

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Янченко Максим Иванович

**Исследование структурных изменений и особенностей  
разрушения конструкционных материалов  
в процессе малоциклового усталости**

Направление подготовки

22.04.01 - «Материаловедение и технологии материалов»

АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2025



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет»

Научный руководитель

кандидат технических наук,  
доцент кафедры МТНМ

Башкова Татьяна Викторовна

Рецензент

кандидат технических наук,  
Жилин Сергей Геннадьевич

Защита состоится «18» июня 2025 года в 09 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 202/2.

Автореферат разослан \_\_\_\_ июня 2025 г.

Секретарь ГЭК

Бурдасова Александра Александровна

## **Целью и задачи исследования**

Цель работы заключается в комплексном изучении закономерностей развития усталостных повреждений и трещинообразования в мартенситно-старееющей коррозионнотойстойкой стали 15-5 РН при малоцикловых нагрузках, а также определение влияния структуры и технологических факторов на усталостную долговечность материала.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие **основные задачи исследования:**

1. Провести аналитический обзор современных представлений об усталостных процессах конструкционных материалов, особенностях малоциклового усталости и принципах механики разрушения.

2. Выполнить патентный анализ существующих методов повышения усталостной прочности конструкционных материалов.

3. Провести выбор и обоснование исследуемого материала, разработать методику подготовки образцов и режим термической обработки.

4. Организовать и выполнить экспериментальные усталостные испытания на специализированном оборудовании с регистрацией динамических параметров в процессе усталостного разрушения.

5. Проанализировать морфологию усталостных трещин с использованием оптической металлографии.

6. Выполнить статистическую обработку результатов и провести корреляционный анализ между параметрами усталостных повреждений и условиями нагружения.

7. Обобщить полученные результаты и сформулировать рекомендации по повышению долговечности исследуемых материалов при циклическом нагружении.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются процессы разрушения конструкционных материалов при малоцикловом нагружении. Предметом исследования является сталь 15-5 РН.

**Методы исследования.** Аналитический обзор литературных и патентных источников; экспериментальные усталостные испытания на установке резонансного типа с электромагнитным возбуждением; регистрация частоты собственных колебаний образцов в процессе циклического нагружения; металлографический анализ поверхностей разрушения с применением оптического микроскопа Nikon MA200; статистическая обработка экспериментальных данных; корреляционный анализ взаимосвязей между частотными характеристиками колебаний, размерами усталостных трещин и условиями нагружения.

**Новизна полученных результатов:**

Получены новые экспериментальные данные о поведении мартенситно-старяющей коррозионностойкой стали 15-5 РН при малоцикловом нагружении;

Установлены закономерности накопления усталостных повреждений и развития трещин в исследуемом материале;

Выявлено влияние структуры, режимов термической обработки и технологической подготовки образцов на усталостную долговечность стали;

Определены количественные зависимости между параметрами колебаний и стадиями развития усталостных дефектов;

Выявлены корреляционные связи между снижением частоты колебаний и размерами усталостных трещин;

**Достоверность и обоснованность результатов исследования.**

Достоверность полученных и представленных в диссертации результатов подтверждается использованием современных независимых, взаимодополняющих методов исследования, большим объемом непротиворечивых экспериментальных данных, согласованность с данными теоретических исследований. Анализ экспериментальных данных проведен с соблюдением критериев достоверности измерений.

### **Практическая значимость и ценность работы.**

Практическая значимость и ценность работы заключаются в возможности применения полученных результатов для повышения надежности и долговечности конструктивных элементов, работающих в условиях малоциклового нагружения. Установленные зависимости между микроструктурными характеристиками, параметрами нагружения и развитием усталостных повреждений позволяют оптимизировать режимы термической обработки мартенситно-старящей стали 15-5 РН с целью повышения её усталостной стойкости. Разработанные методики диагностики на основе контроля колебаний и корреляционного анализа обеспечивают возможность раннего выявления и оценки накопления усталостных дефектов без разрушения изделия, что особенно важно для ответственных узлов в авиационной, энергетической, химической и машиностроительной отраслях. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, производстве, диагностике и техническом обслуживании оборудования, эксплуатируемого в условиях переменных нагрузок.

### **Личный вклад автора.**

Представленные в работе результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Анализ литературных источников, проведение экспериментальных исследований, а также обработка и анализ результатов экспериментов выполнены лично автором. Постановка задач исследований и обсуждение результатов проведено при непосредственном участии автора совместно с научным руководителем.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты работы:

1 Экспериментально установленные закономерности накопления усталостных повреждений и развития трещин в мартенситно-старееющей коррозионностойкой стали 15-5 РН при малоцикловом нагружении;

2 Выявленное влияние структуры материала, режимов термической обработки и технологической подготовки образцов на его усталостную долговечность;

3 Количественные зависимости между параметрами колебаний и стадиями развития усталостных дефектов;

4 Корреляционные связи между снижением частоты колебаний и размерами усталостных трещин, позволяющие использовать их в системах неразрушающего контроля;

5 Методические подходы к диагностике усталостного состояния конструкционных материалов на основе совмещенного анализа зафиксированных колебаний и металлографических исследований.

### **Структура и объём магистерской диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников. Общий объём работы составляет 82 страницы, включая 12 рисунков, 4 таблицы, список используемых источников, состоящий из 109 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлено обоснования актуальности темы диссертационной работы, изложены основные направления проведённых исследований, сформулированы цель и задачи исследований.

**В первом разделе** представлен обзор литературных данных, посвящённый особенностям современного состояния проблемы усталостного разрушения конструкционных материалов.

**Во втором разделе** описаны материалы и методы, используемые в исследовании.

**В третьем разделе** приводятся экспериментальные данные и обсуждение результатов исследования.

Объектом исследования являлись образцы из мартенситно-старееющей коррозионностойкой стали 15-5 РН (1.4540), применяемой в ответственных узлах, работающих в условиях высоких переменных нагрузок.

В исследуемых образцах обеспечивалось формирование заданной структуры за счет проведения термической обработки, включающей закалку при температуре 1038 °С с выдержкой в течение одного часа, последующее охлаждение на воздухе и старение при температуре 620 °С в течение четырёх часов. Проведение термической обработки строго контролировалось для обеспечения стабильной мартенситной структуры с равномерным распределением выделений меди и интерметаллидных фаз..

Химического состав исследуемых заготовок приведен в таблице 1, он соответствует нормативным требованиям к мартенситно-старееющей стали 15-5 РН.

Таблица 1 – Химический состав стали 15-5 РН

Элемент	Содержание, % (массовая доля)
C	0,04
Si	0,85
Mn	0,65
P	0,012
S	0,008
Cr	15,2
Ni	4,4
Cu	3,2
Nb + Ta	0,30
Fe	-

После подготовки материала осуществлялось изготовление рабочих образцов для усталостных испытаний. Конструкция образцов обеспечивала равномерное распределение напряжений в рабочей зоне (рисунок 1). Геометрические размеры и чистота поверхности соответствовали требованиям ГОСТ 25.502-79, отклонения от номинальных размеров не превышали 0,02 мм. Для минимизации влияния поверхностных дефектов

применялись операции полировки и шлифования до шероховатости поверхности не хуже Ra 0,32 мкм.

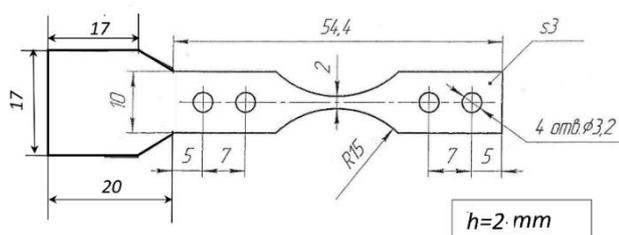


Рисунок 1 - Размеры образца, используемого при усталостных испытаниях

Усталостные испытания проводились на установке резонансного типа с электромагнитным возбуждением (рисунок 2), обеспечивающей синусоидальное нагружение образцов в диапазоне частот 40–50 Гц. В рамках программы испытаний образцы подвергались циклическому изгибному нагружению с различными уровнями амплитудных напряжений — от 500 до 700 МПа, что позволило смоделировать эксплуатационные условия работы конструктивных элементов в реальных нагрузках.



Рисунок 2 – Установка резонансного типа

В процессе нагружения одновременно проводился непрерывный акустико-эмиссионный контроль с использованием многоканальной системы A-Line 32D (рисунок 3). Акустико-эмиссионные датчики устанавливались непосредственно на образцы с применением контактной среды для

обеспечения точного приема сигналов микротрещинообразования и развития дефектов.



Рисунок 3 – Акустико-эмиссионный комплекс

С самого начала испытаний фиксировались низкоамплитудные сигналы, отражающие процессы зарождения микродефектов в поверхностных слоях материала. По мере увеличения числа циклов происходил постепенный рост интенсивности сигналов. Характерный резкий скачок амплитуды наблюдался на стадии активного распространения усталостной трещины. Заключительная стадия сопровождалась лавинообразным ростом амплитуды и частоты событий вплоть до полного разрушения образца (рисунок 4).

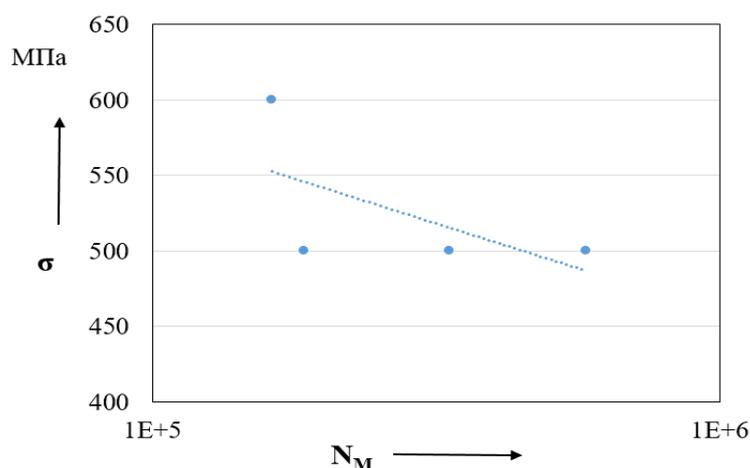


Рисунок 4 – Зависимость числа циклов до начала снижения частоты колебаний от напряжения

Параллельно с регистрацией сигналов колебаний фиксировались изменения динамических характеристик образцов — частоты собственных колебаний. С развитием усталостных трещин наблюдалось стабильное снижение собственной частоты колебаний, обусловленное снижением общей жесткости образца. Проведенный корреляционный анализ (рисунок 5) показал высокую степень связи между снижением частоты и увеличением длины трещины.

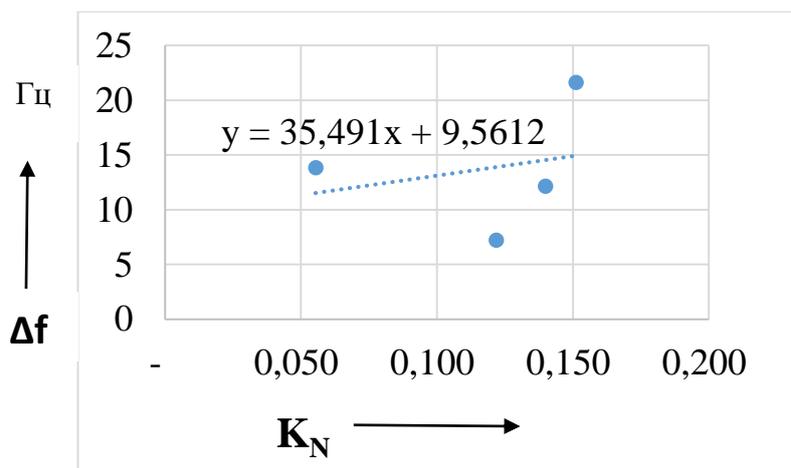


Рисунок 5 – Зависимость величины разброса значений от роста разницы

После завершения усталостных испытаний каждый образец подвергался металлографическому исследованию на оптическом микроскопе Nikon MA200 при увеличении до 1500 крат. В процессе анализа поверхности разрушения последовательно изучались зона инициирования трещины, стабильного её роста и зона конечного разрушения.

В зоне зарождения усталостной трещины выявлены мелкие дефекты структуры: карбидные включения и отдельные микропоры, являющиеся концентраторами напряжений. Зона стабильного распространения характеризовалась формированием типичных полос усталости, демонстрирующих равномерный послойный характер роста дефектов при каждом цикле нагружения. В зоне конечного разрушения наблюдалась кристаллическая структура излома с выраженными фасетками, характерными для мартенситной стали, подвергшейся хрупкому разрушению.

При анализе влияния уровня циклического напряжения было установлено, что повышение амплитуды напряжения приводит к резкому сокращению числа циклов до разрушения. При наибольших уровнях напряжений стадия стабильного роста трещины резко укорачивалась, и образец разрушался в значительно более короткий срок. Полученные данные (рисунок б) демонстрируют экспоненциальный характер зависимости долговечности от амплитуды напряжения.

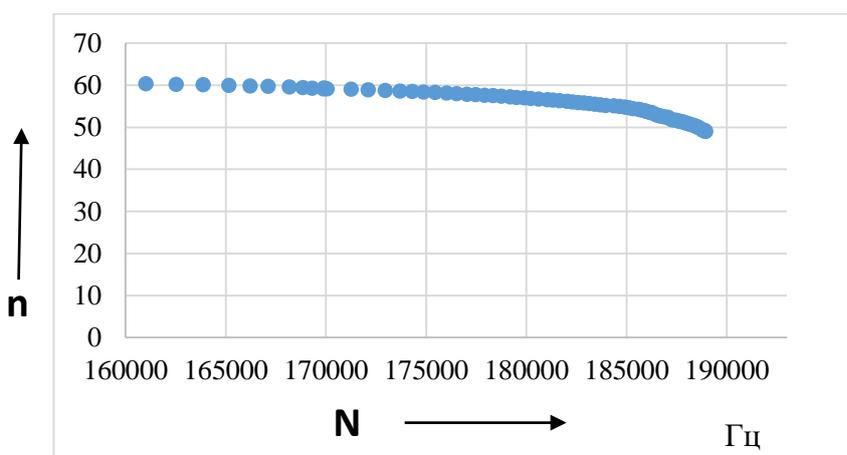


Рисунок б – Результаты регистрации частоты автоколебаний

Результаты статистической обработки показали наличие разброса в числе циклов до разрушения при одинаковых параметрах нагружения.

Обобщение результатов экспериментов позволило сформулировать ряд практических рекомендаций по повышению усталостной долговечности изделий из мартенситно-старееющей стали 15-5 РН. В первую очередь рекомендуется строгий контроль режима термической обработки, обеспечивающего однородность структуры и исключаящего развитие остаточных напряжений. Особое внимание предлагается уделять регулярному контролю состояния изделий в процессе эксплуатации методами, основанными на анализе частотных характеристик, которые продемонстрировали высокую чувствительность к ранним стадиям накопления усталостных повреждений.

## Заключение

В рамках выполненной работы проведено комплексное экспериментальное исследование закономерностей усталостного разрушения мартенситно-старееющей коррозионностойкой стали 15-5 РН при малоцикловом нагружении. Исследование включало в себя проведение усталостных испытаний образцов в контролируемых условиях, регистрацию параметров собственных колебаний в процессе нагружения, металлографический анализ поверхностей разрушения, а также статистическую и корреляционную обработку полученных данных.

Установлены особенности развития усталостных повреждений на различных стадиях нагружения: от формирования начальных микродефектов и зарождения усталостных трещин до их стабильного распространения и последующего перехода к быстрому хрупкому разрушению. Характер разрушения исследуемого материала определяется стадийностью накопления повреждений, изменением морфологии трещин и динамикой активности колебаний.

Проведенный мониторинг позволил выделить характерные этапы развития усталостных повреждений и показал высокую эффективность данного метода для оперативной диагностики процессов усталостного разрушения. Выявлена устойчивая корреляция между снижением частоты собственных колебаний образцов и размерами усталостных трещин, что открывает возможность применения диагностических методов для оценки остаточного ресурса изделий.

**О Т З Ы В**  
**на магистерскую диссертацию**

студента федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

\_\_\_\_\_  
Янченко Максим Иванович

(Ф.И.О.)

по направлению 22.04.01 - «Материаловедение и технологии материалов»

Тема магистерской диссертации Исследование структурных изменений и особенностей разрушения конструкционных материалов в процессе малоциклового усталости

Объем работы:

количество листов пояснительной записки 62

количество листов чертежей 0

Заключение о степени соответствия, выполненной работы заданию

Магистерская диссертация соответствует сформулированному заданию

Проявленная диссертантом самостоятельность при выполнении работы. Ритмичность и дисциплинированность в работе. Умение пользоваться литературным материалом, индивидуальные особенности диссертанта

Работа выполнялась самостоятельно в соответствии с задачами, сформулированными научным руководителем. Все этапы исследования были выполнены в установленные сроки, с соблюдением требований к полноте и качеству выполнения. Диссертант продемонстрировал умение работать с научной и патентной литературой, эффективно используя её при подготовке аналитического и патентного обзоров. Обладает устойчивыми и системными знаниями в области материаловедения, владеет необходимыми теоретическими основами и практическими навыками, соответствующими уровню магистерской подготовки.

Положительные стороны работы

Выполнен комплексный анализ закономерностей накопления усталостных повреждений в мартенситно-стареющей коррозионностойкой стали 15-5 РН при различных уровнях циклического нагружения. Проведено исследование динамических параметров акустико-эмиссионных сигналов и частот собственных колебаний, на основе которых предложен метод оценки стадии

развития усталостных трещин. Представленные результаты обладают высокой практической значимостью для диагностики состояния конструктивных элементов на ранних этапах разрушения.

Недостатки работы

В работе не приведена расчётная модель распределения напряжений и деформаций в образцах с трещиной при малоцикловом нагружении, что ограничивает возможность численной интерпретации результатов акустико-эмиссионного контроля.

Характеристика общетехнической и специальной подготовки диссертанта

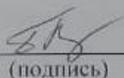
Диссертант обладает достаточным уровнем общетехнической и специальной подготовки, необходимыми знаниями и умениями в области данного направления.

Заключение и предлагаемая оценка работы

Работа обладает признаками научной новизны, выполнена с использованием современных подходов и методов исследования, полученные результаты имеют высокую степень достоверности.

Магистерская диссертация заслуживает оценки «отлично».

Научный руководитель,



(подпись)

Башкова Т. И.

(Ф.И.О.)

должность, ученая степень доцент МТНМ, к. т. н.

« 17 » 06 2022<sup>25</sup> г.

## РЕЦЕНЗИЯ на магистерскую диссертацию

студента федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»  
Янченко Максим Иванович

(Ф.И.О.)

по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Тема магистерской диссертации Исследование структурных изменений и особенностей разрушения конструкционных материалов в процессе малоциклового усталости

Объем работы:

количество листов пояснительной записки 84

количество листов чертежей \_\_\_\_\_

Заключение о степени соответствия, выполненной работы заданию \_\_\_\_\_

Магистерская диссертация полностью соответствует заданию

Характеристика выполнения каждого раздела работы, степень использования последних достижений науки и техники, передовых методов работы  
Проведено исследование механизмов усталостного разрушения мартенситно-старееющей стали 15-5 РН в условиях малоциклового нагружения. В первом разделе систематизированы современные научные представления об усталостных процессах, особенностях разрушения материалов и принципах механики разрушения. Второй раздел включает патентный анализ актуальных технических решений по повышению усталостной стойкости материалов. В третьем разделе представлена методология экспериментальных исследований, включающая использование резонансной установки с электромагнитным возбуждением и акустико-эмиссионной диагностики. В четвертом разделе проведён анализ закономерностей развития усталостных повреждений, рассмотрены особенности трещинообразования и определены зависимости между параметрами колебаний и стадиями разрушения материала.

Перечень положительных качеств работы \_\_\_\_\_

1 Актуальность и практическая значимость исследования, направленного на повышение надёжности конструкционных материалов

2 Применение современных экспериментальных методов, включая акустико-эмиссионный контроль и оптическую металлографию

3 Проведение корреляционного анализа между частотными характеристиками колебаний и размерами усталостных трещин

4 Высокий уровень обобщения полученных результатов и формулирование практических рекомендаций

Перечень основных недостатков работы В работе не приведена расчетная модель напряжённо-деформированного состояния, не рассмотрены альтернативные типы нагружения, отсутствует оценка остаточного ресурса материала

Оценка качества магистерской диссертации Пояснительная записка выполнена в соответствии с требованиями к оформлению и содержанию выпускных квалификационных работ, отражает все этапы исследования и отличается логичной структурой, полнотой изложения материала и корректностью научной терминологии. Используются актуальные научные источники, включая зарубежные патенты, нормативные документы и научные публикации последних лет.

Отзыв о работе в целом и предполагаемая оценка В процессе подготовки магистерской диссертации автор продемонстрировал глубокие знания в области механики разрушения и материаловедения, а также умение применять современные методы диагностики усталостных повреждений. Проведённые исследования и полученные результаты отличаются высокой степенью достоверности и практической значимости.

Магистерская диссертация заслуживает оценки «отлично», а её автор, Янченко Максим Иванович, достоин присвоения квалификации магистр по направлению 22.04.01 – материаловедение и технологии материалов.

Рецензент

(подпись)

Жилин С.Г.

(Ф.И.О.)

ведущий научный сотрудник  
ИМИМ ДВО РАН, к.т.н., доцент

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.



Директор ИМИМ ДВО РАН

ПОДПИСЬ ЖИЛИНА С.Г. ЗАВЕРЯЮ

О.Н. Комаров