

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

На правах рукописи

Зиновьев Олег Анатольевич

**Исследование влияния сверхмногоциклового нагружения  
низкой амплитуды на структуру и свойства стали 45**

Направление подготовки

22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Коротченко Лариса Никитовна
<b>Проверено</b>
20.06.2025 Зачтено Библиотека

2025

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

Научный руководитель

доктор технических наук,  
профессор  
Башков Олег Викторович

Защита состоится «18» июня 2025 года в 9 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки «Материаловедение и технологии новых материалов» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 202/2.

Автореферат разослан 14 июня 2025 г.

Секретарь ГЭК

Бурдасова Александра Александровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Явление усталости, характеризуется накоплением повреждений в материале вследствие воздействия периодически меняющихся напряжений, вызывающих изменение механических характеристик, появление трещин и их дальнейшее распространение вплоть до полного разрушения изделия. Несмотря на давность открытия данного явления, интерес к нему продолжает расти год от года.

Уже в первой половине XIX столетия специалисты поняли угрозу, которую несут многократно повторяющиеся нагрузки на металлические элементы конструкции.

Первые серьезные научные наблюдения в области усталостного разрушения металлов относятся к опытам Уильяма Альберта и французского инженера Жана Виктора Понселе. Настоящий всплеск интереса к изучению поведения материалов под воздействием циклических нагрузок был вызван рядом катастроф с гибелью людей.

Со временем эта область исследований значительно продвинулась вперед. Были разработаны многочисленные методики анализа процессов накопления повреждений, описаны физические процессы формирования и роста трещин, предложены новые способы прогнозирования ресурса изделий и измерения степени их износа.

Сегодня выделяют три вида усталости металлов: малоцикловую, многоцикловую и сверхмногоцикловую. На сегодняшний день теория и практика изучения малоцикловой и многоцикловой усталости достаточно хорошо изучены. Однако сверхмногоцикловая усталость остается наименее исследованной областью, где при числе циклов свыше  $10^9$  существенно меняется механизм образования и распространения трещин.

**Цель работы.** Оценка влияния сверхмногоциклового нагружения низкой амплитуды на структуру и свойства стали 45.

**Задачи исследования:**

- 1) проанализировать имеющиеся данные о механизмах и явлениях, лежащих в основе влияния сверхмногоциклового нагружения на структуру материалов;
- 2) провести сверхмногоциклового испытания на образцах из стали 45;
- 3) провести анализ изображений микроструктур образцов в программе Image-Pro Plus для получения точных количественных показателей;
- 4) провести анализ результатов структурных изменений стали 45 на основе распределения плотности границ зерен;
- 5) провести анализ результатов структурных изменений стали 45 на основе распределения твердости;
- 6) провести анализ результатов структурных изменений стали 45 на основе фрактографии.

**Объектом исследования.** Процесс разрушения в режиме ультразвукового сверхмногоциклового нагружения.

**Предмет исследования.** Структурные изменения в образцах из стали 45 при ультразвуковом сверхмногоциклового нагружении.

**Методы исследования** основаны на подходах экспериментальной механики разрушения. Испытания образцов проведены на лабораторной установке для ультразвуковых испытаний. Структурный количественный анализ проведен с помощью компьютерной металлографии в программе Image-Pro Plus. Изменение микротвердости образцов проводились на микротвердомере по шкале Виккерса. Фрактографический анализ проводился с помощью методов растровой электронной микроскопии. Обработка результатов и их анализ проводились с помощью программы Excel.

**Новизна полученных результатов:**

- 1) получены новые экспериментальные сведения о структурных изменениях в стали 45;

2) разработана методика получения информации о сверхмногоцикловом разрушении образцов из стали 45 путем анализа распределения плотности границ зерен, распределения твердости и фрактографии;

3) предложено описание изменения структуры образцов из стали 45 на основе экспериментальных данных полученных входе испытаний сверхмногоциклового усталости в заданных условиях и обработки.

#### **Достоверность и обоснованность результатов исследования.**

Достоверность полученных и представленных в диссертации результатов подтверждается использованием современных независимых взаимодополняющих методов исследования, обеспечивающих согласованность предполагаемых результатов с проведенными экспериментальными исследованиями.

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

Практическая значимость работы заключается в получении результата структурных изменения в сталях, сформированных в условиях сверхмногоциклового нагрузки.

Ценность работы заключается в предложении новой методики оценки характера структурных изменений в материале, сформированных при сверхмногоциклового нагрузке.

**Личный вклад автора** заключается в формулировании цели и задач диссертационной работы, проведении испытаний и структурных исследований, анализе всех экспериментальных данных и формулировании окончательных выводов по полученным результатам.

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

1) Анализ результатов структурных изменений стали 45 на основе распределения плотности границ зерен, значений микротвердости и фрактографического анализа;

2) Сравнение механизмов малоциклового и сверхмногоциклового усталости.

**Структура и объем работы.** Работа включает введение, аналитический обзор, методическую часть и результаты теоретических и экспериментальных исследований. Работа содержит 97 страниц, 3 раздела, основные выводы, включает 45 рисунков, 8 таблиц и 56 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** раскрывается значимость выбранной темы диссертации, определена основная цель исследования и сформулированы ключевые задачи, подчеркивающие оригинальность научных выводов.

**В первой главе** рассмотрены характер и причины усталостного разрушения, механизмы малоциклового и многоциклового разрушения, методы их исследования, а также особенности сверхмногоциклового разрушения и принцип работы применяемых для исследования ультразвуковых установок. Описано влияние ультразвукового воздействия на структурные изменения материала.

**Во второй главе** описаны методики, позволяющие моделировать ультразвуковые концентраторы и образцы для сверхмногоцикловых испытаний. Описаны методы проведения расчетов показателей распределения плотности границ зерен с помощью компьютерной металлографии. Обоснован выбор материала для испытания на сверхмногоцикловую усталость, а также оборудование для проведения этих испытаний.

**В третьей главе** на основе результатов испытаний на сверхмногоцикловую усталость стали 45 выполнен анализ полученных данных с учетом распределения плотности границ зерен, распределения твердости и фрактографического исследования. С помощью фрактографического анализа произведено сопоставление характерных признаков механизмов разрушения при сверхмногоцикловых нагрузках стали 45. Проведенный анализ позволил сформулировать выводы относительно влияния сверхмногоциклового усталости на структурные изменения в стали 45.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Для исследования на сверхмногоцикловую усталость были взяты образцы стали 45 предварительно прошедшие термическую обработку (нормализация и закалка в среде растительного масла).

Результаты исследований на сверхмногоцикловую усталость приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные особенностей испытаний

№ образца	Частота ср., Гц	Амплитуда, мВ	Амплитуда, мкм	Амплитуда, МПа	Количество циклов N	Время, час
06	20248,6	300	11,79	424	$3,89 \cdot 10^9$	54
07	20665,4	400	15,41	554	$3,75 \cdot 10^9$	50,5

После  $3,89 \times 10^9$  циклов нагружения на образце №06 появилась поперечная трещина длиной 2,58 мм вдоль узкого сечения (рисунок 1).



Рисунок 1 – Расположение трещины на образце №06, x100

Образец №07 выдерживал нагрузку до  $3,75 \times 10^9$  циклов, после которых произошло разрушение материала, форма поверхности излома показана на рисунке 2 (а). Длина трещины составила 2,85 мм, что составляет  $\sim 0,71$  от диаметра образца. На рисунке 2 (б) приведена для сравнения структура усталостного излома образца №5, разрушившегося при ультразвуковом нагружении при  $3,79 \times 10^8$  циклов. Однако, образец №5 в отличие от образца №07 был испытан в состоянии поставки и термической обработке после изготовления не подвергался. Длина трещины составила 2 мм, что составляет также  $\sim 0,71$  от диаметра образца.

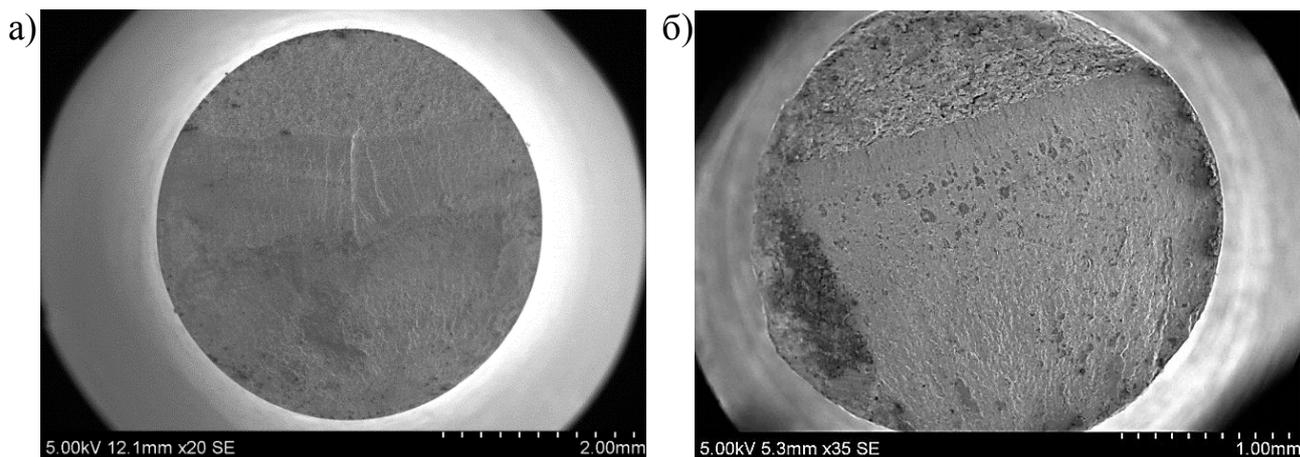


Рисунок 2 – Поверхности излома образцов стали 45, подвергнутых ультразвуковой обработке: а – образца №07 в состоянии после закалки в растительном масле; б – образца №5 в состоянии поставки (нормализация)

Поверхность излома закаленного образца №07 равномерная по зернистости, без ступенек, закалочные трещины в сечении отсутствуют, что подтверждает равномерность закалки, отсутствие превышения температуры закалки. Поверхность излома образца №5 также равномерная плоская, видимых дефектов, способствующих зарождению трещин не имеет.

Характер развития усталостных повреждений образцов, подвергнутых циклической деформации в условиях ультразвукового нагружения, имеет высокую схожесть по структуре зарождения, развития и роста магистральной трещины. Циклическая долговечность образцов различается на порядок. По характеру расположения полос на усталостной трещине можно определить место начала и стадийность ее развития. Радиально расходящиеся от начала трещины рубцы указывают на места их зарождения, которые для обоих образцов находятся в нижней части фотографий излома. Инкубационный период развития трещины в образце №07 заканчивается примерно на половине сечения образца, образца №5 – несколько меньше половине сечения.

Фасетки приращения усталостной трещины на закаленном образце плохо различимы, но на отдельных местах их можно увидеть. Их размер не превышает 300 нм (рисунок 3).

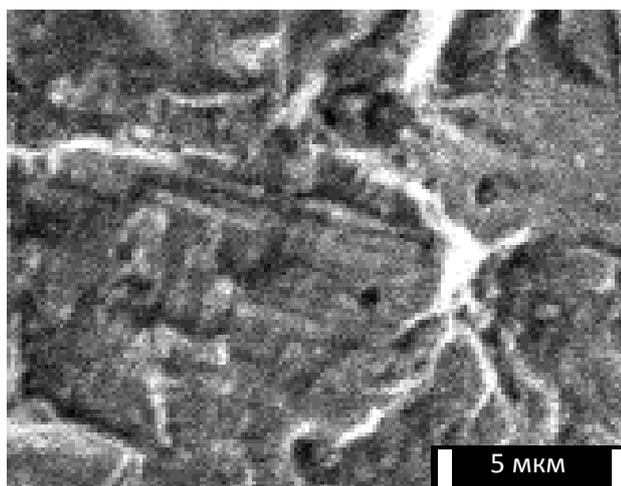


Рисунок 3 – Поверхность излома образца №07

После стадии равномерного развития трещины наблюдается стадия ускоренного развития. На структуре изломов это выглядит в виде области с параллельно идущими вдоль направления фронта развития трещин полосами-рубцами. Ширина области ускоренного развития усталостной трещины закаленного образца №07 составляет 0,25 от диаметра образца в наиболее узкой части, а для не подвергнутого термообработке образца №5 –  $\sim 0,08$ . Таким образом, можно утверждать, что ускоренное развитие трещины закаленного образца наступает ранее, чем не подвергнутого термической обработке.

Особенностью функционирования используемой в работе системы ультразвукового возбуждения колебаний является автоматическое поддержание постоянной амплитуды колебаний при изменении частоты колебаний в определенном диапазоне частот. Развитие магистральной трещины неизбежно приводит к снижению частоты резонансных колебаний. При выходе системы за установленный диапазон управления, амплитуда колебаний существенно снижается, что является признаком разрушения образца и окончания испытания. Область долома имеет характерный вид для обоих образцов в зависимости от вида термической обработки и не связана с развитием усталостной трещины.

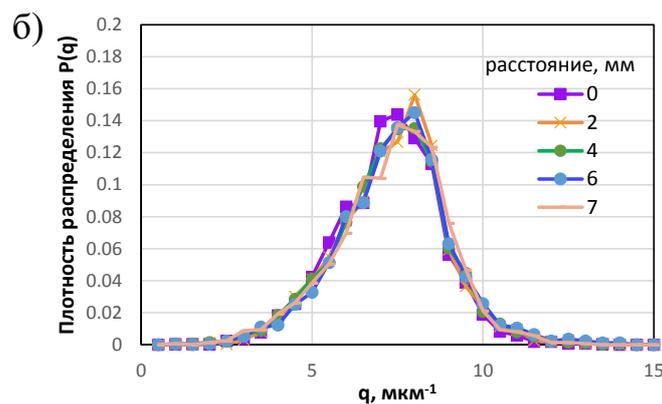
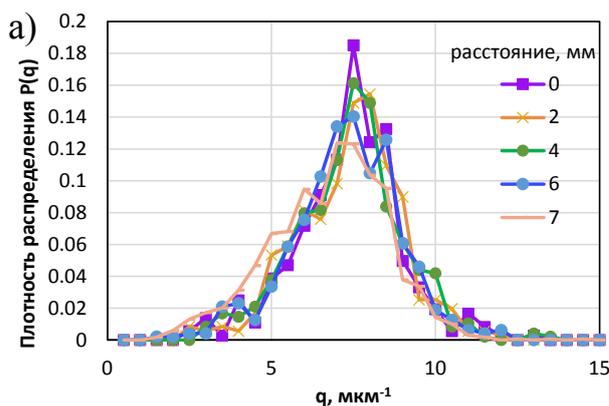
После испытания образцы были разрезаны по плоскости, проходящей вдоль оси симметрии. Таким образом, получили возможность оценки микроструктуры на плоскости, расположенной в средней части объема образца

вдоль направления растягивающих напряжений. После разрезки образцы были подвергнуты шлифовке, полировке и травлению по методике, изложенной в главе 2 диссертации. Фото микроструктур было получено при увеличении  $\times 400$  и  $\times 1000$ . Фото располагались вдоль оси растягивающих напряжений по оси симметрии. В таблице 2 приведены значения напряжений растягивающей нагрузки в зависимости от расстояния от области максимальных напряжений для испытанных образцов №№ 06 и 07.

Таблица 2 – Значения напряжений растягивающей нагрузки

№ образца	Расстояние от зоны максимальных напряжений, мм						
	0	1	2	3	4	5	6
Напряжение в образце №06, МПа	376	364	326	273	220	176	143
Напряжение в образце №07, МПа	492	476	426	356	287	230	187

Количественная обработка микроструктур выполнялась в программе Image-Pro Plus. Алгоритм обработки микроструктур приведен в главе 2. Расчет периметра и площади структурных элементов выполнялся для светлых зон, определенных по заданной в программе маске, позволяющей преобразовать изображения в черно-белый формат из фото с градациями серого. В результате обработки изображений были получены распределения для расчётной величины плотности границ структурных элементов  $q$ , характеризующей структурно-энергетическое состояние границ зерен и других структурных элементов материала. Диаграммы распределения приведены на рисунке 4.



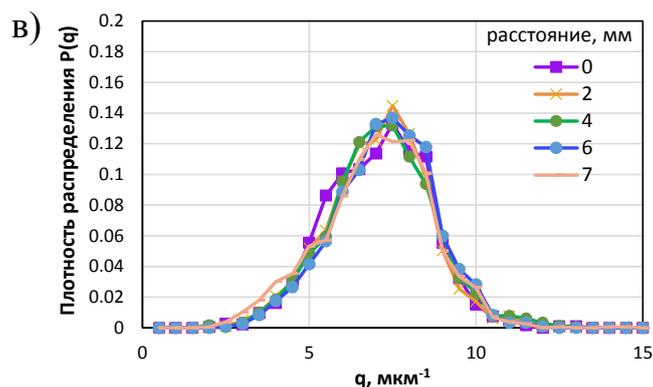
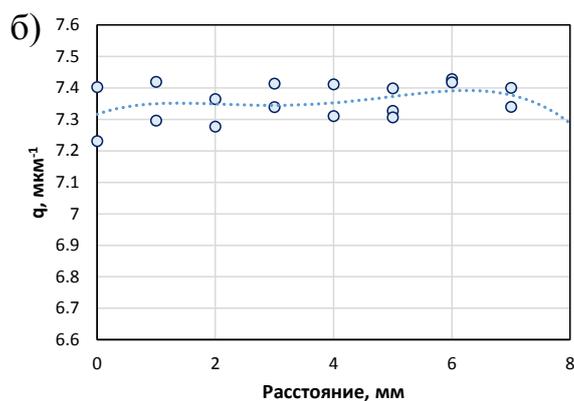
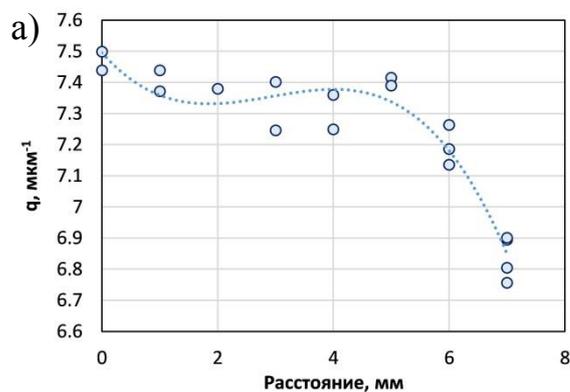


Рисунок 4 – Диаграммы распределения плотности границ зерен  $q$  от расстояния: а – образец №06; б – образец №07; в – образец №08

Из диаграмм распределения видно, что существенное изменение значения  $q$  от расстояния не наблюдается. Для более детальной количественной оценки было рассчитано медианное значение  $q$  для полученных распределений.

Из диаграмм, приведенных на рисунке 5, видно, что количественные изменения структуры не значительны. Однако в зоне, приближенной к области максимальных напряжений (до 4 мм) можно отметить увеличение значения  $q$  до 7,3-7,5 мкм<sup>-1</sup>, рассчитанных для микроструктур образцов №№06 и 07, полученных при увеличении  $\times 1000$ , подверженных ультразвуковому воздействию, в сравнении с образцом №08, без ультразвукового воздействия.



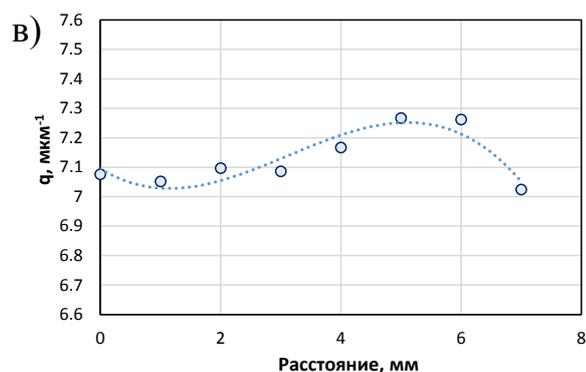


Рисунок 5 – Диаграммы зависимости медианного значения плотности границ зерен  $q$  от расстояния: а – образец №06; б – образец №07; в – образец №08

Для оценки изменения механических свойств образцов после ультразвуковой обработки были выполнены измерения твердости на твердомере Роквелла и микротвердости при различной нагрузке. Результаты измерения твердости приведены по Роквеллу в таблице 3. В таблице приведены результаты измерения твердости поверхности цилиндрической части образцов и сердцевины цилиндрической части после их продольной резки, шлифования и полирования. Значения твердости по Роквеллу представлены для всех 3-х образцов, включая образцы №№06 и 07, подверженные ультразвуковой обработке и образец №08, не подверженный ультразвуковому воздействию. Однако, в связи с тем, что цилиндрическая часть образцов находится в зоне с существенно низким уровнем растягивающих напряжений, можно считать, что образцы в областях замеров твердости по Роквеллу не были подвержены ультразвуковой обработке.

Таблица 3 – Результаты измерения твердости по Роквеллу

Твердость HRC	№ образца		
	06	07	08
Твердость поверхности цилиндрической части, HRC	45,4	48,7	49,0
Твердость сердцевины, HRC	40,8	49,2	47,1

По результатам измерения микротвердости можно отметить следующее. При низких значениях нагрузки до 0,5 Н значения микротвердости образца №07 не превышают значения микротвердости образца №08, не подверженного ультразвуковой обработке. Значения микротвердости образца №06 плавно повышаются, приближаясь к зоне максимальных напряжений, однако в самой зоне максимальных напряжений происходит снижение микротвердости. При увеличении нагрузки на индентор до 1 и 2 Н значение микротвердости образца №07 и образца №06 существенно увеличилось в сравнении с образцом №08, не подверженным ультразвуковой обработке. Полученный результат свидетельствует о том, что измеренная микротвердость при значительных нагрузках 1 Н и более приближаются по способу измерения к макротвердости в объеме материала, что является достоверной информацией об изменении свойств материала на макроуровне. Таким образом, ультразвуковое воздействие при нагрузках 376 - 492 МПа приводит к увеличению твердости стали 45 в результате сверхмногоциклового нагружения более  $3 \times 10^9$  циклов.