На правах рукописи

Попкова Александра Александровна

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ НА ЭВОЛЮЦИЮ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Специальность 05.16.09 Материаловедение (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольском-на-Амуре государственном университете» (ФГБОУ ВО «КнАГУ»), на кафедре «Материаловедение и технология новых материалов»

Научный руководитель: **Башков Олег Викторович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» ФГБОУ ВО «КнАГУ»

Официальные оппоненты: **Мерсон Дмитрий Львович**, доктор физико-математических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института прогрессивных технологий ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти

Коневцов Леонид Алексеевич, кандидат технических наук, научного сотрудника ФГБУН Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН, г. Хабаровск

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ), г. Владивосток.

Защита состоится «24» мая 2019 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.01 в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственный университет» и на сайте https://sovet.knastu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронную почту diss.material@yandex.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
к.т.н. **Проценко Александр Евгеньевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При современном уровне развития техники и технологий требуется создание новых конструкционных материалов, характеризующихся высоким уровнем эксплуатационных свойств, а также разработка методов оценки и прогнозирования их остаточного ресурса. В последние годы используются новые пути повышения свойств конструкционных материалов за счет целенаправленного формирования субмикро- и нанокристаллической структуры.

Использование равноканального углового прессования для получения объемно структурированных материалов (ультрамелкокристаллических, субмикрокристаллических, наноструктурированных) позволяет повысить уровень механических свойств и является наиболее активно развивающимся направлением на сегодняшний день.

Объемно структурированные материалы являются перспективными для применения их в машиностроении. Однако их использование в настоящее время ограничено, что обусловлено недостаточно изученным механизмом эволюции дефектов при различных видах эксплуатационных нагрузок, в том числе циклических.

Проблема оценки усталостного ресурса, определяемого эволюцией структуры материала, связана с установлением кинетики процесса разрушения. Одним из наиболее информативных методов анализа структурных изменений в материалах в реальном времени развития пластической деформации является метод акустической эмиссии (АЭ). Благодаря высокой чувствительности данный метод позволяет осуществлять мониторинг развития процессов деформации и разрушения в процессе эксплуатации, что важно для диагностики состояния конструкций.

Актуальность проводимых исследований заключается в установлении зависимости между параметрами АЭ, регистрируемых при циклических нагрузках и видами усталостных повреждений, характеризующих стадийность процесса циклического разрушения, в целях прогнозирования наступления стадии предразрушения.

Степень проработанности темы. Большой вклад в разработку теоретических и практических основ анализа механизмов деформации и разрушения металлов и сплавов на основе метода АЭ внесли такие советские и российские ученые как А.Е. Андрейкив, В.М. Баранов, В.Н. Белов, Г.А. Бигус, В.С. Бойко, В.В Болотин, Л.Р. Ботвина, С.И. Буйло, С.П. Быков, К.Б. Вакар, В.А. Грешников, О.В. Гусев, Ю.Б. Дробот, В.И. Иванов, Н.В. Лысак, Д.Л. Мерсон, Г.Б. Муравин, В.В. Муравьев, Н.В. Новиков, С.В. Панин, Н.А. Семашко, Л.Н. Степанова, В.М. Финкель, и др.

Среди зарубежных авторов необходимо отметить работы Д. Кайзера, Скофилда, Г. Данегана, А. Поллока, Ё. Накамуры, К. Оно, А. Грина, М. Хэмстеда и др. В большинстве научных работ описаны теоретические аспекты и модели распространения волн АЭ в материалах и причины их происхождения.

Цель. Исследование влияния структурного состояния титановых сплавов на кинетику пластической деформации и стадийность накопления дефектов кристаллического строения при циклическом нагружении для прогнозирования степени деградации структуры материала и долговечности оборудования.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи исследования**:

1. разработать методику циклических испытаний образцов титанового сплава с одновременной регистрацией АЭ;
2. провести экспериментальные исследования накопления усталостных повреждений в титановых сплавах, направленные на анализ и разработку критериев разделения регистируемых сигналов АЭ по видам источников;
3. исследовать влияние структурного состояния титана ВТ1-0, полученного РКУП на долговечность и стадийность накопления усталостных повреждений;
4. разработать методику построения обобщенной диаграммы усталости титановых сплавов, основанную на выделении стадий усталости по регистрируемым параметрам АЭ.

Научная новизна.

1. Определены границы областей рассеивания значений двухпараметрического распределения $E_{АЭ}$-K_f, позволяющие идентифицировать тип источника, генерирующего сигнал акустической эмиссии, как дефекта кристаллического строения.
2. Установлена связь между активностью сигналов АЭ для зарегистрированных источников АЭ и стадийностью накопления усталостных повреждений. Стадия циклической микротекучести характеризуется низкой активностью источников дислокационного типа и двойников. Повышение активности источников пластической деформации соответствует стадии циклической текучести. Снижение активности АЭ, связанное с повышением концентрации дислокаций во время циклической деформации соответствует стадии циклического упрочнения. Стадия развития субмикротрещин до размеров микротрещин характеризуется началом активной регистрации сигналов соответствующих источников АЭ. Стадия развития микротрещин до размеров макротрещин характеризуется регистрацией источников АЭ, идентифицированных, как излучаемые макротрещинами.
3. Установлено влияние структурного состояния на процесс развития усталости в титановых сплавах, заключающееся в том, что уменьшение размеров зерен при переходе от крупнокристаллической (КК) структуры к субмикрокристаллической (СМК) структуре приводит к уменьшению энергии излучаемых сигналов на стадиях II-IV, выявленных по параметрам АЭ. Это приводит к более позднему выявлению стадий и снижению их протяженности в долевом отношении к общей долговечности для испытаний образцов с субмикрокристаллической (СМК) структурой в сравнении с ультрамелкозернистой (УМЗ) и крупнокристаллической (КК) структурой.
4. Разработана методика построения обобщенной диаграммы усталости, основанная на выделении стадий усталости по изменению активности сигналов

АЭ, идентифицированных для различных видов источников в условиях малоциклового нагружения.

Практическая значимость.

1. Разработан метод определения степени структурной деградации титановых сплавов по параметрам регистрируемых сигналов АЭ, который можно использовать для прогнозирования остаточного ресурса деталей, работающих в условиях циклических нагрузок.

2. Методика, основанная на анализе стадийности накопления усталостных повреждений, разделяемых по видам АЭ на источники пластической деформации, применена для построения обобщенной диаграммы усталости, которая может быть использована при проведении усталостных испытаний по сокращенной программе.

Связь работы с крупными научными программами:

– фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере НИОКР «Разработка алгоритма функционирования аппаратной части распределенных акустико-эмиссионных диагностических систем, тестового и полнофункционального программного обеспечения (ПО) и экспериментальное моделирование сигналов акустической эмиссии (АЭ) распределённых систем» (контракт №10458р/18724 от 08.06.2012);

– государственное задание РФ «Исследование стадийности накопления повреждений в конструкционных материалах, и разработка методики выявления дефектов в деталях и конструкциях в процессе их эксплуатации» (шифр программы № 2014-68, НИР № 381);

– грант российского научного фонда №16-19-10149 от 26.05.2016 «Системы мониторинга с распределенными адаптивными волоконно-оптическими датчиками акустической эмиссии».

Положения, выносимые на защиту.

1. Методика и критерии разделения сигналов АЭ, регистрируемых при накоплении усталостных повреждений в условиях циклической деформации титановых сплавов, по видам источников АЭ их порождающих.

2. Установленные связи между параметрами сигналов АЭ, регистрируемых при циклических испытаниях и видами усталостных повреждений, характеризующих различные стадии усталостного разрушения титановых сплавов.

3. Установленное влияние структурного состояния титановых сплавов на долговечность, стадийность накопления усталостных повреждений и характер регистрируемых сигналов АЭ.

4. Методика построения обобщенной диаграммы усталости титановых сплавов, основанная на анализе стадийности накопления усталостных повреждений, разделяемых по видам АЭ на источники пластической деформации (дислокационные, двойникование) и источники образования и развития микро- и макротрещин.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивалась проведением экспериментальных исследований с применением современного оборудования, прошедшего государственную поверку; статистической

обработкой экспериментальных данных; использованием общепринятых и специальных методик, что гарантировало достоверность полученных результатов, для обработки которых использовались стандартные компьютерные программы.

Апробация результатов работы. Материалы диссертации представлялись на следующих научных конференциях: международная научно-техническая конференция «Современное материаловедение и нанотехнологии» (Комсомольск- на-Амуре, 2010); 5th Conference on Emerging Technologies in Non Dstructive Testing (Греция, Янина, 2011); World Conference on Acoustic Emission 2011 (WCAE-2011), (Beijing, 2011 г.); China; 30th European Conference on Acoustic Emission Testing; 7th International Conference on Acoustic Emission (Испания, Гранада, 2012); VI Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур «ПРОСТ-2012» (Москва, 2012); VI Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур «ПРОСТ-2014» (Москва, 2014); международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2016); международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2017); международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Пермь. 2017).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 3 статьи из перечня изданий, определенных ВАК РФ, 3 статьи включены в базу цитирования Scopus, 2 статьи включены в базу цитирования Web of Science, получено 1 свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора в работу заключается в постановке задач исследований, проведении экспериментальных исследований и их анализе, формировании выводов по работе.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует следующим пунктам по специальности 05.16.09 Материаловедение (по отраслям):

1) установление закономерностей и критериев оценки разрушения материалов от действия механических нагрузок и внешней среды;

2) развитие методов прогнозирования и оценка остаточного ресурса материалов в машиностроении.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает в себя введение, 4 главы, заключение, написана на 112 страницах, содержит 49 рисунков, 2 таблицы, список литературы состоит из 130 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, обозначена основная цель, определены задачи и сформулирована научная новизна исследований, отмечена практическая ценность, основные направления реализации диссертационной

работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, дан обзор содержания диссертации.

В первой главе обобщены и проанализированы современные представления в области исследования усталостных повреждений материалов. Рассмотрены теоретические основы акустической эмиссии, сопровождающей процессы пластической деформации и трещинообразования. Проанализированы критерии классификации источников акустической эмиссии.

Во второй главе изложены экспериментальные методики и подбор материалов для исследования, методика исследования и математическая обработка полученных результатов.

При выполнении диссертационной работы использовались как общепринятые методики определения усталостных характеристик и структурного состояния материала, так и методики анализа параметров акустикой эмиссии, разработанные на кафедре «Материаловедение и технология новых материалов».

Исследования включали две серии проведения экспериментальных исследований и испытаний. Первая серия предварительных исследований была направлена на разработку критериев разделения источников АЭ и состояла из испытаний материалов различных классов (пластичные, твердые, с упрочняющими покрытиями).

Первая группа исследований включала испытания образцов с твердыми упрочняющими покрытиями (углеродистая сталь с поверхностной закалкой, легированная сталь и титановые сплавы с азотированным поверхностным слоем). На предварительно отполированной поверхности фиксировали моменты образования трещин и регистрировали АЭ. Во второй - регистрировалось образование и развитие структурных дефектов (микротрещин, дислокаций, двойников) в различных конструкционных материалах: сталь, титановые и алюминиевые сплавы.

Разделение сигналов АЭ по типам источников выполнялось при испытании конструкционных материалов и одновременной регистрации АЭ на стадиях, характерных для определенного процесса структурной деградации: пластической деформации и разрушения. На стадии легкого скольжения в низкоуглеродистой стали регистрировались дислокационные процессы структурной перестройки. На стадии пластического деформирования титановых сплавов регистрировалось двойникование, в том числе сопровождаемое структурными изменениями, связанными с движением дислокаций. Дислокационные процессы в пластической деформации на стадии деформационного упрочнения регистрировались в дисперсно-упрочняемых алюминиевых сплавах.

Объектами исследования второй серии исследования являлись титановые сплавы ОТ4, ВТ20 в состоянии поставки титан марки ВТ1-0 в крупнокристаллическом (размер зерна 20-25 мкм), ультрамелкозернистом (размер зерна 1-2 мкм) и субмикрокристаллическом (размер зерна 0,2-0,3 мкм) состояниях, сформированных в образцах методом равноканального углового прессования (РКУП).

Испытания материала осуществлялось методом статического растяжения и циклического изгиба. В первом случае использовалась универсальная испытательная машина INSTRON 3382. Во втором – специальная усталостная установка. Для исследования кинетики накопления повреждений при циклической усталости были проведены испытания на установках с низким уровнем акустических шумов в условиях деформации изгибом с одновременной регистрацией сигналов АЭ.

Исследования усталостных изломов проводились на растровом электроном микроскопе (РЭМ HITACHI S3400N). Применяли методы анализа и цифровой обработки сигналов и изображений, метода статистического анализа.

Измерение микротвердости образцов проводилось на микротвердомере SHIMADZU HMV-2. Микротвердость измеряли на специально приготовленных микрошлифах до и после проведения испытаний согласно программы исследований.

Экспериментальные данные проходили обработку с помощью пакетов прикладных программ (Microsoft Excel, MATLAB, Acoustic Emission Pro v2.0).

В третьей главе представлены результаты исследований кинетики накопления повреждений при статическом деформировании, полученные на основе разработанных методик по классификации и идентификации типов источников АЭ на образцах.

На поле двухпараметрического распределения $E_{АЭ}$ - K_f при статическом деформировании были выделены области, соответствующие сигналам АЭ, зарегистрированным при излучении различными ранее установленными типами источников: дислокациями, двойниками, микро- и макротрещинами.

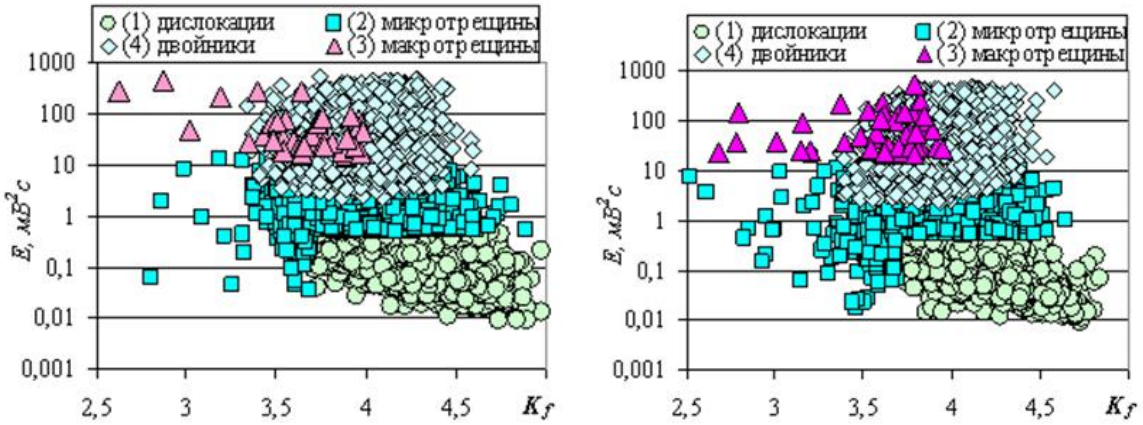


Рисунок 1 – Двухпараметрическое распределение сигналов АЭ $E_{АЭ}$ - K_f для титановых сплавов, деформированного при одноосном растяжении: а) ВТ20; б) ОТ4

Критерии разделения сигналов АЭ на типы источников легли в основу разработанной методики анализа частотно-энергетических характеристик сигналов АЭ с использованием вейвлет и Фурье спектров.

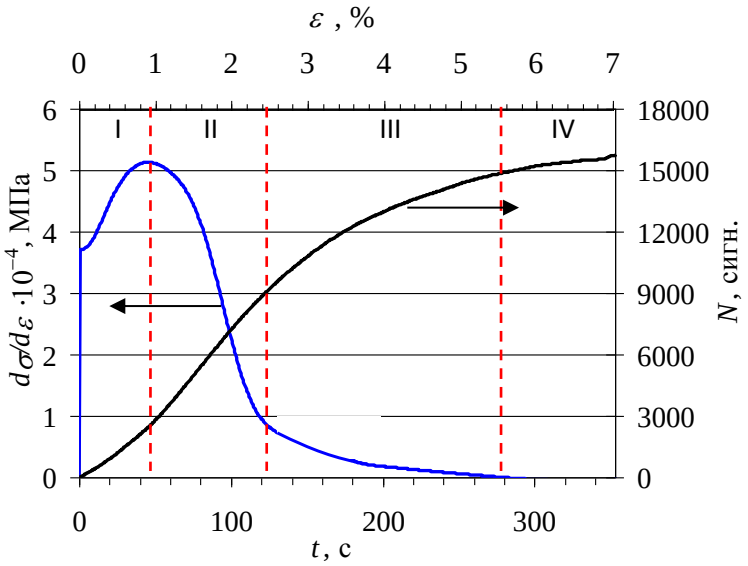
Были выявлены следующие соответствия типов источников регистрируемым параметрам АЭ: дислокационным источникам соответствуют сигналы со значением параметров АЭ $K_f > 3,7$ при $E_{АЭ} < 0,5$ мВ^{2}с,

микротрещинам – $K_f > 3,7$ при $E_{АЭ} = 0,5–20$ мВ^{2}с и $K_f < 3,7$ при $E_{АЭ} < 20$ мВ^{2}с, макротрещинам – $K_f < 3,7$ и $E_{АЭ} > 20$ мВ^{2}с (рисунок 1).

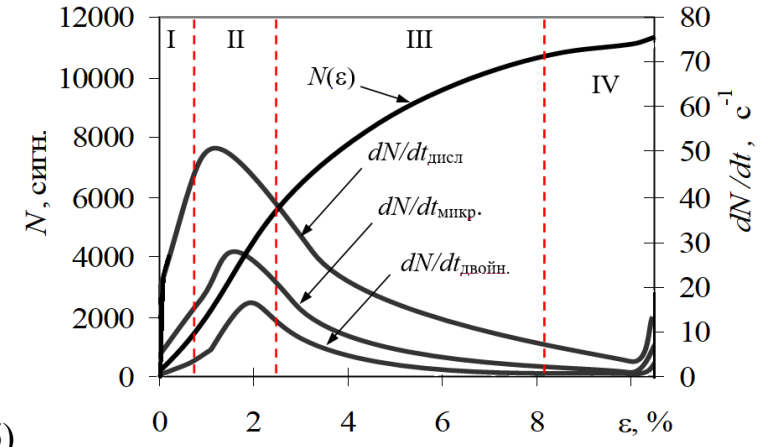
Выявление двойников было выполнено на основе вейвлет анализа и спектрально-энергетического анализа. Диапазон рассеяния сигналов АЭ, излучаемых двойниками перекрываются на двухпараметрическом распределении с сигналами, регистрируемыми от микротрещин. Поэтому область сигналов, идентифицируемых как излучаемые двойниками приведена на диаграмме $E_{АЭ}$ - K_f поверх остальных областей.

На основе полученных данных было выполнено раздельное построение интегрального накопления и активности АЭ за весь период испытания.

На рисунке 2 приведены график изменения коэффициента деформационного упрочнения с выделенными стадиями деформации (рисунок 2, а) и активность сигналов АЭ для различных видов источников АЭ (рисунок 2, б).



а)



б)

Рисунок 2 – Диаграмма нагружения и активность сигналов АЭ при деформации образца сплава ОТ4:

а) график изменения коэффициента деформационного упрочнения с выделенными стадиями деформации, б) активность сигналов АЭ для различных видов источников АЭ

По характеру изменения коэффициента деформационного упрочнения можно выделить четыре характерные стадии (рисунок 2, б), определенные как стадия упругости (I), пластической деформации (II), медленного убывания коэффициента деформационного упрочнения $d\sigma/d\varepsilon$ с малой почти неизменяющейся скоростью (III), образование шейки (IV).

Активность сигналов АЭ всех типов источников на стадии I микротекучести начинает расти с самого начала деформации (рисунок 2, б). Стадия II характеризуется началом пластической деформации и максимумом активности АЭ сигналов всех типов. Первым достигается максимум дислокационных сигналов АЭ.

Отмечена более поздняя регистрация пика активности АЭ сигналов, идентифицированных как излучаемые микротрещинами. Идентификация двойников при деформации титановых сплавов была проведена на основании классификационных признаков, соответствующих теоретическим представлениям о механизмах двойникования и определенных на основании вейвлет и Фурье анализов. Максимум активности двойников регистрируется позднее остальных видов идентифицированных дефектов. Активность АЭ на стадии деформационного упрочнения снижается (стадия III). Начальный этап локализации деформации на завершающей стадии IV продолжает монотонное снижение активности АЭ. В момент разрушения происходит повышение активности АЭ при излучении дефектами всех типов, что связано с увеличением скорости истинной деформации в локализованной зоне и развитием магистральной трещины.

При увеличении степени деформации происходит смена одного масштабного уровня деформации другим, превалирующим на данной стадии деформации. Этот процесс сопровождается изменением активности структурных элементов различного масштабного уровня: активность дислокаций сменяется повышенной активностью микро– и впоследствии макротрещин.

При циклическом деформировании образцов сплава ОТ4 аналогичным образом на поле двухпараметрического распределения $E_{АЭ}$ - K_f были выделены области, соответствующие сигналам, зарегистрированным при излучении различными ранее установленными типами источников: дислокации, двойники, микро- и макротрещинами. однако на поле двухпараметрического распределения для большинства испытанных образцов отсутствуют области, соответствующие двойникам (рисунок 3).

Проявление активности АЭ каждого из классифицированных типов источников АЭ не является стабильным на протяжении процесса накопления усталостных повреждений при циклическом нагружении образцов сплава ОТ4. На рисунке 3 приведены графики накопления сигналов АЭ, разделенных по типам источников наиболее типичного образца сплава ОТ4.

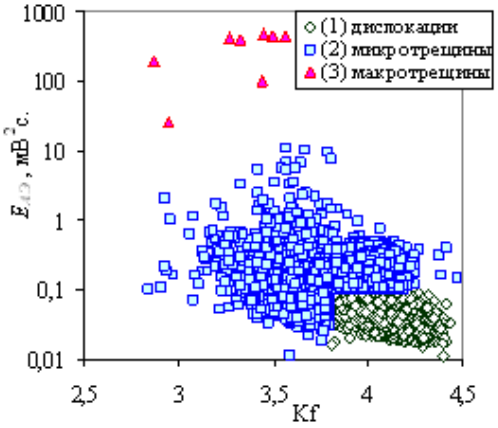


Рисунок 3 – Двухпараметрическое распределение $E_{АЭ}$ - K_f сигналов АЭ при циклической деформации изгибом образцов сплава ОТ4

На рисунке 4 приведены графики накопления сигналов АЭ, разделенных по типам источников наиболее типичного образца сплава ОТ4, испытанного при максимальном напряжении цикла 550 МПа (рисунок 4). По графику можно выделить пять стадий изменения активности АЭ.

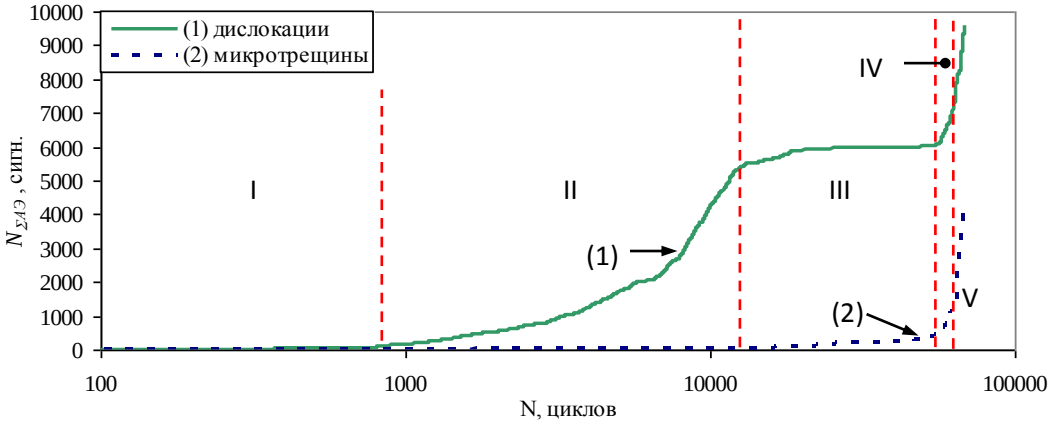


Рисунок 4 – График интегрального накопления сигналов АЭ, зарегистрированных при циклической деформации образца сплава ОТ4

По аналогии со статическим деформированием и при использовании представленной на рисунке 2 классификации стадий по изменению характера интегрального накопления сигналов АЭ было выполнено разделение процесса усталости на шесть стадий: I - циклической микротекучести, II - циклической текучести, III - циклического упрочнения, IV - развития субмикротрещин до размеров микротрещин, V - развития микротрещин до размеров макротрещин, VI -долом.

Представленное разделение процесса накопления усталости на стадии имеет устойчивую корреляцию с теорией стадийности усталости, предложенной в 1975 г. В.С. Ивановой и В.Ф. Терентьевым.

Видимое изменение микроструктуры начинается уже после нескольких тысяч циклов. На протравленных образцах становятся заметной текстура в виде расположенных вдоль направления растяжения/сжатия полос с упорядоченной

структурой на характерной для α-сплавов структуре корзинчатого плетения (рисунок 5).

При дальнейшем увеличении числа циклов нагружения скопление дефектов во всем объеме материала и достижение их максимальной концентрации в приповерхностном слое приводит к образованию на поверхности сначала микронесплошностей, а в последствии микротрещин. Первые микротрещины визуально обнаруживаются на микроструктуре некоторых образцов.

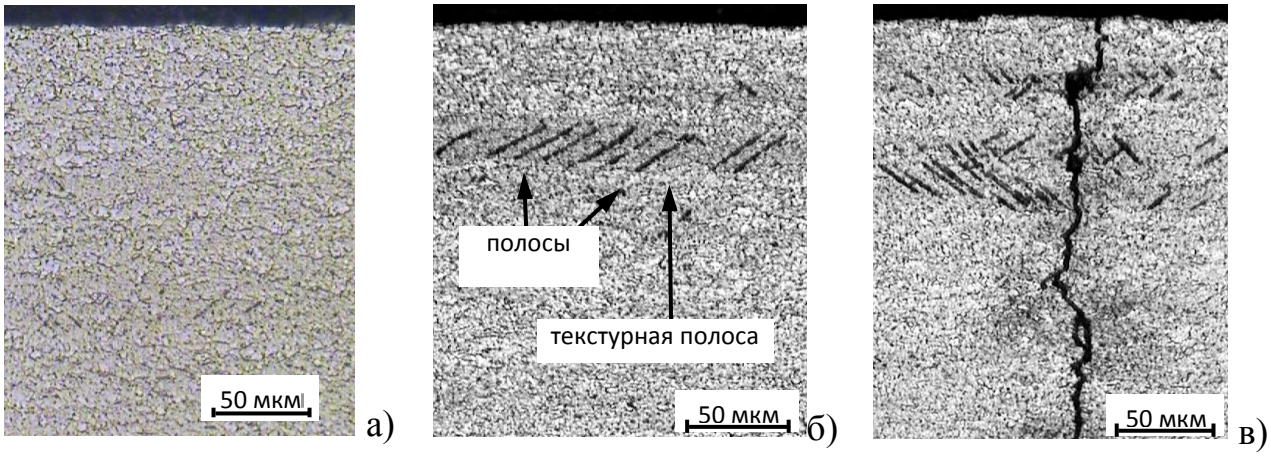


Рисунок 5 – Фотографии микроструктур, полученные в сечении перпендикулярном поверхности образцов сплава ОТ4 на различных стадиях циклической усталости: а) исходная структура, б) 20000, в) 60000 циклов

Трещины, как правило, имеют ветвящийся вид с преимущественным направлением, перпендикулярным направлению действия напряжений растяжения/сжатия. Образованные на различных стадиях усталости трещины распространяются до полос образованных полигональных текстур (рисунок 5, б), и в ряде случаев пересекают их (рисунок 5, в), проходя через скопления структурных дефектов, образовавшихся в текстурных полосах. При этом в процессе роста трещин и периодических взаимодействий их границ структурные дефекты сливаются, приводя к высокой степени деформации и разупорядоченности структуры в данных областях. Это подтверждается наличием более широких областей травления в местах прохождения трещин через текстурные полосы.

Микротвердость, измеренная на различных этапах усталости (рисунок 6), т.е. при достижении определенного, заданного программой исследований, числа циклов испытания, позволила выявить характер упрочнения/разупрочнения титанового сплава ОТ4. и сравнить его с характером изменения регистрируемых параметров АЭ.

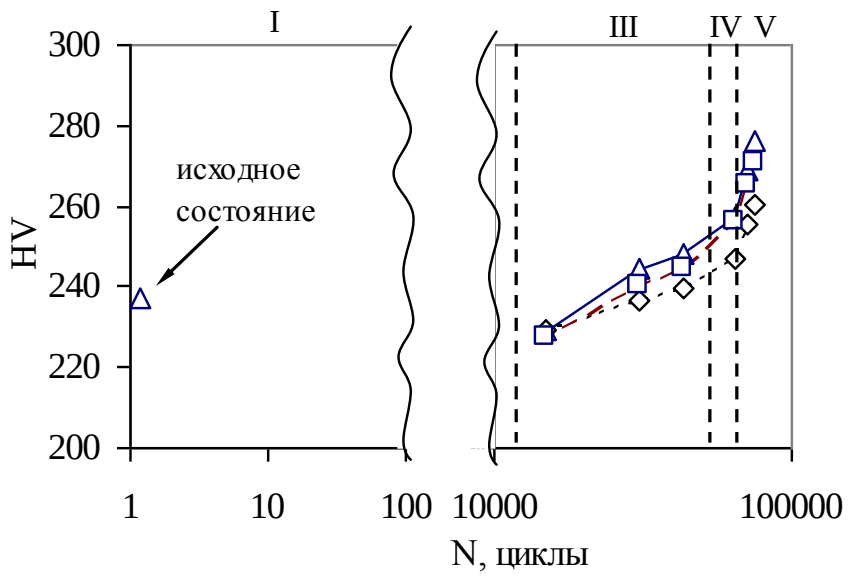


Рисунок 6 – График изменения микротвердости на разных стадиях усталости сплава ОТ4

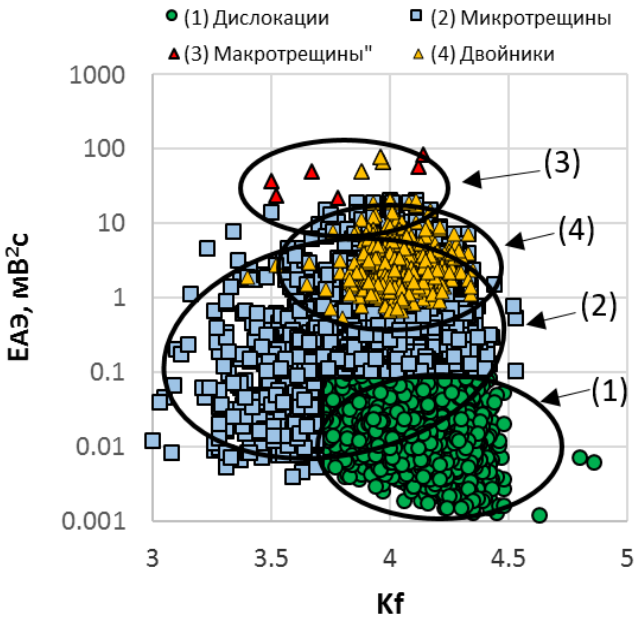
Микротвердость HV была измерена в разных областях поперечного среза образцов, доведенных до различного числа циклов. Изменение микротвердости от степени накопления усталости для разных мест его измерения имеет схожий характер. На одном из графиков приведены значения микротвердости, измеренные в местах расположения текстурных полос упорядоченной структуры, обнаруженных при микроструктурном анализе.

В четвертой главе представлены результаты исследований кинетики накопления повреждений при статических и усталостных испытаниях в титане ВТ1-0 методом акустической эмиссии (АЭ).

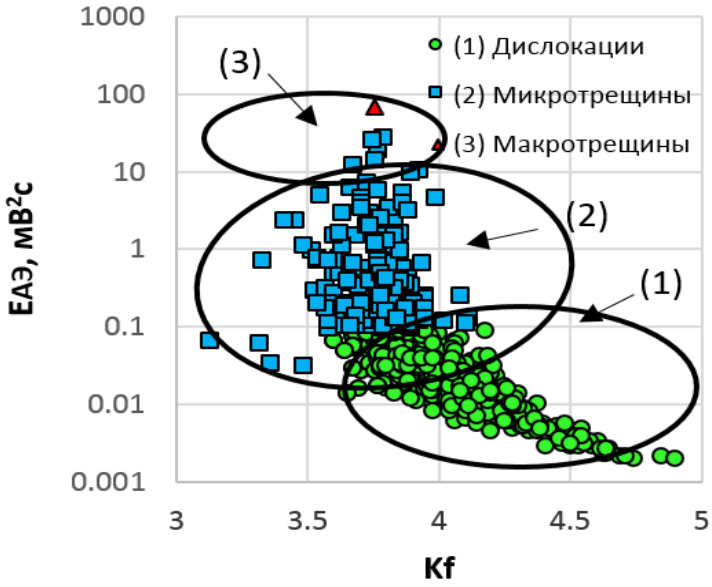
На рисунке 7 представлены графики двухпараметрического распределения сигналов АЭ, зарегистрированные в процессе статических испытаний.

На поле двухпараметрического распределения $E_{АЭ}$ - K_f при статическом деформировании были выделены области, соответствующие сигналам, зарегистрированным при излучении различными ранее установленными типами источников: дислокации, двойники, микро- и макротрещинами (рисунок 7).

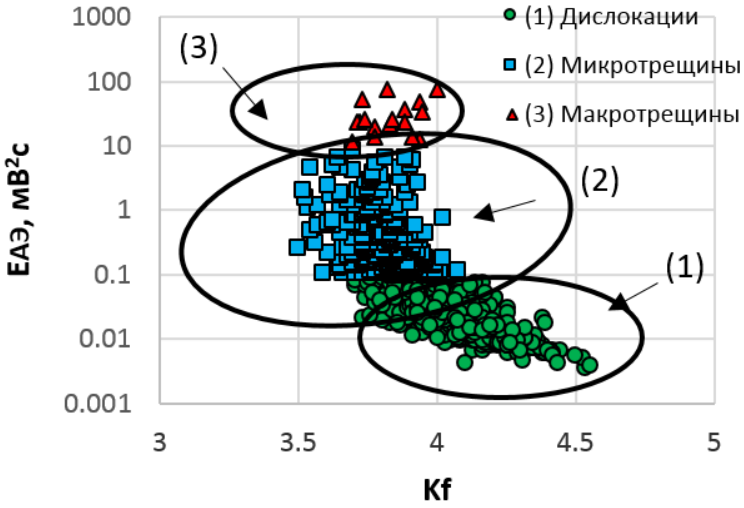
Выявление двойников было выполнено на основе вейвлет анализа и спектрально-энергетического анализа. На двухпараметрическом распределении для крупнокристаллического образца эллипс рассеяния сигналов АЭ, излучаемых двойниками перекрывается с сигналами, регистрируемыми от микротрещин. Поэтому область сигналов, излучаемых двойниками приведена на диаграмме $E_{АЭ}$ - K_f поверх остальных областей. Для большинства образцов с субмикрокристаллической и ультрамелкозернистой структурой сигналы, излучаемые двойниками зарегистрированы, не были.



а)



б)



в)

Рисунок 7 – Двухпараметрическое распределение сигналов АЭ для образцов титана ВТ1-0: а) КК, б) УМЗ, в) СМК

На основе полученных данных по аналогии с ранее примененной методикой был проведен анализ активности АЭ на различных стадиях накопления усталости после разделения сигналов на виды источников АЭ накопления повреждений. На диаграммах распределения $E_{АЭ}$-K_f при циклических испытаниях выделены три области, соответствующие различным типам источников АЭ (рисунок 8): дислокационные источники (1), двойникование (2) и микротрещины (3). Выбор границ областей был сделан на основании множественных экспериментальных исследований образцов различных материалов при статических и циклических испытаниях.

Выделенные области позволяют оценить участие различных типов зарегистрированных источников в накоплении усталостных повреждений. Наиболее широкое рассеяние значений распределения $E_{АЭ}$-K_f наблюдается для образцов с КК структурой. Это является закономерным, учитывая способ формирования структуры образцов путем неполного отжига. Во-первых, рост зерен в результате полигонизации границ при термическом отжиге приводит к образованию зерен различных размеров. Это влечет за собой неравномерный рост усталостных микро- и макротрещин. Во-вторых, отожженный материал интенсивно упрочняется при циклической деформации, формируя структуру с локальным различием свойств.

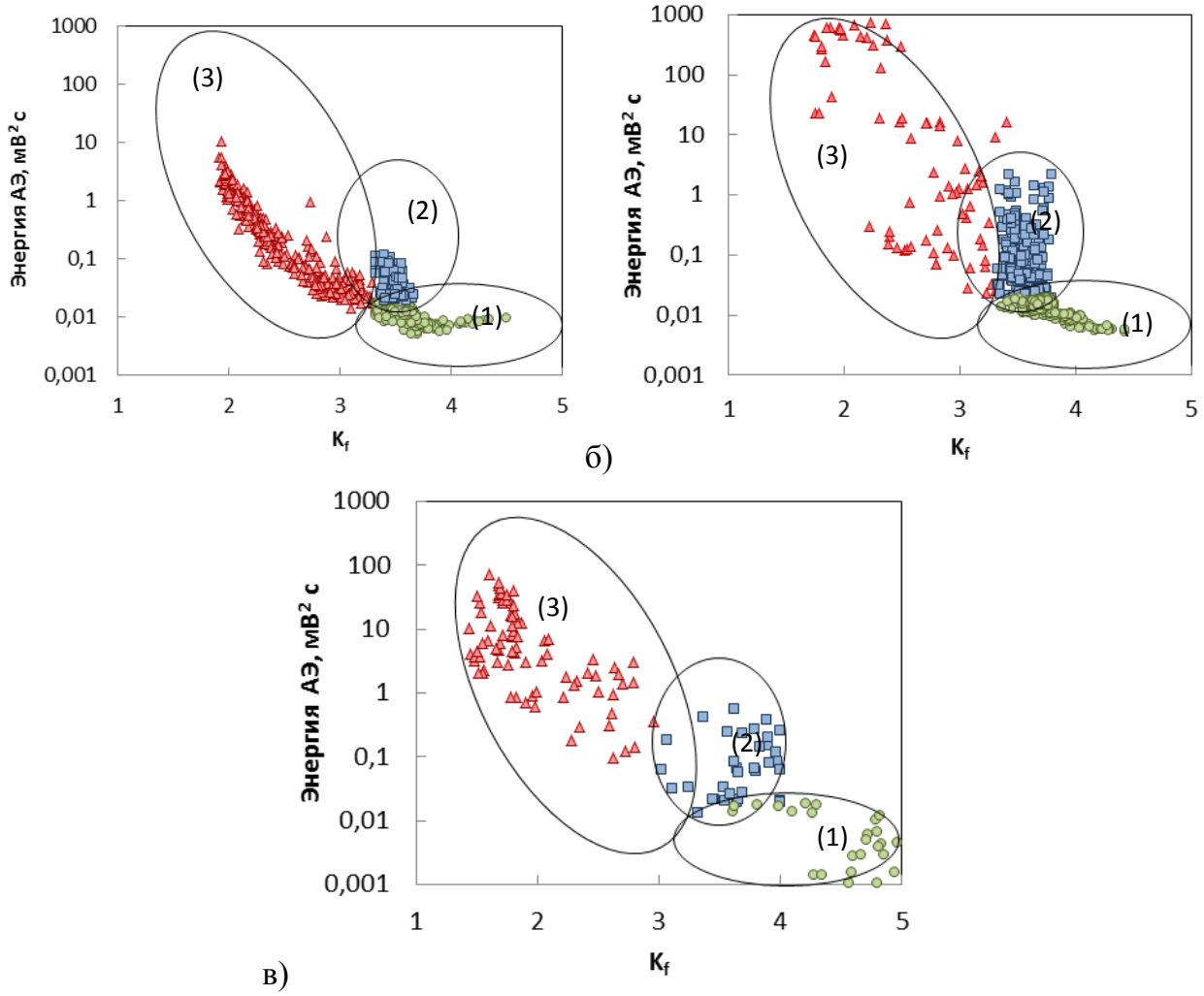
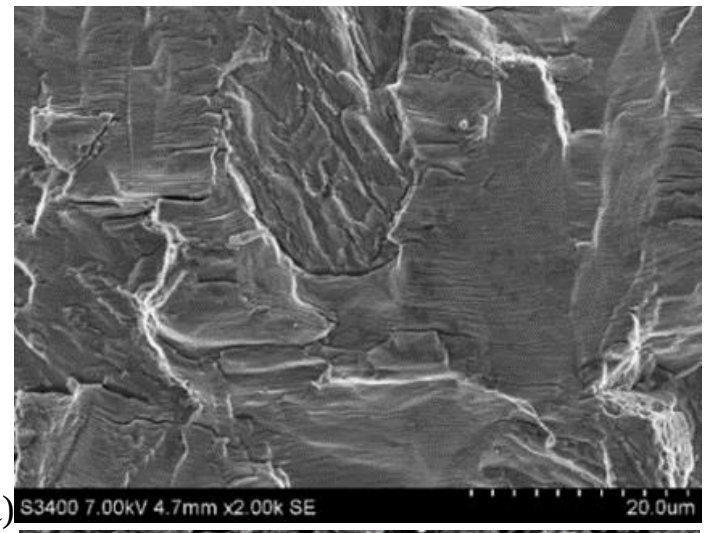
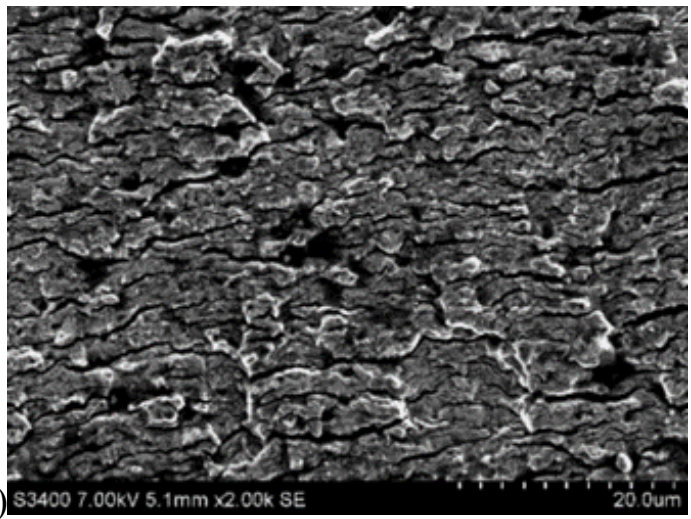


Рисунок 8 – Двухпараметрическое распределение сигналов АЭ для образцов: а) КК, б) УМЗ, в) СМК

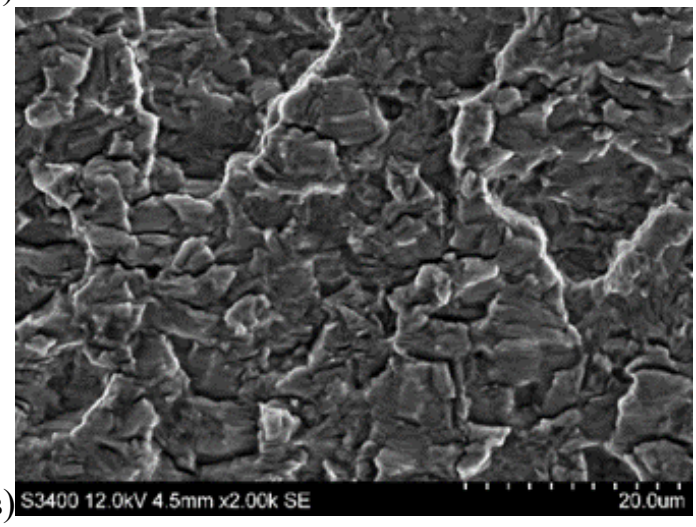
Наличие усталостных бороздок различной ширины и направлений на изломах образцов с КК структурой подтверждает неравномерность протекания деформации (рисунок 9). Микротрещины распространяются преимущественно вдоль границ зерен и имеют неравномерное ветвление. Фрактографические исследования усталостных изломов образцов, подвергнутых малоцикловым испытаниям, позволили выявить явные различия в топографии поверхностей разрушения.



а)



б)



в)

Рисунок 9 – Фотография поверхности излома: а) КК; б) УМЗ; в) СМК

Границы зерен оказывают большое влияние на характер накопления повреждений и процессы, влияющие на изменение свойств при статических и циклических нагрузках. Измельчение структуры приводит к повышению долговечности образцов в СМК состоянии по сравнению с исходной КК структурой. Но необходимо учитывать, что интенсивная пластическая деформация приводит к значительному увеличению энергии границ зерен, что ведет к облегчению образования микротрещин вследствие скопления дефектов у границ зерен. Таким образом, в исследованных материалах границы зерен являются источниками разрушения, поскольку на границах зерен зарождаются и развиваются микротрещины.

Микротвердость HV была измерена в разных областях поперечного среза образцов, доведенных до различного числа циклов (рисунок 10).

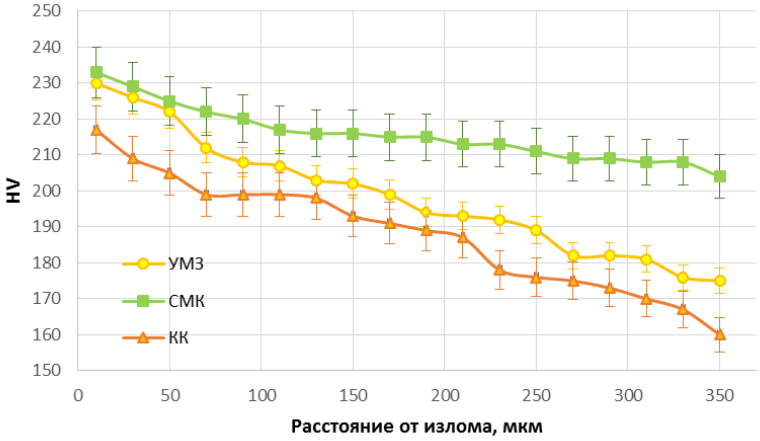
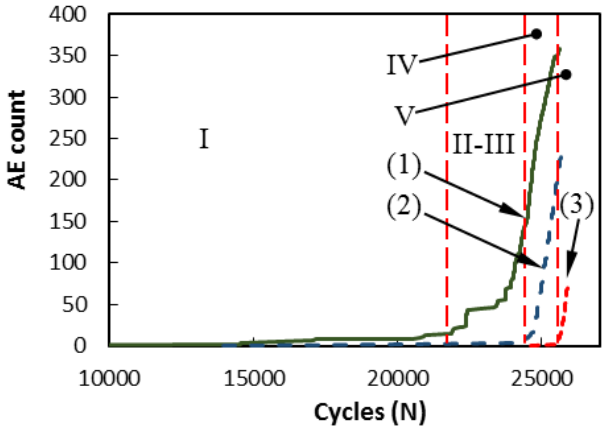


Рисунок 10 – График изменения микротвердости в разных структурных состояниях сплава ВТ1-0

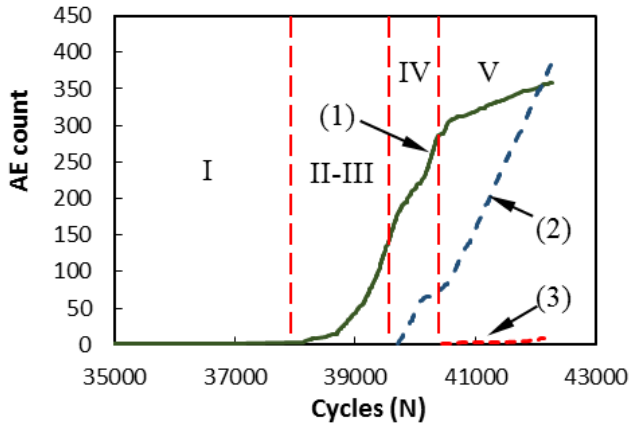
Из графика следует, что значения микротвердости уменьшалась при удалении от зоны образования магистральной трещины. На расстоянии, равноудаленном от зоны разрушения, исходная твердость образцов с различной структурой различается и согласуется с их структурным состоянием: образцам с большим размером зерна соответствуют меньшие значения микротвердости. При этом степень упрочнения, определяемая разницей микротвердости образцов вблизи зоны разрушения и на удаленном расстоянии от зоны разрушения, различается и тем выше, чем крупнее размер зерна образца.

Раздельное построение графиков суммарной АЭ по типам источников АЭ позволило выявить активность АЭ накопления усталостных повреждений на различных стадиях усталости. Разделение на стадии было выполнено на основании оценки графиков суммарной АЭ для источников различных типов. Нумерация стадий сохранена вне зависимости от их наличия. Весь период накопления усталостных повреждений включает пять стадий: I - циклической микротекучести, II - циклической текучести, III циклического упрочнения, IV зарождения и развития субмикротрещин до размеров микротрещин, V - развития микротрещин до размеров макротрещин и стадия долома.

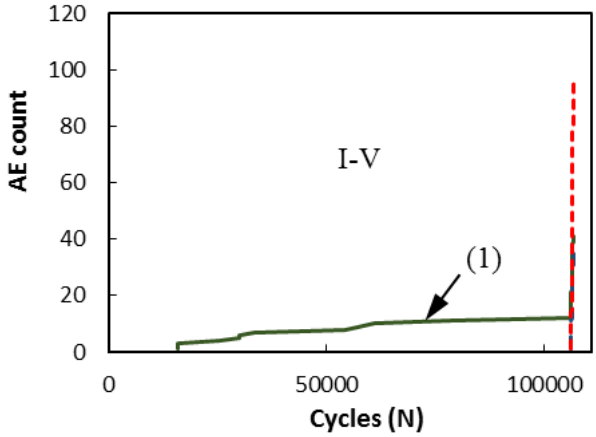
Все стадии, кроме стадии долома, присутствуют на графиках накопления суммарной АЭ (рисунок 11).



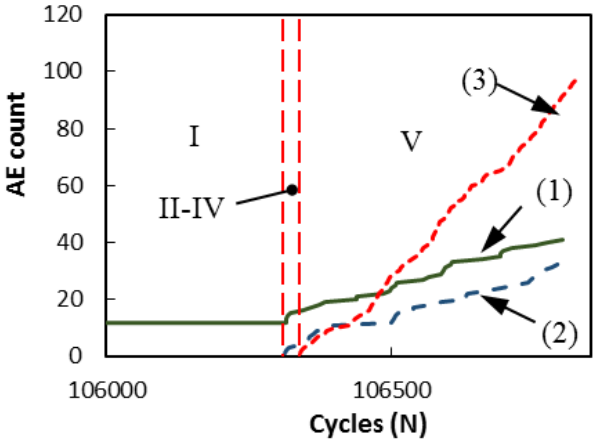
а)



б)



в)



г)

Рисунок 11 – Графики накопления суммарной АЭ для образцов с различной структурой: а) КК, б) УМЗ, в) и г) СМК

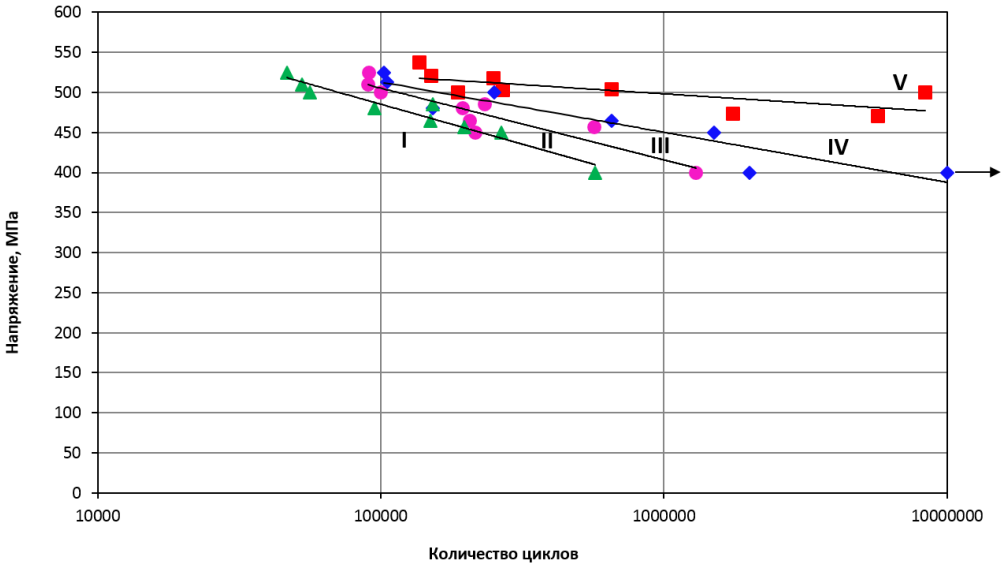
Эти стадии можно наблюдать на образцах с отожженной КК структурой. Стадия долома как правило короткая и составляет несколько десятков циклов. Стадии I-III относятся к инкубационному периоду. Различить их можно по активности сигналов дислокационного типа. Стадия циклической микротекучести I характеризуется незначительной активностью АЭ дислокационного типа. Переход к стадии II сопровождается повышением активности АЭ сигналов дислокационного типа в связи с наступлением общей текучести материала по всему объему нагруженных участков образца. Необходимо отметить, что переходы от стадии к стадии для деформации изгибом являются более протяженными и, как правило, перекрываются в связи с неравномерностью напряжений по сечению образца. По этой причине стадии циклической текучести и циклического упрочнения по активности АЭ не всегда различимы. При переходе от стадии текучести III, завершающей инкубационный период, к стадии IV активность АЭ сигналов дислокационного типа не снижается или снижается не значительно. Начало стадии IV всегда характеризуется повышением активности сигналов АЭ типа, излучаемых микротрещинами.

Большинство сигналов АЭ, отнесенных к типу (3), регистрируется на стадии V. Однако, зарождение магистральной трещины наступает раньше. Основную часть сигналов АЭ при ее зарождении составляют сигналы, излучаемые областями микропластической деформации и микротрещинами. Однако, отсутствие сигналов АЭ на ранней стадии зарождения магистральной трещины связано с низким значением их энергии в связи с малыми размерами излучающих источников АЭ. Сигналы АЭ с высокими значениями энергии начинают обнаруживаться лишь на стадии предразрушения и разрушения.

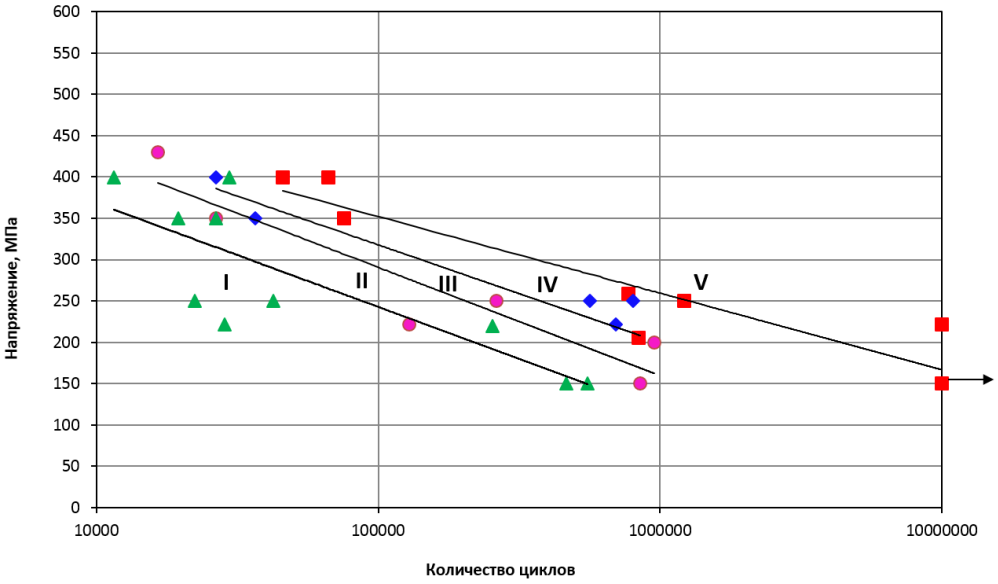
В результате статистической обработки усталостных испытаний образцов была построена диаграмма усталости для образцов с различным исходным структурным состоянием (рисунок 12).

Анализ обобщенных диаграмм усталости на базе 10^7 циклов показал, что положение стадий I и II для образцов с УМЗ и КК структурами практически совпадает. Это объясняется тем, что неполный отжиг образцов с УМЗ структурой, приведший к частичному восстановлению структуры после РКУП, обеспечил диссипацию энергии на стадиях циклической микротекучести и текучести, определяемой подвижностью дислокаций в той же мере, что и для образцов с КК структурой, сформированной полным отжигом.

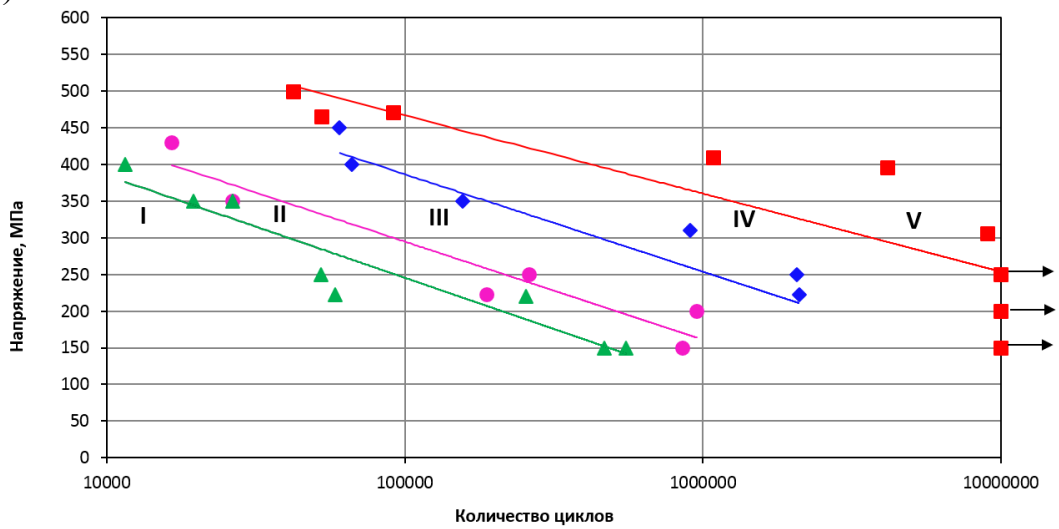
Однако, неполный отжиг позволил частично восстановить структуру и подвижность дислокаций лишь в областях с незначительной разориентировкой кристаллов. Фрагментированность же структуры сохранилась и привела к более раннему моменту образования микротрещин, смещающих границы стадий III и IV в область меньших значений циклов.



а)



б)



в)

Рисунок 12 – Обобщенная диаграмма усталости для образцов с различной структурой: а) СМК, б) УМЗ, в) КК

Измельчение структуры в процессе РКУП снижает подвижность дислокаций на I-III стадиях усталости, что приводит к смещению положения

стадий в область больших значений циклов. Это сдерживает в образцах с СМК структурой момент перехода на завершающие стадии образования и роста микро- и макротрещин. Сближение стадий относительно друг друга и смещение конечной стадии разрушения в строну увеличения долговечности характеризует СМК структуру. Однако, сближение соседних стадий снижает их различимость и возможность раннего выявления приближающегося разрушения.

Было установлено, что на базе испытаний 10^7 циклов титан с СМК структурой имеет максимальную долговечность и наибольший предел усталости (400 МПа). Наименьшие значения долговечности и предела усталости были отмечены для титана ВТ1-0 с УМЗ структурой (220 МПа). Долговечность на базе 10^7 циклов для титана ВТ1-0 с КК структурой составила 300 МПа. Существенное снижение долговечности УМЗ по отношению к КК и СМК структуре связано с особенностью ее формирования. По всей видимости, формирование дефектов в кристаллической структуре, возникших в результате измельчения структуры при равноканальном угловом прессовании и неполном отжиге, привело к образованию структурных фрагментов с неравномерно диссипативной структурой, содержащей в себе субструктурные элементы размером 1-2 мкм. Полный отжиг титана с образованием КК структуры привел к рекристаллизации с восстановлением пластичности. Восстановленная вязкость структуры привела к формированию полного цикла сопротивления разрушению в условиях накопления усталостных повреждений. Таким образом, неполное структурное восстановление при отжиге может привести к образованию неравномерной дефектной структуры и снижению предела выносливости титановых сплавов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По активности излучения различных типов источников сигналов АЭ (дислокационные, микротрещины) было выявлено пять стадий накопления усталостных повреждений в образцах титановых сплавов: стадия циклической микротекучести I, характеризующаяся незначительной активностью АЭ всех типов источников; стадия циклической текучести (II), сопровождающаяся повышением активности сигналов АЭ дислокационного типа; стадия (III), на которой происходит дальнейшее повышение плотности дислокаций, приводящее к снижению активности АЭ дислокационного типа; на стадии IV активность АЭ сигналов дислокационного типа не снижается или снижается не значительно, начало стадии IV характеризуется повышением активности сигналов АЭ типа, излучаемых микротрещинами; на стадии V наблюдается повышение активности сигналов АЭ, как излучаемых микротрещинами, так и сигналов дислокационного типа.

2. На основании проведенной классификации сигналов АЭ была разработана методика идентификации типов источников АЭ на излучаемые при образовании и развитии микро- и макротрещин, генерации и движении дислокаций и пластической деформации с образованием двойников.

3. Установлено, что периоды накопления суммарной АЭ различных типов источников сигналов АЭ при испытании на изгиб всегда перекрываются. В

основном это связано с неравномерностью напряжений по сечению образца и последовательным послойным смещением периода наступления и окончания каждой из стадий.

4. Установлено, что период начала регистрации сигналов АЭ, излучаемых при образовании двойников, существенно зависит от размеров зерен и находится ранее периода образования магистральной трещины только для образцов титана с крупнокристаллической структурой. Образование двойников в образцах с ультрамелкозернистой и субмикрокристаллической структурами, регистрируемое по сигналам АЭ, фиксируется в зоне образования магистральной трещины в период ее активного роста ввиду высокой плотности дефектов и стесненности зеренной деформации.

5. Установлено, что существенное снижение долговечности УМЗ по отношению к КК и СМК структуре связана с особенностью ее формирования. Неполный отжиг может приводить к неравномерному распределению дефектов и образованию фрагментов с неравномерной диссипативной структурой.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

1. Башков О.В., Попкова А.А., Башкова Т.И., Шаркеев Ю.П. Исследование стадийности накопления усталостных повреждений в структурированных образцах титана ВТ1-0 методом акустической эмиссии// Цветные металлы. 2017. № 9. С. 84-90.

2. Башков О.В., Башкова Т.И., Ромашко Р.В., Попкова А.А. Построение обобщенной диаграммы усталости алюминиевых сплавов с использованием метода акустической эмиссии// Цветные металлы. 2016. № 4 (880). С. 58-64.

3. Башков О.В., Ким В.А., Евстигнеев А.И., Попкова А.А., Башкова Т.И. Исследование кинетики накопления усталостных повреждений в титановом сплаве методом акустической эмиссии // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 4. С. 41-47.

Публикации в зарубежных и переводных рецензируемых изданиях (Web of Science, Scopus).

4. Bashkov O.V., Popkova A.A., Gadoev G.A., Bashkova T.I., Solovev D. B. Construction of a generalized fatigue diagram of metallic materials// Materials Science Forum Vol. 945, pp 563-568.

5. Bashkov, O.V., Sharkeev, Y.P., Panin, S.V., Kim V. A., Bashkova T. I., Popkova A. A., Eroshenko, A.Y., Tolmachev, A.I. Fatigue failure stages of VT1-0 titanium in different structural states. Study by acoustic emission method// AIP Conference Proceedings 2016, P. 020013-1-020013-5.

6. Bashkov O.V., Bashkova T.I., Popkova A.A. The Use of Acoustic Emission for the Construction of a Generalized Fatigue Diagram of Metals and Alloys// Springer New York Heidelberg Dordrecht London. 2015. V. 158. Chap. 26. Pp. 283-291, (http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4939-1239-1_26).

7. Bashkov O.V., Panin S.V., Bashkova T.I., Byakov A.V., Popkova A.A., Shakirov I.V. Acoustic emission features at deformation of aluminum alloys with

different strain behavior types// AIP Conference Proceedings (Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures), 1683, 020023 (2015), pp. 020023-1–020023-4.

8. Bashkov O.V., Bashkova T.I., Popkova A.A., Hu M. Study of the kinetics of fatigue fracture of titanium alloys by acoustic emission// Modern materials and technologies. 2013. No 1. P. 20-25.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

9. Башков, О.В. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016610266 «Расчет параметров сигналов и локации источников акустической эмиссии по серии экспериментов» О.В. Башков, А.А. Попкова, Т.И. Башкова, Е.Г. Иринкова – Заявка № 2015661127; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 11.01.2016. – М., 2016.

Публикации в других изданиях.

10. Башков О.В., Попкова А.А., Шаркеев Ю.П., Панин С.В., Ерошенко А.Ю. Исследование накопления усталости в титановых сплавах методом акустической эмиссии // Международная конференция Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций - 13 октября 2017 года, Томск, Россия.

11. Башков О.В., Шаркеев Ю.П., Панин С.В., Ким В.А., Башкова Т.И., Попкова А.А., Ерошенко А.Ю., Толмачев А.И. Стадийность усталостного разрушения титана ВТ1-0 в различном структурном состоянии и ее исследование методом акустической эмиссии // Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», Томск, 19-23 сентября 2016 года.

12. Bashkov O.V., Popkova A.A. 1, Sharkeev Y.P., Bashkova T.I. Acoustic emission during fatigue damage of nanostructured titanium // Czech Society for Nondestructive Testing 32nd European Conference on Acoustic Emission Testing Prague, Czech Republic, September 07-09, 2016.

13. Башков О.В., Шаркеев Ю.П., Попкова А.А., Ким В.А. Исследование кинетики накопления усталостных повреждений в титане ВТ1-0 методом акустической эмиссии // Международный симпозиум «Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы» Комсомольск-на-Амуре, 12-16 мая 2015 г.

14. Башков О.В., Шаркеев Ю.П., Попкова А.А. Исследование кинетики накопления повреждений в титане ВТ1-0 в различном структурном состоянии методом акустической эмиссии // Сборник трудов конференции "VII-я Евразийская научно-практическая конференция "Прочность неоднородных структур" ПРОСТ-2014, 22-24 апреля 2014 г.

15. Bashkov O.V., Bashkova T.I., Popkova A.A., Hu M. Study of the kinetics of fatigue fracture of titanium alloys by acoustic emission// Advanced materials and processing technology. 2013. No 1. P. 20-25.

16. Башков О.В., Попкова А.А. Иерархия структурных уровней при накоплении усталости в титановых сплавах // Сборник международной конференции «Иерархические организованные системы живой и неживой природы», Томск, 9-13 сентября 2013. – С. 87-91.

17. Bashkov O.V., Bashkova T.I., Popkova A.A. Stages of bending fatigue of titanium alloys and their identification by acoustic emission // 30th European Conference on Acoustic Emission Testing. 7th International Conference on Acoustic Emission. Испания, Гранада. 12-15 сентября 2012.

Подписано в печать 25.03.2019.
Формат 60x84 1/16. Бумага писчая. Ризограф RISO EZ 570E.
Усл. печ. 1,16 л. Уч. изд. 1,10 л. Тираж 100 экз. Заказ 29614.

Полиграфическая лаборатория Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
Комсомольского-на-Амуре государственного университета
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.