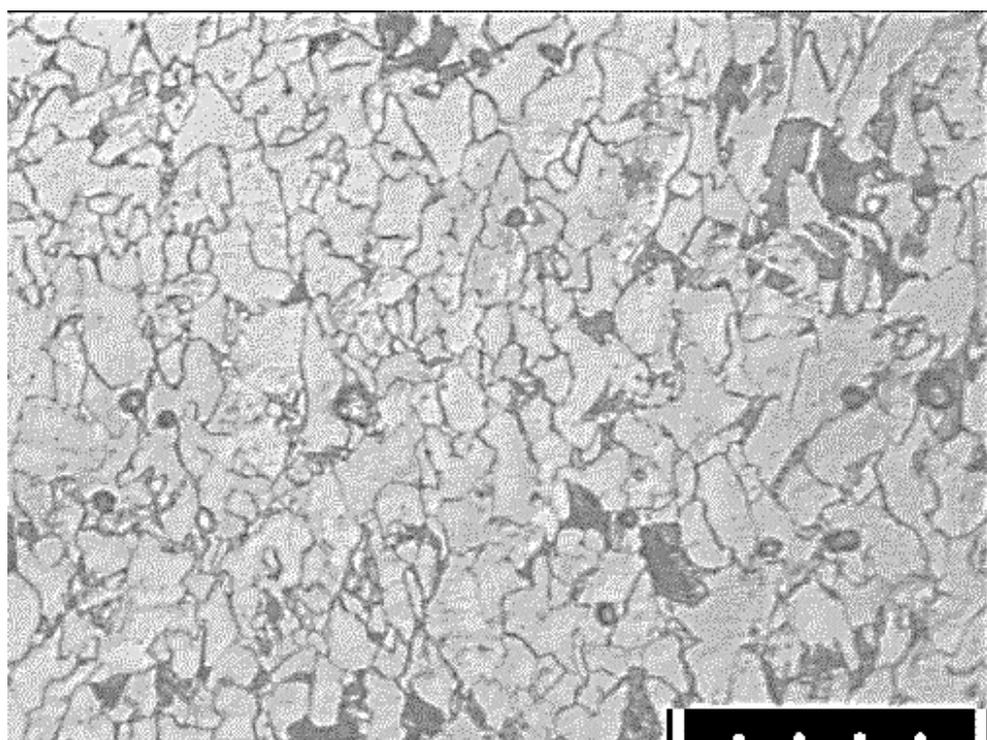
Рисунок 4.14 – Области проведения микроструктурного анализа

Принято решение провести расчет среднего размера зерна феррита в точке 17, так как данная точка находится в середине шлифов. В данной точке поверхность максимально плоская, отсутствуют завалы, характерные на краях шлифов. На Рисунке 4.15 представлены микроструктуры поверхности образцов в области 17.

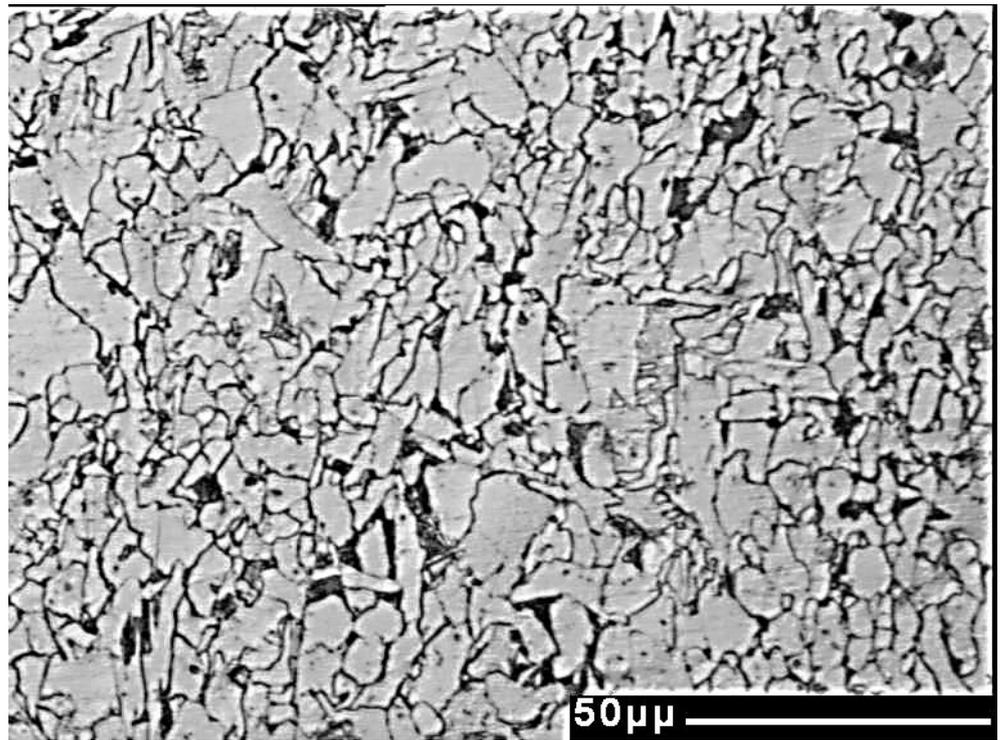
Ni/Np = 0



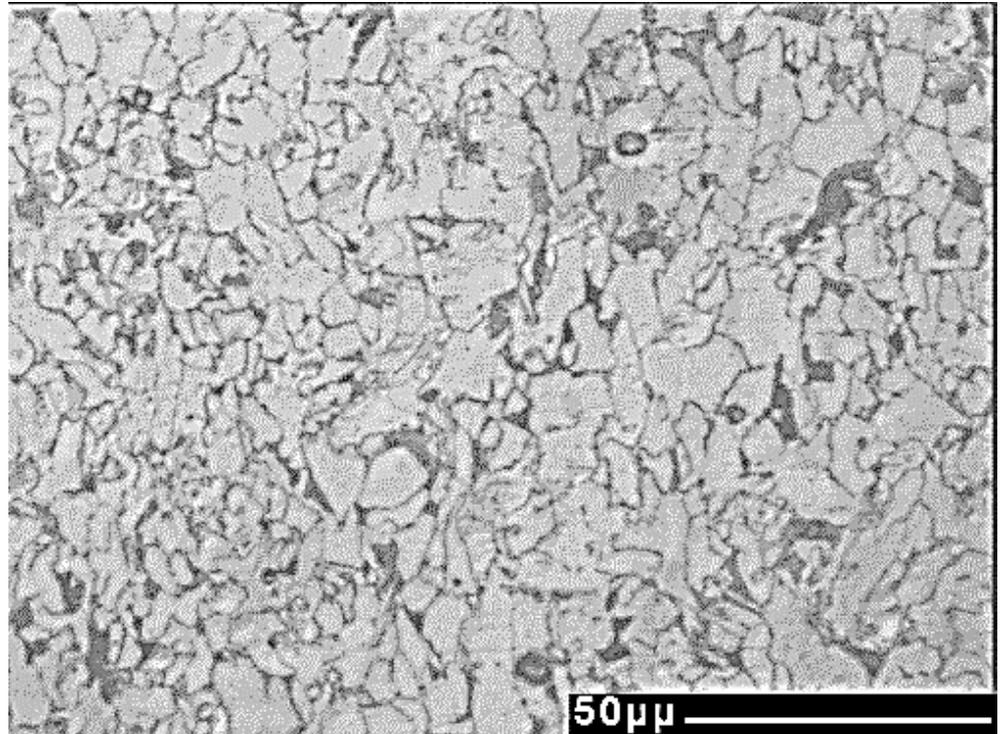
Ni/Np = 0,1

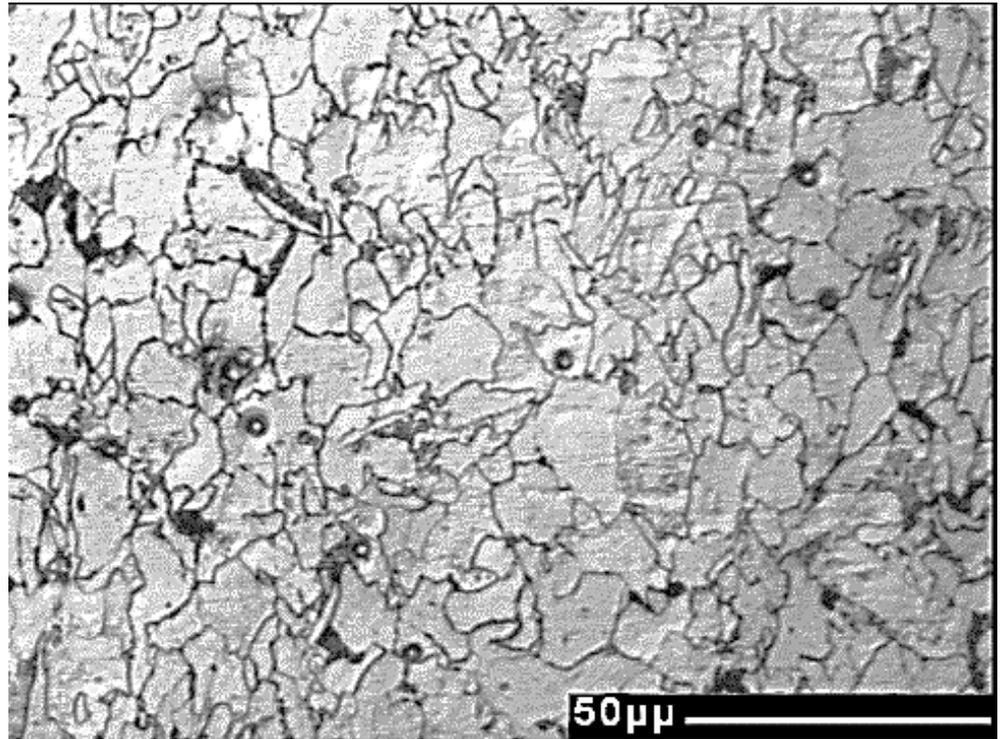
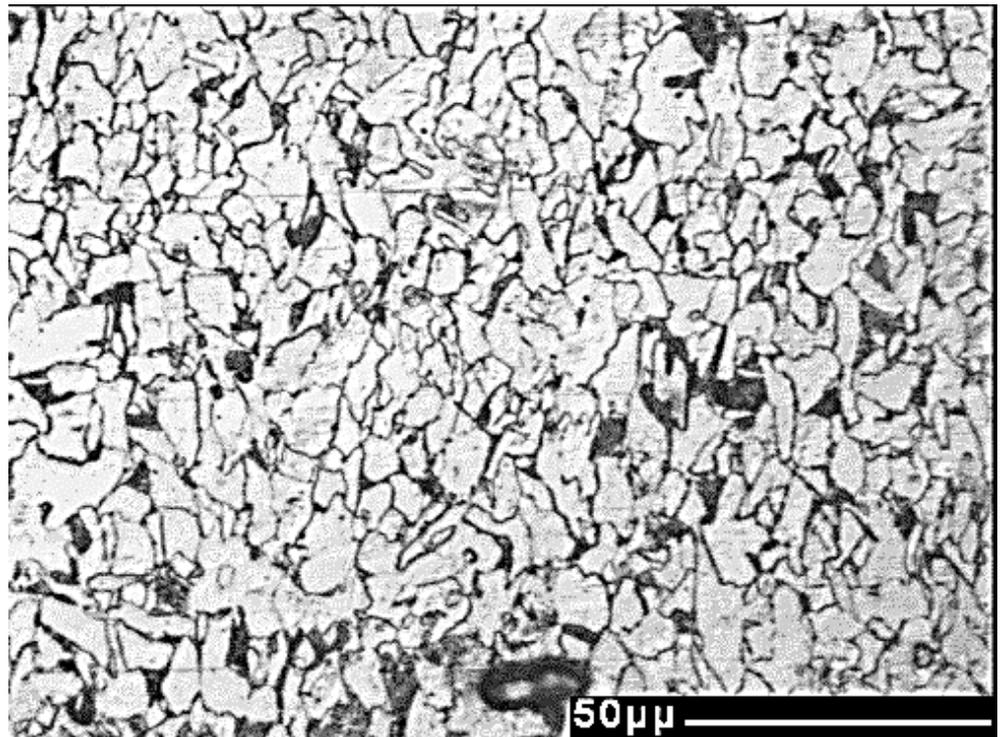


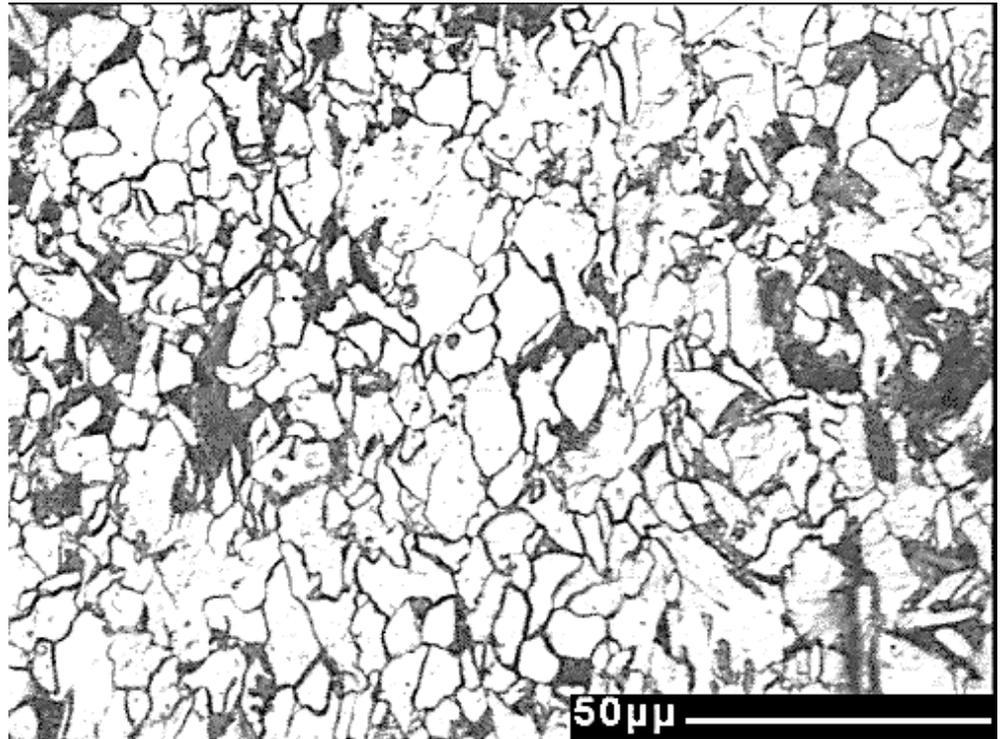
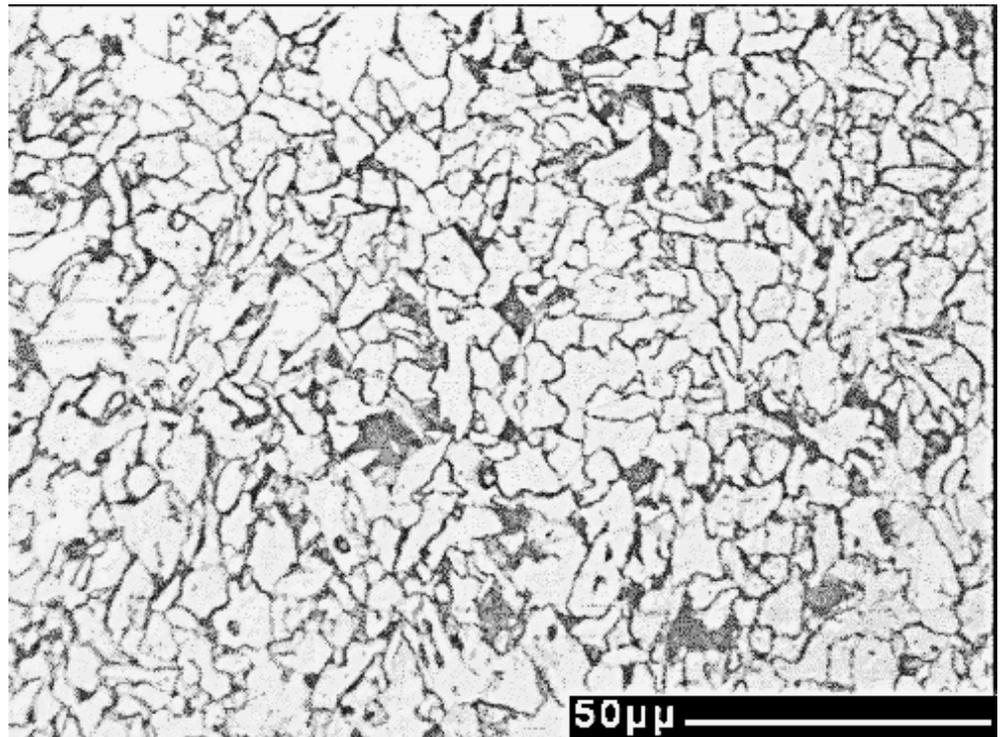
Ni/Np = 0,2



Ni/Np = 0,3



$Ni/Np = 0,4$  $Ni/Np = 0,5$ 

$Ni/Np = 0,6$  $Ni/Np = 0,7$ 

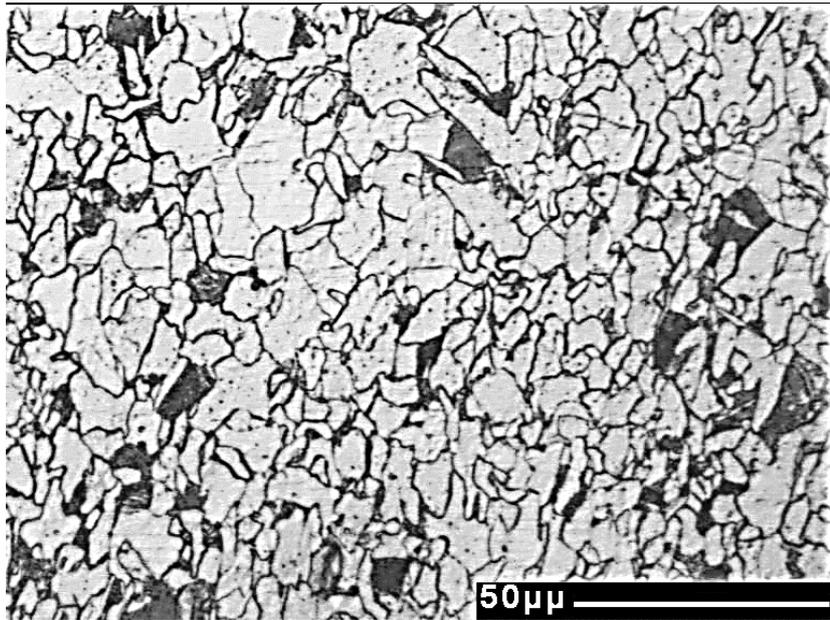
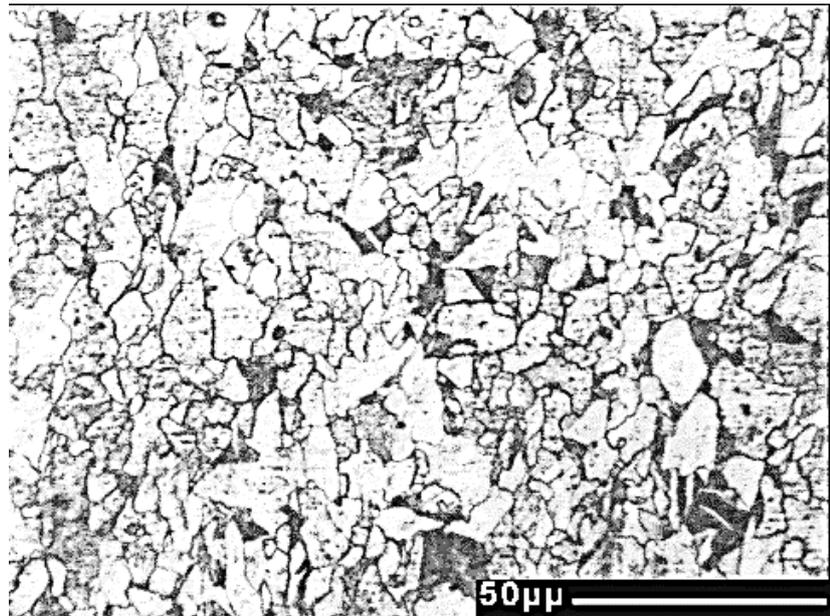
$Ni/Np = 0,8$  $Ni/Np = 0,9$ 

Рисунок 4.15 – Микроструктура образцов с различным уровнем накопленных повреждений в области 17

Измерение среднего размера проводилось в программе в программном комплексе «Image-Pro Plus 6.0», в соответствии с ГОСТ 5639-82 [113]. После подсчета среднего размера зерна была построена зависимость среднего размера зерна от уровня накопленных повреждений после статического растяжения вдали от зоны разрушения (Рисунок 4.16).

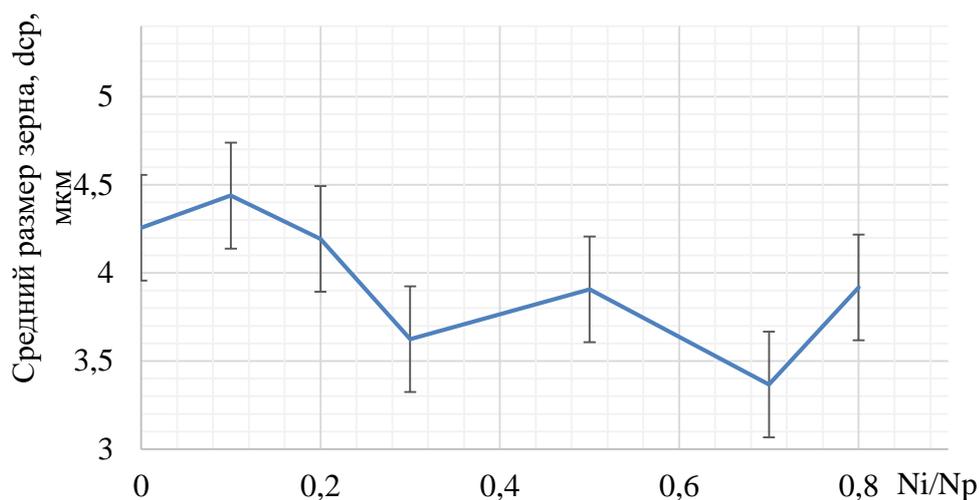


Рисунок 4.16 - Зависимость среднего размера зерна от уровня накопленных повреждений после статического растяжения вдали от зоны разрушения

Из полученной зависимости можно сделать вывод о том, что размер зерен феррита в интервале  $Ni/Np = 0...0,7$  уменьшается. Этот результат связан с реализацией нескольких независимых процессов, связанных с образованием ячеистой структуры в зернах феррита, формированием микропор и трансформацией перлита. Аналогичный результат был получен в исследованиях И.А. Вакуленко и Л.А. Горбачева [134,135]. При достижении уровня накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,7$  уменьшение размера зерна прекращается, и преобладающим становится процесс порообразования с последующим формированием трещин на различных масштабных уровнях.

В исследованиях Н.А. Махутова [130] данный уровень  $Ni/Np = 0,7$  описывается как граница перехода разрушения материала с микроуровня на макроуровень, причем, для различных материалов данная граница перехода различна, в работах Е.А. Наумкина [7] - как момент начала страгивания магистральной трещины.

Как было показано выше, в процессе циклической деформации происходит перестройка структуры металла. В результате изменяются механические свойства и характер разрушения.

### 4.3 Влияние МЦУ на образование микропор в структуре

Известно, что адаптация материала к внешним воздействиям связана со структурным переходом, при котором внутренние напряжения снижаются. Одним из механизмов уменьшения напряжений является преобразование микротрещин в микропору путем вхождения дислокации обратного знака в дислокационную микротрещину и ее затупления [136-138].

Изучению кинетики зарождения и роста пор посвящено много работ [139-140], которые направлены на исследования образование пор в различных структурах. Но так как зарождения пор в структуре вызывает понижение прочности металла и может вызывать возможные дефекты в материалах, данная тема весьма актуальна для изучения. В данной работе были проведены исследования по появлению пор при усталостных нагрузках и измерении среднего расстояния между ними.

Измерение количества пор и среднего расстояния между ними проводилось аналогично исследованию структуры перлита. Отличительной чертой является исследование поверхности образцов без травления. Для более детального изучения процесса накопления повреждений образцы нагружались с меньшим изгибом, общий ресурс образцов до разрушения составил 9990 циклов. При исходном измерении на образце, было обнаружено 7 микропор в структуре стали. Исходная структура образца до циклического нагружения изображена на Рисунке 4.17.

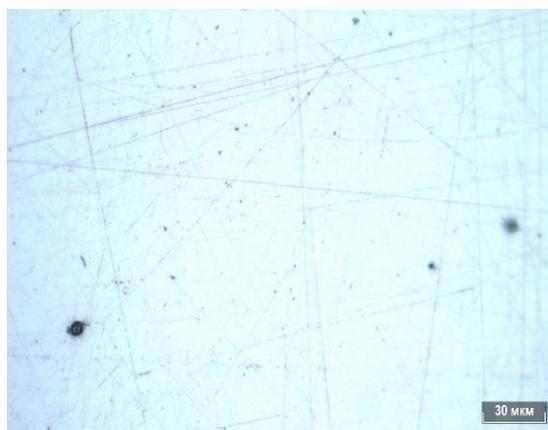


Рисунок 4.17 – Исходная структура до циклического нагружения

На Рисунках 4.18-4.22 изображена структура образца в процессе измерения исследуемых параметров на разных этапах циклического нагружения.

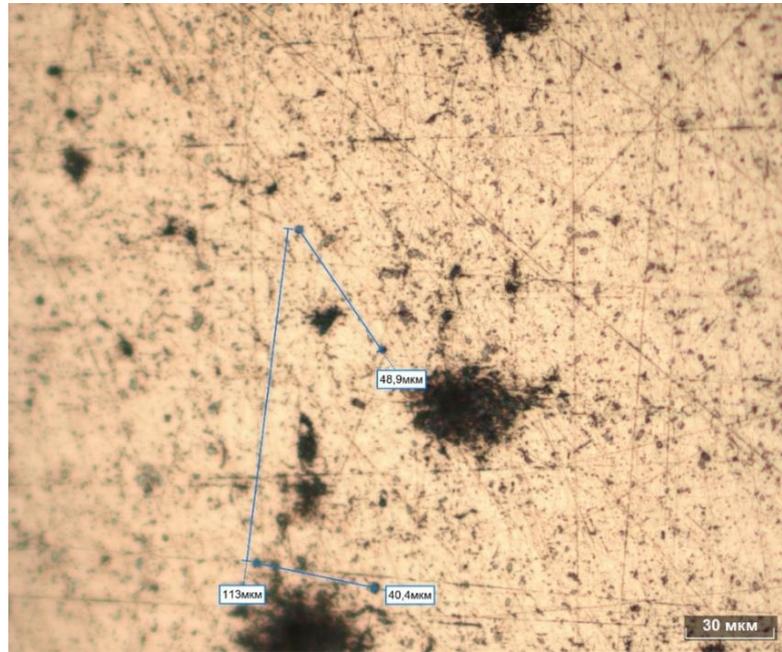


Рисунок 4.18 – Структура образца после 500 циклов ( $N_i/N_p=0,05$ )



Рисунок 4.19 – Структура образца после 2000 циклов ( $N_i/N_p=0,2$ -)

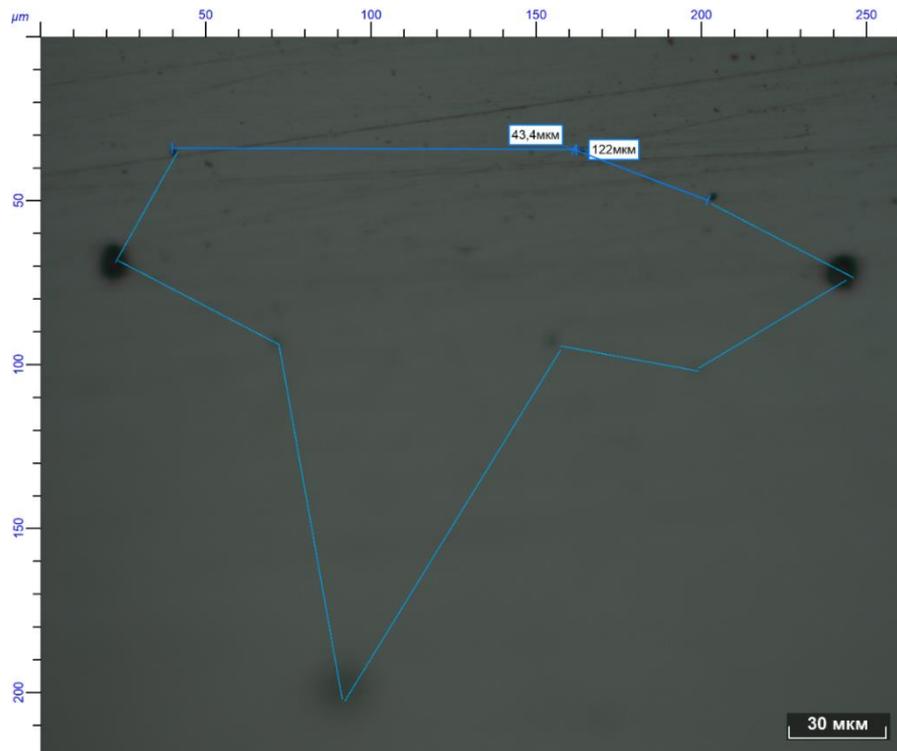


Рисунок 4.20 – Структура образца после 6000 циклов ( $Ni/Np=0,6$ )

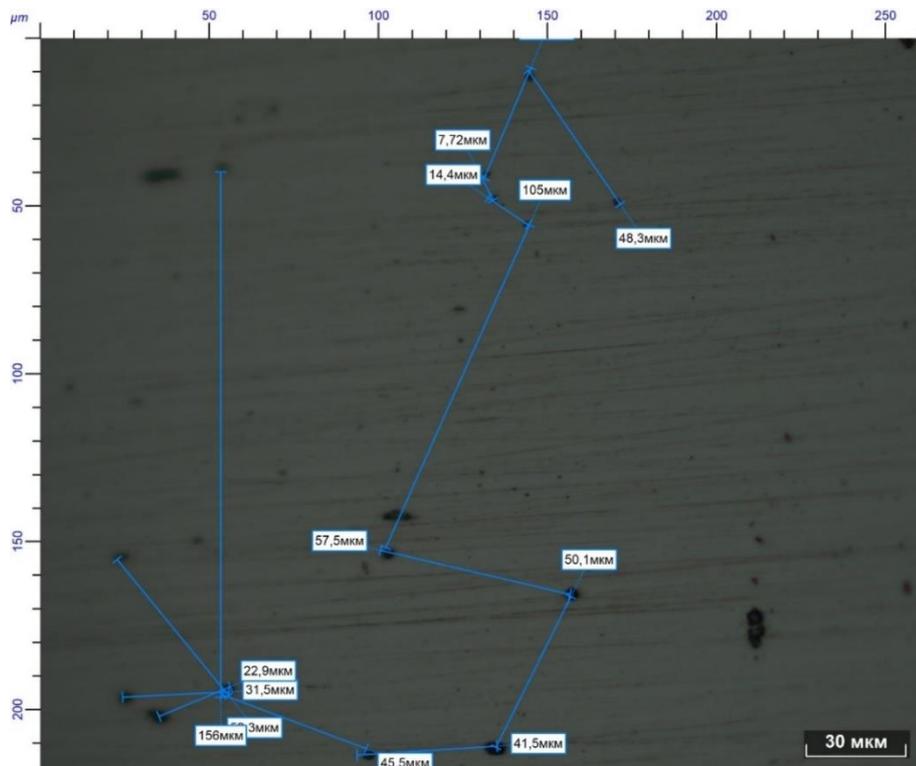


Рисунок 4.21 – Структура образца после 7000 циклов ( $Ni/Np=0,7$ )

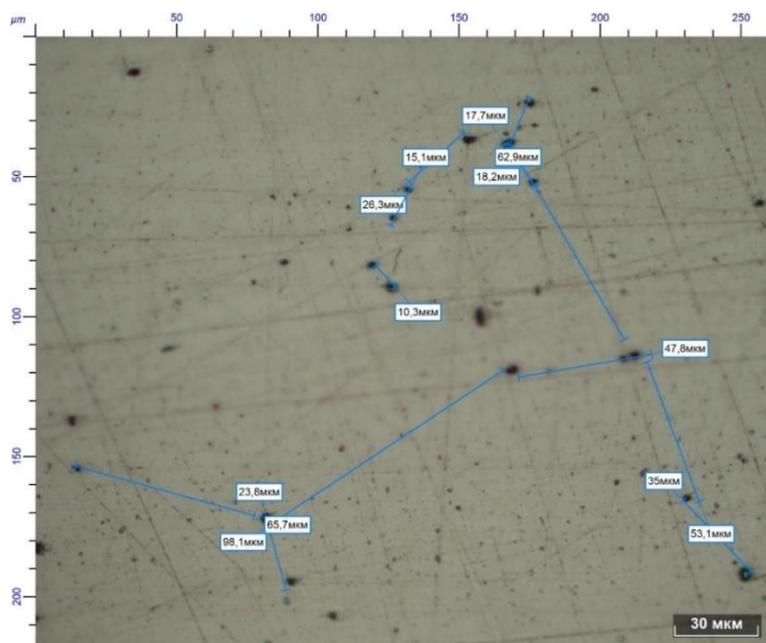


Рисунок 4.22 – Структура образца после совершения 9990 циклов ( $Ni/Np=1$ )

Исходя из представленных структур на Рисунках 4.18-4.22 можно заметить постепенное возрастание количества пор в металле, что свидетельствует об уменьшении среднего расстояния микропор. На Рисунке 4.23 изображена зависимость среднего расстояния между порами от уровня накопленных повреждений.

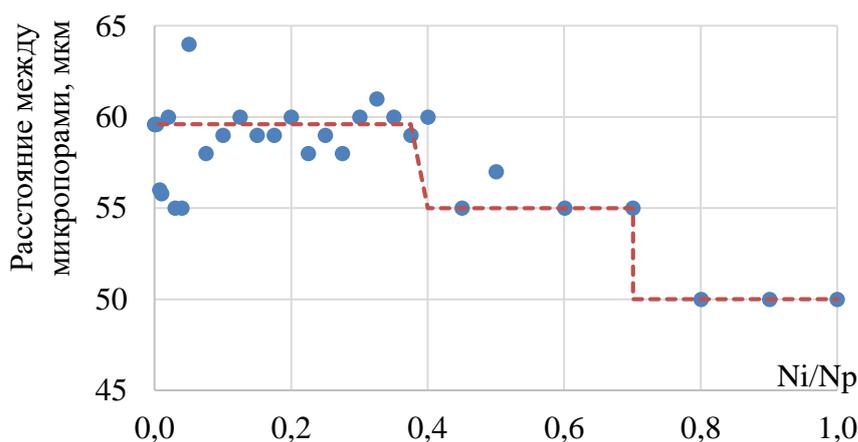


Рисунок 4.23 – Зависимость среднего расстояния между порами от уровня накопленных повреждений

После доведения образца до разрушения в структуре стали зафиксированы 57 пор, что является подтверждением того, что с совершением циклических нагрузок происходит образования новых микропор в структуре.

На Рисунке 4.24 изображена зависимость количества микропор от уровня накопленных повреждений.

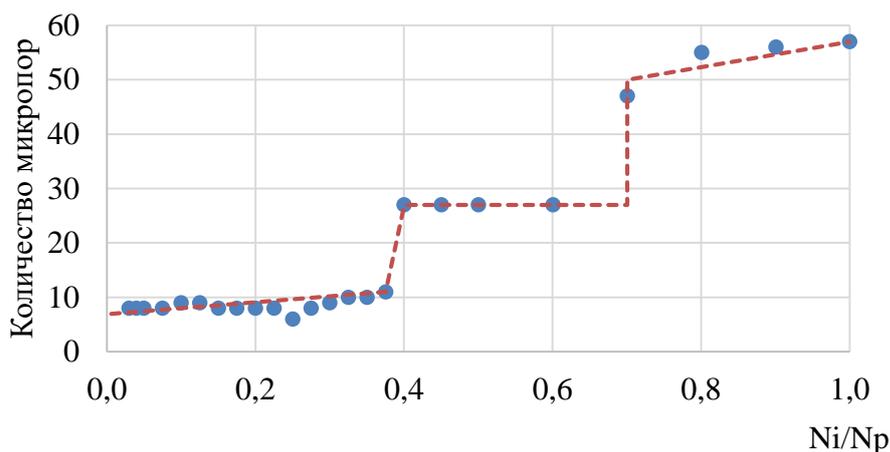


Рисунок 4.24 – Зависимость количества микропор от уровня накопленных повреждений

Зависимость, представленная на Рисунке 4.24, отличается ступенчатым характером и наличием пороговых значений, которые проявляются при достижении  $Ni/Np=0,3-0,4$  и  $Ni/Np=0,7$ .

#### 4.4 Исследования торцевой поверхности

Основываясь на результатах, полученных в исследованиях, а также на факте, что микротрещина начинает развиваться в поверхностных и приповерхностных слоях (исследования А.А. Шанявского [5]) было принято решение провести микроструктурный анализ торцевой поверхности образцов с уровнем накопленных повреждений  $Ni/Np=0,3$ . Исследование микроструктуры проводили с торцевой стороны, при этом из центральной части образца изготовлены микрошлифы (область разреза представлена на Рисунке 4.25).

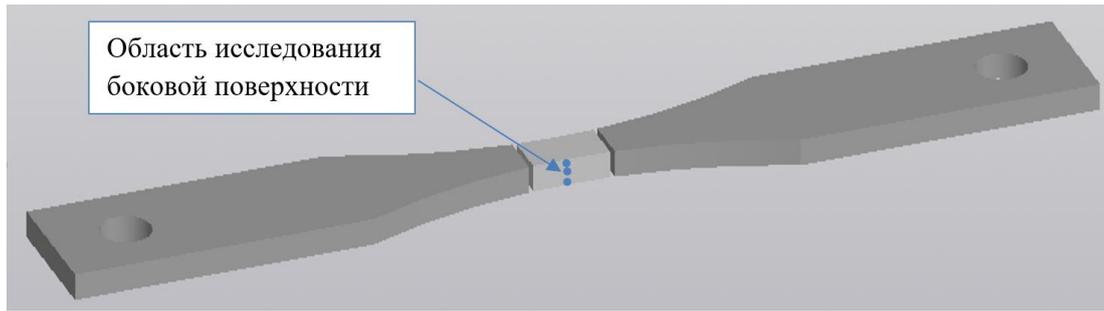


Рисунок 4.25 – Область разреза образцов для изготовления микрошлифа

Исследование торцевой поверхности проводилось в 3-х зонах (верхняя зона, середина, нижняя зона), которые представлены на Рисунке 4.26.

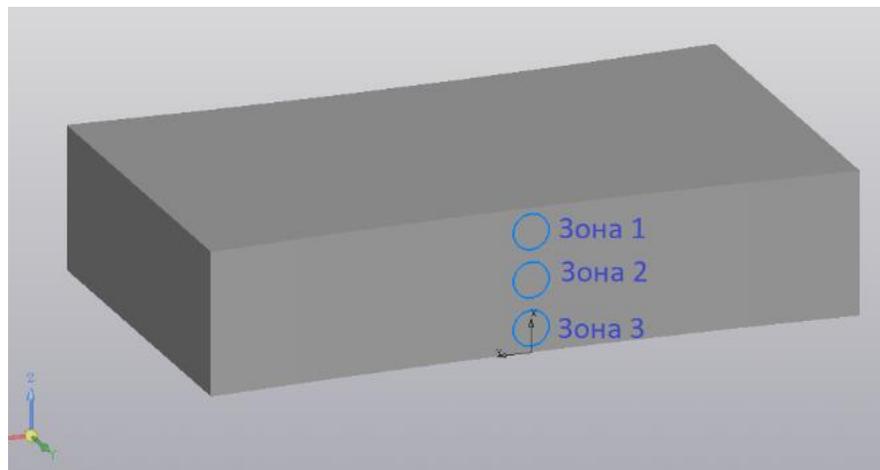


Рисунок 4.26 – Зоны проведения микроструктурного анализа

Работа проводилась в 2 этапа: на первом этапе изучали изменение среднего размера зерна, на втором – изменение количества микропор. Образцы изучаемого материала были подвергнуты шлифованию, полированию и травлению 5-типроцентной азотной кислотой (снимки микроструктуры представлены на Рисунке 4.27).

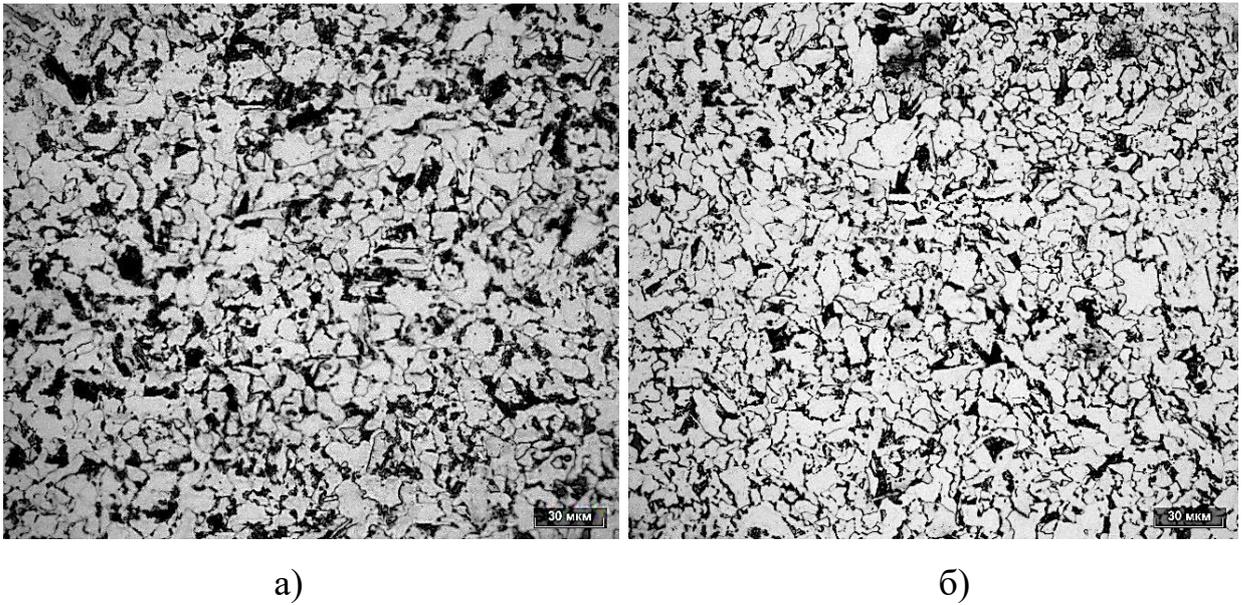


Рисунок 4.27 – Микроструктура исследуемого материала (а) и с уровнем накопленных повреждений  $Ni/Np=0,3$  (б) в зоне 3

Расчет среднего размера зерна проводился в программе ImageJ. Результаты анализа представлены в виде зависимости на Рисунке 4.28.

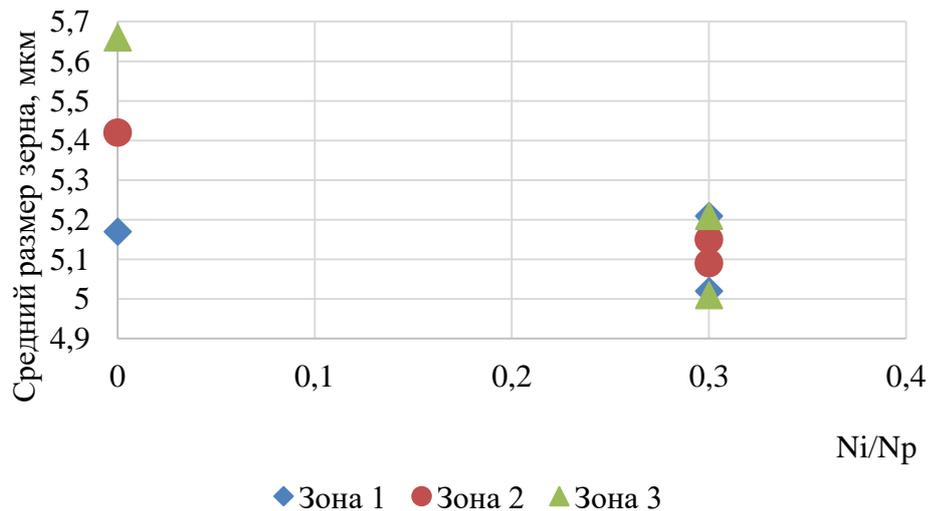


Рисунок 4.28 – Зависимость среднего размера зерна феррита на торцевой поверхности образца от уровня накопленных повреждений

Полученные результаты указывают на уменьшение среднего размера зерен феррита, что коррелирует с ранее полученными данными при исследовании верхней поверхности образцов. Также выявлено, что наибольшая интенсивность уменьшения размеров наблюдается в зоне 3 (нижний участок).

На следующем этапе проводился анализ изменения количества микропор от уровня накопленных повреждений в нижней зоне. Измерение размеров частиц также проводилось в программе в ImagJ. В процессе исследования выявлено образование микротрещины на нижнем участке образца (Рисунок 4.29), при этом вблизи самой трещины наблюдается повышенная плотность микропор [141].

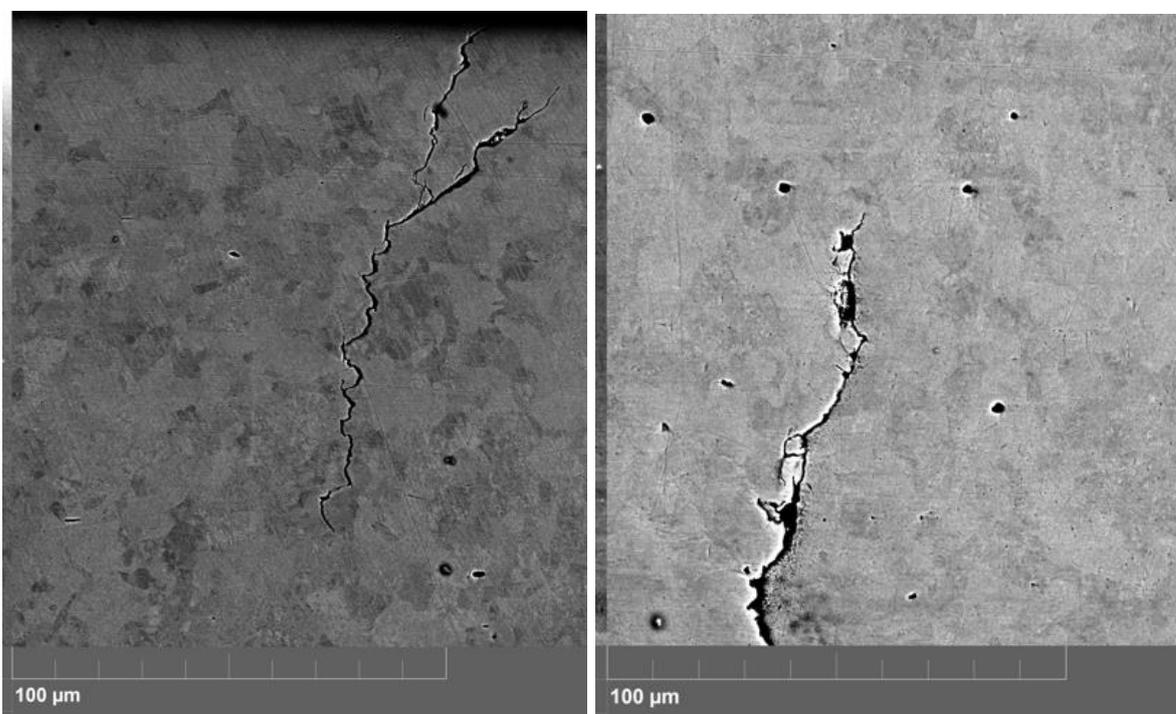


Рисунок 4.29 – Развитие микротрещин при уровне накопленных повреждений  $Ni/Np=0,3$  на поверхности образца

С целью анализа количества микропор по их размерам полученные данные в программе ImagJ были экспортированы в программу Excel для построения вариативных диаграмм. Диаграммы распределения микропор по размерам представлены на Рисунках 4.30-4.32.

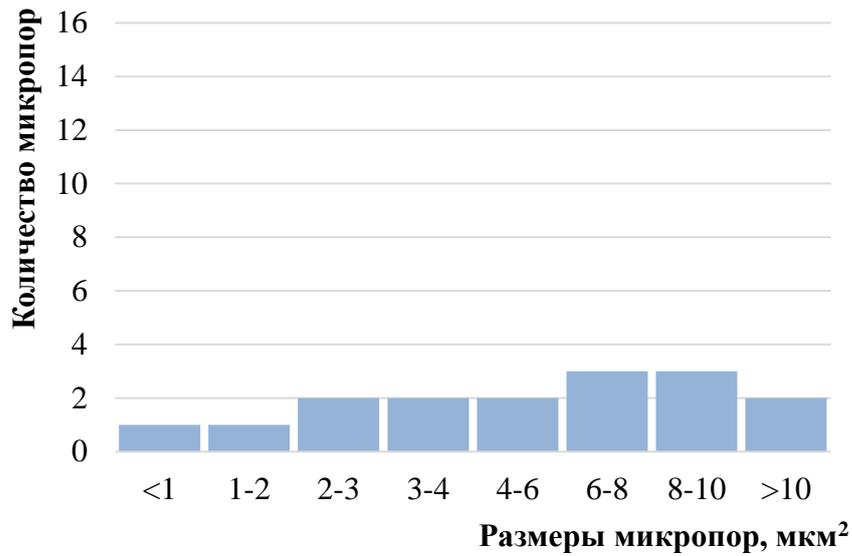


Рисунок 4.30 – Диаграмма распределения микропор по размерам исходного образца

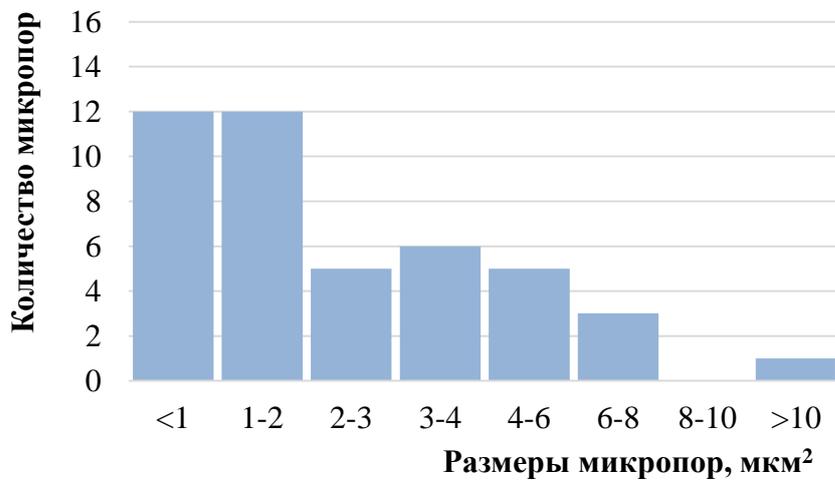


Рисунок 4.31 – Диаграмма распределения микропор по размерам образца с уровнем накопленных повреждений  $N_i/N_p = 0,3$  (первый образец)

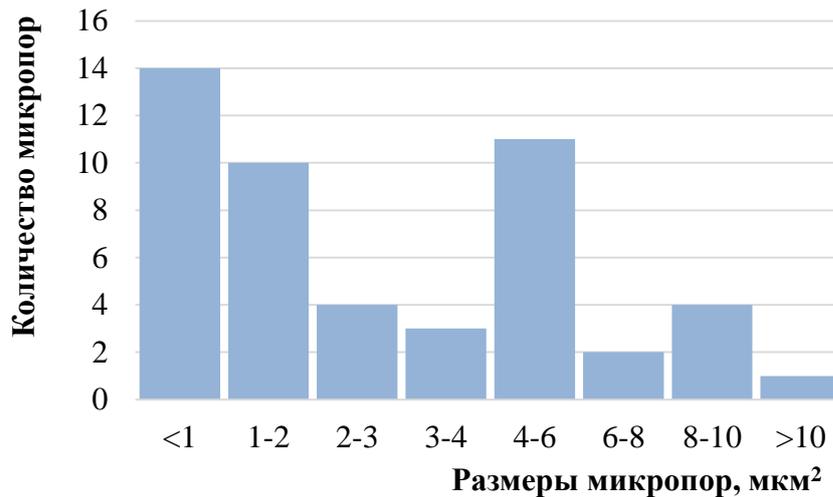


Рисунок 4.32 – Диаграмма распределения микропор по размерам образца с уровнем накопленных повреждений  $N_i/N_p = 0,3$  (второй образец)

Полученные результаты подтвердили тезис о том, что с накоплением усталостных деформаций происходит увеличение количества микропор. Возможно, микропоры выступают в качестве механизмов адаптации материала – при прохождении микротрещин через микропоры происходит релаксация внутренних напряжений, тем самым увеличивается ресурс материала.

Также выявлено, что при уровне накопленных повреждений  $N_i/N_p = 0,3$  уже имеется микротрещина с размерами 150-200 мкм (690 циклов), данная трещина развивается до уровня накопленных повреждений  $N_i/N_p = 0,7$  (1610 циклов) в стабильном режиме, после чего происходит «страгивание» магистральной трещины с быстрым разрушением.

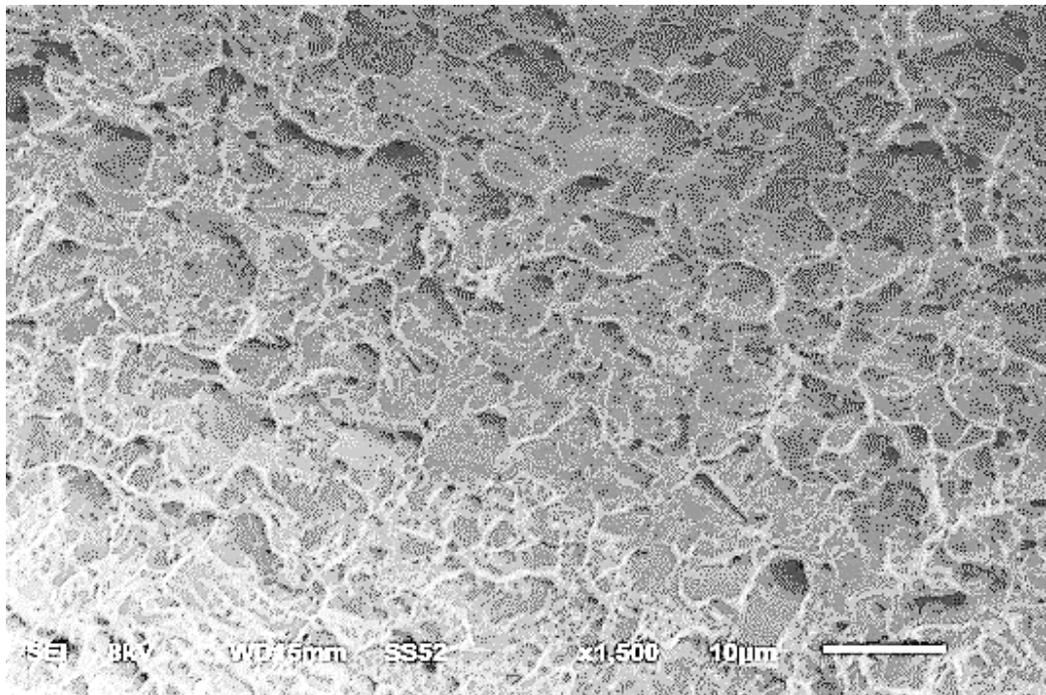
#### 4.5 Исследования поверхности разрушения

Для наглядного представления влияния уровня накопленных повреждений на характер излома были проведены исследования поверхности разрушения на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-6610LV.

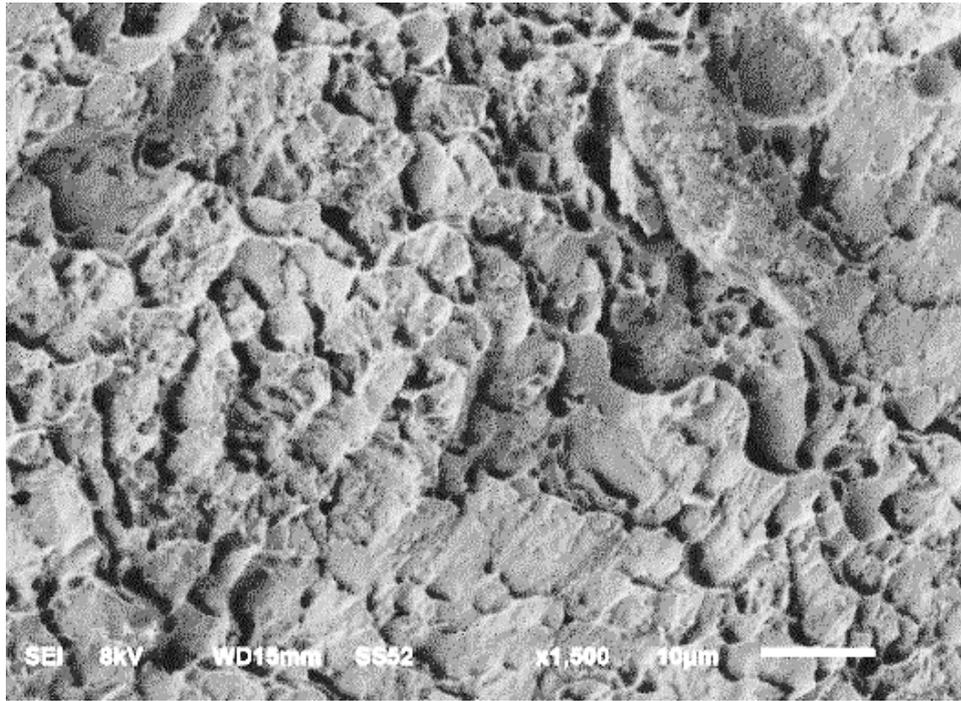
В работах [29,50] отмечено, что при МЦУ зарождение дефекта начинается в поверхностных и приповерхностных слоях, поэтому фрактограммы были сняты в двух зонах: в середине (зона долома) и с краю (зона развития трещины).

На Рисунке 4.33 представлены микрорельефы изломов стали 09Г2С. При анализе картины излома образца (Рисунок 4.33а), не подверженного циклическому нагружению, видны характерные ямки различного размера, представляющие собой половину микропор, через которые прошло разрушение. Ямки подразделяются на три группы: равноосные, ямки сдвига и ямки отрыва. Равноосные ямки свидетельствуют о вязком разрушении путем одноосного растяжения.

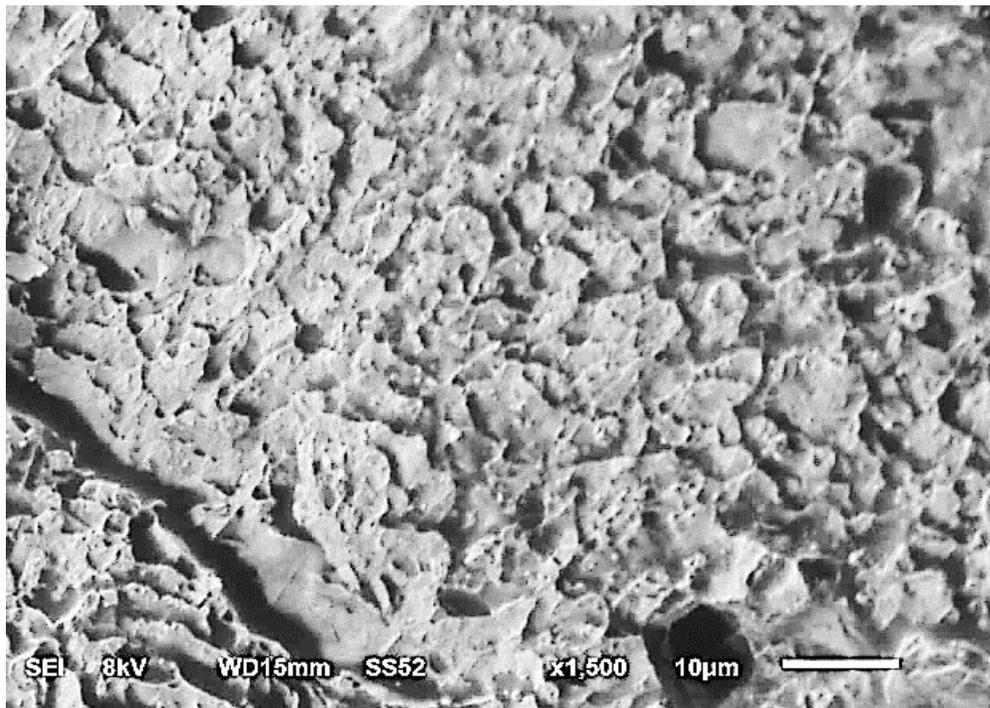
а)



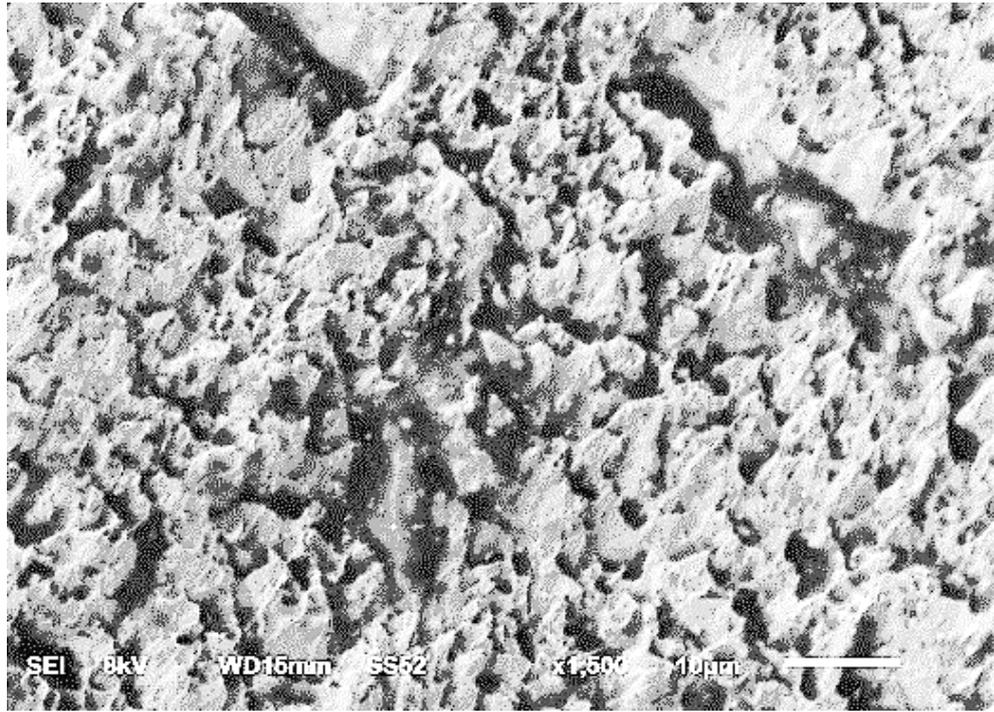
b)



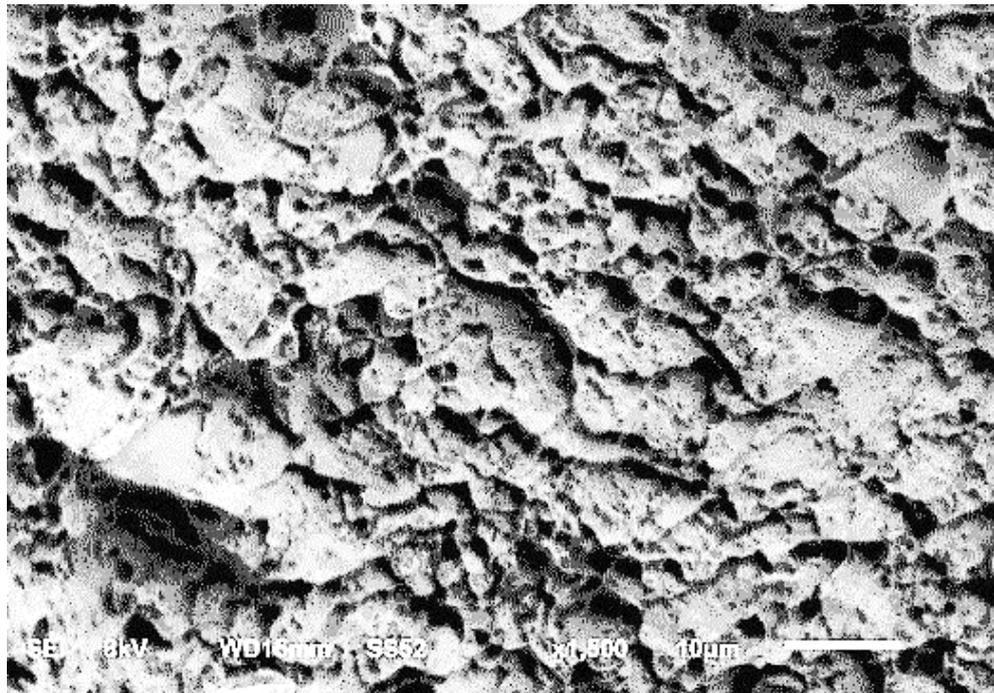
B)



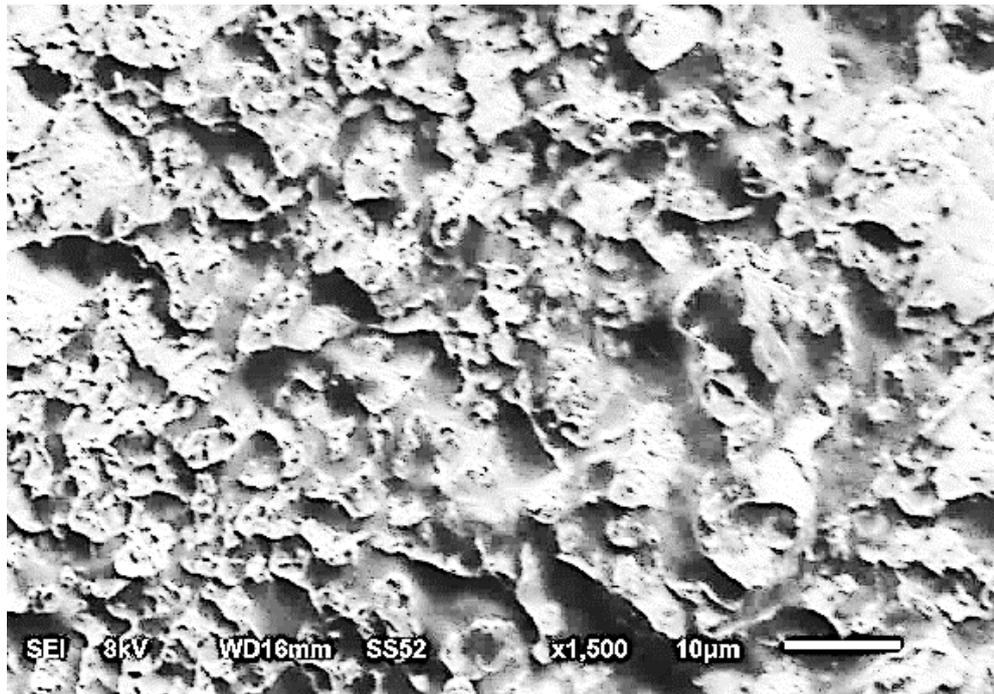
г)



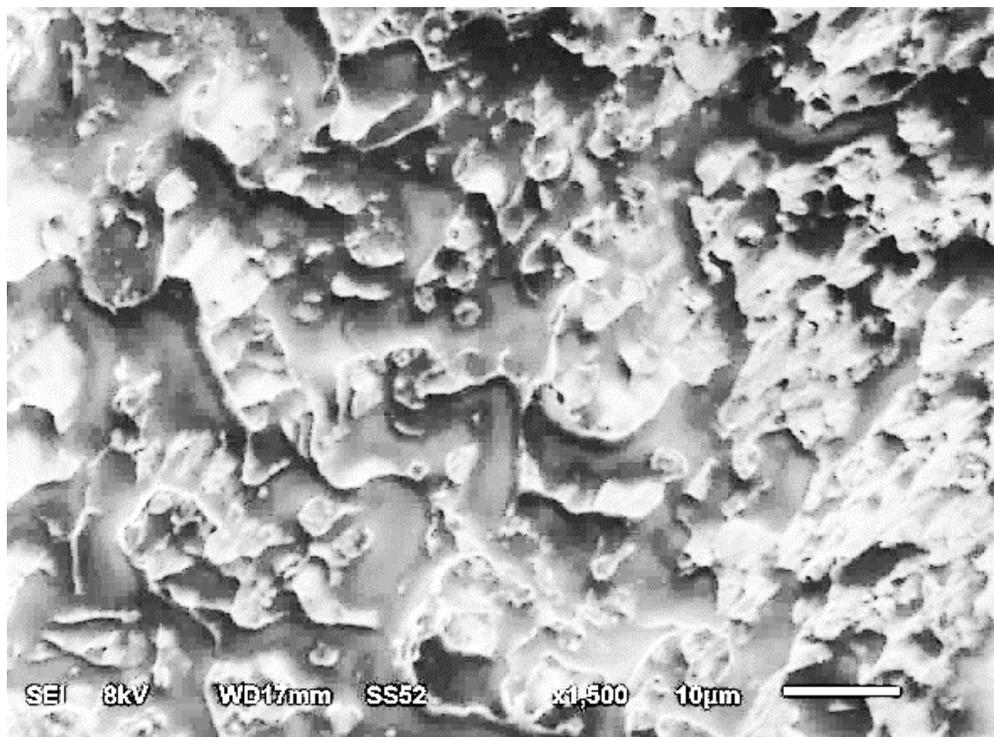
д)



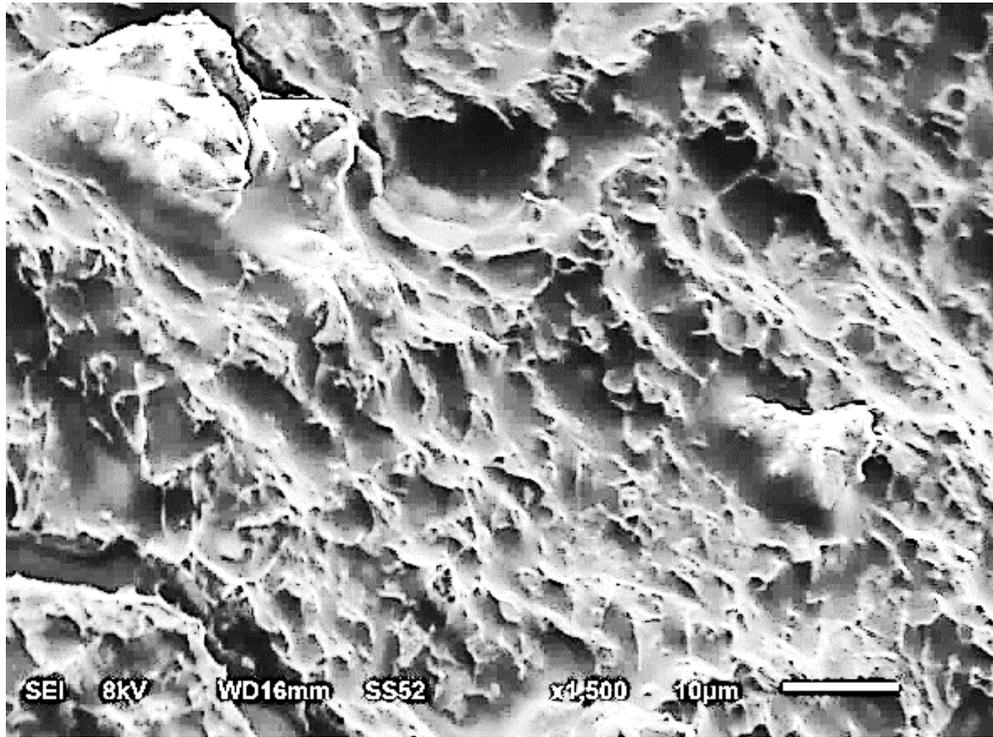
e)



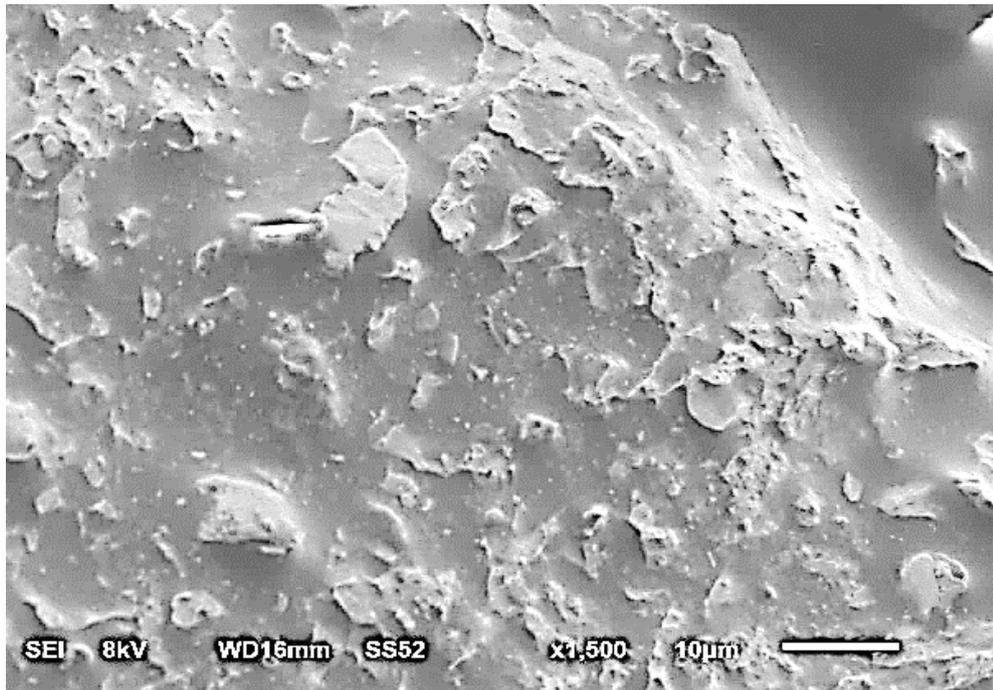
ж)



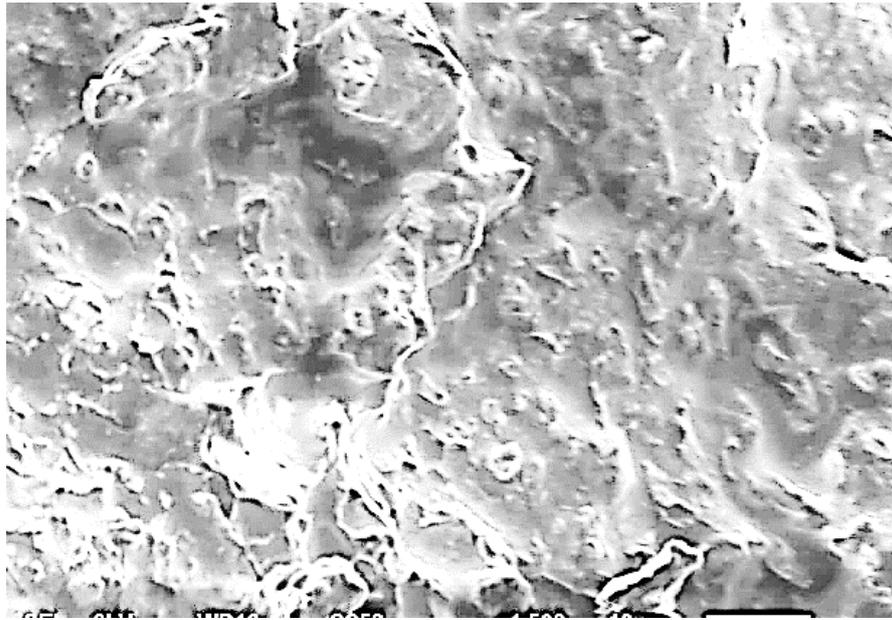
3)



и)



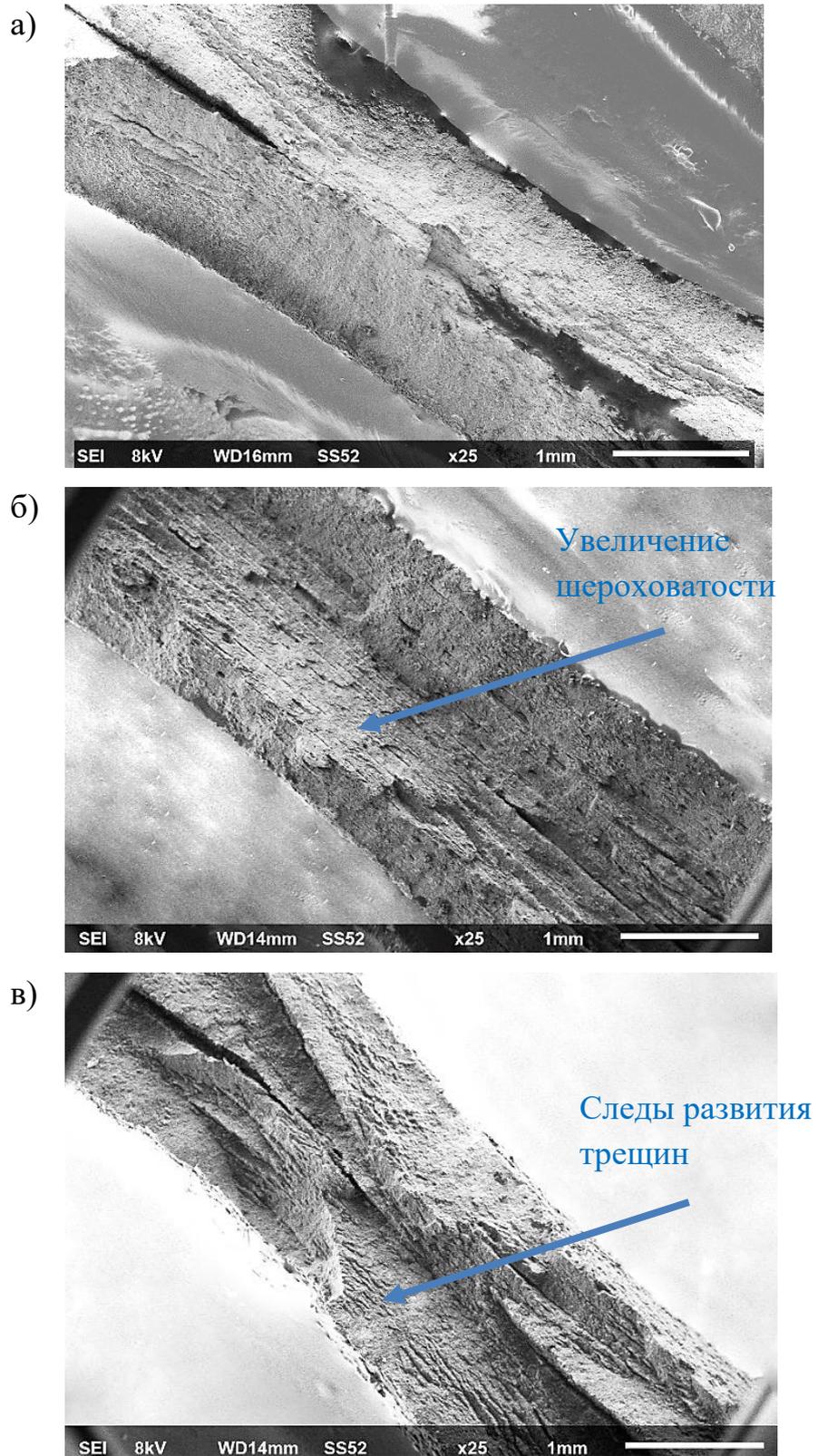
к)



а)  $Ni/Np=0$ , б)  $Ni/Np=0,1$ ; в)  $Ni/Np=0,2$ ; г)  $Ni/Np=0,3$ ; д)  $Ni/Np=0,4$ ;  
 е)  $Ni/Np=0,5$ ; ж)  $Ni/Np=0,6$ ; з)  $Ni/Np=0,7$ ; и) з)  $Ni/Np=0,8$ ; к) з)  $Ni/Np=0,9$   
 Рисунок 4.33 – Влияние уровня накопленных повреждений на микрорельеф  
 поверхности разрушения после испытания на растяжение (x1500)

По Рисунку 4.33 можно констатировать, что с увеличением уровня накопленных усталостных повреждений происходит переход от вязкого к хрупкому механизму разрушения. Так, при  $Ni/Np=0,1$  хорошо видны ямки сдвига в сочетании с отрывом. Также с увеличением уровня деформации наблюдается изменение картины излома. При  $Ni/Np=0,1-0,3$  наблюдается образование ямок нормального отрыва, которые образуются путем слияния микропор, начинают проявляться характерные признаки хрупкого разрушения – фасетки скола. Глубина ямок значительно больше по сравнению с исходным образцом, что свидетельствует на большую пластическую деформацию в отдельных зонах. При уровне накопленных повреждений  $Ni/Np=0,5-0,6$  наблюдается сочетание слияния микропор.

Известно [142], что одним из основных отличий хрупкого разрушения от вязкого является наличие микротрещин. На Рисунке 4.34 представлены изломы исследуемых образцов без воздействия циклических нагрузок и с уровнем накопленных повреждений  $Ni/Np=0,3$  и  $Ni/Np=0,8$ .



а) -  $Ni/N_p=0$ ; б)  $Ni/N_p=0,6$ ; в)  $Ni/N_p=0,8$

Рисунок 4.34 – Микрорельеф поверхности разрушения образцов с различным уровнем накопленных повреждений после статического растяжения

По изображениям изломов видно, что с накоплением повреждений возникает скопление микротрещин. У исходного образца не наблюдаются вторичные трещины, с воздействием же циклических нагрузок зарождаются микротрещины и постепенно локализируются на поверхности. На Рисунке 4.34в отчетливо видна магистральная трещина, развивающаяся с поверхностного слоя.

Фрактографический анализ изломов показал, что поверхности разрушения отличаются. На поверхности излома исходного образца видны глубокие «чашки», что является показателем вязкого чашечного излома. С увеличением уровня накопленных повреждений глубина «чашек» уменьшается. Также отличительной чертой поверхности разрушения образцов с большим количеством циклов нагружения является наличие трещин и фасеток сколов.

#### 4.4 Выводы по главе 4

1 Исследовано влияние МЦУ на зерна перлита. Установлено, что при достижении уровня накопленных повреждений  $Ni/Np=0,3$  происходит уменьшение размера зерна с последующим плавным его увеличением до момента разрушения. В работе [128] выявлено, что при циклическом воздействии на сталь У10 происходит сфероидизация дисперсных цементных пластин перлита и укрупнение (коалесценция) карбидов.

2 Выявлено, что при достижении уровня повреждений  $Ni/Np=0,7$  происходит увеличение разброса показаний объемной доли. Предполагается, что на данном этапе происходят локальные изменения структуры материала с релаксацией напряжений в одних областях и увеличением в других, находящихся на пути развития магистральной трещины.

3 Выполнен анализ изменения среднего размера зерна феррита в продольных и поперечных направлениях от уровня накопленных повреждений. Установлено, что до достижения уровня долговечности  $Ni/Np = 0,7$  происходит плавное уменьшение размеров зерна. В исследованиях Н.А. Махутова [130] данный уровень

$Ni/Np = 0,7$  описывается как граница перехода разрушения материала с микроуровня на макроуровень.

4 Особый интерес вызвали показания отношения размеров зерна в продольном направлении на поперечный (коэффициент вытянутости). Зерна исходного образца имеют вытянутую форму (связано с технологией изготовления листового проката). До достижения  $Ni/Np = 0,3$  вытянутость уменьшается, в период  $Ni/Np = 0,3-0,5$  – увеличивается, с последующим уменьшением, что свидетельствует о внутренних перестройках в структуре стали.

5 Установлено, что количество микропор начинает увеличиваться с уровня накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,3-0,4$ . Интенсивный рост продолжается до достижения уровня повреждений  $Ni/Np = 0,8$ . Возможно, микропоры выступают в качестве механизмов адаптации материала – при прохождении микротрещин через микропоры происходит релаксация внутренних напряжений, а при стабильном распространении усталостной трещины микропоры затупливают вершину трещины, тем самым увеличивая ресурс материала до ямочного разрушения.

6 Проведенный микроструктурный анализ оптическим микроскопом показал, что уровень накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,7$  является критическим, при достижении которого происходит страгивание магистральной трещины. Все последующие изменения в структуре происходят локально, в непосредственной близости от зоны распространения трещины. Для изучения структурных и фазовых изменений при  $Ni/Np = 0,2-0,4$  необходимо выполнить исследования при больших увеличениях.

7 Исследование поверхности разрушения при статическом разрушении образцов с различным уровнем накопленных повреждений показало, что с увеличением циклов нагружения в поверхности разрушения наблюдаются характерные для хрупкого разрушения усталостные бороздки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По характеру изменения параметров АЭ выявлены 2 критических периода накопления усталостных повреждений:  $Ni/Np = 0,2-0,4$  и  $Ni/Np = 0,7-0,8$ , при этом наиболее информативным параметром АЭ является энергия импульсов. Проведенный микроструктурный анализ подтвердил протекание структурных изменений в указанных диапазонах нагружения: происходит ступенчатое увеличение количества микропор, меняется форма зерен феррита, средний размер зерен феррита уменьшается до  $Ni/Np = 0,7$ .

1 Рассмотрены существующие методы НК применяемые для оценки долговечности оборудования, эксплуатируемого в условиях МЦУ. Проведены исследования закономерностей накопления повреждений при квазистатических и циклических нагружениях по характеру изменений поверхностной энергии, скорости ультразвука, отклика электрического сигнала. Установлено, что метод АЭК также является чувствительным к структурным изменениям. При этом наиболее информативными и имеющие обширную статистику результатов являются такие параметры АЭ, как амплитуда сигналов, количества и энергия импульсов.

2 Установлено, что изменение параметров АЭ в области МЦУ имеет нелинейный характер и описывается полиномиальными зависимостями с экстремумами при уровнях накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,2-0,4$ ,  $Ni/Np = 0,5-0,6$  и  $Ni/Np = 0,7-0,8$ . При достижении  $Ni/Np = 0,2-0,4$  и  $Ni/Np = 0,7-0,8$  происходит снижение энергии импульсов, что свидетельствует о накоплении материалом критического уровня энергии и, для последующей релаксации напряжений, происходит смена механизма адаптации материала к внешнему нагружению.

3 Выявлены следующие микроструктурные изменения в стали 09Г2С при МЦУ: средний размер зерен перлита увеличивается на всем протяжении циклического нагружения, средний размер зерен феррита в продольном и поперечном направлениях уменьшается до достижения  $Ni/Np = 0,7$ , при этом

вытянутость зерен меняется нелинейно с экстремумами при  $N_i/N_p = 0,3$ ,  $N_i/N_p = 0,5$ ,  $N_i/N_p = 0,6$ . Также обнаружено, что изменение количества микропор имеет ступенчатый характер, пороговыми значениями являются уровни накопленных повреждений  $N_i/N_p = 0,3-0,4$ ,  $0,8$ .

4 Показана согласованность экстремумов на графиках АЭ с результатами фрактографического анализа. На поверхности излома исходного образца видны глубокие «ямки», что является показателем пластической деформации. С увеличением уровня накопленных повреждений глубина «ямок» уменьшается. У образцов с большим уровнем накопленных повреждений на поверхности излома наблюдаются трещины.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

- 1 Иванова, В.С. Общность природы предела усталости и физического предела текучести [Текст] / В.С. Иванов, В.Ф. Терентьев, В.Г. Пойда // Усталость металлов и сплавов. – М.: Наука, 1971. – С.15-23.
- 2 Башков, О. В. Исследование и идентификация механизмов деформации и разрушения стали 12Х18Н10Т методом акустической эмиссии [Текст] / О. В. Башков, С. В. Панин, Т. И. Башкова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2010. – Т. 1, № 2. – С. 145-154.
- 3 Мерсон, Д.Л. Изучение процессов разрушения поверхностей, деформируемых трением, методом акустической эмиссии [Текст] / Д. Л. Мерсон, В. И. Полуин, Б. А. Чудинов [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 8. – С. 9-14.
- 4 Терентьев, В.Ф. К вопросу о построении полно кривой усталости. Сообщения1-3 [Текст] / В.Ф. Терентьев, М. Биллы // Проблемы прочности. – 1972. – №6. – С. 12-22; 1973. – №2. – С.27-31.
- 5 Шанявский, А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Синергетика в инженерных приложениях: монография / А.А. Шанявский. - Уфа, 2003. – 803 с.
- 6 Махутов, Н.А. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности: учебное пособие [Текст] / под общ. ред. В.В. Клюева. - М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 187 с.
- 7 Наумкин, Е.А. Методология прогнозирования ресурса нефтегазового оборудования, эксплуатируемая в условиях циклического нагружения, на стадии проектирования и эксплуатации [Текст]: дис. ...д-ра техн. наук: 05.02.13 / Наумкин Евгений Анатольевич. – Уфа, 2011. – 250 с.
- 8 Кузеев, М. И. Закономерности накопления повреждений в сварных соединениях оболочек реакторов установок замедленного коксования [Текст]: дис.

... канд. техн. наук: 05.04.09/ Максим Искандерович Кузеев. – Уфа: УГНТУ, 2000. – 100 с.

9 Екобори, Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел [Текст] / Т. Екобори. – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.

10 Klesnil, M. Fatigue of metallic materials / M. Klesnil, P. Lukáš // Materials Science Monographs 7. – New York, NY: Elsevier Scientific Publishers, 1980. – 270 p.

11 Polák, J. Cyclic plasticity and low cycle fatigue of metals / J. Polák. – Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1991. – 315 p.

12 Ewing, J.A. The fracture of metals under repeated alternations of stress / J.A. Ewing, J.C.W. Humfrey // Phil Trans Roy Soc. - 1903. – 241 p.

13 МЫЛЬНИКОВ, В. В. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов [Текст]: монография / В. В. МЫЛЬНИКОВ, О. Б. Кондрашкин, Д. И. Шетулов. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. – 177 с.

14 Griffith, A. A. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character / A. A. Griffith. – 1921. – Vol. 221. – PP. 163-198.

15 Paris, P. A. Critical analysis of crack propagation laws / P. Paris, F. Erdogan // Journal of Basic Engineering. – 1963. – №4. – Vol. 85. – PP. 528-533.

16 Alfredo, S.R., Evolution of fatigue history// Correia Conference: COBEM 2011 - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica At: 24-28 de Outubro de 2011, Natal, Brasil.

17 Susmel, L. A simple and efficient reformulation of the classical Manson-Coffin curve to predict lifetime under multiaxial fatigue loading / L. Susmel, G. Meneghetti, B. Atzori // Part I: Plain materials. Trans ASME J Eng Mater Technol. – 2009. – 131 p.

18 Palmgren, A. Durability of ball bearings / A. Palmgren. ZVDI. – 1924. – Vol.68. – P.339–341.

19 Miner, M.A. Cumulative damage in Fatigue / M.A. Miner. J. Appl. Mech. – 1945. – Vol.12. – P.159–164.

- 20 EN 1993-1-9 Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1–9: Fatigue; Technical Report; European Committee for Standardisation. – Brussels, Belgium, 2005. – 37 p.
- 21 BS 7608:2014 Guide to Fatigue Design and Assessment of Steel Products. Technical Report. The British Standards Institution. – London, UK, 2014. – 150 p.
- 22 DNV. DNVGL-RP-C203. Fatigue Design of Offshore Structures. Technical Report April 2016. – Oslo, Norway, 2016. – 216 p.
- 23 Richart, F.E. An hypothesis for the determination of cumulative damage in fatigue / F.E. Richart, N.M. Newmark // In Civil Engineering Classics; Newmark, N.M. Ed.; ASCE: Reston, VA, USA, 1948. – P. 279–312.
- 24 Marco, S.M. A concept of fatigue damage / S.M. Marco; W.L. Starkey. Trans. ASME. – 1954. – Vol.76. – P. 627–632.
- 25 Hectors, K. Cumulative Damage and Life Prediction Models for High-Cycle Fatigue of Metals: A Review / K. Hectors, W. De Waele // Metals. – 2021. – Vol. 11. 204 p.
- 26 Hunter, M.S. Metallographic aspects of fatigue behavior of aluminum / M.S. Hunter, W.G. Fricke // Proc. ASTM. – 1954. – Vol. 54. – P. 717-736.
- 27 Иванова, В.С. Усталостное разрушение металлов [Текст] / В.С. Иванова. – М.: Metallurg, 1963. – 272 с.
- 28 Слуцкер, А. И. Возникновение зародышевых трещин в нагруженных твердых телах [Текст] / А. И. Слуцкер, В. С. Куксенко, В. И. Бетехтин, В. А. Марихин // Физика твердого тела. – Л.: Наука, 1978. – С. 11-12.
- 29 Терентьев, В.Ф. Усталость металлических материалов [Текст] / В.Ф. Терентьев. – М.: Наука. 2002. – 248 с.
- 30 Орлов, Л.Г. Электронно-микроскопическое исследование дислокационной структуры внутренних и поверхностных слоев деформационных монокристаллов кремнистого железа [Текст] / Л.Г. Орлов, В.И. Большаков // Физика твердого тела. – 1970. – Т.12. – №3. – С. 745-751.
- 31 Gong, B. Cyclic deformation behavior and dislocation structures of [001] copper single crystals—I Cyclic stress-strain response and surface feature / B. Gong, Z. Wang // Acta Mater. – 1997. – Vol. 45. – P. 1365–1377.

32 Glasov, M. Self-organized dislocation structures (SODS) in fatigue metals / M. Glasov, L.M. Llanes, C. Laird // *Phys. Stat. Sol.(a)*. – 1995. – Vol. 149. – 297 p.

33 Wilkinson, A.J. Modeling the threshold conditions for propagation of stage I fatigue cracks / A.J. Wilkinson, S.G. Roberts, H.B. Hirsch // *Acta mater.* – 1998. – Vol.46. – P.379-390.

34 Бородин, Н.А. Проблемы и методы оценки сопротивления металлических материалов многоциклового усталости и длительному статическому разрушению [Текст] / Н.А. Бородин, С.П. Борисов // *Завод. лаб. Диагностика материалов.* – 2002. – Т.68. – №1. – С. 89-94.

35 Гуревич, С.Е. О скорости распространения трещины и пороговых значениях коэффициента интенсивности напряжений в процессе усталостного разрушения [Текст] / С.Е. Гуревич, Л.Д. Едидович // *Усталость и вязкость разрушения металлов.* – М.: Наука, 1974. – С.36 – 78.

36 Березин, И.Я. Прогнозирование надежности конструкций с учетом стадии докритического развития усталостных трещин [Текст] / И.Я. Березин, В.Б. Порошин // *Вестник ЮУрГУ, Серия Математика. Механика. Физика.* – 2012. – Вып. 6. № 11 (270). – С. 42-46.

37 Tanaka, K. Analysis of fatigue crack growth data for various steels with special reference to fracture mechanism and metallurgical structures / K. Tanaka, C. Masuda, S. Mishijima // *Proceeding of “Fatigue 81”, Warwick, England, March, 1981.* Warwick, 1981. – P.450-459.

38 Степаненко, В.А. Стереофрактографическое исследование зоны статического страгивания и динамического скачка усталостной трещины в корпусной стали [Текст] / В.А. Степаненко, А.С. Штукатурова, П.В. Ясний // *Физ. - хим. механика материалов.* – 1983. – Т. 19, №6. – С.71-78.

39 Серенсен, С.В. Прочность при малоцикловом нагружении [Текст] / С.В. Серенсен, Р.М. Шнейдерович, А.П. Гусенков. – М.: Наука, 1975. – 285с.

40 ГОСТ 25.502-79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. –

Введ. 01.01.1981. [Электронный ресурс] URL: [http://vestnik.fa.ru/4\(28\)2003/4.html](http://vestnik.fa.ru/4(28)2003/4.html) (дата обращения: 16.04.2019).

41 Махутов, Н.А. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении [Текст] / Н.А. Махутов, А.З. Воробьев, М.М. Гаденин. – М.: Наука, 1983. – 272с.

42 Соснин, О.В. Электростимулированная малоцикловая усталость [Текст] / О.В. Соснин, В.Е. Громов, Э.В. Козлов. – М.: Недра комм. ЛТД, 2000. – 208с.

43 Стрижало, В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур [Текст] / В.А. Стрижало. – Киев: Наукова думка, 1978. – 241с.

44 Терентьев, В.Ф. Особенности напряжения пластической деформации ОЦК металлов в области микротекучности [Текст] / В.Ф. Терентьев, Л.Г. Орлов, В.Г. Пойда // Проблемы прочности. – 1979. – №9. – С.34-38.

45 Кудрявцев, П.И. О постоянстве напряжений долома при усталостных испытаниях стальных образцов [Текст] / П.И. Кудрявцев, А.И. Бесман, Т.И. Морозова // Зав. лаборатория. – 1970. – №9. – С.1112-1115.

46 Черепанов, Г.П. Рост трещин при циклическом и переменном нагружении: Усталость и вязкость разрушения металлов [Текст] / Г.П. Черепанов, В.Д. Кулиев, Х. Халманов. – М: Наука, 1974. – С. 1-30.

47 Школьник, Л. М. Скорость роста трещин и живучесть металла [Текст] / Л. М. Школьник. – М.: Металлургия, 1973. – С. 34-60.

48 Иванова, В.С. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов [Текст] / В.С. Иванова, Л.К. Гордиенко, В.Н. Геминев. – М.: "Наука", 1965. – 180 с.

49 Прохоров, А.В. Оценка долговечности аппаратов, подверженных действию циклических нагрузок, по изменению акустических и магнитных свойств стали: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 [Текст] / Андрей Владимирович Прохоров. – Уфа: УГНТУ, 2011. – 97 с.

50 Терентьев, В.Ф. Циклическая прочность металлических материалов [Текст] / В.Ф. Терентьев, А.А. Оксогоев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.

- 51 Карпенко, Г.В. Малоцикловая усталость стали в рабочих средах [Текст] / Г.В. Карпенко, К.Б. Кацов, И.В. Кокотайло, В. П. Руденко. – Киев: Наукова думка, 1977 – 110 с.
- 52 Гутман, Э.М. Кинетика изменения микроискажений кристаллической решетки и электрохимического поведения аустенитной стали в процессе малоцикловой коррозионной усталости [Текст] / Э.М. Гутман, И.Г. Абдуллин, Д.Е. Бугай // Защита металлов. – 1982. – Т. XVIII, №4. – С. 535-539.
- 53 Каландия, А. И. Механика деформируемого твердого тела [Текст] / А.И. Каландия, А.И. Лурье, Г.Ф. Манджавидзе [и др.]. – М: Наука, 1972. – 480 с.
- 54 Демченко, А.А. Оценка степени поврежденности конструкционных материалов по изменению деформационного рельефа поверхности стали: дис. ... канд. техн. Наук: 05.16.09 [Текст] / Артем Альбертович Демченко. – Уфа: УГНТУ, 2013. – 90 с.
- 55 Бьючер, Дж. Х. Прочность и вязкость горячекатаных феррито-перлитных сталей [Текст] / Дж. Х. Бьючер, Дж. Грозиер, Дж. Ф. Энриэтто. – В сб.: Разрушение, т. 6. – М.: Металлургия, 1976. – С. 246- 259.
- 56 Miller, D.K. Lessons learned from the Northridge earthquake / D.K. Miller// Eng. Struct. – 1998. – Vol. 20. – P. 249- 260.
- 57 Nakashima, M. Classification of damage to steel buildings observed in the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake / M. Nakashima, K. Inoue, M. Tada // Eng. Struct. – 1998. – Vol. 20. – P. 271-281.
- 58 Yang, L. Low cycle fatigue property and fracture behavior of low yield point steels / L. Yang, Y. Gao, G. Shi, X. Wang, Y. Bai // Constr. Build. Mater. – 2018. – Vol.165. – P. 688-696.
- 59 Milani, A.S. Low-cycle fatigue performance of solid cylindrical steel components subjected to torsion at very large strains / A.S. Milani, M. Dicleli // J. Constr. Steel Res. – 2017. – Vol.129. – P. 12–27.
- 60 Drumond, G. High Cycle Fatigue Damage Evaluation of Steel Pipelines Based on Microhardness Changes During Cyclic Loads / G. Drumond, B. Pinheiro, I. Pasqualino, R. Francine, D. Chicot, X. Decoopman // Proceedings of the ASME 2017

36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. – 2017. – Vol. 10. – P. 1-10.

61 Xiaoping, M. Experimental and theoretical analysis of the correlation between cumulative plastic damage and SMFL of structural steel under low cycle fatigue / Ma Xiaoping, Su Sanqing, Wang Wei, Yang Yiyi // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2021 – Vol. 538. doi:10.1016/j.jmmm.2021.168292.

62 Hasanov, R.N. Development of the algorithm for determination of mechanical properties of steel 20 with different levels of cumulative fatigue damage with the application of compact samples./ R.N. Hasanov, A.S. Valiev, I.R. Kuzeev. // Solid State Phenomena. -2018. Vol. 284, pp 581-586.

63 Hasanov, R.N. Assessment of steel mechanical characteristics of non-standard compact specimens under statistical tests/ R.N. Hasanov, A.S. Valiev, I.R. Kuzeev. // MATAC Web of Conferences 224, 03010. – 2018.

64 Hasanov, R.N. Assessment of mechanical characteristics of steel subject to cyclic loads effect on non-standard compact specimens/ R.N. Hasanov, A.S. Valiev, I.R. Kuzeev. // MATAC Web of Conferences 224, 04025. – 2018

65 Бикбулатов, Т.Р. Оценка остаточного ресурса оборудования и предельного состояния конструкционных материалов при усталостном нагружении по результатам электромагнитных измерений: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 [Текст] / Тимур Ринатович Бикбулатов. – Уфа: УГНТУ, 2011. – 102 с.

66 Рябов, А.А. Совершенствование средств и методологии вихревого контроля для применения в диагностике сосудов [Текст] / А.А. Рябов, А.С. Валиев, В.Ю. Пивоваров, А.П. Терехов // Научно-техническая конференция ПАО АНК «Башнефть» – 2016. – С.17.

67 Валиев, А.С. Определение оптимальной частоты входного сигнала вихревого метода контроля [Текст] / А.С. Валиев // 68-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ: сб. материалов конф.; редкол.: Р.А. Исмаков и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2017. – С. 280.

68 Pivovarov, V.Yu. Influence of alternating current frequency on output voltage at electromagnetic method of metal control / V.Yu. Pivovarov, A.S. Valiev, I.R. Kuzeev. // Trans Tech Publications Ltd. - 2019. Vol. 945, pp 879-884.

69 Прохоров, А.В. Оценка долговечности аппаратов, подверженных действию циклических нагрузок, по изменению акустических и магнитных свойств стали: дис. ... канд. техн. наук 05.02.17 [Текст] / Андрей Владимирович Прохоров. – Уфа: УГНТУ, 2011. – 97 с.

70 Валиев, А.С. Изменение шероховатости стали 09Г2С при эксплуатации в условиях длительного квазистатического нагружения [Текст] / А.С. Валиев, В.Ю. Пивоваров, Ю.С. Ковшова // 67-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ: сб. материалов конф.; редкол.: Р.А. Исмаков и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2016. – С. 261-262.

71 Ковшова, Ю.С. Изменение характеристик материала оборудования при эксплуатации в условиях длительного статического нагружения [Текст] / Ю.С. Ковшова, В.Ю. Пивоваров, А.С. Валиев // Международная научно-практическая конференция «Остаточный ресурс нефтегазового оборудования» №4, УГНТУ. – 2014. – С.113-115

72 Sikorski, W. Acoustic Emission / W. Sikorski. – London, United Kingdom, 2012 – Vol. 410. doi: 10.5772/2070.

73 Семашко, П.А. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении [Текст] / П.А. Семашко, В.И. Шпорт, Б.Н. Марьин. – М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.

74 Mason, W.P. Acoustic Emission - An Update In: Physical Acoustic, Principles and Methods / W. P. Mason, R. N. Thurson // Academic Press. – New York. 1974. – P. 295-360.

75 Kaiser, J. Untersuchung uber das auftreten Gerauschen beim Zugversuch: PhD thesis. / J. Kaiser // Arkiv fur das Eisenhüttenwesen, AREIA. – 1953. – Vol. 24. №1-2. – P. 43–45.

76 Dunegan, H.L. Acoustic emission a new nondestructive testing tool / H.L. Dunegan, D. Harris // Ultrasonic. – 1969 – №3. – P. 160–166.

77 Harris, D.O. Verification of Structural Integrity of Pressure Vessels by Acoustic Emission and Periodic Proof Testing. Report UCRL-72783 / D.O. Harris, H.L. Dunegan. – Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, 1970. – Vol.365. – P.40 – 65.

78 Pollock A. A. Quantitative Evaluation of Acoustic Emission from Plastic Zone Growth. Dunegan / A. A. Pollock // Endeveco Tecnical Report. – 1976. DE – 76. – № 8. – 31 p.

79 Green, A.T. Acoustic verification of structural integrity of Polaris Chambers Society if Plastic Engineers / A.T. Green, C.S. Lockman, R.K. Steele // Atlantic City, N.J., 1964. – Vol.320. – P.36 – 48.

80 Линдереv, М.Л. Идентификация механизмов и кинетики релаксации напряжений при деформации модельных ТРИП/ТВИП сталей методом кластерного анализа акустической эмиссии [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07 / Михаил Леонидович Линдереv. – Тольятти, 2017. – 117 с.

81 Heiple, C.R. Acoustic Emission from Beryllium / C.R. Heiple, R.O. Adams // Proceedings of Third Acoustic Emission Symposium. – Tokyo. – 1976. – Vol.123. – P. 1-10.

82 Singh, P.J. Understanding fatigue crack propagation in AISI 316 (N) weld using Elber's crack closure concept: Experimental results from GCMOD and acoustic emission techniques / PJ Singh, CK Mukhopadhyay, T Jayakumar, SL Mannan, R Baldev // Int. J. Fatigue. – 2007. – P. 2170- 2179.

83 Paris, P.C. A critical analysis of crack propagation laws / PC Paris, F. Erdogan // ASME. – 1963. – P. 20 – 32.

84 Talebzadeh, M. Correlation of crack propagation and acoustic emission rates / M. Talebzadeh, T. Roberts // In: Key engineering materials. Trans Tech Publ. – 2001. – Vol. 204. – P. 341–350.

85 Gong, Z. Measurement and interpretation of fatigue crack growth in 7075 aluminum alloy using acoustic emission monitoring / Z. Gong, D. DuQuesnay, S. McBride // J Test Eval. – 1998. – Vol. 26(6). – P. 67–74.

86 Berkovits, A. Study of fatigue crack characteristics by acoustic emission / A. Berkovits, D. Fang // Eng Fract Mech. – 1995. – P. 401-416.

- 87 Aggelis, D. Acoustic emission for fatigue damage characterization in metal plates / D Aggelis, E Kordatos, T. Matikas // *Mech Res Commun.* – 2011. – P. 106-108.
- 88 Babu, M.N. Study of fatigue crack growth in RAFM steel using acoustic emission technique / MN Babu, C Mukhopadhyay, G Sasikala, SK Albert, A Bhaduri, T Jayakumar // *J Constr Steel Res.* – 2016. – Vol.126. – P.10-16.
- 89 Deschanel, S. Acoustic emission multiplets as early warnings of fatigue failure in metallic materials / Stéphanie Deschanel, W Ben Rhouma, J Weiss // *Sci Rep.* – 2017. – P. 1-10.
- 90 Chai, M. Acoustic emission studies for characterization of fatigue crack growth in 316LN stainless steel and welds / Mengyu Chai // *Appl Acoust.* – 2017. – P. 101-113.
- 91 Yeasin, B. Acoustic emission sensor effect and waveform evolution during fatigue crack growth in thin metallic plate / Bhuiyan Yeasin, Bin Lin, Victor Giurgiutiu // *J Intell Mater Syst Struct.* – 2018. – P. 1275–1284.
- 92 Yeasin, B. Toward identifying crack-length-related resonances in acoustic emission waveforms for structural health monitoring applications / Bhuiyan Yeasin // *Struct Health Monit.* – 2018. – P. 577–585.
- 93 Криштал, М.А. ФММ [Текст] / М.А. Криштал, Д.Л. Мерсон. – 1987. – Т. 63. Вып. 5. – С. 1011.
- 94 Merson, D. Materials science & engineering / D. Merson, A. Vinogradov. – 1997. – A-234. – P. 587.
- 95 Черняева, Е.В. Оценка состояния металлов с использованием метода акустической эмиссии. Перспективы и проблемы [Текст] / Е.В. Черняева, Д.И. Галкин, Д.Л. Мерсон, Г.А. Бигус, Н.А. Быстрова, А.Е. Волков // *Акустические методы. Дефектоскопия.* – 2013. – № 3. – С. 3-14.
- 96 Васильев, Е.В. Кинетические особенности механизмов деформации магниевых сплавов при статическом и циклическом нагружении [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07 / Евгений Викторович Васильев. – Тольятти, 2018. – 125 с.
- 97 Черняева, Е.В. Применение метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля состояния основного металла и сварных соединений

трубопроводов, работающих в условиях малоциклового усталости [Текст] / Е.В. Черняева, Д.И. Галкин, Г.А. Бигус, Д.Л. Мерсон // Сварка и диагностика. – 2010. – № 2. – С. 50- 56.

98 Чернов, Д.В. Исследование закономерностей акустической эмиссии при развитии усталостных трещин в низкоуглеродистых сталях [Текст] / Д. В. Чернов, В. М. Матюнин, В. А. Барат [и др.] // Дефектоскопия. – 2018. – № 9. – С. 21-30. – DOI 10.1134/S0130308218090038.

99 Botvina, L.R. The effect of preliminary cyclic loading on acoustic emission parameters and damage of structural steels / L.R. Botvina, M.R. Tyutin, I.O. Sinev, A.I. Bolotnikov // Procedia Structural Integrity. – 2020. – Vol. 28. – P. 2118-2125. – ISSN 2452-3216. doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.038.

100 Башков, О.В. Акустическая эмиссия при смене механизмов деформации пластичных конструкционных материалов [Текст] / О.В. Башков, Н.А. Семашко // Физическая мезомеханика: Международный журнал. – 2004.7. – № 6. – С. 59-62.

101 Носов, В.В. Оценка прочности и ресурса сварных конструкций на основе микромеханической модели акустической эмиссии при статическом нагружении [Текст] / В.В. Носов, А.Р. Ямилова, Н.А. Зеленский, И.В. Матвиев // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 11. – С. 38–45.

102 Носов, В.В. Влияние неоднородности прочностного состояния на акустическую эмиссию конструкционных материалов [Текст] / В.В. Носов, Г.С. Ельчанинов // Дефектоскопия. – 2011. – № 12. – С 55 – 66.

103 Носов, В.В. Оценка прочности сосудов давления на основе использования явления акустической [Текст] / В.В. Носов, С.В. Номинас, Н.А. Зеленский // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2015. – С. 182 - 190.

104 Носов, В.В. Методика акустико-эмиссионного контроля прочности и прогнозирования остаточного ресурса металлических конструкций [Текст] / В.В. Носов // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 1. – С. 63 - 66.

105 Носов, В.В. Методика акустико-эмиссионной оценки нанохарактеристик прочности конструкционных и машиностроительных материалов объектов [Текст] / В.В. Носов, Е.В. Григорьев // Контроль. Диагностика. – 2019. – №9. – С. 44-57.

106 Системы акустико-эмиссионные Малахит АС-15А [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.all-pribors.ru/opisanie/35170-12-malakhit-as-15a-35889> (дата обращения: 23.10.2019).

107 Описание типа средства измерений. Системы акустико-эмиссионные «Малахит АС-15А» [Электронный ресурс] (дата обращения: 16.04.2019).

108 Практические рекомендации по обработке и анализу данных, зарегистрированных акустико-эмиссионными системами Малахит АС-12А, Малахит АС-14А и Малахит АС-15А при диагностике и контроле промышленного оборудования // Научно-производственная фирма "Диатон". – Москва, 2010. – 34с.

109 ГОСТ Р 52381-2005 Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава [Электронный ресурс]: – Введ. 01.07.2005. – М.: Изд-во стандартов URL: <http://1000gost.ru/Index/2/2957.htm> (дата обращения: 16.04.2019).

110 Коваленко, В.С. Металлографические реактивы [Текст] / В.С. Коваленко // Справочник. – М: Металлургия. – 1970. – 134 с.

111 Axio scope.a1 //Исследовательский цифровой микроскоп для металлографии и материаловедения. [Электронный ресурс]. – URL: <http://nelian.ru/product/axio-scopea1-issledovatel'skij-cifrovoj/>. (дата обращения 20.01.2020).

112 ООО «Тиксомет» // Пошаговое руководство Thixomet PRO. – Санкт-Петербург. – 2016. – С. 10-15.

113 ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения размеров зерна [Электронный ресурс]: – Введ. 01.01.1983 – М.: Изд-во стандартов. – URL: HYPERLINK "url:<http://files.stroyinf.ru/Data>" HYPERLINK "url:<http://files.stroyinf.ru/Data>"<http://files.stroyinf.ru/data2/1/4294823/4294823438.pdf> (дата обращения: 02.05.2020).

114 Валиев, А.С. Оценка степени повреждения образцов из стали 09Г2С, подверженных малоцикловой усталости, акустико-эмиссионным способом контроля [Текст] / А.С. Валиев, И.Р. Кузеев // Нефтегазовое дело. Т. 20. № 3. Уфа: Изд-во Нефтегазовое дело, 2022. С. 142-152.

115 Валиев, А.С. Оценка степени повреждения образцов из стали 09Г2С, подверженных малоцикловой усталости, акустико-эмиссионная диагностика [Текст] / А.С. Валиев // XV Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы и техники. – Уфа: УГНТУ. – 2022. – С.110-113.

116 Валиев, А.С. Оценка степени повреждения образцов из стали 09Г2С, подверженных малоцикловой усталости, акустико-эмиссионным способом контроля [Текст] / А.С. Валиев // 69-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ: сб. материалов конф.; редкол.: Р.А. Исмаков и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ. – 2018. – С. 347

117 ГОСТ 1497-84 Методы испытаний на растяжение. [Электронный ресурс]: – Введ. 01.01.1986. – М.: Изд-во стандартов [URL:http://files.stroyinf.ru/Data/1/3/3898/](http://files.stroyinf.ru/Data/1/3/3898/) (дата обращения: 16.04.2018).

118 Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учебник [Текст] / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. Репринтное воспроизведение издания 1990 г. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 528 с.

119 Valiev, A.S. Damage Assessment of Specimens Made of Steel 09G2S Exposed to Low-Cycle Fatigue with the Help of Acoustic Emission Monitoring Method / A.S. Valiev, G.R. Khalikova, I.R. Kuzeev. // Trans Tech Publications Ltd. - 2019. Vol. 945, pp 964-970

120 Kovshova, Y.S. The process of initiation of potential fracture zones in the material of shell structures under static load / Y.S. Kovshova, I.R. Kuzeev, E.A. Naumkin, I.G. Fattakhov // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562. – 2016. – № 3. – Vol. 11. – P. 1630-1636.

121 Рыбин, В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов [Текст] / В.В. Рыбин. – Москва: Металлургия, 1986. – 224 с.

122 Иванов, В.И. Акустико-эмиссионная диагностика [Текст]: [справочник] / В. И. Иванов, В. А. Барат. – Москва : Спектр, 2017. – 362 с

123 Drumonda, G. High cycle fatigue damage evaluation of steel pipelines based on microhardness changes during cyclic loads / G. Drumonda, F. Roudetb, I. Pasqualinoa, B. Pinheiroa, D. Chicotb, X. Decoopmanb // Congrès Français de Mécanique. – 2017. – P. 1-8.

124 Ye, D. An approach to investigate pre-nucleation fatigue damage of cyclically loaded metals using Vickers microhardness tests / D.Ye, Z. Wang // International journal of fatigue. – 2021. – № 23(1). – P.85-91.

125 Валиев, А.С. Структурные и фазовые изменения в стали 09Г2С в области малоциклового усталости [Текст] / А.С. Валиев, И.Р. Кузеев // Нефтегазовое дело. Т. 20. № 1. Уфа: Изд-во Нефтегазовое дело, 2022. С. 93-102.

126 Целлермаер, В.В. Структурно-фазовые превращения в феррито-перлитной стали при усталости с импульсным токовым воздействием [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07 / Владимир Владимирович Целлермаер. – Новокузнецк, 2004. – 146 с.

127 ГОСТ 8233-56 Сталь. Эталоны микроструктуры. Межгосударственный стандарт [Текст]. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 32 с.

128 Макаров, А.В. Структурные особенности поведения перлита различной морфологии при циклическом растяжении [Текст] / А.В. Макаров, Р.А. Саврай, Т.И. Табатчикова, В.М. Счастливец, Л.Ю. Егорова // Материалы XLVII международной конференции «Актуальные проблемы прочности»: Часть 1. – Нижний Новгород, 2008. – С. 27 – 30.

129 Валиев, А.С. Определение критического уровня накопления усталостных повреждений в стали 09Г2С по характеру изменения параметров акустической эмиссии [Текст] / А.С. Валиев // Сборник материалов всероссийской молодежной научно-практической конференции «Современная механика в цифровую эпоху: проблемы и перспективы». – Оренбург: ОГУ. – 2022. – С.33-40.

130 Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность [Текст] / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005. – 494 с.

131 Назарова, М.Н. Исследование механизмов релаксации внутренних напряжений в стенке резервуара и их влияние на развитие процессов разрушения [Текст]: дис. ... канд. техн. наук.: 05.02.01 / Мария Николаевна Назарова. – Уфа: УГНТУ, 2000. – 100 с.

132 Иванов, В.С., Терентьева В.Ф. Природа усталости металлов [Текст] / В.С. Иванов, В.Ф. Терентьева. – М.: Металлургия, 1975. – 325 с.

133 Ахмарова, Л.Р. Микроструктурные изменения при малоцикловом нагружении [Текст] / Л.Р. Ахмарова, А.С. Валиев // XV Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы и техники. – Уфа: УГНТУ. – 2022. – С.116-117.

134 Gorbachev, L.A. Periods of the fatigue failure process / L.A. Gorbachev, T.A. Lebedev, T.K. Marinets // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 1970. – Vol. 11. – No. 5. – P. 828-831.

135 Вакуленко, И.А. Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформировании [Текст] / И.А. Вакуленко. Днепропетровск: Gaudeamus, 2003. – 94 с.

136 Маркидонов, А.В. Структурные трансформации вакансионной поры при радиационном облучении материала [Текст] / А.В. Маркидонов, М.Д. Старостенков, А.В. Яшин // Научная электронная библиотека. – Барнаул. – 2013. – С.12-20.

137 Власов, В.М. Влияние дефектов, возникающих в процессе наплавки, на механические характеристики металла [Текст] / В.М. Власов // Журнал современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 1 – С. 9-11.

138 Mahajan, S. Origins of micropipes in SiC crystals / S. Mahajan // Appl. Phys. Lett. – 2002. – Vol. 80. – Iss. 23. – P. 4321-4323.

139 Ma, X. A method to determine superscrew dislocation structure in silicon carbide / X. Ma // Mater. Sci. Engineer. B. – 2006. – Vol. 129. – Iss. 13. – P. 216 – 221.

140 Количественный фазовый и структурный анализ сталей. [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.gubkin.ru/faculty/mechanical\\_engineering/chairs\\_and](https://www.gubkin.ru/faculty/mechanical_engineering/chairs_and)

departments/welding\_and\_oilfield\_facility\_monitoring/Lab\_Rab/Efimenko/EL1.docx/  
(дата обращения 29.09.2019).

141 Ахмарова, Л.Р. Исследование микроструктуры торцевой поверхности образцов плоского типа из стали 09Г2С, подверженных малоцикловой усталости [Текст] / Л.Р. Ахмарова, А.С. Валиев // 73-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа: УГНТУ. – 2022. – С.343.

142 Феллоуз, Дж. Фрактография и атлас фрактограмм / Дж. Феллоуз // Справочник. – Пер. с англ. Шур Е.А.; под ред. Бернштейна М.Л. – М.: Metallurgia, 1982. – 489 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А****Справка о внедрении результатов исследования****ООО «ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА»**

Адрес: 450006, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Ленина, д. 99, этаж 1; 2  
Телефон: (347) 289-97-62, 289-97-63. Факс: (347) 289-97-64.  
E-mail: [techdiag@mail.ru](mailto:techdiag@mail.ru). Сайт: [www.techdiag.ru](http://www.techdiag.ru)  
ИНН 0278161402. КПП 027801001. ОГРН 1090280026814.

Исх. № 2/Э-2023/01-7 от 07.05.2023 г.  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

По месту требования

**СПРАВКА**

Результаты исследований, полученные при личном участии аспирантов Уфимского государственного нефтяного технического университета Пивоварова Валерия Юрьевича и Валиева Айбулата Салаватовича, направленные на определение уровня накопленных повреждений конструкционных сталей за счёт комплексного анализа амплитудно-частотных характеристик выходного электрического сигнала при вихретоковом методе контроля и параметров акустической эмиссии при внедрении твёрдосплавного индентора в материал оборудования, используются независимой экспертной организацией ООО «Техническая диагностика» в качестве дополнительного метода контроля за состоянием технологического оборудования в процессе технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности на объектах АО «Роснефть», АО «Башкирская содовая компания», ООО «КИНЕФ».

Заместитель директора по научной работе

ООО «Техническая диагностика»



К.В.Петров

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Справка о применении результатов исследования в учебном процессе

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (ФГБОУ ВО "УГНТУ")ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450064. Тел.: (347) 242-03-70, факс: (347) 243-14-19, <http://www.rusoil.net>, E-mail: [info@rusoil.net](mailto:info@rusoil.net)  
ИНН 0277006179, ОГРН 1020203079016, ОКПО 02069450, КПП 027701001

18.01.2022 № 054-228/14

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## СПРАВКА

Результаты исследований, лежащие в основе метода оценки предельного состояния конструкционной стали 09Г2С при малоцикловом нагружении по параметрам акустической эмиссии, полученные при личном участии ассистента кафедры «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета Валиева Айбулата Салаватовича, используются при чтении лекций по дисциплине бакалаврской подготовки по направлению 15.03.02 Технологические машины и оборудование «Оборудование и методы для проведения испытания материалов».

Проректор по учебной работе,  
профессор

И.Г. Ибрагимов

Гафарова В.А.  
Тел.: 8 (964) 954-51-31