На правах рукописи

Майрамбекова Айкол Майрамбековна

УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА В УСЛОВИЯХ ГИГАЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ БИОИНЕРТНЫХ СПЛАВОВ С УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ, СФОРМИРОВАННОЙ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Шаркеев Юрий Петрович

Официальные оппоненты:

Иванов Юрий Федорович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория плазменной эмиссионной электроники, главный научный сотрудник;

Иванова Оксана Владимировна, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, научно-исследовательский отдел структурной макрокинетики, старший научный сотрудник;

Пономарев Сергей Васильевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», отдел механики деформируемого твердого тела Научно-исследовательского института прикладной математики и механики, заведующий отделом.

Защита состоится 7 октября 2022 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.01.02», созданного на базе физико-технического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус № 2 ТГУ, аудитория 428).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/c2fe5cc3-88de-4aff-8670-bcb75e505b08

Автореферат разослан « ____ » августа 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Усанина Анна Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. В современных условиях эксплуатации машин, конструкций и изделий, в том числе и медицинских имплантатов различного назначения, проблемы повышения прочности, ресурса, живучести и долговечности материалов выдвигаются в число основных задач. Титан и его сплавы, циркониевые сплавы благодаря уникальному сочетанию физико-механических, биологических и коррозионностойких свойств находят применение в качестве медицинских имплантатов и в различных отраслях промышленности в качестве конструкционных материалов.

В последние десятилетия активно ведутся исследования усталостных свойств металлов и сплавов в режимах много- и гигациклового нагружения. Заметный вклад в исследования усталостных свойств внесены зарубежными и отечественными учеными (C. Bathias, Z. Wang, H. Mughrabi, T. Sakai, Y. Murakami, T. Naito, T. Palin-Luc, А. Шанявский, Л. Ботвина, В. И. Бетехтин, О.Б. Наймарк). Испытания образцов из металлических материалов на базе 10^8-10^9 и более циклов нагружения показали, что в этом диапазоне наблюдается снижение предела усталости. Кривая гигацикловой усталости имеет ступеньку в области обычного предела усталости. Это означает, что концепция о существовании бесконечной долговечности при напряжениях ниже предела усталости неверна, а оценка предела усталости на базе 10^6 циклов не гарантирует предсказанной долговечности, что может привести к разрушению и нежелательным аварийным последствиям.

С другой стороны, большой интерес к режиму гигацикловой усталости связан с возможностями повышения усталостного ресурса вследствие создания наноструктурного (НС) и/или ультрамелкозернистого (УМЗ) состояния в металлах и сплавах методами интенсивной пластической деформации (ИПД), которые позволяют получить сплавы с варьируемой структурой, обеспечивающей высокие механические свойства (пределы текучести и прочности, твердость и микротвердость, сопротивление к усталостному разрушению, циклическая долговечность и др.). Известно, что формирование НС и УМЗ состояний в металлах эффективно повышает предел выносливости в области многоцикловой усталости (более 10^6 циклов). В настоящее время актуальными являются исследования, посвященные влиянию НС и/или УМЗ состояния на процессы разрушения материалов при циклических нагрузках, анализу кривой усталости и поверхностей разрушения в широком диапазоне числа циклов нагружения, не только для многоцикловой усталости, но и для гигацикловой усталости.

В связи с этим актуальной является разработка материалов с УМЗ структурой для медицины и техники с улучшенным комплексом функциональных характеристик. В процессе циклического нагружения современных конструкционных металлических материалов сопровождается накоплением дефектов и интенсивным выделением тепла на поверхности материала, которые невозможно обнаружить до конца срока службы конструкции. Это привело к появлению новых методов, основанных на применении ультразвуковой резонансной нагружающей машины, инфракрасной камеры высокого разрешения, интерферометра–профилометра и т.д. Также наряду с традиционными методами оценки повреждений на поверхностях разрушения актуальным является количественный фрактальный анализ, основанный на концепции масштабной инвариантности рельефа поверхности, связанной с дефектами структуры.

Вопросы, связанные с оценкой усталостной прочности, анализом закономерностей преобразования и накопления энергии, а также с выявлением механизмов разрушения в процессе гигациклового нагружения перспективных биоинертных сплавов на основе титана, ниобия, циркония в УМЗ состоянии, остаются до настоящего времени недостаточно изученными и требуют детального исследования и анализа.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы – установление влияния деформированного состояния с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученной при интенсивной пластической деформации, на усталостные свойства биоинертных сплавах ВТ1–0, Zr–1 мас. % Nb и Ti–45 мас. % Nb и выявление особенностей их разрушения при гигацикловом режиме нагружения.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие **задачи**.

1. Выполнить усталостные испытания в режиме гигациклового нагружения образцов сплавов ВТ1–0, Zr–1 мас. % Nb и Ti-45 мас. % Nb в УМЗ состоянии и в крупнокристаллическом (КК) недеформированном состоянии с низкой плотностью дефектов для определения влияния УМЗ структуры на усталостную прочность и усталостную долговечность.

2. Исследовать в процессе циклического нагружения эволюцию температурного поля на поверхности образцов сплавов ВТ1–0, Zr–1 мас. % Nb и Ti-45 мас. % Nb в УМЗ состоянии и в КК недеформированном состоянии.

3. Провести сравнительный качественный анализ морфологии поверхностей разрушения образцов сплавов ВТ1–0, Zr–1 мас. % Nb и Ti-45 мас. % Nb с УМЗ структурой и в КК состоянии, и количественный анализ с УМЗ структурой исследуемых образцов при гигацикловой усталости, а также исследовать микроструктуру в приповерхностных слоях разрушенных образцов.

4. Определить накопление необратимых усталостных повреждений на примере сплава Ti-45 мас. % Nb с УМЗ структурой и в КК состоянии в гигацикловом нагружении при измерении амплитуды второй гармоники свободного торца образца по методике анализа нелинейных колебаний.

Научная новизна исследования заключается в следующем.

1. Впервые установленное увеличение усталостной прочности и циклической долговечности сплавов ВТ1-0, Zr-1 мас. % Nb и Ti-45 мас. % Nb с УМЗ структурой при гигацикловых режимах нагружения (10^9 циклов и более).

2. Обнаруженное существенное влияние на усталостную прочность и циклическую долговечность сплавов ВТ1–0, Zr–1 мас. % Nb и Ti–45мас. % Nb с УМЗ структурой и в КК недеформированном состоянии процессов зарождения и распространении очага тепловыделения при циклическом нагружении.

3. Впервые экспериментально определен с применением метода Ризитано–Люонга предел усталости сплава Ti-45 мас. % Nb. Показано, что величина предела усталости для сплава Ti-45 мас. % Nb в КК состоянии - 180 МПа, а у сплава в УМЗ структурой – 235 МПа.

4. Впервые определены на основе фрактального анализа рельефа поверхности разрушения образцов сплавов ВТ1-0, Zr-1 мас. % Nb и Ti-45 мас. % Nb с УМЗ структурой значения масштабного инварианта, показателя Херста, и соответствующие им масштабы, характеризующие развитие усталостного разрушения, что позволило выявить на поверхности разрушения области зарождения и распространения трещины в режиме гигацикловой усталости.

5. Установлены стадии зарождения и роста усталостной трещины в сплаве Ti-45 мас. % Nb с УМЗ структурой и КК недеформированном состоянии при гигацикловом нагружении. С применением методики «in-situ» и проведенным анализом нелинейных проявлений сигнала обратной связи в замкнутой системе ультразвуковой усталостной установки определены закономерности накопления необратимых усталостных повреждений.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты вносят вклад в расширение научных знаний о закономерностях усталостного поведения и разрушения в режиме гигациклового нагружения сплавов ВТ1-0, Zr-1 мас. % Nb и Ti-45 мас. % Nb с УМЗ структурой, сформированной интенсивной пластической деформацией. Полученные новые экспериментальные данные могут быть применены для оценки усталостной прочности и прогнозирования циклической долговечности; для получения информации о процессах

зарождения и распространения усталостных трещин в режиме реального времени; качественного и количественного анализа морфологии поверхностей разрушения на основе показателя Херста и измерения профиля поверхности 2D- и 3D-карт рельефа и определения накопления необратимых усталостных повреждений по методике «in-situ».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использованы экспериментальные методы механики деформируемого твердого тела: определение твердости; испытания на одноосное растяжение образцов сплавов ВТ1-0, Zr-1 мас. % Nb и Ti-45 мас. % Nb; измерение модуля упругости; испытания в режиме гигациклового нагружения; исследование процесса диссипации энергии при циклическом нагружении в различных структурных состояниях методом инфракрасной термографии; измерение амплитуды второй гармоники на ультразвуковой резонансной нагружающей машине. Структура и морфология исследуемых сплавов исследовалась с использованием методов оптической, растровой электронной микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и компьютерной томографии.

Положения, выносимые на защиту.

1. Сформированное в сплавах ВТ1–0, Zr–1 мас. % Nb и Ti–45 мас. % Nb деформированное состояние с УМЗ структурой и структурно-фазовое состояние определяют увеличение предела усталостной прочности при циклическом нагружении в гигацикловой области в 1,6 раза для ВТ1–0, в 1,7 раза для сплава Zr–1 мас. % Nb и в 1,5 раза для сплава Ti-45 мас. % Nb по сравнению со сплавами в КК состоянии.

2. Новые научные результаты об эволюции температурных полей образцов биоинертных сплавов ВТ1–0, Zr–1 мас. % Nb и Ti–45 мас. % Nb с УМЗ структурой и в КК недеформированном состоянии в условиях высокочастотного циклическом нагружения, показывающие, что зона диссипации энергии охватывает значительный объем образца с УМЗ структурой в процессе циклического деформирования, тогда как в случае КК состоянии рост тепловой энергии имеет локализованный характер для образцов ВТ1–0 и Zr–1 мас. % Nb. В сплаве Ti-45 мас. % Nb с УМЗ структурой и в КК состоянии очаги диссипации энергии по размерам отличаются незначительно, что обусловлено наличием многофазного состояния.

3. Результаты количественного анализа морфологии поверхностей разрушения образцов сплавов ВТ1–0, Zr–1 мас. % Nb и Ti–45 мас. % Nb с УМЗ структурой, что позволило выявить на поверхности разрушения области зарождения и распространения трещины с учетом масштабно-инвариатных характеристик рельефа поверхности разрушения в режиме гигацикловой усталости.

4. Данные о закономерностях накопления дефектов в сплавах ВТ1–0, Zr–1 мас. % Nb и Ti–45 мас. % Nb в режиме гигацикловой усталости, включая данные о тонкой структуре указанных сплавов в КК и УМЗ состояниях в зоне разрушения.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается использованием современного и сертифицированного оборудования, лицензионными программными продуктами для обработки экспериментальных данных, экспериментально реализованными методиками и компьютерными программами для испытаний на гигацикловую усталость, статистическими методами обработки результатов, соответствующими требованиям ГОСТ и международным стандартам, согласием с результатами, имеющимися в научно-технической литературе по данной проблеме.

Личный вклад автора заключается в непосредственном ее участии на всех этапах исследований, обсуждении и постановке цели и задач совместно с научным руководителем, выборе и обосновании направления исследования по материалам анализа литературы, подготовке образцов и проведении экспериментов, исследовании структуры и фазового состава биоинертных сплавов, в обработке полученных результатов и сопоставлении их с литературными данными, формулировании выводов и положений, выносимых на защиту, написании статей в соавторстве по теме диссертационной работы.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на следующих международных и всероссийских конференциях: Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Современные технологии и материалы новых поколений» (г. Томск, 2017), VII, VIII и IX Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (г. Томск, 2017, 2018, 2019), Открытая школа конференции стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы» (г. Уфа, 2018), XVI Российская научно студенческая конференция «Физика твердого тела» (г. Томск, 2018), Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» и «Химия нефти и газа» в рамках Международного симпозиума «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций» (г. Томск, 2018, 2019), XVI и XVII международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2019, 2020), 25 всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (г. Симферополь, 2019), VIII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (г. Москва, 2019), Международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (г. Томск, 2020), XIV Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2020).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 26-ти работах, в том числе 5 статей опубликованы в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 3 статьи в российских научных журналах индексируемых в базе данных Scopus, 1 статья в российском журнале, переводная версия которого индексируется в базе данных Web of Science, 1 статья в зарубежном научном журнале, индексируемом в базе данных Scopus), 5 статей в сборниках материалов конференций, индексируемых в базе данных Scopus, 2 главы - в монографиях, 14 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских конференций.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ мол_нр № 17-32-50163 (2017–2018 гг.) и Государственного задания ИФПМ СО РАН № III.23.2.2 (2013-2021 гг.).

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка использованной литературы, содержащего 138 источников. Работа представлена на 141 странице, содержит 74 рисунка и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена и обоснована актуальность исследования, результаты которого представлены в работе, сформулированы цели и задачи научной работы, показана научная новизна, разработанность темы исследования, теоретическая и практическая значимости работы, достоверность полученных результатов, методология и методы исследования, перечислены основные результаты работы, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложен результаты анализа литературных данных, посвященных теме исследования. Представлен обзор основных результатов, полученных ранее по усталостному разрушению металлов и сплавов, рассмотрены виды циклов нагружения, кривые усталости, основные этапы усталостного нагружения и механизмы возникновения и распространения усталостных трещин. Проанализированы экспериментальные результаты по влиянию размера зерна на много- и гигацикловую усталость, и особенностям усталостного разрушения металлических сплавов. Рассмотрены современные методы мониторинга усталостных повреждений, накопления энергии, прогнозирования

долговечности материалов и количественной оценки поверхностей разрушения в терминах масштабного инварианта (показателя Херста). Обоснована перспективность способа повышения физико-механических и усталостных свойств материалов за счет формирования в них НС и /или УМЗ состояния методами ИПД. Показана недостаточная изученность влияния УМЗ состояния в биоинертных сплавах на основе титана, ниобия, циркония на усталостные свойства при гигацикловом режиме нагружения, на диссипацию и накопление энергии и особенности механизмов разрушения.

Во второй главе описаны используемые материалы и методики экспериментальных исследований. Исследования были проведены на оборудовании ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН, г. Томск; Томского регионального центра коллективного пользования научным оборудованием, ТГУ, г. Томск; Университета Дуйсбурга-Эссена, (г. Эссен, Германия); ЦКП «Материаловедение» СибГИУ, г. Новокузнецк, и ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь. Микроструктурные исследования, определение фазового состава и морфологии поверхностей разрушения выполнены с использованием оптической микроскопии (микроскопы Altami MET 1 MT и AXIOVERT -200 MAT), растровой электронной микроскопии (РЭМ) (микроскоп LEO EVO 50) с приставкой для энергодисперсионного микроанализа (INCA Energy-250), дифрактометров (ДРОН-2, ADVANCED D8 Bruker) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (микроскоп JEOL JEM-2100). Тонкие фольги для ПЭМ исследований готовили методом ионного утонения.

В качестве материалов использовали титан марки ВТ1–0 (Ti), сплавы Zr–1 мас. % Nb (Э110, Zr–1Nb) и Ti-45 мас. % Nb (Ti–45Nb) с УМЗ структурой и в КК состоянии. УМЗ состояние исследуемых сплавов получено в ИФПМ СО РАН, в лаборатории физики наноструктурных биокомпозитов коллективом под руководством Шаркеева Ю.П., с помощью комбинированного двухэтапного метода ИПД, состоящего из многократного abc-прессования и многоходовой прокатки в ручьевых валках с последующими отжигами.

Для формирования КК состояния в исследуемых сплавах был применен отжиг в вакууме УМЗ образцов: ВТ1–0 и Ti–45Nb - при температуре 800 °С в течение 1-го часа, Zr–1Nb – при 580 °С в течение 3-х часов[1, 2]. Микроструктура ВТ1–0 в КК состоянии состояла из равноосных зерен α-Ti (ГПУ-решетка) со средним размером зерна 41±1,5 мкм. В УМЗ состоянии микроструктура состояла из зерен, субзерен и фрагментов, где локализована дислокационная субструктура с наибольшей плотностью дислокаций. Средний размер структурных элементов составил 0,20±0,10 мкм[1]. После отжига микроструктура сплава Zr–1Nb состояла из равноосных матричных зерен α-Zr (ГПУ-решетка) со средним размером 4,0±0,1 мкм и частиц β-Nb (ОЦК-решетка), расположенных по границам и в телах матричных зерен, со средним размером 0,4±0,1 мкм. Структура сплава Zr–1Nb с указанными размерами зерен относится к мелкозернистому (МЗ) состоянию. Однако для сравнения данных сплавов отнесем сплав Zr–1Nb к КК состоянию как и сплавы ВТ1–0 и Ti–45Nb. УМЗ структура состояла из субзерен матричной фазы α-Zr и частиц β-Nb, средний размер элементов структуры в УМЗ состоянии в сплаве Zr–1Nb – 0,2±0,1 мкм[1]. Сплав Ti–45Nb в КК состоянии состоял из матричных субзерен β-фазы (твердый раствор Ti и Nb с ОЦК-решеткой, где Nb неограниченно растворим в Ti), средний размер зерен – 44±16 мкм, и внутри зерен β-фазы присутствует дисперсно-упрочненая ω-фаза (ГП-решетка, средний размер – 15±1,3 нм).

---

[1] Sharkeev Y. P. Microstructure and Mechanical Properties of Nanostructured and Ultrafine-Grained Titanium and the Zirconium Formed by the Method of Severe Plastic Deformation / Y. P. Sharkeev, A. Y. Eroshenko, V. I. Danilov [et al.] // Russ Phys. J. – 2014. – Vol. 56. – P. 1156–1162.

[2] Eroshenko A.Yu. The influence of dimensions and phase state of structural elements on mechanical properties of binary alloys of the Ti-Nb and Zr-Nb systems / A. Yu. Eroshenko, Yu. P. Sharkeev, I. A. Glukhov, P. V. Uvarkin, A. M. Mairambekova, A. I. Tolmachev // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 61, № 10. – P. 1899–1907.

В УМЗ состоянии средний размер структурных элементов (зерен, субзерн и фрагментов) β-фазы равен 0,28±0,10 мкм, α- и ω-фазы – 40±5 нм и 10±1,2 нм[2]. Ранее в работах[1, 2] были исследованы механические свойства сплавов ВТ1–0, Zr–1Nb и Ti–45Nb в КК состоянии и с УМЗ структурой. УМЗ структура, сформированная в сплавах ВТ1–0, Zr–1Nb и Ti–45Nb при двухэтапной ИПД, приводит к увеличению предела прочности на растяжение соответственно в 2,9; 2,0 и 1,37 раза, предела текучести - в 4,0; 1,95 и 1,45 раза и микротвердости - в 1,6; 1,8 и 1,7 раза по сравнению КК состоянием при одновременном снижении пластичности[1, 2]. УМЗ сплавы Zr–1Nb и Ti–45Nb имеют более низкий модуль упругости (66 ГПа и 58 ГПа), чем титан ВТ1–0 (100 ГПа)[1, 2].

Усталостные испытания проведены для сплавов ВТ1–0, Zr–1Nb и Ti–45Nb в КК состоянии и с УМЗ структурой в режиме гигацикловой усталости на ультразвуковой резонансной нагружающей машине Shimadzu USF-2000 с частотой 20 кГц с соотношением напряжений $R= (\sigma_{min}/ \sigma_{max})= -1$ с воздушным охлаждением[3]. Образцы для гигацикловых испытаний имели форму песочных часов с минимальным диаметром поперечного сечения 3 мм[4]. Поверхности исследуемых образцов имели шероховатость по Ra не более 0,6 мкм. По методике «in-situ» нелинейных проявлений сигнала обратной связи в замкнутой системе ультразвуковой усталостной установки[5] в процессе циклических испытаний определены закономерности накопления необратимых усталостных повреждений для сплава Ti–45Nb в КК состоянии и с УМЗ структурой. Компьютерная томография проводилась на рентгеновском микроскопе XRadia Versa XRM-500. Инфракрасная камера FLIR SC 5000[3] была использована для измерения температурного поля в процессе циклического деформирования на ультразвуковой машине в режиме реального времени без воздушного охлаждения при амплитуде напряжений: ВТ1–0 – 130 МПа, Zr–1Nb – 100 МПа и Ti–45Nb – 195 МПа. Запись поля температур поверхности для всех исследуемых образцов проводилась с частотой от 1600 Гц при минимальным пространственным разрешением $2x10^{-4}$ м при комнатной температуре, 20 °С. Анализ и обработку результатов, визуализацию температурных полей осуществляли в программе Altair[3]. При такой же схеме нагружения было проведено исследование величины предела усталости для сплава Ti–45Nb по методу Ризитано–Люонга[6–8]. Оптический интерферометр-профилометр ZYGO New View 5010 при увеличении х2000 был использован для количественной характеристики профилей поверхностей разрушения, по которым определяли масштабно-инвариантные закономерности инициирования и роста трещин[9, 10]. 10 – 13 одномерных профилей были получены в пределах каждого «окна», обеспечивая определенность данных о структуре рельефа, индуцированного дефектами, с вертикальным разрешением 0,1 нм и с горизонтальным разрешением 0,5 мкм.

---

[3] Naimark O. Gigacycle fatigue: Gigacycle fatigue: non-local and scaling aspects of damage localization, crack initiation and propagation / O. Naimark, T. Palin-Luc // Proced. Struct. Integ. – 2016. – Vol. 2. – P. 1143–1148.

[4] Bathias C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice / C. Bathias, P.C Paris. – New York: CRC Press, 2004. – 328 p.

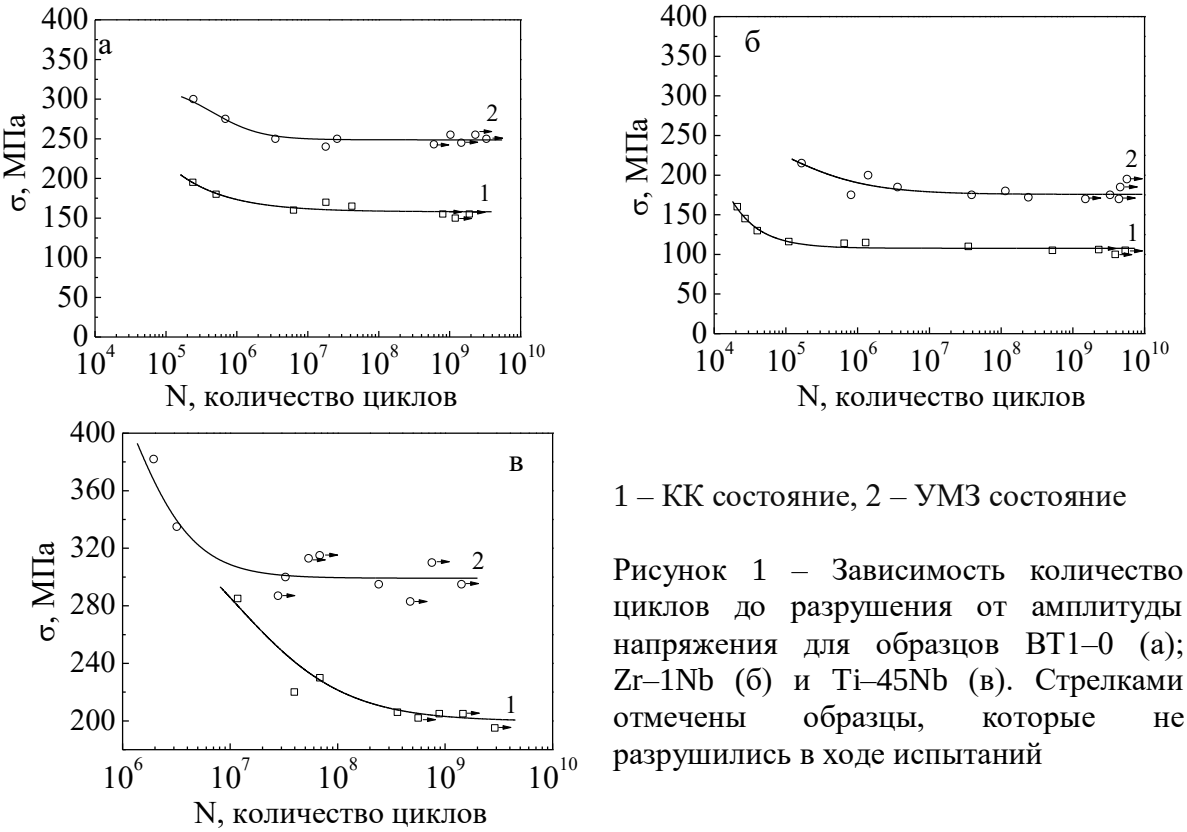
[5] Наймарк О. Б. Нелинейная кинетика развития поврежденности и аномалии упругих свойств металлов при гигацикловом нагружении / О. Б. Наймарк, М. В. Банников // Письма о материалах. – 2015. – Т. 5, № 4. – С. 497–503.

[6] Luong M. P. Infrared thermographics scanning of fatigue in metals / M. P. Luong // Nuclear Engineering and Design. – 1995. – Vol. 158 – P. 363–376.

[7] La Rosa G. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components / G. La Rosa, A. Risitano // Int. J. Fatigue. – 2000. – Vol. 22 – P. 65–73.

[8] Банников М. В. Экспериментальное исследование фрактальных закономерностей роста усталостной трещины и диссипации энергии в ее вершине / М. В. Банников, А. Ю. Федорова, А. И. Терехина, О. А. Плехов // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – № 2. – С. 21–36.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты и кривые усталости для сплавов ВТ1–0, Zr–1Nb и Ti–45Nb в КК состоянии и с УМЗ структурой в режиме гигацикловой усталости (рис. 1).



1 – КК состояние, 2 – УМЗ состояние

Рисунок 1 – Зависимость количество циклов до разрушения от амплитуды напряжения для образцов ВТ1–0 (а); Zr–1Nb (б) и Ti–45Nb (в). Стрелками отмечены образцы, которые не разрушились в ходе испытаний

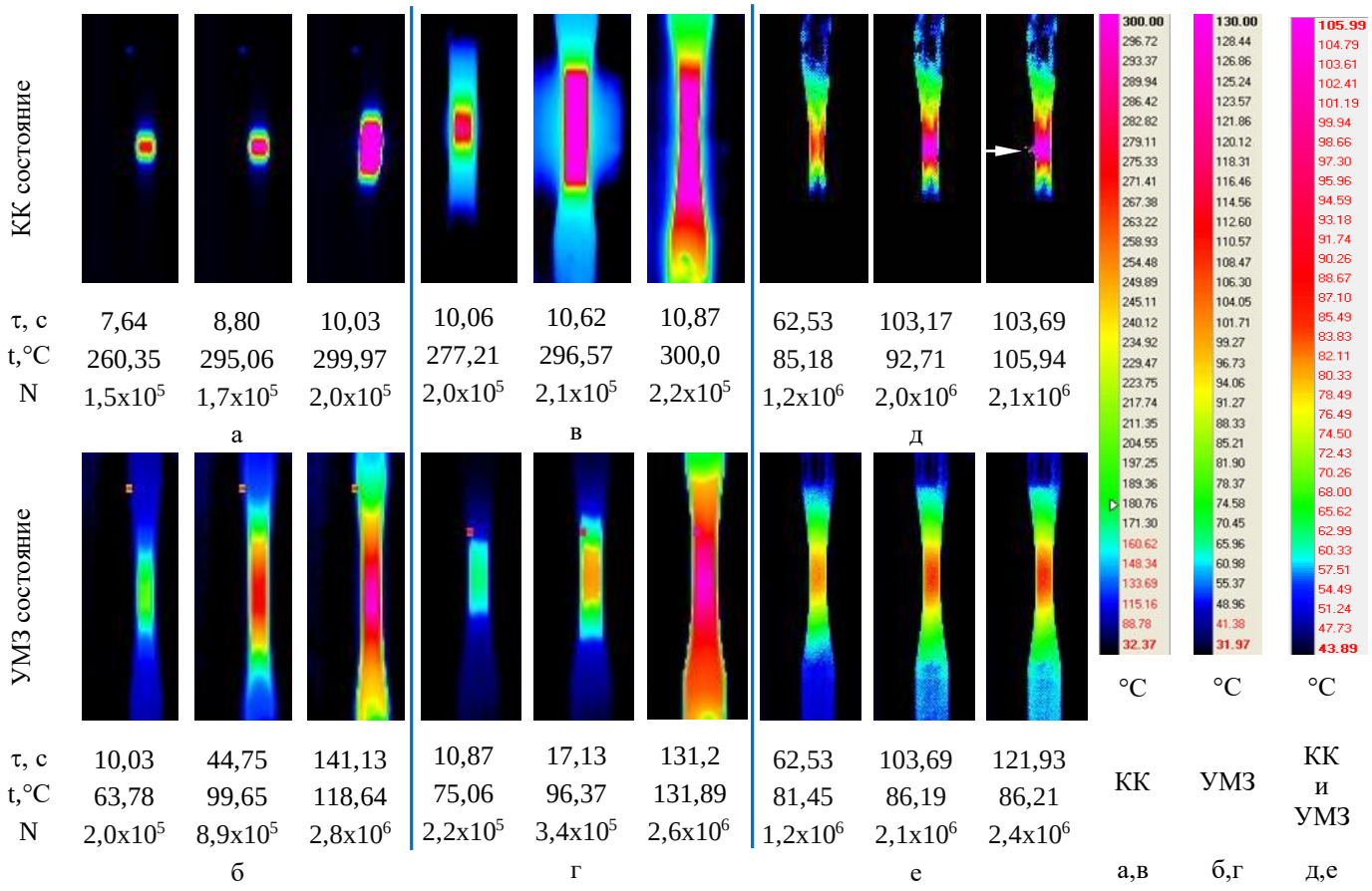
Установлено, что формирование УМЗ структуры в исследуемых сплавах приводит к повышению усталостной прочности в гигацикловой области. Предел выносливости ВТ1–0 в КК состоянии на базе 10^9 циклов нагружения составил 155 МПа, а для ВТ1–0 с УМЗ структурой – 245 МПа. Для образцов сплава Zr–1Nb в КК состоянии предел выносливости на базе 10^9 равен 100 МПа, а для образцов с УМЗ структурой – 170 МПа. Предел выносливости образцов сплава Ti–45Nb на базе 10^9 циклов в КК состоянии составил 195 МПа, а для УМЗ образцов – 295 МПа.

На рисунке 2 представлена эволюция тепловых полей на поверхности образцов сплавов ВТ1–0, Zr–1Nb и Ti–45Nb в КК состоянии и с УМЗ структурой в процессе циклического нагружения.

Выявлено, что для всех типов структурных состояний исследуемых сплавов наблюдается общая тенденция. Приращение температуры в процессе циклического нагружения образцов сплавов в КК состоянии и с УМЗ структурой сопровождается зарождением и распространением очага тепловыделения, площадь которого возрастает с увеличением времени испытания. Обнаружено, что скорость нарастания максимальной температуры на поверхности образцов сплавов ВТ1–0 и Zr–1Nb в КК состоянии значительно выше по сравнению с УМЗ состоянием.

[9] Оборин В. А. Фрактальный анализ поверхности разрушения сплава АМг6 при усталостном и динамическом нагружении / В. А. Оборин, М. В. Банников, Ю. В. Баяндин, М. А. Соковиков, Д. А. Билалов, О. Б. Наймарк // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 2. – С. 116–126.

[10] Bouchaud E. Scaling properties of cracks / E. Bouchaud // Journal of physics: Condensed Matter. – 1997. – Vol. 9. – P. 4319–4344.



(а, в, д) – в КК и (б, г, е) – УМЗ состояниях

Рисунок 2 – Изображения тепловых полей в ИК области, зарегистрированные в процессе циклического нагружения образцов сплавов ВТ1–0 (а, б), Zr–1Nb (в, г) и Ti–45Nb (д, е). τ– время испытания, N – количество циклов, t– максимальная температура в центре образца

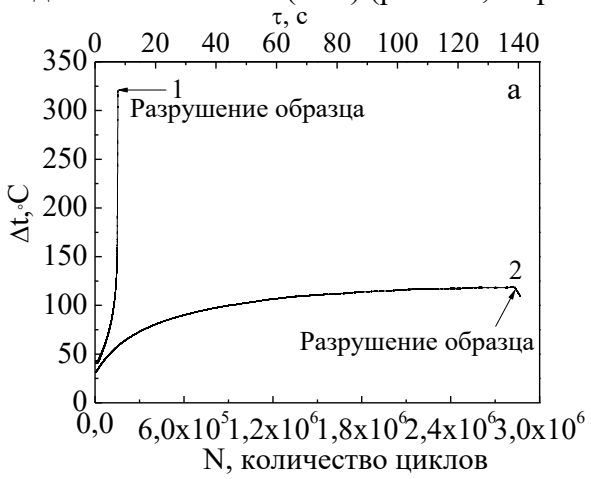
В КК состоянии для обеих сплавов зона с высокой температурой (~300 °С) появляется в средней рабочей части образцов, на базе $2{,}0 \cdot 10^5$ циклов. Затем в процессе циклического нагружения площадь температурной зоны увеличивается в размерах и распространяется по всему образцу (рис. 2 а, в). В случае УМЗ сплавов ВТ1–0 и Zr–1Nb зоны с повышенной температуры (~120 °С и ~130 °С) также возникает в средней рабочей части образцов при $2{,}6 \cdot 10^6$ циклов, но в процессе испытаний ее размер увеличивается по поверхности образца с меньшей скоростью (рис. 2 б, г).

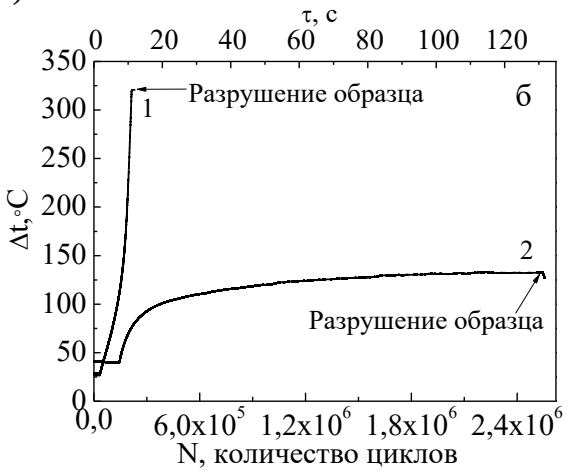
Для сплава Ti–45Nb в КК и УМЗ состояниях очаг тепловыделения с максимальной температурой по площади отличается незначительно (рис. 2 д, е). При циклических испытаниях образцов на базе 10^5 циклов площадь зоны теплового поля практически не меняется, а при 10^6 циклов происходит качественное изменение температуры для КК и УМЗ образцов. В КК образцах появляется область с повышенной температурой (~105 °С) в средней части, которая со временем распространяется по всему образцу. При этом в момент предразрушения образца при количестве $2{,}07 \cdot 10^6$ циклов на тепловом изображении наблюдается вспышка (рис. 2 д, показано стрелкой). Для УМЗ сплава Ti–45Nb распределение температурного поля по поверхности образцов подобно тепловому полю в КК состоянии, но при увеличении длительности циклических испытаний наблюдается стабилизация температуры в центральной части образца (рис. 2 е). Следует отметить, что для УМЗ образцов область с максимальной температурой (85 °С) занимает меньшую площадь по сравнению с КК состоянием.

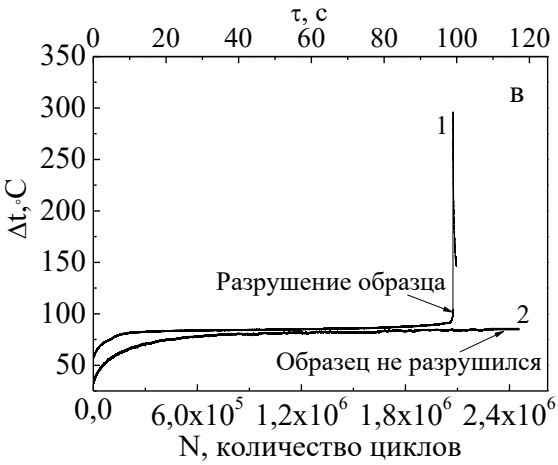
Локализация теплового поля наиболее ярко выражена для КК состояния в отличие от УМЗ состояния для образцов ВТ1–0 и Zr–1Nb. На процессы диссипации энергии при циклическом нагружении сплава Ti–45Nb в УМЗ и КК состояниях оказывают влияние не

только особенности структурного состояния, связанные с масштабным фактором (размер зерна, дефектность структуры, наличие зернограничных дефектов), но и фазовое состояние (наличие зерен α- и β - фаз и дисперсно-упрочняющей ω-фазы). Различия в механизмах диссипации при разрушении КК и УМЗ материалов могут обусловлены качественными изменениями и в дислокационных субструктурах.

Показаны зависимости прироста максимальной температуры на поверхности средней части образцов от количества циклов до разрушения в процессе циклического нагружения сплавов ВТ1–0, Zr–1Nb и Ti–45Nb в КК состоянии и с УМЗ структурой (рис. 3). Образцы ВТ1–0 и Zr–1Nb в КК состоянии нагреваются до максимальной температуры 300 °С, которая достигается за 10 с (рис. 3 а, б кривые 1). Разрушение образцов происходит при температуре выше 300 °С. В УМЗ состоянии максимальная температура для ВТ1–0 120 °С достигается за 140 с, а для сплава Zr–1Nb 130 °С - за 130 с, что в 14 и 13 раз больше, чем для КК состояния (10 с) (рис. 3 а, б кривые 2).







1–КК состояние; 2–УМЗ состояние

Рисунок 3 – Приращения максимальной температуры в зависимости от количества циклов до разрушения в процессе циклического нагружения образцов сплавов ВТ1–0 (а); Zr–1Nb (б) и Ti–45Nb (в)

Разрушение образцов в УМЗ состоянии происходит в многоцикловой области (более 10^6 циклов). Приращение температуры в УМЗ образцах существенно ниже, чем для КК образцов, т.е. циклическое деформирование сплавов ВТ1–0 и Zr–1Nb в УМЗ состоянии сопровождается качественным изменением процесса диссипации энергии. Образцы КК сплава Ti–45Nb в процессе циклического нагружения нагревались до температуры 73 °С, которая достигается за 6 с (рис. 3 в, кривая 1). При дальнейшем увеличении длительности испытаний до 20 с наблюдается стабилизация температуры в диапазоне 85-90 °С. Максимальная температура нагрева составляет 105 °С, которая достигается за 103 с. При этом разрушение образцов происходит в многоцикловой области (10^6 циклов). Перед разрушением в КК состоянии наблюдается резкий скачок температуры (рис. 3 в, кривая 1) до 300 °С, который может быть связан с возрастающей ролью очагового тепловыделения в микрообъемах, подвергающихся микродеформациям в процессе усталостного разрушения металлов. Для УМЗ образцов характер изменения максимальной температуры подобный,

как и для КК образцов (до момента разрушения). УМЗ образцы нагреваются до 80 °С при циклических испытаниях за 37 с. После 40 с (рис. 3 в, кривая 2) температура стабилизируется в диапазоне 80-90 °С, что соответствует области 10^6 циклов и при этом образец не разрушился. То, что при стабилизации температуры образцы не разрушались после 10^6 циклов, отражает способность материала в УМЗ состоянии к формированию равновесной системы зернограничных дефектов. Дополнительный вклад вносит наличие зерен α- и β - фаз, а также дисперсионное упрочнение частицами ω-фазы, что сдерживает рост рассеяния электронов проводимости на межзеренных границах и не приводит к значительному изменению тепловых свойств.

На рисунке 4 показаны результаты изменения продольных размеров тепловых очагов образцов сплавов ВТ1–0, Zr–1Nb и Ti–45Nb при заданных температурах и амплитудах нагружения в зависимости от количества циклов нагружения в КК и УМЗ состояниях. При амплитудах напряжений, близких к разрушению, линейный размер очагов тепловыделения, имеющих температуры не менее 120 °С (при σ = 130 МПа) для ВТ1–0 и 130 °С (при σ = 100 МПа) для сплава Zr–1Nb, возрастает в УМЗ состоянии соответственно в диапазоне от 4,50 мм до 8,45 мм при максимальном количестве циклов $2{,}8\cdot10^6$ циклов и от 3,22 мм до 7,74 мм при максимальном количестве циклов $2{,}5\cdot10^6$ циклов (рис. 4 а, б, кривые 2). Тогда как в случае КК состояния сплавов продольный размер зон растет соответственно от 1,46 мм до 2,86 мм при максимальном количестве циклов $1{,}5\cdot10^5$ и от 1,84 мм до 2,88 мм при максимальном количестве циклов $1{,}4\cdot10^6$ (рис. 4 а, б, кривые 1).

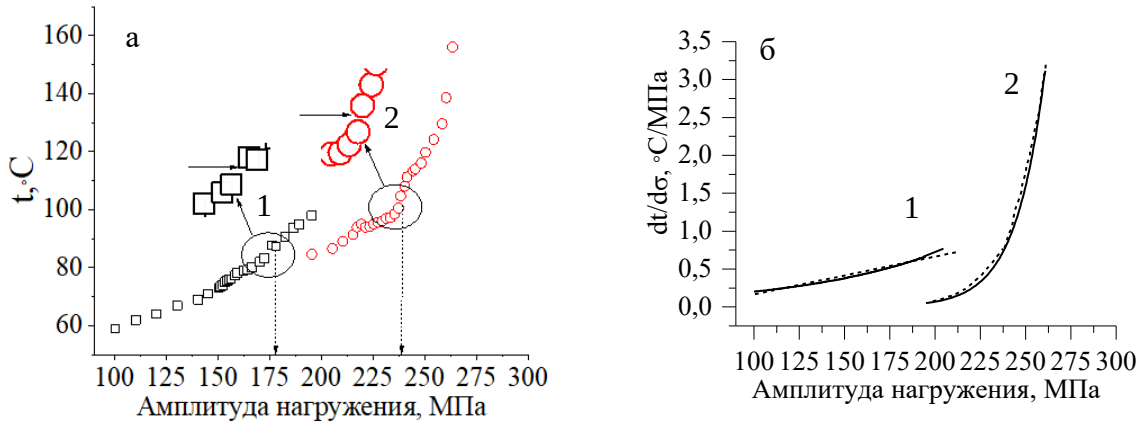
1–КК состояние; 2–УМЗ состояние

Рисунок 4 – Зависимости продольного размера очага тепловыделения от количества циклов нагружения образцов ВТ1–0 (а) при t = 120 °С, σ = 130 МПа; Zr–1Nb (б) при t = 130 °С, σ= 100 МПа и Ti–45Nb (в) при t = 85 °С, σ = 195 МПа

Размеры очагов тепловыделения с температурой не менее 85 °С (при σ = 195 МПа) для сплава Ti–45Nb в УМЗ и КК состояниях сопоставимы, занимают промежуточное положение по отношению к сплавам ВТ1–0 и Zr–1Nb и возрастают для обоих состояний в КК и УМЗ соответственно от 1,50 мм до 4,20 мм при количестве циклов $1{,}9\cdot10^6$ и от 1,3 мм до 5,7 мм при количестве циклов $2{,}4\cdot10^6$ (рис. 4 в, кривые 1,2).

Согласно методике Ризитано–Люонга построена зависимость максимальной температуры на поверхности испытуемого образца от амплитуды прикладываемого напряжения при циклическом нагружении для сплава Ti-45Nb в двух состояниях (рис. 5 а). Видно, что в ходе циклирования при выбранных амплитудах напряжений максимальная температура УМЗ образцов превышает температуру образцов с КК структурой. В соответствии с методикой Ризитано–Люонга точка перегиба (на кривых 1, 2 показаны стрелками, рис. 5 а) позволяет получить оценку предела усталости в области многоцикловой усталости. Ее значение для Ti–45Nb в КК состоянии составило 180 МПа при количестве циклов до разрушения $2{,}01\cdot10^6$, а в УМЗ состоянии – 235 МПа при $5{,}88\cdot10^6$ циклов.

Представлена зависимость скорости роста температуры от амплитуды напряжения для образцов исследуемого сплава (рис. 5 б, кривые 1, 2).



1 – КК состояние, 2 – УМЗ состояние

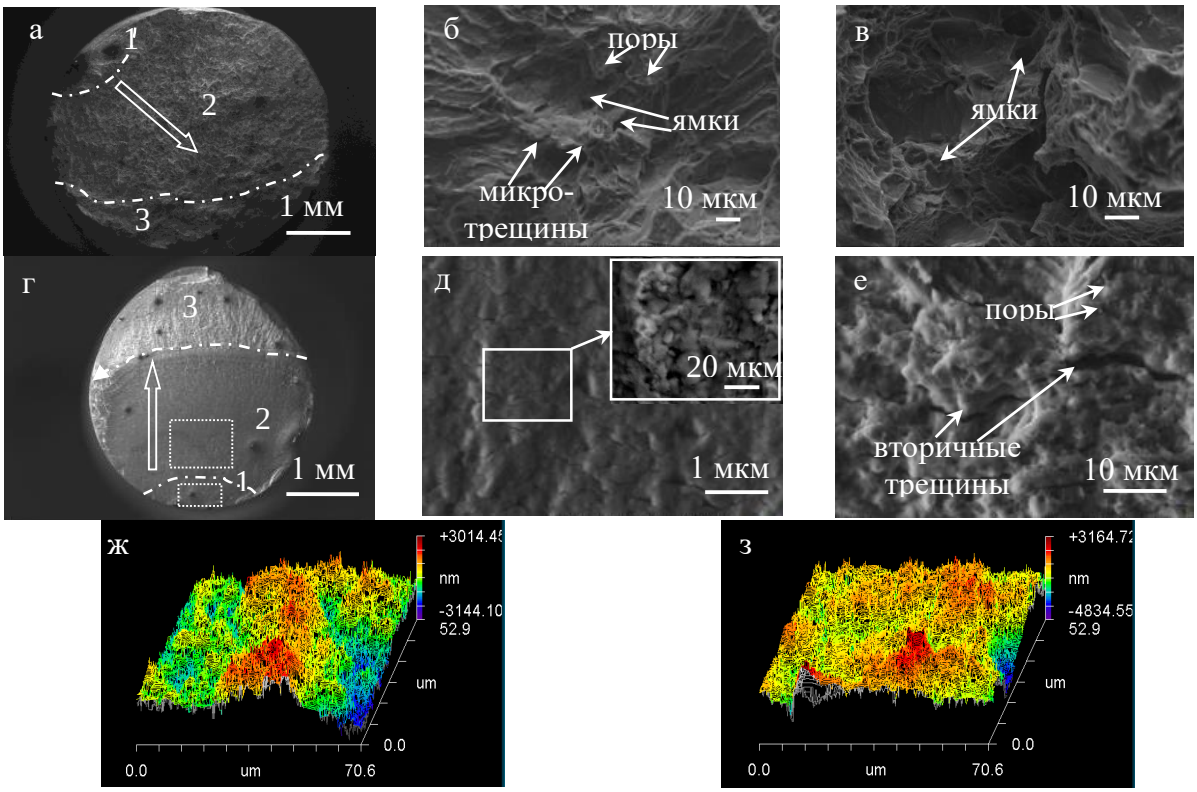
Рисунок 5 – Зависимости максимальной температуры (а) и скорости роста максимальной температуры (б) от напряжения при циклическом нагружении сплава Ti–45Nb

Для КК образцов кривая 1 аппроксимирована линейной зависимостью в интервале амплитуд напряжений (100–195) МПа. При этом для УМЗ сплава на кривой 2 аппроксимирована параболической зависимостью и можно выделить две линейные стадии в интервале напряжений (195–230) МПа и (240–260) МПа. Такой двухстадийный характер скорости роста температуры связан с качественным различием механизмов диссипации энергии при структурной релаксации в сплаве с УМЗ структурой по сравнению с КК сплавом.

Результаты, получаемые по методу «in-situ», позволяют заблаговременно прогнозировать инициирование (зарождение) и распространение трещины. Изменение второй гармоники может быть связано как с изменением внутренней структуры, которая формирует трещину, так и с равномерным линейным расширением материала вследствие увеличения температуры в ходе циклических испытаний.

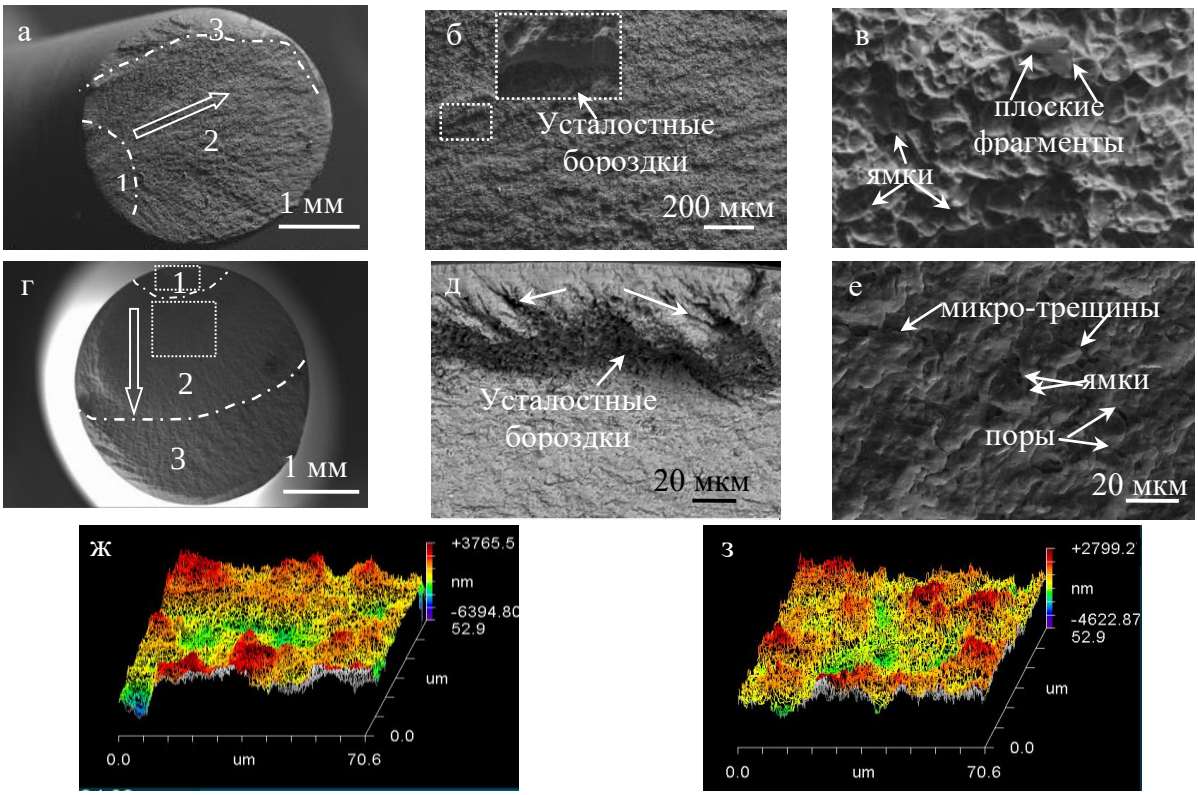
В четвертой главе приводятся результаты анализа поверхностей разрушения исследуемых образцов, подвергнутых нагружению в режиме гигацикловой усталости (рис. 6-8). Показано, что морфология поверхности сплавов ВТ1–0, Zr–1Nb и Ti–45Nb в КК состоянии в зоне инициирования (зарождения) и распространения трещины характеризуются высокой шероховатостью, видны участки поверхности с плоскими фрагментами, «ямками» и порами, а также наблюдаются микротрещины, вторичные трещины и усталостные бороздки (рис. 6-8, а-в). Разрушение КК образцов вязкое, в зоне долома оно происходило с преобладанием «ямочного» микрорельефа. Выявлено, что после гигацикловых испытаний для исследуемых образцов в КК состоянии зарождение трещины идет с поверхности и затем распространяется вглубь. В случае сплавов с УМЗ структурой, зарождение трещины происходит под поверхностью, либо вблизи поверхности, концентраторами которой являются внутренние дефекты, такие как, «ямки», поры, усталостные бороздки, микротрещины, вторичные трещины (рис. 6-8, г-е). Разрушение УМЗ образцов хрупкое. Зарождения трещины в УМЗ образцах происходит значительно позже по сравнению с КК образцами, что является следствием затрудненного движения дислокаций в зернах субмикронного и нанометрового диапазонов по сравнению с КК образцами.

Представлены результаты фрактального анализа поверхности разрушения после гигацикловых испытаний для УМЗ образцов (рис. 6-8, г-з). Поверхности излома в КК образцах характеризовались высокой шероховатостью, что не позволило провести количественный анализ морфологии поверхностей разрушения.



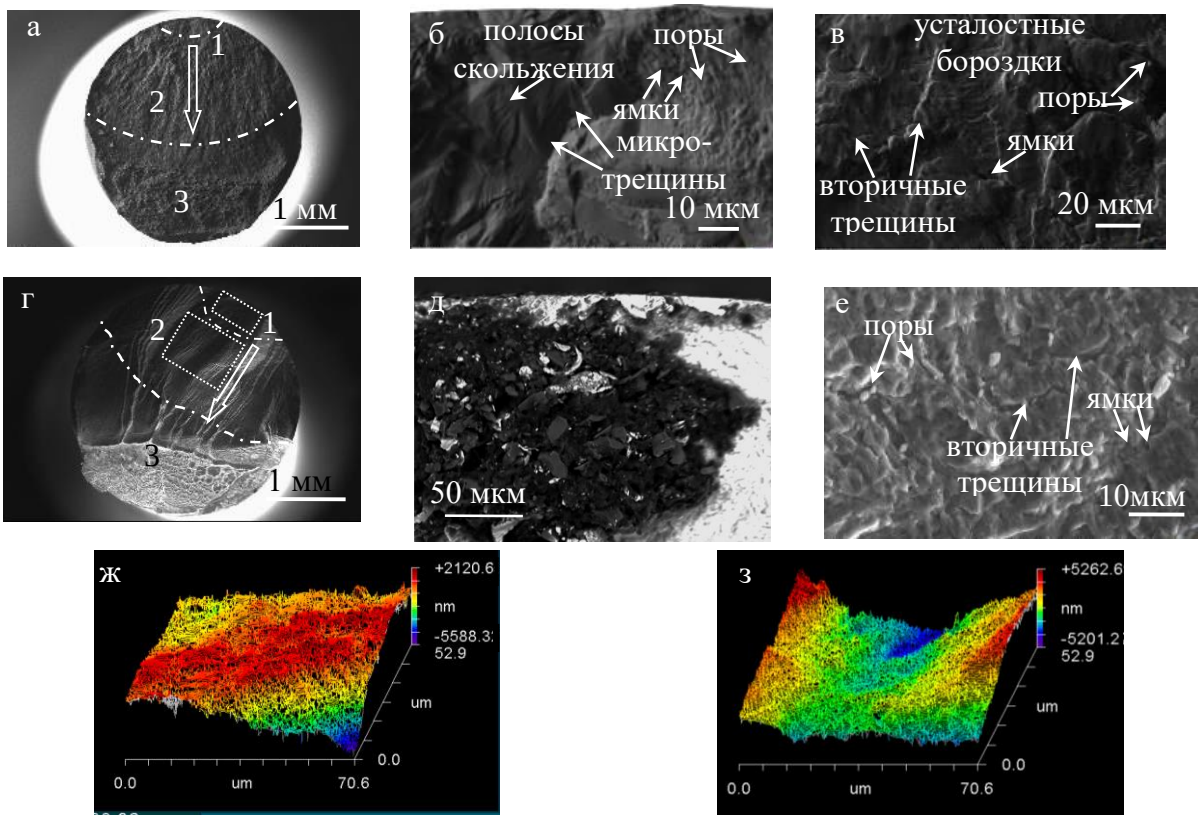
(а–в) – в КК, (г–е) – в УМЗ состоянии – РЭМ-изображения;
(ж, з) – 3D-карты рельефа; (д, ж) – зона 1; (е, з) – зона 2

Рисунок 6 – РЭМ-изображения и 3D-карты рельефа, снятые с поверхности разрушения в зоне 1 и зоне 2 образца ВТ1–0 в УМЗ состоянии



(а–в) – в КК, (г–е) – в УМЗ состоянии – РЭМ-изображения;
(ж, з) – 3D-карты рельефа; (д, ж) – зона 1; (е, з) – зона 2

Рисунок 7 – РЭМ-изображения и 3D-карты рельефа, снятые с поверхности разрушения в зоне 1 и зоне 2 образца сплава Zr–1Nb в УМЗ состоянии



(а–в) – в КК, (г–е) – в УМЗ состоянии – РЭМ-изображения;
(ж, з) – 3D-карты рельефа; (д, ж) – зона 1; (е, з) – зона 2

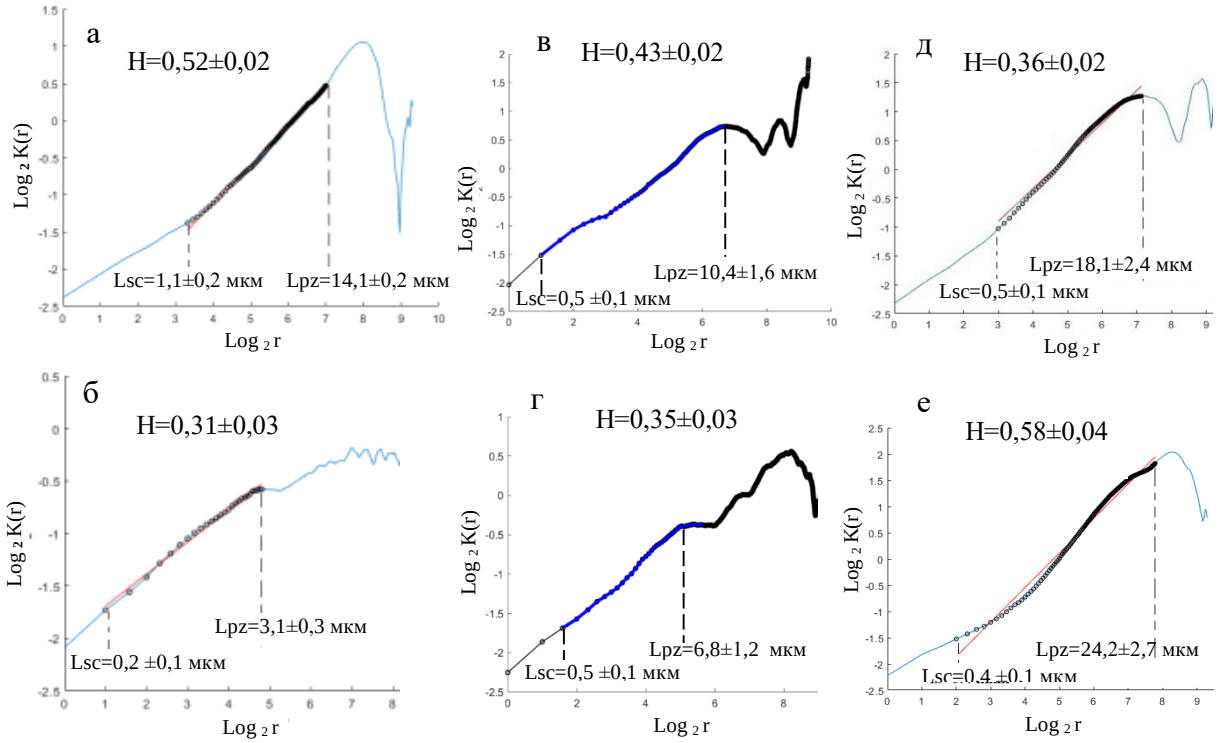
Рисунок 8 – РЭМ-изображения и 3D-карты рельефа, снятые с поверхности разрушения в зоне 1 и зоне 2 образца Ti–45Nb в УМЗ состоянии

На рисунках 6-8, г показаны области (выделены прямоугольниками), выбранные для сканирования поверхности излома исследуемых образцов вблизи очага зарождения трещины (зона 1) и вдали от него вдоль основного направления распространения трещины (зона 2). По данным интерферометрической профилометрии определены масштабные инварианты рельефа поверхности разрушения (показатель Херста)[5,8], соответствующие одномерным профилям рельефа поверхности разрушения для исследуемых сплавов в УМЗ состоянии, которые вычислялись по формуле[9]:

$$K(r)=\left\langle (z(x+r)-z(x))^2 \right\rangle_x^{1/2} \propto r^H, \qquad (1)$$

где $K(r)$ – функция корреляции (усредненная разность значений высот рельефа поверхности $z(x + r)$) и $z(x)$ для окна размером r, r-масштаб, по которому определяется корреляция, H - показатель Херста (показатель шероховатости). Функции $K(r)$ представленной в логарифмических координатах log K(r)~H log r в соответствии с соотношением (1) позволяет провести оценку критического масштаба l_{sc}. Значение нижней границы масштаба скейлинга, принималось за значение критического масштаба l_{sc} и значение верхней границы принималось за значение масштаба L_{pz}, связанного с зоной процесса, областью коррелированного поведения дефектных структур.

Зависимости $\log_2 K(r)$ от $\log_2 r$, показателя Херста H и критических масштабов l_{sc} и L_{pz} для УМЗ сплавов ВТ1–0, Zr–1Nb и Ti–45Nb показаны на рисунке 9.



(а, б) – ВТ1–0; (в, г) – Zr–1Nb; (д, е) – Ti–45Nb; (а, в, д) – зона 1; (б, г, е) – зона 2

Рисунок 9 – Вид зависимости $\log_2 K(r)$ от $\log_2 (r)$ (б), значения показателя Херста H и критические масштабы L_{pz} и l_{sc} в зоне 1 и зоне 2 для сплавов ВТ1–0, Zr–1Nb и Ti–45Nb в УМЗ состоянии

Выявлены две зоны с различными значениями шероховатости, т.е. показателя Херста, для исследуемых сплавов. Для сплавов ВТ1–0 и Zr–1Nb в зоне 2 (рис. 9 б, г) определен показатель Херста (H=0,31±0,03 и H=0,35±0,03). Он показывает увеличение диапазона пространственных масштабов значения l_{sc} и L_{pz} и соответствует зоне зарождения усталостной трещины по сравнению зоной 1 (рис. 9 а, в), где показатель Херста равен H=0,52±0,02 и H=0,43±0,02. Для сплава Ti–45Nb соотношения показателей Херста обратное: зона 1 (рис. 9 д, H=0,36±0,02), соответствует зоне зарождения трещины, зона 2 (рис. 9 е) - распространению трещины (H=0,58±0,04), при этом имеет место уменьшение диапазона пространственных масштабов, что связано не только с УМЗ структурой, но с дополнительным фактором, многофазным состоянием сплава Ti–45Nb. Показано, что функция $K(r)$ для зон 1 и 2 во всех сплавах имеет линейный участок (сплошная линия) в диапазоне значений масштабов l_{sc} и L_{pz} (рис. 9).

На рисунке 10 показано ПЭМ-изображение тонкой микроструктуры для сплавов ВТ1–0, Zr–1Nb и Ti–45Nb в КК состоянии и с УМЗ структурой после гигациклового испытания с воздушным охлаждением. В КК образцах ВТ1–0 обнаружено, что после гигацикловых испытаний (при σ = 155 МПа, $N=2{,}3\times10^9$), рис. 10, 1 б, формируется дислокационная неразориентированная субструктура в виде сеток и ячеек. Видно, что на границах и внутри зерен генерируется новые дислокации. Средний размер зерен после испытания составил 40,0±1,2 мкм (исходном состоянии – 41,0±1,5 мкм, рис.10, 1 а). Однако в локальных участках наблюдается измельчение зерен, имеющих различные кристаллические ориентации, со средним размером 3,1±1,1 мкм (рис. 10, 1 б). Это обусловлено длительным циклическим испытанием при небольшом значении амплитуды нагружения. Плотность дислокаций для ВТ1–0 в КК состоянии составила $\rho\approx2\cdot10^{10}$ см$^{-2}$. В случае УМЗ состояние ВТ1–0 после испытания (σ =245 МПа, $N=3{,}6\times10^9$ циклов) не обнаружено значительных изменений в микроструктуре (рис. 10, 1 г). Средний размер элементов структуры составил 0,18±0,10 мкм (исходном состояние - 0,20±0,10 мкм, рис. 10,

1 в). Микроструктуры после гигациклового испытания сплава Zr–1Nb в КК и УМЗ состояниях, в целом подобен микроструктуре образцов ВТ1–0 рис. 10, 2 б-г).

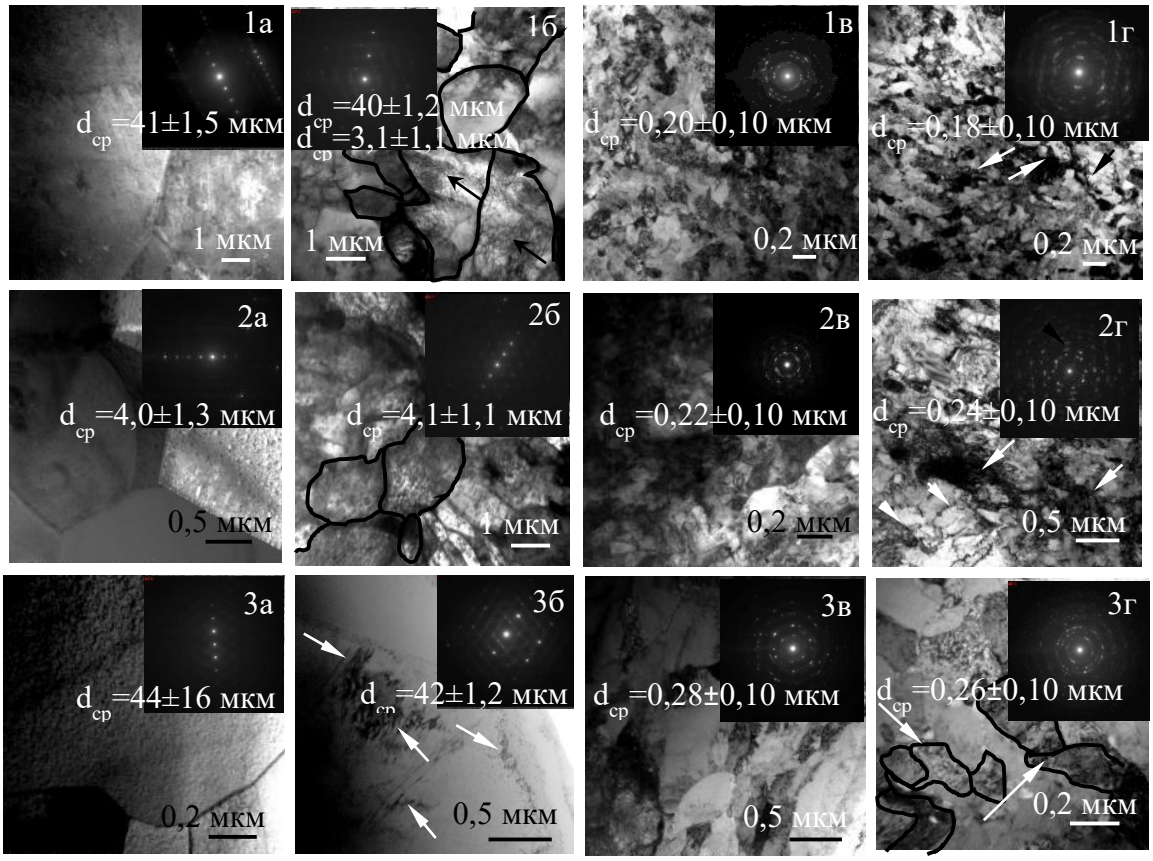


Рисунок 10 – ПЭМ – изображения вблизи области разрушения образцов ВТ1– 0 (1 а–г), Zr–1Nb (2 а–г) и Ti–45Nb (3 а–г) в КК (1 а, 2 а, 3 а исходные в КК состояниях; 1 б, 2 б, 3 б после гигацикловых испытаний) и в УМЗ состояниях (1 в, 2 в, 3 в исходные в УМЗ состояниях; 1 г, 2 г, 3 г после гигацикловых испытаний)

Микроструктуры после гигациклового испытания сплава Zr–1Nb в КК и УМЗ состояниях, в целом, подобны микроструктуре образцов ВТ1–0 рис. 10, 2 б-г). Сплав Zr–1Nb в КК состоянии (σ =105 МПа, N=6,5x10^8 циклов) характеризуется ячеисто-сетчатой дислокационной неразориентированной субструктурой ($\rho \approx 2 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$). Вблизи поверхности разрушения в локальных местах (рис. 10, 2 б) наблюдается измельчение зерен, где средний размер зерна составил 2,3±0,8 мкм, а в исходном состоянии – 4,0±1,3 мкм (рис. 10, 2 а). В УМЗ состоянии для сплава Zr–1Nb после испытания (σ = 170 МПа, N = 1,5x10^9 циклов) формируется дислокационная разориентированная фрагментированная субструктура (рис. 10, 2 г, показано стрелками). Средний размер элементов структуры составил 0,24±0,10 мкм (исходное состояние - 0,22±0,10 мкм, рис. 10, 2 в,). Для сплава Ti–45Nb в КК состоянии (σ =195 МПа, N=1,7x10^9) также наблюдается сетчатая дислокационная неразориентированная субструктура (рис. 10, 3 б, показано стрелками). Плотность дислокаций для сплава Ti–45Nb в КК состоянии составила $\rho \approx 1 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$. В данном сплаве не наблюдается явного измельчения структуры по сравнению с исходным состоянием (рис. 10, 3 а). В УМЗ состоянии (σ =295 МПа, N=1,6x10^9) формируется разориентированная фрагментированная субструктура (рис. 10, 3 г, показано стрелками). Средний размер элементов структуры составил 0,26±0,10 мкм (исходное состояние - 0,28±0,10 мкм, рис. 10, 3 в). Выявлено, что для всех сплавов в УМЗ состоянии зерно слишком мало для формирования внутризеренных дислокационных структур, где границы зерен могут играть значительную роль в аннигиляции дислокаций в процессе гигацикловых испытаний.

В заключении приведены выводы, полученные в диссертационной работе.

1. Установлено, что сплавы ВТ1–0, Zr–1 мас. % Nb и Ti-45 мас. % Nb в УМЗ состоянии показывают более высокие усталостные свойства при гигацикловом нагружении по сравнению со сплавами КК недеформированном состоянии. Формирование УМЗ структуры сопровождается увеличением предела усталости в 1,6 раза для ВТ1–0, в 1,7 раза для Zr–1 мас. % Nb и в 1,5 раза для Ti-45 мас. % Nb в гигацикловой области нагружения (10^9 циклов и более).

2. Показано, что процесс гигациклового нагружения образцов исследуемых сплавов в УМЗ состоянии и в КК недеформированном состоянии сопровождается зарождением и распространением очага тепловыделения. Зона диссипации энергии охватывает значительный объем образца с УМЗ структурой в процессе циклического деформирования, тогда как в случае КК недеформированного состояния рост тепловой энергии имеет локализованный характер в рабочей зоне для образцов ВТ1–0 и Zr–1 мас. % Nb. В процессе циклического деформирования приращение температуры на поверхности образцов сплавов ВТ1–0 и Zr–1 мас. % Nb с УМЗ структурой существенно ниже, чем в КК состоянии. В сплаве Ti–45 мас. % Nb с УМЗ и КК структурами очаги диссипации энергии по размерам отличаются незначительно, что обусловлено средним размером элементов структуры и наличием многофазного состояния.

3. Методом Ризитано–Люонга определено, что в области многоцикловой усталости сплава Ti–45N в КК состоянии величина предела усталости составляет 180 МПа при количестве циклов до разрушения $2{,}01 \cdot 10^6$, а с УМЗ структурой – 235 МПа при $5{,}88 \cdot 10^6$ циклов, что удовлетворительно согласуется с результатами гигацикловых испытаний, 10^9 циклов, и подтверждает возможность применения Метода Ризитано–Люонга для оценки усталостных свойств материалов.

4. Установлено, что сформированная при гигацикловом нагружении УМЗ структура в сплавах ВТ1–0, Zr–1 мас. % Nb и Ti–45 мас. % Nb является стабильной и обеспечивает долговечность до 10^9 и более при более высокой усталостной прочности по сравнению в КК недеформированном состоянии, при этом дополнительным фактором в сплаве Ti–45 мас. % Nb является многофазное состояние.

5. На поверхности разрушения исследуемых сплавов в УМЗ состоянии выявлены области зарождения и распространения трещины в режиме гигацикловой усталости и соответствующие им масштабы, характеризующие развитие усталостного разрушения, определен показатель Херста в данных областях, который равен соответственно для ВТ1–0 в зоне зарождения трещины 0,52±0,02 и в зоне распространения трещины 0,31±0,03; а для сплава Zr–1 мас. % Nb соответственно – 0,43±0,02 и 0,35±0,03. В случае сплава Ti-45Nb соотношение показателя Хёрста для указанных зон обратное, он равен 0,36±0,02 для первой зоны и 0,58±0,04 для второй зоны, что связано кроме УМЗ структуры с дополнительным фактором, многофазным состоянием. В случае сплава Ti–45 мас. % Nb показатель Херста равен 0,36±0,02 в зоне инициирования трещины и 0,58±0,04 для зоны распространения трещины.

6. Процесс длительного циклического разрушения образцов сплавов ВТ1–0, Zr–1 мас. % Nb и Ti–45 мас. % Nb в КК недеформированном состоянии сопровождается изменением дислокационной субструктуры в виде сеток и ячеек. Для образцов в УМЗ состоянии характер микроструктуры при циклическом нагружении меняется незначительно. Сформированное ультрамелкозернистое зерно имеет критические размеры для формирования внутризеренных дислокационных структур, а границы зерен играют значительную роль в аннигиляции дислокаций в процессе гигацикловых испытаний.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Eroshenko A. Yu. Structure, phase composition and mechanical properties in bioinert zirconium-based alloy after severe plastic deformation / A. Yu. Eroshenko, **A. M. Mairambekova,** Yu. P. Sharkeev, Zh. G. Kovalevskaya, M. A. Khimich, P. V. Uvarkin // Письма о материалах. – 2017. – Т. 7, № 4. – С. 469–472. – DOI: 10.22226/2410-3535-2017-4-469-472. – 0,43 / 0,07 а.л.

Scopus: Eroshenko A. Yu. Structure, phase composition and mechanical properties in bioinert zirconium-based alloy after severe plastic deformation / A. Yu. Eroshenko, **A. M. Mairambekova,** Yu. P. Sharkeev, Zh. G. Kovalevskaya, M. A. Khimich, P. V. Uvarkin // Letters on materials. – 2017. – Vol. 7, № 4. – P. 469–472.

2. Наймарк О. Б. Закономерности разрушения титана ВТ1-0 и сплава циркония Э110 в ультрамелкозернистом, мелкозернистом и крупнокристаллическом состояниях при циклическом нагружении в гигацикловом режиме / О. Б Наймарк, Ю. П. Шаркеев, **А. М. Майрамбекова,** М. В. Банников, А. Ю. Ерошенко, А. И. Ведерникова // Письма о материалах. – 2018. – Т. 8, № 3. – С. 317–322. – DOI: 10.22226/2410-3535-2018-3-317-322. – 0,65 / 0,10 а.л.

Scopus: Naimark O. B. Failure mechanisms of titanium VT1-0 and zirconium alloy E110 in ultrafine-grained, fine-grained and coarse-grained states under cyclic loading in gigacycle regime / Y. P Sharkeev, A. M. **Mairambekova**, M. V. Bannikov, A. Y. Eroshenko, A. I. Vedernikova // Letters on materials. – 2018. − Vol. 8, № 3. − P. 317−322.

3. Ерошенко А. Ю. Влияние размера структурных элементов и фазового состояния на механические свойства бинарных сплавов систем Ti–Nb и Zr–Nb / А. Ю. Ерошенко, Ю. П. Шаркеев, И. А. Глухов, П. В. Уваркин, **А. М. Майрамбекова**, А. И. Толмачев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т. 61, № 10. – С. 136–143. – 0,72 / 0,12 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Eroshenko A. Yu. The influence of dimensions and phase state of structural elements on mechanical properties of binary alloys of the Ti-Nb and Zr-Nb systems / A. Yu. Eroshenko, Yu. P. Sharkeev, I. A. Glukhov, P. V. Uvarkin, **A. M. Mairambekova,** A. I. Tolmachev // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 61, № 10. – P. 1899–1907. – DOI: 10.1007/s11182-019-01616-z.

4. Ерошенко А. Ю. Микроструктура ультрамелкозернистого сплава Ti-40 мас. % Nb после отжигов / А. Ю. Ерошенко, Ю. П. Шаркеев, М. А. Химич, И. А. Глухов, П. В. Уваркин, А. И. Толмачев, **А. М. Майрамбекова** // Письма о материалах. – 2020. – Т. 10, № 1. – С. 54–59. – DOI: 10.22226/2410-3535-2020-1-54–59. – 0,60 / 0,08 а.л.

Scopus: Eroshenko A. Yu. Microstructure of ultrafine-grained Ti-40 wt. % Nb alloy after annealing / A. Yu. Eroshenko, Yu. P. Sharkeev, M. A. Khimich, I. A. Glukhov, P. V. Uvarkin, A. I. Tolmachev, **A. M. Mairambekova** // Letters on materials. – 2020 – Vol. 10, № 1. – P. 54–59.

5. **Mairambekova A. M.** Characteristic Features of Ultrafine-Grained Ti-45 wt. % Nb alloy under High Cycle Fatigue [Electronic resource] / A. M. Mairambekova, A. Yu. Eroshenko, V. A. Oborin, M. V. Bannikov, V. V. Chebodaeva, A. I. Terekhina, O. B. Naimark, A. I. Dmitriev, Yu. P. Sharkeev // Materials. – 2021. – Vol. 14, is. 18. – Article number 5365. – 21 p. – URL: https://www.mdpi.com/1996-1944/14/18/5365 (access date: 06.03.2022). – DOI: 10.3390/ma14185365. – 1,18 / 0,13 а.л. (*Scopus*).

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus:

6. Eroshenko A. Yu. Structure and phase composition of ultrafine-grained TiNb alloy after high-temperature annealings [Electronic resource] / A. Yu. Eroshenko I. A. Glukhov, **A. M. Mairambekova**, A. I. Tolmachev, Yu. P. Sharkeev // AIP Conference Proceedings. – 2017.

– Vol. 1909 : International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2017, AMHS 2017. Tomsk, Russia, October 09–13, 2017. – Article number 020046. – 4 p. – URL: https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5013727 (access date: 06.03.2022). – DOI: 10.1063/1.5013727. – 0,36 / 0,07 а.л.

7. **Mairambekova A.** Fracture characteristics of titanium VT1-0 and Zr-1 wt. % Nb alloy in different structures under gigacycle fatigue loading regime [Electronic resource] / **A. Mairambekova,** A. Eroshenko, M. Bannikov, O. Naimark, Yu. Sharkeev // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2051 : International Symposium on Hierarchical Materials: Development and Applications for New Technologies and Reliable Structures 2018. Tomsk, Russia, October 01–05, 2018. – Article number 020184. – 4 p. – URL: https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5083427 (access date: 06.03.2022). – DOI: 10.1063/1.5083427. – 0,32 / 0,06 а.л.

8. Eremin A. V. Effect of grain refinement on deformation behavior of technical grade titanium under tension [Electronic resource] / A. V. Eremin, S. V. Panin, A. V. Byakov, Yu. P. Sharkeev, A. Yu. Eroshenko, **A. M. Mairambekova** // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2051 : International Symposium on Hierarchical Materials: Development and Applications for New Technologies and Reliable Structures 2018. Tomsk, Russia, October 01–05, 2018. – Article number 020076. – 5 p. – URL: https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5083319 (access date: 06.03.2022). – DOI: 10.1063/1.5083319. – 0,35 / 0,05 а.л.

9. Zhu Q. Grain characteristics and mechanical properties of bioinert Ti-40 wt. % Nb alloy [Electronic resource] / Q. Zhu, Yu. Sharkeev, A. Eroshenko, S. Zeming, H. Zhang, X. Han, I. Glukhov, **A. Mairambekova,** M. Khimch // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2167 : International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2019. Tomsk, Russia, October 01–05, 2019. – Article number 020401. – 4 p. – URL: https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5132268 (access date: 06.03.2022). – DOI: 10.1063/1.5132268. – 0,36 / 0,04 а.л.

10. Glukhov I. A. Thermal Stability of Ti–45 wt. % Nb Alloy at Isothermal Annealing [Electronic resource] / I. A. Glukhov, A. Yu. Eroshenko, M. A. Khimich, **A. M. Mairambekova**, A. I. Tolmachev, P. V. Uvarkin, Yu. P. Sharkeev // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 23101 : International Conference on Physical Mesomechanics. Materials with Multilevel Hierarchical Structure and Intelligent Manufacturing Technology 2020. Tomsk, Russia, October 05–09, 2020. – Article number 020110. – 5 p. – URL: https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0034597 (access date: 06.03.2022). – DOI: 10.1063/5.0034597. – 0,31 / 0,04 а.л.

Главы в монографиях:

11. Глухов И. А. Эволюция структурно-фазового состояния и механических свойств сплава Ti – 40 мас. % Nb, подвергнутого абс-прессованию и прокатке / И. А. Глухов, А. Ю. Ерошенко, **А. М. Майрамбекова**, А. И. Толмачев, Ю. П. Шаркеев, Q. Zhu // Модифицирование структуры и свойств перспективных материалов при внешних воздействиях : коллективная монография. – Томск, 2017. – Гл. 5. – С. 97–105. – 0,66 / 0,11 а.л.

12. Шаркеев Ю. П. Биоинертные сплавы на основе титана, циркония и ниобия в наноструктурном и ультрамелкозернистом состоянии: получение, микроструктура и механические и свойства / Ю. П. Шаркеев, А. Ю. Ерошенко, М. А. Химич, Е. В. Легостаева, **А. М. Майрамбекова**, О. А. Белявская, Ж. Г. Ковалевская // Современные наноматериалы : монография. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2020. – Гл. 10. – С. 175–193. – 0,98 / 0,14 а.л.

Публикации в прочих научных изданиях:

13. **Майрамбекова А. М.** Формирование ультрамелкозернистой структуры в биоинертном сплаве Ti-40 мас. % Nb в результате интенсивной пластической деформации / А. М. Майрамбекова, А. Ю. Ерошенко // Актуальные проблемы современной механики

сплошных сред и небесной механики : тезисы докладов VII Международной молодежной научной конференции. Томск, 27–29 ноября 2017 г. – Томск, 2017. – С. 132–134. – 0,19 / 0,09 а.л.

14. Емельянов А. Н. Исследование термостабильности низкомодульного сплава Ti-40 МАС. %Nb в ультрамелкозернистом состоянии / А. Н. Емельянов, **А. Майрамбекова,** И. А. Глухов // Современные технологии и материалы новых поколений : сборник трудов международной конференции с элементами научной школы для молодежи. Томск, 09–13 октября 2017 г. – Томск, 2017. – С. 164–165. – 0,14 / 0,04 а.л.

15. **Майрамбекова А. М**. Исследование усталостного разрушения титана ВТ1-0 и сплава Zr-1 мас.%Nb в режиме гигацикловой усталости / А. М. Майрамбекова, А. Ю. Ерошенко, М. В. Банников // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2018 : сборник материалов VIII Международной молодежной научной конференции. Томск, 26–28 ноября 2018 г. – Томск, 2019 г. – С. 137–139. – 0,38 / 0,12 а.л.

16. **Майрамбекова А. М.** Исследование морфологии поверхности разрушения ВТ1-0 и сплава Zr-1 мас.% Nb в различных структурных состояниях при циклическом нагружении в гигацикловом режиме / А. М. Майрамбекова, А. Ю. Ерошенко // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики : материалы IX Всероссийской молодежной научной конференции. Томск, 18–20 ноября 2019 г. – Томск, 2020. – С. 149–153. – 0,31 / 0,15 а.л.

17. Ерошенко А. Ю. Микроструктура, механические свойства и термостабильность биоинертного ультрамелкозернистого сплава Ti-45 мас.% Nb / А. Ю. Ерошенко, Ю. П. Шаркеев, И. А. Глухов, П. В. Уваркин, **А. М. Майрамбекова,** М. А. Химич, А. И. Толмачев // Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы (УМЗНМ)-2018 : сборник тезисов докладов Открытой школы конференции стран СНГ. Уфа, 01–05 октября 2018 г. – Уфа, 2018. – С. 110. – 0,06 / 0,01 а.л.

18. **Майрамбекова А. М**. Формирование ультрамелкозернистого состояния в чистом титане ВТ1-0 и сплаве Zr – 1 мас.% Nb в результате интенсивной пластической деформации / А. М. Майрамбекова, А. Ю. Ерошенко // Физика твердого тела : сборник материалов XVI Российской научной студенческой конференции. Томск, 17–20 апреля 2018 г. – Томск, 2018. – С. 71–73. – 0,19 / 0,07 а.л.

19. **Майрамбекова А. М**. Закономерности разрушения титана ВТ1-0 и сплава Zr-1 мас.% Nb в различных структурных состояниях в режиме гигацикловой усталости при циклическом нагружении / А. М. Майрамбекова, О. Б. Наймарк, М. В. Банников, А. Ю. Ерошенко, А. И. Ведерникова, Ю. П. Шаркеев // Тезисы докладов Международных конференций «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» и «Химия нефти и газа» в рамках Международного симпозиума «Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций». Томск, 01–05 октября 2018 г. – Томск, 2018. – С. 311–312. – 0,14 / 0,02 а.л.

20. **Майрамбекова А. М.** Разрушение сплавов ВТ1-0 и Zr-1 мас. % Nb в различных структурных состояниях при нагружении в режиме гигацикловой усталости / Майрамбекова А. М., Шаркеев Ю. П., Наймарк О. Б., Банников М. В., Ерошенко А. Ю., Оборин В. А. // Тезисы докладов International Workshop «Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems», Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» и VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию основания института химии нефти «Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа». Томск, 01–05 октября 2019 г. – Томск, 2019. – С. 404. – 0,06 / 0,01 а.л.

21. **Майрамбекова А. М.** Механические характеристики ВТ1-0 и сплава Zr-1 мас.% Nb в различных структурных состояниях в режиме гигацикловой усталости / А. М. Майрамбекова, М. В. Банников, А. С. Грибкова // Перспективы развития

фундаментальных наук : сборник научных трудов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 23–26 апреля 2019 г. – Томск, 2019. – Т. 2 : Химия. – С. 141–143. – 0,19 / 0,06 а.л.

22. **Майрамбекова А. М.** Усталостное поведение титана ВТ1-0 в различных структурных состояниях (инфракрасная термография) / А. М. Майрамбекова, М. В. Банников, А. И. Терехина // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 21–24 апреля 2020 г. – Томск, 2020. – Т. 1 : Физика. – С. 121–123. – 0,19 / 0,06 а.л.

23. **Майрамбекова А. М.** Влияние структурного состояния титана ВТ1-0 и сплава Zr-1 мас.% Nb при гигацикловой усталости [Электронный ресурс] / А. М. Майрамбекова, А. Ю. Ерошенко, М. В. Банников // Сборник тезисов, материалы 25-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-25, Крым). Екатеринбург – Ростов-на-Дону – Крым, 19–26 апреля 2019 г. – Симферополь, 2019. – С. 426–427. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37623619_35078713.pdf (дата обращения: 06.03.2022). – 0,13 / 0,04 а.л.

24. Ерошенко А. Ю. Микроструктура, механические свойства и термостабильность ультрамелкозернистого биоинертного сплава Ti-45 мас.% Nb, сформированного abc-прессованием и многоходовой прокаткой / А. Ю. Ерошенко, Ю. П. Шаркеев, И. А. Глухов**,** М А Химич, П. В. Уваркин, **А. М. Майрамбекова**, А. И. Толмачев // Деформация и разрушения материалов и наноматериалов : сборник материалов 8 Международной конференции. Москва, 19–22 ноября 2019 г. – Москва, 2019. – С. 243. – 0,09 / 0,01 а.л**.**

25. **Майрамбекова А. М.** Влияние ультрамелкозернистого состояния на процесс усталостного разрушения в сплаве системы Zr-Nb при гигациклических испытаниях / А. М. Майрамбекова, Ю. П. Шаркеев, О. Б. Наймарк, М. В. Банников, А. Ю. Ерошенко // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии: тезисы докладов Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения основателя и первого директора ИФПМ СО РАН академика В. Е. Панина. Томск, 05–09 октября 2020 г. – Томск, 2020. – С. 304–305. – 0,14 / 0,02 а.л.

26. **Майрамбекова А. М.** Усталостные свойства биоинертных сплавов на основе титана, циркония и ниобия в различных структурных состояниях в режиме гигацикловой усталости / А. М. Майрамбекова, М. В. Банников, В. А. Оборин, А. И. Терехина, А. Ю. Ерошенко, О. Б. Наймарк, Ю. П. Шаркеев // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : сборник материалов XIV Международной конференции. Екатеринбург, 09–13 ноября 2020 г. – Екатеринбург, 2020. – С. 349. – 0,08 / 0,01 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
Заказ № 5116 от «10» августа 2022 г. Тираж 100 экз.
г. Томск, Московский тр.8, тел. 53-15-28