

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

На правах рукописи

Евсейчик Ольга Александровна

**Исследование структурных изменений в сталях, формируемых в
условиях гигацикловой усталости**

Направление подготовки
22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

2021



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

Научный руководитель

доктор технических наук,
доцент Башков Олег Викторович

Защита состоится «25» июня 2020 года в 9 часов 00 минут на заседании государственной аттестационной 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 23 июня 2021 г.

Секретарь ГЭК

А. А. Бурдасова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Явление усталости, то есть процесс постепенного накопления повреждений материала под действием циклически изменяющихся напряжений, приводящих к изменению свойств, образованию трещин и их развитию, и последующему разрушению, несмотря на то, что возникло больше, чем сто лет назад, интерес к нему с каждым годом все больше и больше.

Это связано с тем, что многие механические узлы машин (детали, конструкции) в процессе эксплуатации подвергаются циклическим нагрузкам. Статистика неисправностей турбореактивных двигателей китайских самолетов показывает, что более 70% неисправностей связаны с усталостью. Такие циклические нагрузки являются результатом вращений, растяжения-сжатия материала, вибраций.

С начала XIX века было известно, что многократные повторяющиеся нагрузки представляют опасность разрушения металлических деталей.

С тех пор были достигнуты огромные успехи в области разрушения. Изучено большое количество новых методов исследования кинетики усталостного разрушения. Описаны многие физические механизмы развития усталости и кинетика роста внутренней энергии в деформируемых материалах. Кроме того, предлагаются новые модели расчета ресурса, методы и технические средства оценки его параметров.

В настоящее время малоцикловая и многоцикловая усталость наиболее полно проверены теоретически и экспериментально в отличие от гигацикловой. В последние годы интерес к фундаментальным проблемам усталости резко возрос в связи с возможностью достижения усталостного ресурса. Кроме того, возникла необходимость в проведении испытаний на усталость на испытательных базах, превышающих $10^8 - 10^{10}$ циклов нагружения, поскольку ресурс нагрузки многих критических конструкций, работающих при циклических нагрузках, превышает стандартные нормы.

Цель работы. Оценка влияния гигацикловой усталости на структурные изменения в стали 45.

Задачи исследования:

1 провести гигацикловые испытания на смоделированных образцах из стали 45;

2 разработать методику обработки изображений и расчета в программе Image-Pro.Plus для получения наиболее точных количественных показателей микроструктуры;

3 провести анализ результатов структурных изменений стали 45 на основе распределения плотности границ зерен;

4 провести анализ результатов структурных изменений стали 45 на основе распределения твердости;

5 провести анализ результатов структурных изменений стали 45 на основе фрактографии.

Объект исследования. Процесс разрушения в режиме ультразвуковой гигацикловой усталости.

Предмет исследования. структурные изменения в образцах из стали 45 при ультразвуковом гигацикловом разрушении.

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 по шкале Виккерса. Фрактографический анализ проводился с помощью методов растровой электронной микроскопии. Обработка результатов и их анализ проводились с помощью Excel.

Научная новизна работы:

1 получены новые результаты экспериментальных исследований о структурных изменениях в стали 45 при гигацикловой усталости и в сплаве 1163 при малоциклового усталости;

2 разработана методика получения информации о гигацикловом 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 гигацикловой 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 работы

Практическая значимость работы заключается в получении результата – изучении структурных изменения в сталях, сформированных в условиях гигацикловой усталости.

Ценность работы заключается в предложении новой методики оценки характера структурных изменений, сформированных при гигацикловой усталости.

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) Результаты проведенных малоцикловых испытаний на образцах сплава 1163 и гигацикловых испытаний при ультразвуковом воздействии на образцах стали 45;

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

3) Сравнение механизмов малоцикловой и гигацикловой усталости.

Структура и объем работы. Работа включает введение, аналитический обзор, методическую часть и результаты теоретических и экспериментальных исследований. Работа содержит 92 страницы, 3 раздела, основные выводы, включает 44 рисунка, 7 таблиц и 56 источников.

Публикации.

1 Евсейчик, О. А. Кинетика изменения твердости вблизи зоны роста усталостной трещины в сплаве 1163 / О. А. Евсейчик, Г. А. Гадоев, О. В. Башков // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы III Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2020 г. : в 3 ч. / редкол. : Э. А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2020. – Ч. 1. – С. 51-54;

2 Евсейчик, О. А. Гигацикловая усталость как причина преждевременного выхода из строя ответственных авиационных деталей / О. А. Евсейчик, О. В. Башков // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы IV Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 12-16 апреля 2021 г. : в 4 частях / редкол. : Э. А. Дмитриев (отв. ред.), А. В. Космынин (зам. отв. ред.). – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2021. – Ч. 1. – С. 34-35.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования диссертации, сформулирована цель работы и определены основные задачи исследования, отмечена научная новизна.

В первой главе рассмотрены характер и причины усталостного разрушения, механизмы малоциклового и многоциклового разрушения, методы их исследования, а также особенности гигациклового разрушения и принцип

работы применяемых для исследования ультразвуковых машин. Описано влияние ультразвукового воздействия на структурные изменения.

Во второй главе описаны методики, позволяющая моделировать ультразвуковые концентраторы и образцы для гигацикловых испытаний, и позволяющая провести расчет показателей распределения плотности границ зерен с помощью компьютерной металлографии. Обоснован выбор материала, подвергаемые малоциклового усталости и гигацикловой усталости, а также описаны установки для проведения этих испытаний.

В третьей главе на основании результатов испытаний на малоцикловую усталость сплава 1163 и результатов испытаний на гигацикловую усталость стали 45, проведен анализ результатов на основании распределения плотности границ, распределения твердости и фрактографического анализа. При помощи фрактографического анализа проведено сравнение особенностей механизмов разрушения гигацикловой усталости стали 45 и малоциклового усталости сплава 1163. Анализ результатов позволил сделать выводы о влиянии гигацикловой усталости на структурные изменения в стали 45.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Усталость – это процесс постепенного накопления повреждений материала под действием циклически изменяющихся напряжений (вращений, растяжения-сжатия, вибраций), приводящих к изменению свойств, образованию трещин и их развитию, и последующему разрушению. В металлических материалах существуют три типа усталости: малоцикловая, многоцикловая, гигацикловая. В настоящее время малоцикловая и многоцикловая усталость наиболее полно проверены теоретически и экспериментально. Гигацикловая усталость – явление, открытое сравнительно недавно. Несмотря на то что много времени уделено исследованию материалов в режиме гигацикловой усталости, и написано большое количество публикаций, но данные являются достаточно отрывочными, поэтому необходимо дальнейшее изучение. Но по-

сколькx эксперименты в гигацикловой области очень длительные необходимо ультразвуковое усталостное испытание.

Результаты исследований на малоцикловую усталость приведены ниже.

Сделаны измерения твердости при HV0,2 через 5 мм при выдержке 10 с вдоль образца в трех рядах. Построенные графики твердости представлены на рисунке 1.

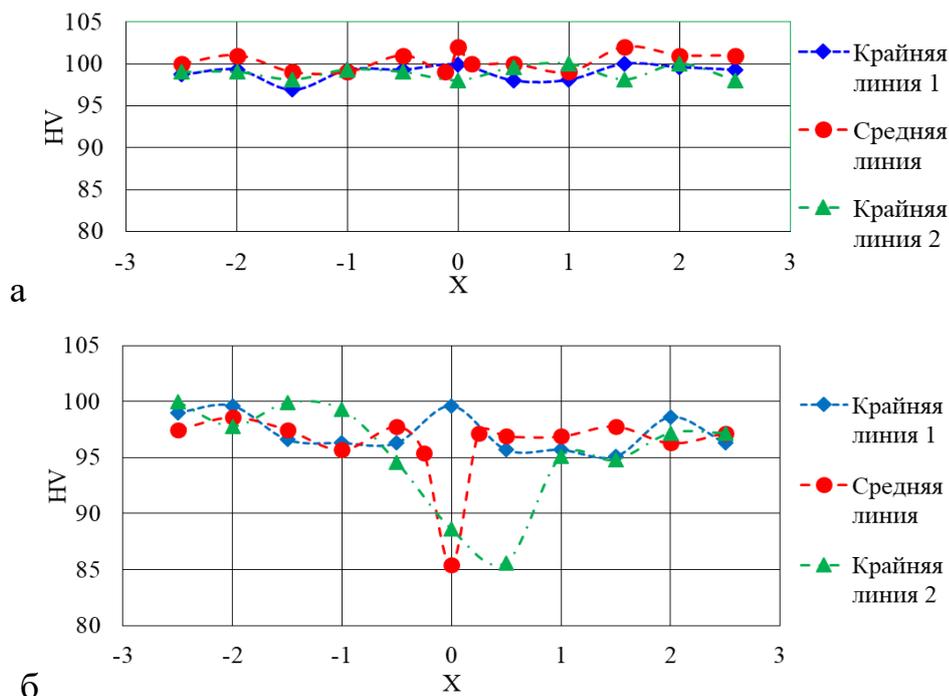


Рисунок 1 – Графики твердости вдоль образца:

а – напряжение 200 МПа; б – напряжение 250 МПа

Измерена твердость поперек у образцов в середине и построены графики твердости, представленные на рисунке 2.

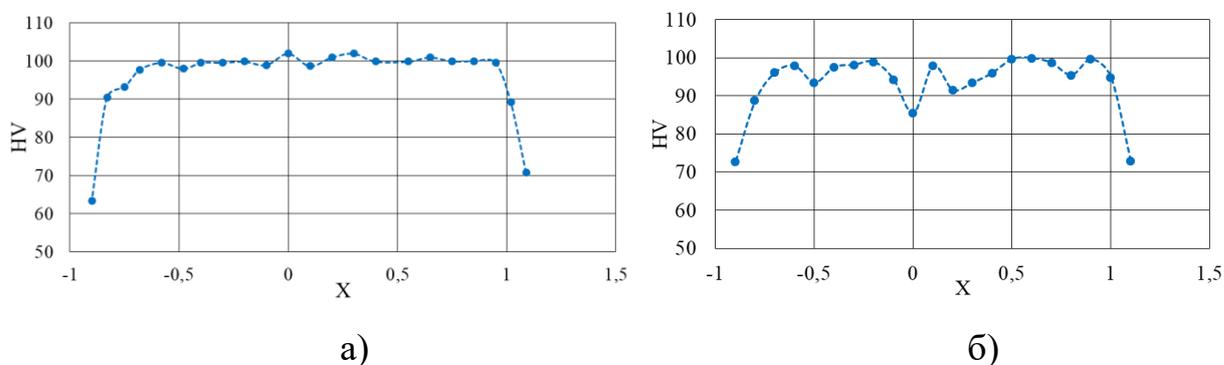


Рисунок 2 – Графики твердости поперек образца:

а – напряжение 200 МПа; б – напряжение 250 МПа

Был построен фрагмент диаграммы усталости в области малоциклового усталости характеризующая сплав 1163 (рисунок 3).

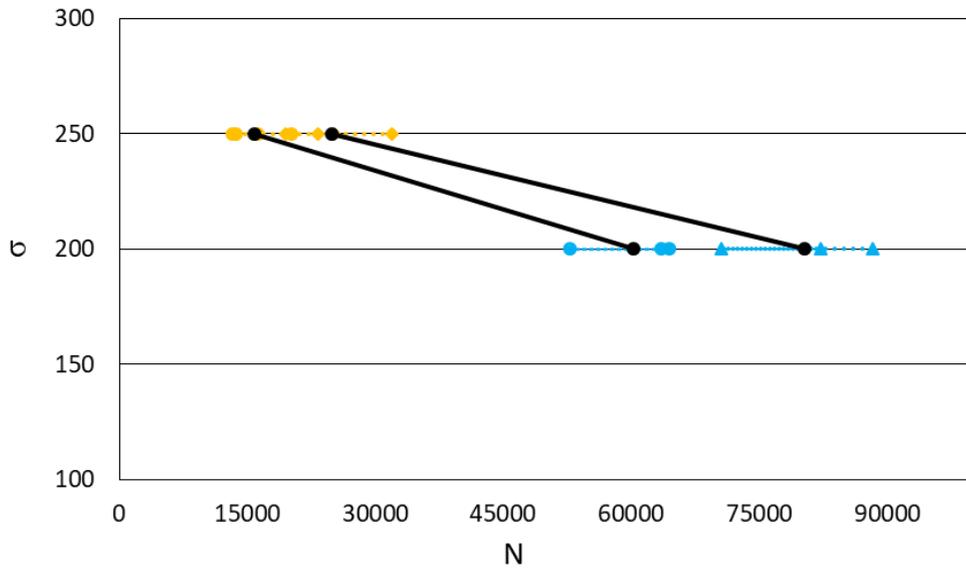


Рисунок 3 – Кривая Вёлера в области малоциклового усталости

Графики твердости, измеренные вокруг трещин и в вершинах (рисунки 4-5).

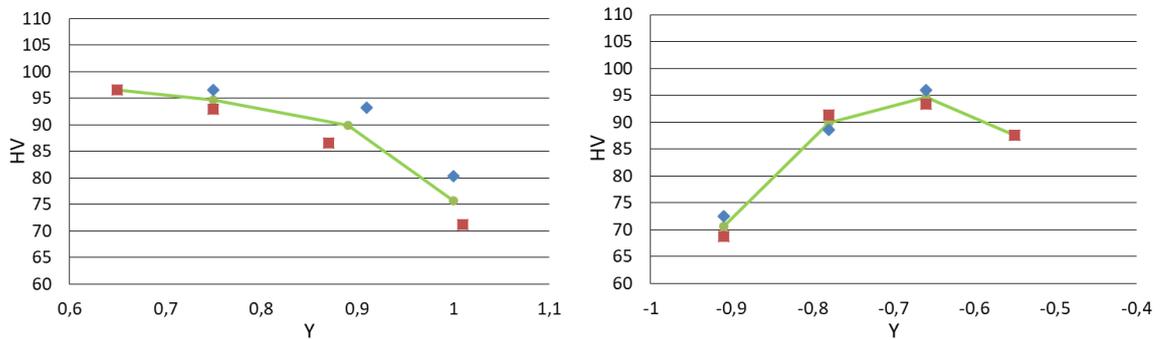


Рисунок 4 – Графики твердости вокруг трещин образца при напряжении 200 МПа

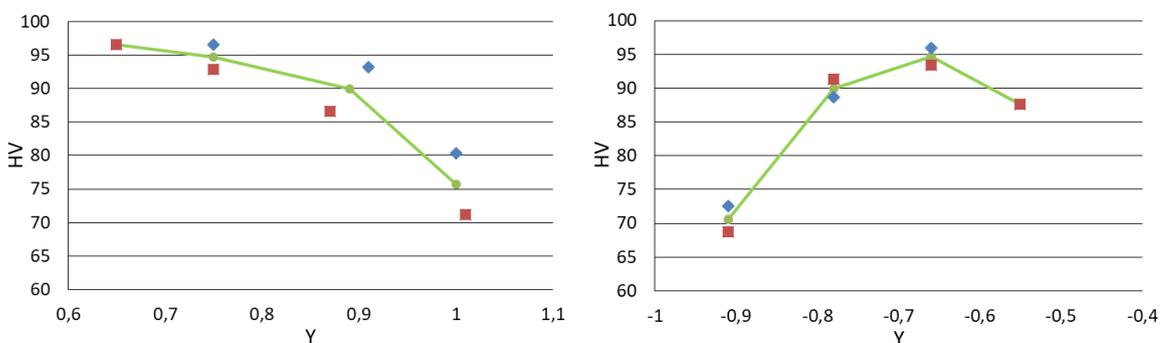


Рисунок 5 - Графики твердости вокруг трещин у образца при напряжении 250 Мпа

Сплав 1163, который при разных напряжениях как упрочняется, так и разупрочняется. Установлено, что зона, близкая к устью трещины, имеет более высокую микротвердость, вдоль всей трещины, что связано с прорастанием трещины в зону скопления дислокаций и увеличения их плотности.

Результаты исследований на гигацикловую усталость приведены ниже (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов стали 45 на гигацикловую усталость

| № образца | N | Частота ($f_{нач}$ - $f_{кон}$), Гц | Амплитуда, мкм | t, мин |
|-----------|-------------------|---------------------------------------|----------------|--------|
| 3 | $6 \cdot 10^6$ | 20020-20033 | - | 5 |
| 4 | $2,42 \cdot 10^7$ | 20222-20227 | 0,21 | 20 |
| 5 | $3,91 \cdot 10^8$ | 20395-20376 | 1,19 | 320 |

Была выполнена количественная металлография микроструктур образцов в программе Image-Pro.Plus (рисунок 6).

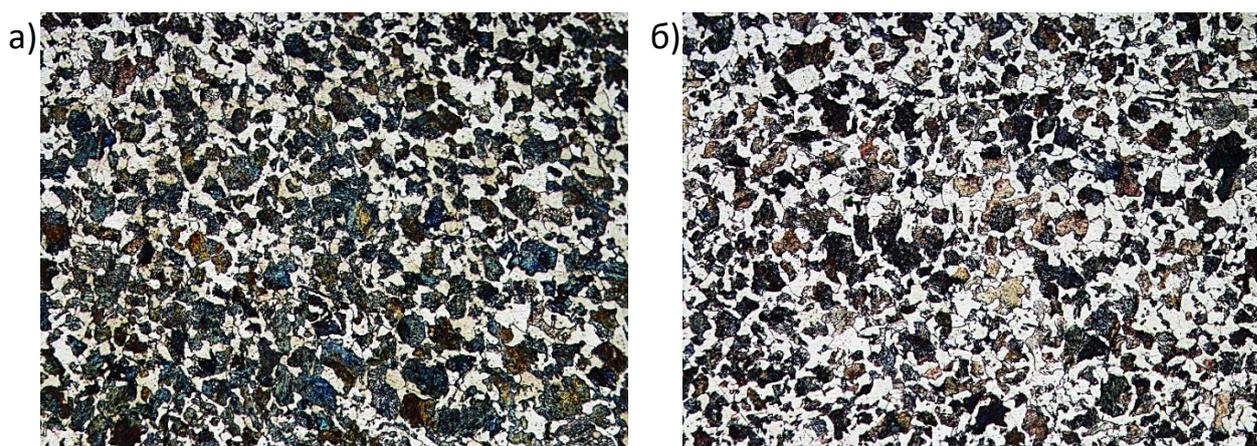


Рисунок 6 – Микроструктура образца № 3 при увеличении $\times 400$
а – у края; б – 3 мм

По результатам компьютерной обработки в программе Image-Pro.Plus для каждого изображения рассчитывались значения периметра и площади зерен.

По ним рассчитывалась плотность границ зерен с целью последующего построения распределения.

По рассчитанным значениям плотности границ зерен для каждого зерна и количеству микроструктурных объектов для каждого значения плотности границ были построены графики (рисунок 7).

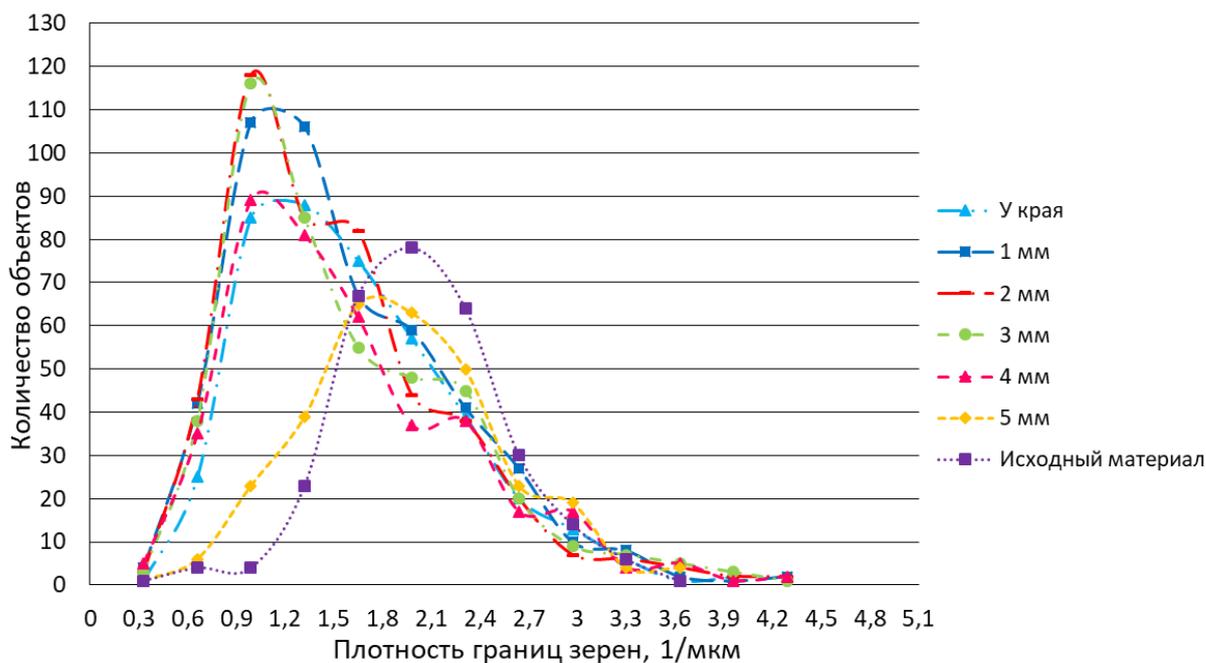


Рисунок 7 – Кривая распределения плотности границ зерен от количества объектов у образца №3

Были сделаны измерения твердости при HV0,2 через 1мм от края (зоны воздействия) на протяжении 4 мм при выдержке 10 с. Построенная гистограмма твердости представлена на рисунке 8.

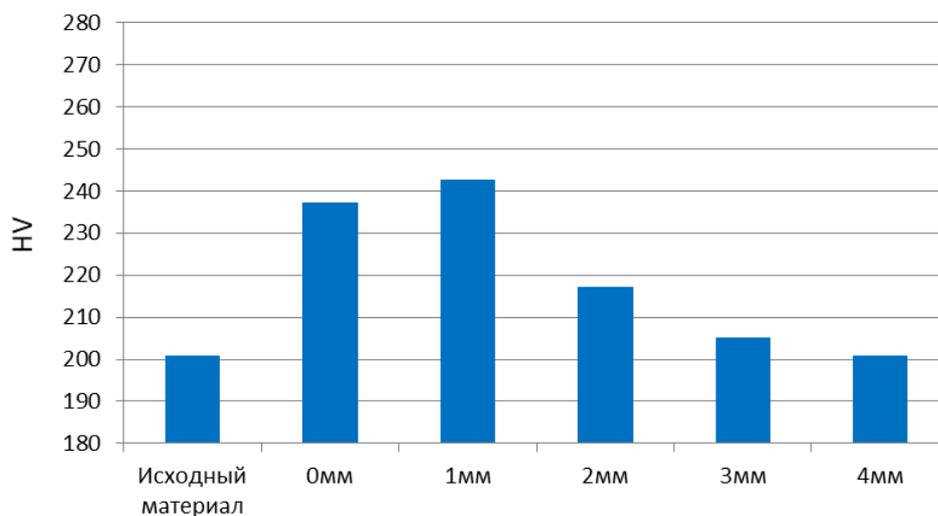


Рисунок 8 – Гистограмма распределения твердости у образца №3

Для фрактографического анализа усталостных изломов были сфотографированы на растровом электронном микроскопе образцы потерпевшие ультразвуковое гигацикловое разрушение (рисунок 9).

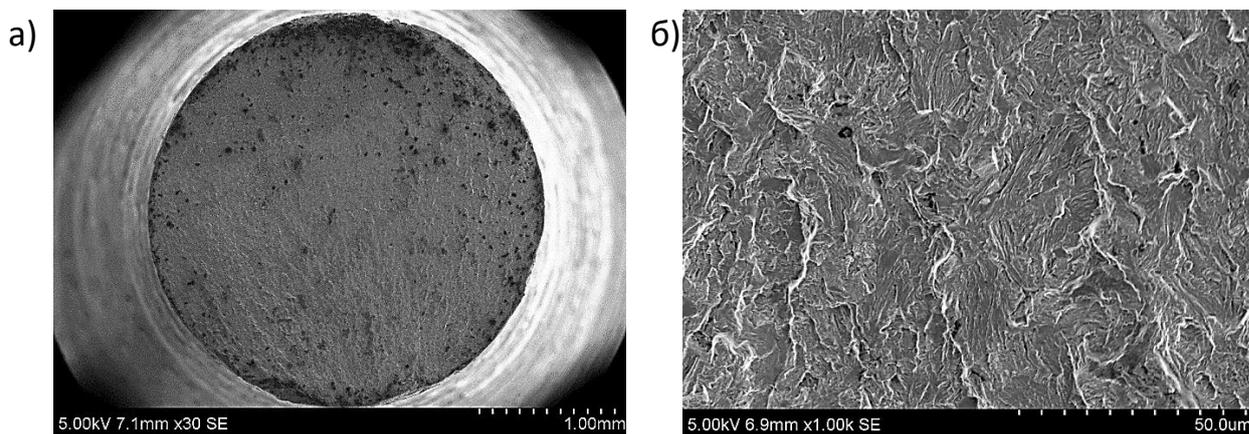


Рисунок 3.17 – Вид усталостного излома образца №3

а – общий вид излома при увеличении 30;

б – зона излома в середине образца при увеличении x 1000

Таким образом, механизм гигацикловой усталости отличается от механизма малоциклового усталости. Фрактографический анализ позволяет установить место и причины начала развития усталостной трещины, а также характер ее развития. Структурные изменения по распределению плотности границ зерен подтверждаются исследованиями микротвердости.