

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»

(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа 2023

Работа выполнена на кафедре «Технологические машины и оборудование» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Кузеев Искандер Рустемович**

Официальные оппоненты: **Барат Вера Александровна**  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» / кафедра «Диагностические информационные технологии», профессор

**Носов Виктор Владимирович**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» / кафедра «Метрологии, приборостроения и управления качеством», профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» (г. Оренбург)

Защита диссертации состоится «24» ноября 2023 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.428.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



О.Р. Латыпов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **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 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, 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. Помимо периода предразрушения, в работах М.И. Кузеева и Е.А. Наумкина 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 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.

Следует отметить, что наряду с большим количеством работ по исследованию процесса усталостного разрушения по характеру изменений физических и механических свойств материала, 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, А.П. Науменко, 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 области нагружения  $N_i/N_p = 0,3-0,4$  остаются изученными фрагментарно.

### **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 зеренной структуры материала.

### **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 изменений микроструктуры стали 09Г2С, происходящих при малоциклового 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 малоциклового 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 нагружения 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  $Ni/Np = 0,3$ , средний размер зерен перлита увеличивается на всем протяжении циклического нагружения. Средний размер зерен феррита в продольном и поперечном направлениях уменьшается вплоть до достижения  $Ni/Np = 0,7$ , при этом их соотношение (вытянутость зерен) меняется нелинейно с экстремумами при  $Ni/Np = 0,3$ ,  $Ni/Np = 0,5$ ,  $Ni/Np = 0,6$ , что свидетельствует об изменении микроструктуры.

### **Теоретическая значимость**

Полученные результаты расширяют представления о полиэкстремальном характере накопления повреждений в низколегированной стали при реализации циклического нагружения в малоцикловой 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 в процессе изучения дисциплины «Оборудование и методы проведения испытания материалов» при подготовке 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 зеренной 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 «Пром-Инжиниринг» (Москва, 2018), Международной научно-технической конференции "Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Севастополь, 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).

### **Соответствие паспорта заявленной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 2.6.17. – «Материаловедение» (отрасль науки – технические, химические), 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).

### **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 16 научных работах, в том числе 2 в ведущих рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России.

### **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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и основные задачи, обозначены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

**В первой главе** представлен обзор научных работ, посвященных изучению природы усталостного разрушения.

Зарождение и развитие усталостных трещин в оборудовании топливно-энергетического комплекса могут привести к возникновению аварийных ситуаций, развитие которых, как правило, приводят к катастрофическим последствиям. Своевременное обнаружение развивающихся усталостных трещин является приоритетным направлением исследований. Несмотря на накопление большого теоретического и экспериментального опыта в изучении закономерностей зарождения и развития трещин в конструкционных материалах, в настоящее время нет единого воззрения на механизмы реализации этого процесса. Все зависимости, описывающие рассматриваемые процессы, такие как уравнения Пэриса, Коффина-Мэнсона, Лэнджера, суммирования повреждений Пальмгрена-Майнера и другие, носят



эмпирический характер и используются в рамках различных расчетно-экспериментальных схем. Исследования В.С. Ивановой, В.Е. Панина, А.А. Шанявского и многих других исследователей показывают, что процессы разрушения генерируются и реализуются на различных масштабных уровнях: нано-, микро-, мезо- и макро. Использование ресурсов каждого из масштабных уровней организации конструкционного материала для рассеивания энергии деформации, рассматриваются как механизмы адаптации к внешним нагрузкам. Критические условия перехода реализации адаптационных механизмов с одного масштабного уровня на другой связаны со структурными изменениями, и они могут служить диагностическими признаками реализующихся этапов процесса разрушения. Как правило, структурные изменения сопровождаются акустическими эффектами, которые можно обнаруживать неразрушающими методами с развитой для этих целей приборной базой. Параллельное изучение структурных изменений в конструкционных материалах и сопровождающих их акустических сигналов позволяет разработать алгоритм обнаружения и отслеживания развития процессов разрушения.

В данной главе также рассмотрены основные принципы акустического метода неразрушающего контроля (НК). Сделан вывод, что такие параметры АЭ, как амплитуда сигнала, количество импульсов и энергия импульсов являются наиболее информативными с точки зрения выявления усталостных дефектов.

**Вторая глава** посвящена обоснованию выбора материала, описанию известных и оригинальных экспериментальных методов исследования микроструктуры низколегированной стали и параметров АЭ при МЦУ.

В качестве объекта исследований выбрана низколегированная сталь 09Г2С, которая широко применяется в качестве материала для изготовления трубопроводов, оболочковых конструкций в нефтегазовой отрасли. Для проведения усталостных испытаний были изготовлены 50 плоских образцов с плавными концентраторами из одного листового проката толщиной 4 мм (общий вид образца представлен на Рисунке 1). Исследования малоциклового усталости методом АЭ выполнены в 3 этапа. В качестве прибора для регистрации параметров АЭ использовалась акустико-эмиссионная система «МАЛАХИТ АС-15А».

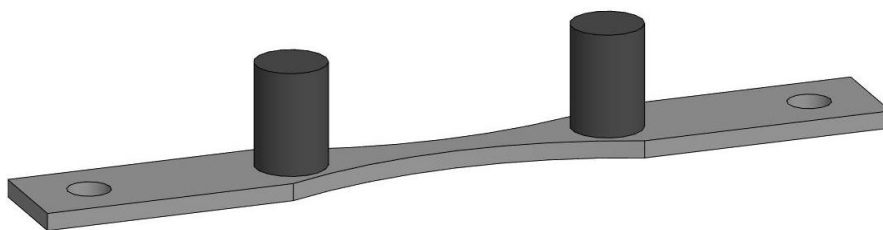


Рисунок 1 – Общий вид исследуемого образца с установленными преобразователями АЭ

На первом этапе проводились испытания на чистый симметричный изгиб на стенде для усталостных испытаний. Величина изгиба образца подобрана для обеспечения не менее 2000 циклов нагружения при испытаниях на усталость. Регистрация параметров АЭ выполнялась при первых трех циклах и через каждые 230 циклов (10 % от общего ресурса).

На втором этапе были выполнены испытания на статическое растяжение образцов с различным уровнем усталостных повреждений на разрывной машине ИР5113. С целью генерации усталостных дефектов образцы предварительно подвергались циклическому нагружению от 0 до 2070 циклов с шагом в 230 циклов. Далее проводились испытания на статическое растяжение с одновременной регистрацией параметров АЭ. Для корректного разделения этапов накопления повреждений при растяжении была выбрана минимальная скорость нагружения 0,3 мм/мин. Данные исследования позволяют оценить влияние усталостных повреждений на механические свойства стали и параметры АЭ, провести корреляцию полученных результатов, а также определить достижение критического состояния образцов при растяжении.

На третьем этапе проводилось исследование АЭ при внедрении индентора на твердомере Роквелла Wilson Hardness 574Т. Совместное применение акустико-эмиссионного метода и индентирования позволяет использовать данный подход в качестве метода НК состояния материала оборудования, подверженного МЦУ. Для измерения параметров АЭ после каждых 230 циклов нагружения образцы снимались с установки для чистого симметричного изгиба с последующим внедрением твердосплавного сферического индентора в течение 30 секунд с параллельной регистрацией сигналов АЭ.

Для анализа микроструктуры образцов на различных этапах усталостного нагружения использовался оптический микроскоп Axio Scope A1. Влияния уровня накопленных повреждений на характер излома проанализирован при исследовании поверхности разрушения на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6610LV.

В третьей главе изложены результаты исследования изменения параметров АЭ при МЦУ. Зависимости суммарного количества сигналов и энергии импульсов АЭ, полученные на первом этапе исследований, представлены на Рисунке 2.

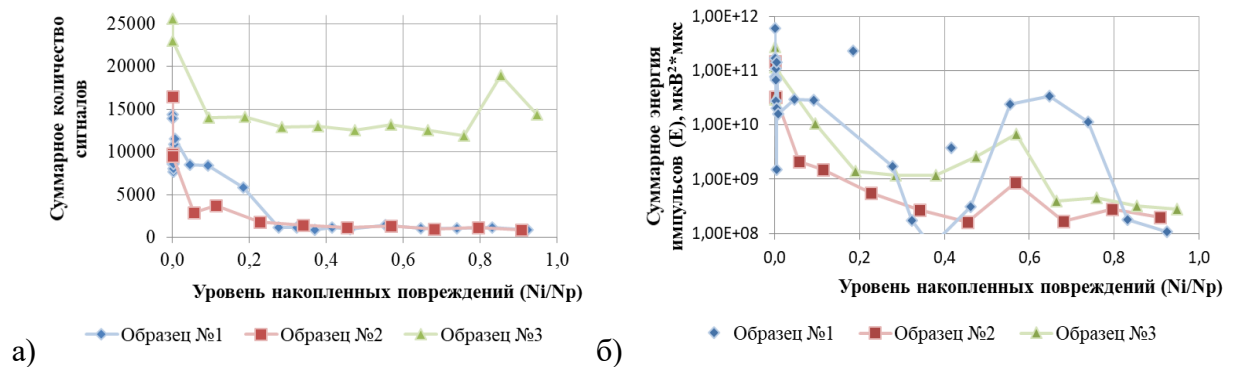


Рисунок 2 – Зависимости суммарного количества сигналов АЭ (а) и суммарной энергии импульсов АЭ (б) от уровня накопленных повреждений

По Рисунку 2(а) видно, что количество зарегистрированных сигналов для образца №3 больше, 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 образцов характерно уменьшение количества сигналов до уровня накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,25-0,4$ , при этом наиболее резкий спад сигналов происходит в первых циклах нагружения, что характерно для реализующегося эффекта Кайзера.

Суммарная энергия импульсов АЭ также снижается на начальном этапе циклического нагружения, однако, после уровня повреждений  $Ni/Np = 0,25-0,4$  происходит увеличение энергии сигналов при стабильном их количестве, что свидетельствует об изменении механизма адаптации материала к приложенным нагрузкам. Возникает генерация дефектов с большей энергией. В работе В.С. Ивановой изменение механизма адаптации обусловлено переходом накопления повреждения с микроуровня на мезо- и макроуровни.

На втором этапе проводились исследования параметров АЭ при статическом растяжении образцов с различным уровнем накопленных повреждений.

Для оценки влияния уровня накопленных повреждений на механические свойства исследуемых стальных образцов были получены зависимости предела прочности материала и работы разрушения от степени накопления усталостных повреждений, которые представлены на Рисунке 3.

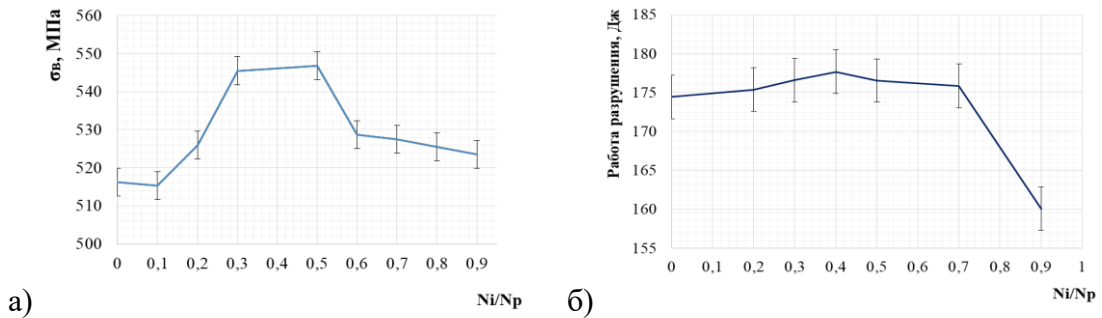


Рисунок 3 – Зависимость предела прочности (а) и работы разрушения (б) от уровня накопленных повреждений

Эксперименты показали (Рисунок 3), что после циклического нагружения, максимальные значения предела прочности металла наблюдаются при  $Ni/Np = 0,5$ . Это явление обусловлено тем, что на интервале нагружения  $Ni/Np = 0,1-0,5$  происходит упрочнение металла, в связи с увеличением плотности дислокаций, как это показано в работах М.И. Кузеева, А.Е. Прохорова.

Изменения параметров АЭ при статическом растяжении с наложением диаграммы растяжения для образцов с различным уровнем накопленных повреждений представлены на Рисунках 4 и 5.

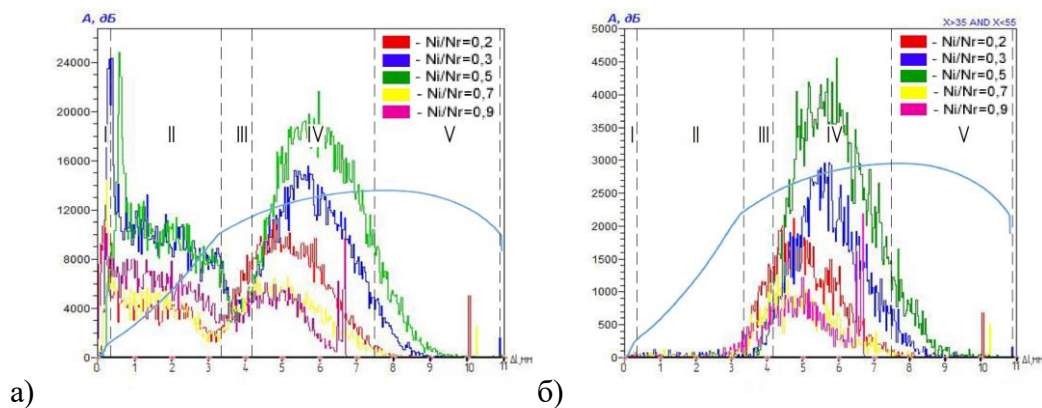


Рисунок 4 – Изменение амплитуды импульсов (А, дБ) при растяжении для образцов с различным уровнем повреждений на всем объеме (а) и в зоне концентратора (б)

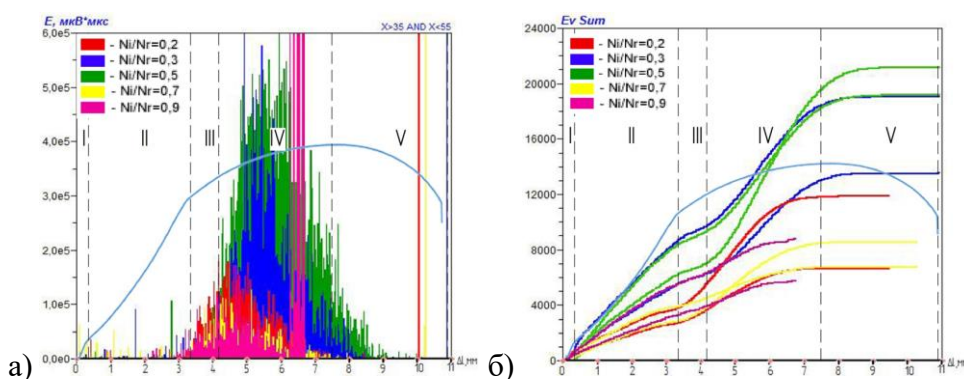


Рисунок 5 – Изменения энергии импульса (а) и числа сигналов (б) при растяжении для образцов с различным уровнем повреждений

Из представленных зависимостей можно выделить пять характерных участков.

Первый участок ( $\Delta l = 0 \dots 0,3$  мм) соответствует чисто упругой деформации. На данном интервале нагружения наблюдается отсутствие импульсов АЭ.

Второй участок ( $\Delta l = 0,3 \dots 3,5$  мм) соответствует микропластической деформации на макроупругом участке кривой растяжения. На этом интервале наблюдается минимальная амплитуда сигнала (Рисунок 4), а также всплески сигнала с небольшой энергией, связанные с дислокационными сдвигами и двойникованием, описание которых представлены в работах Н.А. Семашко и О.В. Башкова.

Третий участок ( $\Delta l = 3,5 \dots 4,5$  мм) соответствует стадии предтекучести, которая 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, что подтверждается результатами работ В.В. Рыбина, который выявил повышение плотности дислокаций в данном участке 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. Результаты находятся в согласии с результатами исследований В.И. Иванова. По полученным данным построены зависимости изменения суммарного значения параметров АЭ от уровня накопленных повреждений (Рисунок 6).

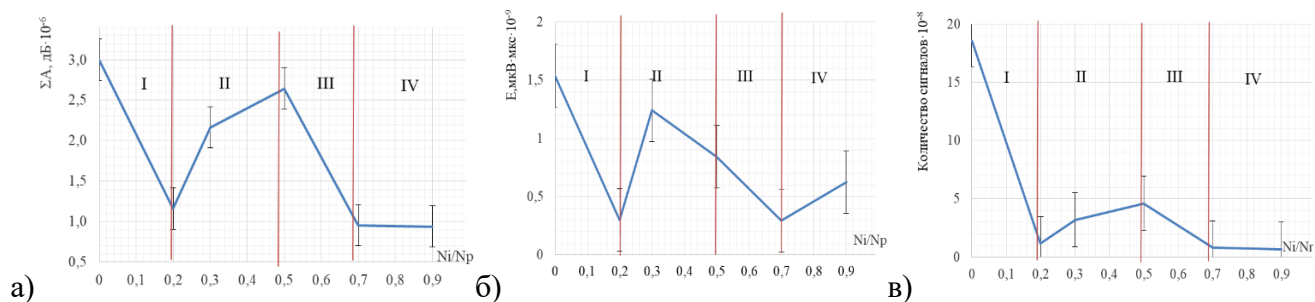


Рисунок 6 – Зависимости суммарных значений амплитуды импульсов (а), энергии импульса (б) и числа сигналов (в) от уровня накопленных повреждений

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

- циклическая микротечучесть, характеризующаяся резким спадом значений параметров АЭ. Данное явление связано с началом процесса адаптации структуры материала к нагрузкам, который описан в работах В.И. Иванова и В.А. Барат;

- зарождение и развитие микротрещин. В промежутке  $Ni/Np = 0,2-0,5$  происходит постепенное увеличение параметров АЭ, что связано с активным накоплением дефектов в виде дислокаций, а также началом активности таких источников АЭ, как микротрещины;

- развитие микротрещин до размеров макротрещин, сопровождающееся снижением активности АЭ всех типов источников;

- стадия долома с излучением сигналов АЭ всех типов, включая сигналы АЭ характерные для продвижения макротрещин.

Результаты изменения параметров АЭ симбатны с результатами изменения механических свойств образцов. Экстремумы в зависимости суммарной энергии АЭ в областях накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,2$ ,  $Ni/Np = 0,7$  свидетельствуют о смене механизма адаптации в рассматриваемых областях нагружения.

Известно, что при внедрении индентора в металл происходит генерация акустических сигналов. На 3 этапе исследовано влияние усталостных повреждений на характер сигналов АЭ при индентировании. На Рисунке 7 представлены зависимости суммарных значений параметров АЭ, полученные в процессе

индентирования, от уровня накопленных повреждений. Наиболее информативным параметром АЭ является энергия импульсов.

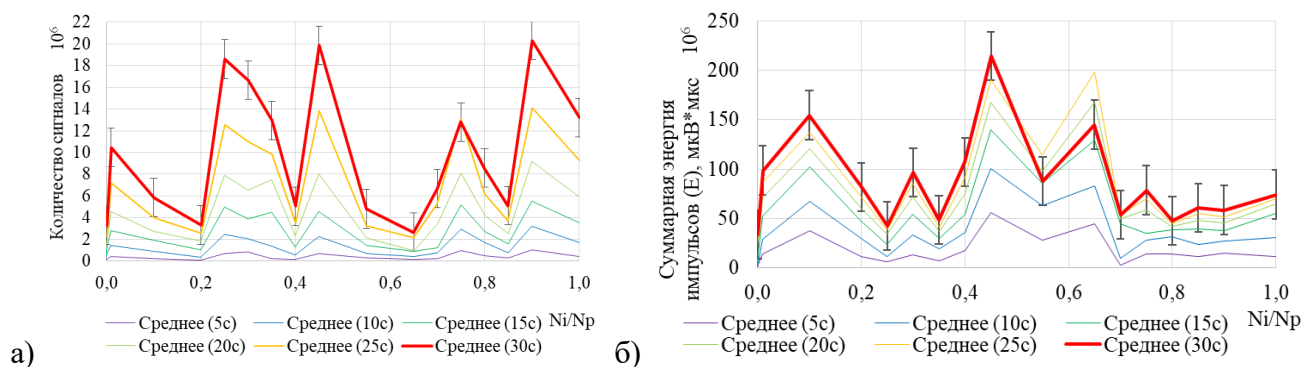


Рисунок 7 – Зависимости суммарных значений количества сигналов (а) и энергии сигнала (б) АЭ в различных моментах времени от уровня накопленных повреждений

По диаграммам можно идентифицировать четыре стадии накопления повреждений. 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 микротрещин. Далее происходит рост и объединение микротрещин до трещины критической длины (стадия 3). Четвертая стадия связана с нестабильным ростом магистральной трещины, с характерными для этой стадии сигналами АЭ.

Полученные зависимости энергии импульсов АЭ от уровня накопленных повреждений согласовываются с результатами исследований, полученными В.С. Ивановой, В.Ф. Терентьевым, О.В. Башковым. При совместном использовании методов индентирования и АЭЖ также можно прогнозировать момент наступления предельного состояния материала, при котором происходит его разрушение.

**В четвертой главе** проведены микроструктурные исследования образцов из низколегированной стали 09Г2С, подверженных испытаниям в области малоциклового усталости. В исследованиях под руководством В.Е. Громова выявлены структурные изменения в перлите стали 60ГС2 при усталостных испытаниях, в связи с чем особый интерес вызвало изучение изменений перлита стали 09Г2С при МЦУ.

В процессе усталостных испытаний отслеживался 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 8 представлена микроструктура исходного образца с выделенными зернами перлита.

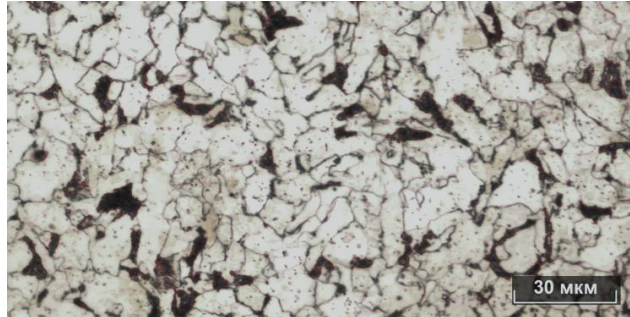


Рисунок 8 – Микроструктура в середине исходного образца с выделенными зернами перлита, x50

Зависимости параметров микроструктуры с графиком изменения суммарной энергии АЭ от уровня накопленных повреждений представлены на Рисунке 9.

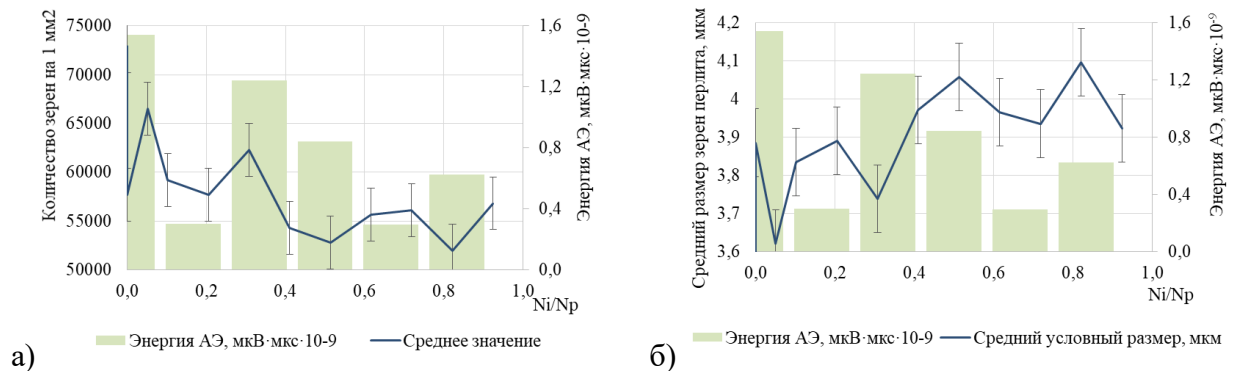


Рисунок 9 – Зависимости количества зерен перлита на единицу поверхности (а) и среднего размера зерна (б) от уровня накопленных повреждений с наложением графика изменения суммарной энергии АЭ при МЦУ

Полученная тенденция роста среднего размера зерна перлита со скачкообразным изменением в области  $Ni/Np = 0,3$  свидетельствует о внутренних структурных изменениях в перлите. Предполагается, что высокий размах напряжений при МЦУ приводит к перегреву в локальных областях, что вызывает частичное разрушение пластин цементита с образованием глобулярного перлита. Известно, что сфероидизация протекает активней в перлите с меньшим размером зерна. При этом стоит отметить, что разрушение мелких зерен перлита может привести к растворению пластин цементита. Растворение мелких зерен при стабильном количестве крупных приводит к увеличению среднего размера зерна перлита.



Также проанализирована зависимость объемной доли перлита от уровня накопленных повреждений (Рисунок 10). Установлено, что объемное содержание перлита возрастает с увеличением количества циклов нагружения, при достижении уровня  $Ni/Np = 0,7$  происходит увеличение разброса показаний.

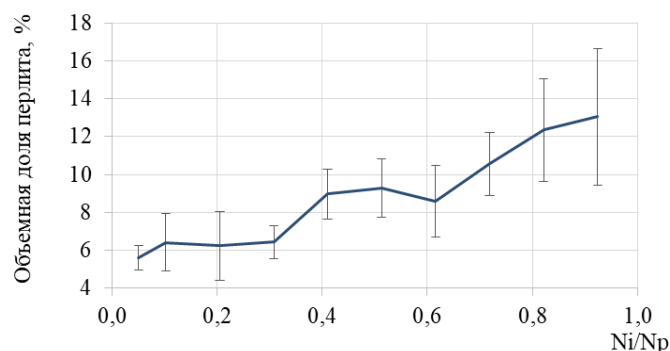


Рисунок 10 – Зависимость объемной доли перлита от уровня накопленных повреждений

В исследованиях Н.А. Махутова 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 в участках, находящихся непосредственно на пути развития магистральной трещины. В связи с отличием структур в смежных участках увеличивается разброс показаний объемной доли перлита.

Также был проведен анализ влияния усталостных нагрузок на ферритную фазу. На Рисунке 11 представлены снимки микроструктуры в середине образцов с различным уровнем накопленных повреждений.

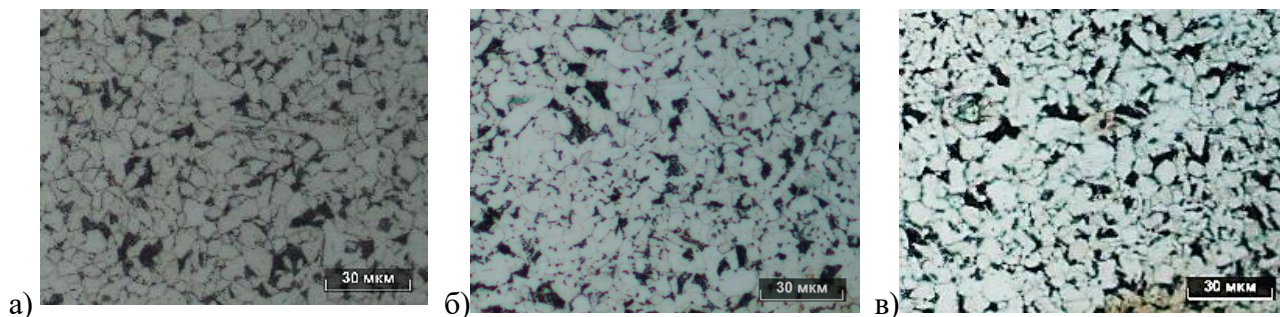


Рисунок 11 – Микроструктура образцов при уровне накопленных повреждений  $Ni/Np = 0$  (а),  $Ni/Np = 0,3$  (б) и  $Ni/Np = 0,7$  (в),  $\times 50$

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. Измерение среднего размера зерен феррита проводилось в соответствии с ГОСТ 5639-82. 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 12 и 13). Вытянутость зерна рассчитывалась как отношение среднего размера зерна в продольном направлении на средний размер зерна в поперечном направлении.

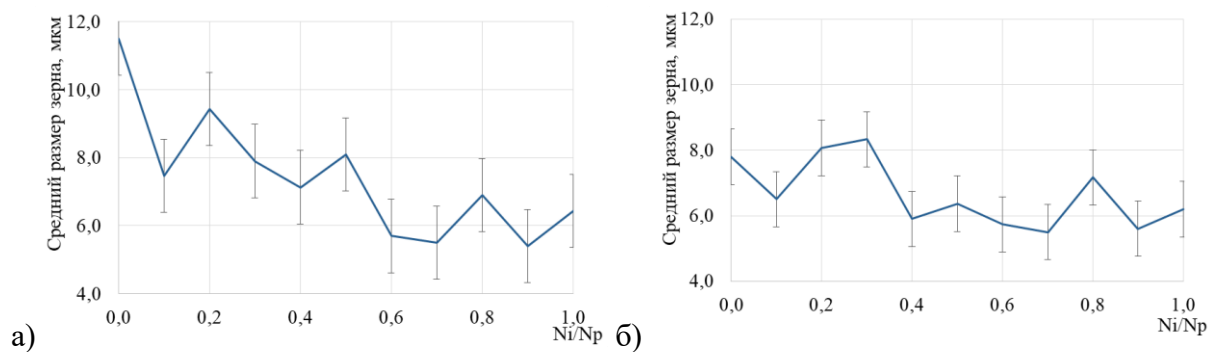


Рисунок 12 – Зависимость среднего размера зерна феррита в продольном (а) и поперечном (б) направлениях от уровня накопленных повреждений

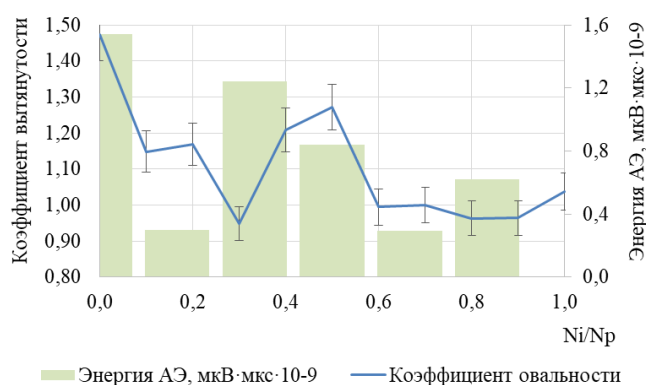


Рисунок 13 – Зависимость вытянутости зерна феррита от уровня накопленных повреждений с наложением графика изменения суммарной энергии АЭ при МЦУ

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. Вероятно, повышение вытянутости зерен после  $Ni/Np = 0,3$  свидетельствует о накоплении критического уровня энергии в данной области с последующим ее высвобождением (смена механизма адаптации материала к внешнему нагружению).

Для подтверждения влияния усталостных повреждений на структуру образцов при статическом растяжении выполнен анализ металлографической структуры образцов (Рисунок 14) с последующим построением зависимости среднего размера зерен феррита от уровня накопленных повреждений (Рисунок 15).

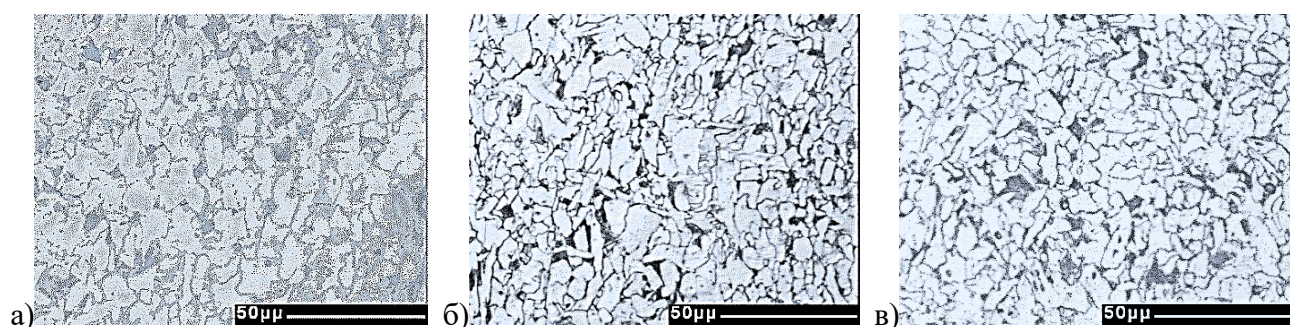


Рисунок 14 – Микроструктура образца с различным уровнем накопленных повреждений:  $Ni/Np = 0$  (а),  $Ni/Np = 0,2$  (б) и  $Ni/Np = 0,7$  (в) после разрушения при статическом растяжении,  $\times 50$

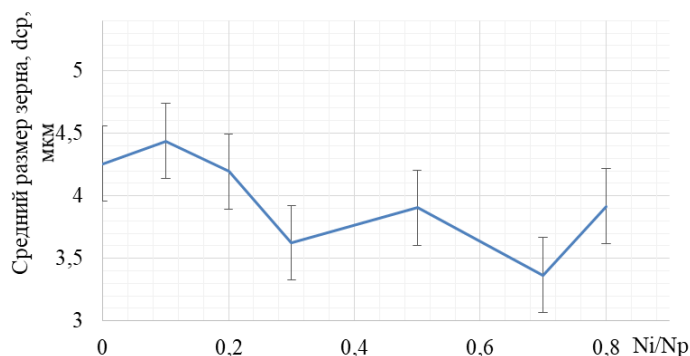


Рисунок 15 – Зависимость среднего размера зерен феррита от уровня накопленных повреждений после статического растяжения

Из полученной зависимости можно сделать вывод, что размер зерен феррита в интервале  $Ni/Np = 0-0,65$  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. При достижении уровня накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,7$

уменьшение размера зерна прекращается, и превалирующим становится процесс порообразования с последующим формированием трещин на различных масштабных уровнях. Этот вывод подтверждается результатами анализа влияния МЦУ на образование микропор. Характерная зависимость представлена на Рисунке 16 и отличается она ступенчатым характером и наличием пороговых значений, которые проявляются при достижении  $Ni/Np = 0,3-0,4$  и  $Ni/Np = 0,7$ .

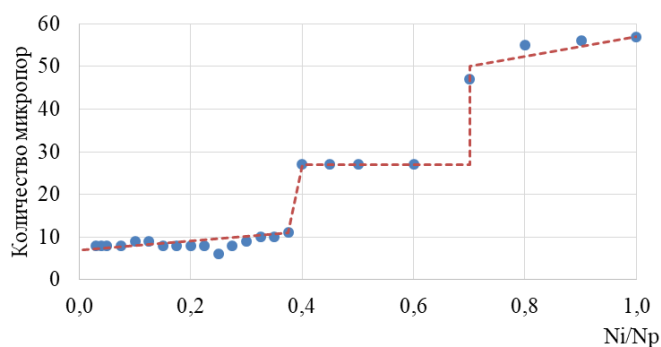


Рисунок 16 – Зависимость количества микропор от уровня накопленных повреждений

Микроструктурный анализ показал, что уровень накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,7$  действительно 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 изменений в интервале  $Ni/Np = 0,2-0,4$  были изготовлены микрошлифы из центральной части образцов. Микроструктурный анализ (измерение среднего размера зерен феррита, количества микропор) боковой поверхности проводился в 3 зонах: 1 – верхняя; 2 – средняя, 3 – нижняя. Область исследования представлена на Рисунке 17. Снимки микроструктуры образцов представлены на Рисунке 18.

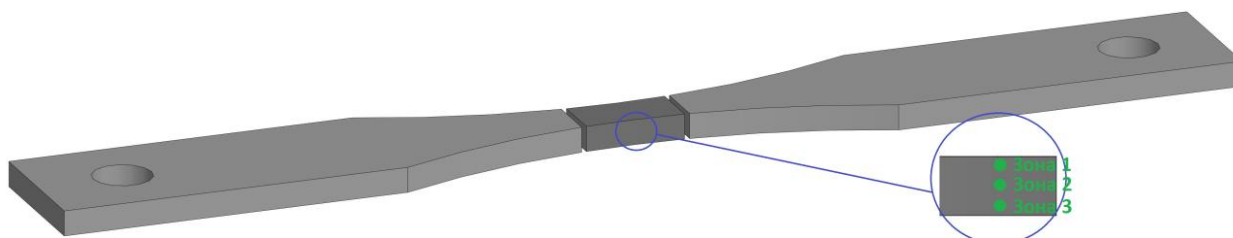


Рисунок 17 – Область исследования боковой поверхности образца

Анализ результатов указал на уменьшение среднего размера зерен феррита, что коррелирует с ранее полученными результатами микроструктурного анализа. Также выявлено, что наибольшая интенсивность уменьшения размеров зерен наблюдается в зоне 3 (нижний участок).

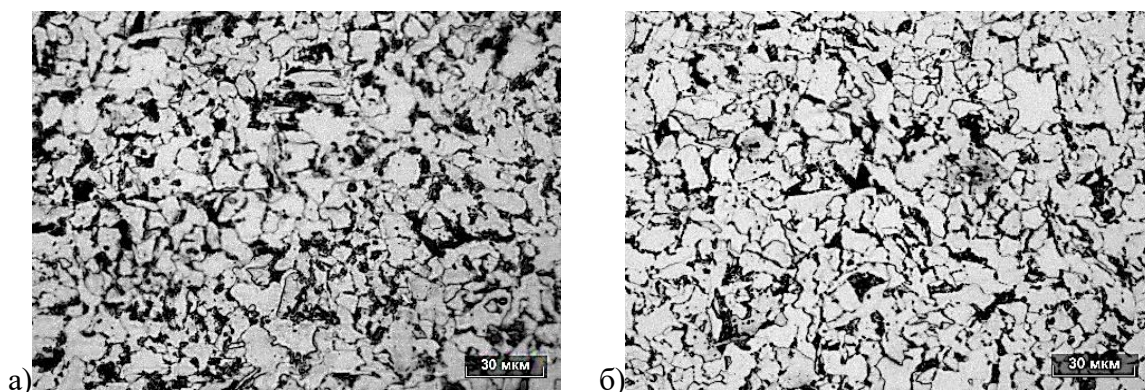


Рисунок 18 – Снимки микроструктуры исходного образца (а) и с уровнем накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,3$  (б) в зоне 3,  $\times 50$

На следующем этапе проводился анализ изменения количества микропор от уровня накопленных повреждений. В качестве параметров анализа были выбраны количество микропор и их размер (площадь). На Рисунке 19 представлены диаграммы распределения микропор. Полученные результаты подтвердили тезис о том, что с накоплением усталостных деформаций происходит увеличение количества микропор.

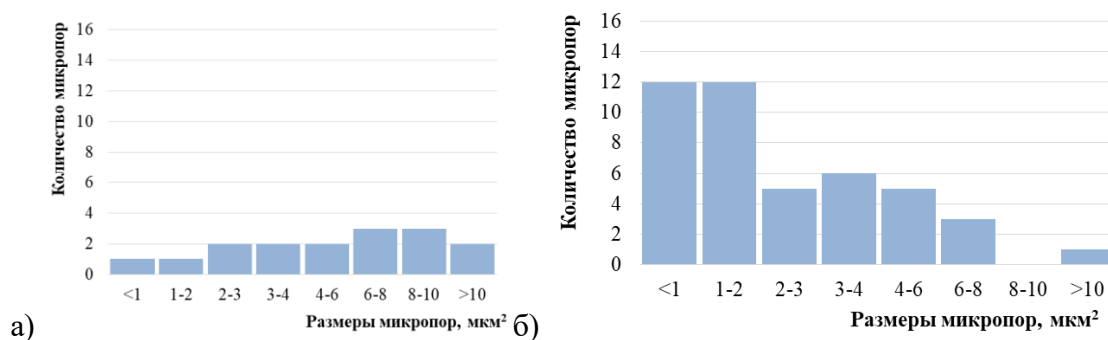


Рисунок 19 – Диаграммы распределения микропор по размерам исходного образца (а) и с уровнем накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,3$  (б)

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

Известно, что хрупкое разрушение характеризуется наличием большого количества микротрещин. На Рисунке 20 представлены изломы исследуемых образцов без воздействия циклических нагрузок и с уровнем накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,8$  после статического растяжения.

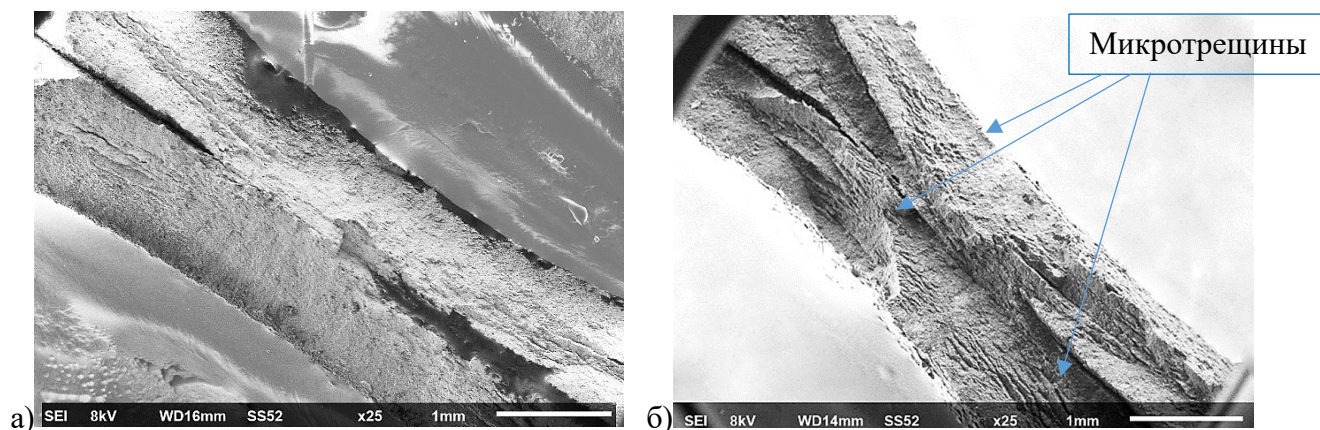


Рисунок 20 – Микрорельеф поверхности разрушения исходного образца (а) и с уровнем накопленных повреждений  $Ni/Np = 0,8$  (б) после статического растяжения

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. Также отличительной чертой поверхности разрушения образцов с большим количеством циклов нагружения является наличие трещин и фасеток сколов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По характеру изменения параметров АЭ выявлены два 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, количество 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  $N_i/N_p = 0,2-0,4$ ,  $N_i/N_p = 0,5-0,6$  и  $N_i/N_p = 0,7-0,8$ . При достижении  $N_i/N_p = 0,2-0,4$  и  $N_i/N_p = 0,7-0,8$  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  $N_i/N_p = 0,7$ , 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.

**Основные положения диссертации опубликованы в 16 научных изданиях, наиболее значимые из которых:**

**- в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:**

1 Валиев, А.С. Структурные и фазовые изменения в стали 09Г2С в области малоциклового усталости / А.С. Валиев, И.Р. Кузеев // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т.20, №1. – С.93-102.

2 Валиев, А.С., Оценка степени повреждения образцов из стали 09Г2С, подверженных малоциклового усталости, акустико-эмиссионным способом контроля / А.С. Валиев, И.Р. Кузеев // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т.20, №3. – С.142-152.

**- в рецензируемых научных изданиях, включенных в международную базу данных SCOPUS:**

1 Valiev, A. Damage Assessment of Specimens Made of Steel 09G2S Exposed to Low-Cycle Fatigue with the Help of Acoustic Emission Monitoring Method / A. Valiev, G. Khalikova, I. Kuzeev // Trans Tech Publications. Switzerland, 2020. – Vol. 992. – P. 964–970.

2 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. – P. 581-586.

**- публикации в прочих изданиях:**

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

2 Валиев, А.С. Оценка степени повреждения образцов из стали 09Г2С, подверженных малоциклового усталости, акустико-эмиссионным способом контроля / А.С. Валиев // Материалы 69-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа: УГНТУ, 2018. – С. 347.

3 Валиев, А.С. Оценка степени повреждения образцов из стали 09Г2С, подверженных малоциклового усталости, акустико-эмиссионным методом / А.С. Валиев // Материалы XV Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы и техники». – Уфа: УГНТУ, 2022. – С.110.

4 Ахмарова, Л.Р. Исследование микроструктуры торцевой поверхности образцов плоского типа из стали 09Г2С, подверженных малоциклового усталости / Л.Р. Ахмарова, А.С. Валиев // Материалы 73-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа: УГНТУ, 2022. – С.343.