

На правах рукописи



СМИРНОВА Анастасия Сергеевна

**СТРУКТУРНО-МАСШТАБНЫЕ УРОВНИ
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.16.01 Металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

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

Научный руководитель:
академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор
Панин Виктор Евгеньевич

Официальные оппоненты:

Райков Сергей Валентинович – доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский государственный индустриальный
университет» (г. Новокузнецк), доцент кафедры естественнонаучных
дисциплин имени профессора В.М. Финкеля

Батаев Иван Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет», доцент кафедры
материаловедения в машиностроении

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
машиноведения Уральского отделения Российской академии наук
(г. Екатеринбург)

Защита диссертации состоится «25» января 2019 г. в 14:30 на заседании
диссертационного совета Д003.038.01 на базе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)
по адресу: 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический 2/4;
e-mail: ovs@ispms.tsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФПМ СО РАН, а также на
официальном сайте ИФПМ СО РАН: <http://ispms.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



О.В. Сизова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Повышение усталостной долговечности деталей ответственного назначения для авиационной, ракетно-космической, нефте- и газовой промышленности является одной из приоритетных задач современного материаловедения. Особое значение эта задача имеет для сварных соединений конструкционных материалов. При прочности сварных соединений на уровне 0,8–0,95 от основного материала их усталостная долговечность в разы ниже. Очень актуально повышение усталостной прочности и долговечности для сварных соединений титановых сплавов. Сварные соединения высокопрочных титановых сплавов характеризуются низкой пластичностью вследствие формирования в сварном соединении крупных зерен β -фазы, образования интерметаллидных и других фаз с высокой хрупкостью. Низкая теплопроводность титановых сплавов приводит при сварке к ощутимому перегреву зон термического влияния, росту в них размера зерна и появлению высоких остаточных напряжений. Поэтому для повышения служебных характеристик сварных соединений титановых сплавов проводят либо термическую обработку, требующую применения дорогостоящего и габаритного оборудования, либо применяют методы поверхностного пластического деформирования.

Анализ методов и способов послесварочной технологической обработки показывает, что высокой технологичностью, возможностью обрабатывать локальные области сварного соединения и зоны термического влияния, высокой производительностью при приемлемой стоимости оборудования обладает ультразвуковая механическая ковка. Ультразвуковая ковка (УЗК) характеризуется многократным импульсным приложением нагрузки с высокой частотой и отличается высокой производительностью.

Применение УЗК в процессах обработки сварных соединений в значительной степени сдерживается отсутствием обобщающих и систематизированных данных по исследованию структурно-фазовых превращений в модифицированном поверхностном слое и влиянию временно-силовых параметров обработки (мощности и времени обработки, усилие прижима обрабатывающего инструмента) и геометрических факторов (обрабатываемой области сварного соединения) на служебные характеристики сварных соединений и конструкций.

В настоящей работе изложены результаты экспериментальных исследований, проведенных в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН и НИ ТПУ по изучению структурно-фазовых превращений в поверхностных слоях под воздействием УЗК и их влиянию на механические и усталостные характеристики высокопрочных титановых сплавов авиационного назначения. Основное внимание уделено рассмотрению активации наномасштабных структурных уровней деформации и разрушения при обработке ультразвуковой ковкой и ультразвуковой ковкой с одновременным высокочастотным электроимпульсным воздействием (ВЭВ). Поскольку сплавы такого класса работают в условиях циклического нагружения, особое внимание было уделено изучению влияния УЗК и

УЗК+ВЭВ на их усталостную долговечность. Впервые предложено при УЗК сварных соединений использовать электропластический эффект (ЭПЭ). Его реализация в процессе высокочастотного электроимпульсного воздействия способствует диспергированию неравновесных высокопрочных фаз в сварных соединениях и возникновению эффекта демпфирования за счет формирования иерархии структурно-масштабных уровней, включая наномасштабные структурные уровни.

Степень разработанности темы исследования. Заметный вклад в исследования эффективности ультразвукового пластического деформирования и электропластического эффекта внесен такими известными учеными, как В.И. Лукин, О.А. Троицкий, В.В. Столяров, Е.Ш. Статников, В.П. Алехин, Amanda H. Palmatier, Jing Zheng, Shijuan Dai, Liu X.S., В.В. Кныш, Б.Н. Мордюк, Г.И. Прокопенко, А.В. Мордвинцева, И.И. Муханов, Sanjeev Kumar, В.К. Pant, S. Bagherifard, Aymen A. Ahmed, E. Maawad, Steven J. Laine и др. Несмотря на большое количество опубликованных работ, механизмы и структурные трансформации в титановых сплавах в результате УЗК и УЗК+ВЭВ остаются малоизученными, а технология высокочастотного электроимпульсного воздействия применительно к сварным соединениям вообще не исследована.

Целью настоящей работы является установление влияния ультразвуковойковки (УЗК) и УЗК в сочетании с высокочастотным электроимпульсным воздействием на структуру, механические и усталостные свойства, развитие пластической деформации и разрушение на различных структурно-масштабных уровнях сварных соединений среднелегированных титановых сплавов авиационного назначения.

Для достижения вышеуказанной цели были сформулированы следующие **задачи:**

1. Исследовать изменения структурно-фазового состояния поверхностных слоев сварных соединений титановых сплавов авиационного назначения после ультразвуковойковки и ультразвуковойковки в сочетании с высокочастотным электроимпульсным воздействием с использованием методов оптической металлографии, электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

2. Выявить закономерности эволюции структурно-масштабных уровней пластической деформации и разрушения сварных соединений в процессе их модификации ультразвуковойковкой, а также при сочетании УЗК и ВЭВ. Установить взаимосвязь деформационных процессов на различных структурно-масштабных уровнях на механические свойства сварных соединений титановых сплавов при статическом и циклическом нагружениях.

3. Исследовать закономерности процессов зарождения и распространения усталостных трещин, особенности разрушения в образцах сварных соединений с различным состоянием поверхностного слоя при статическом и циклическом нагружениях методами растровой электронной микроскопии и корреляции цифровых изображений.

Научная новизна.

1. Впервые выявлены изменения в структурно-фазовом состоянии поверхностного слоя сварных соединений высокопрочных титановых сплавов, подвергнутых УЗК. Установлено, что в поверхностном слое сварных соединений титанового сплава ВТ18У (метод дуговой сварки в аргоне (ДСА)) под воздействием УЗК формируется градиентная дефектная структура с плотностью дефектов, монотонно снижающейся с удалением от поверхности. Вблизи поверхности обработанной области (7–15 мкм) формируется высокодисперсная нанокристаллическая структура с характерными размерами зерен менее 100 нм.

2. Установлены закономерности влияния ультразвуковой ковки и ультразвуковой ковки в сочетании с высокочастотным электроимпульсным воздействием на прочностные характеристики, кинетику усталостного разрушения, макро- и микростроение изломов сварных соединений титановых сплавов ВТ18У, ВТ8-1 и ВТ23, выполненных различными видами сварки.

3. Показано, что УЗК эффективно повышает усталостную долговечность сварных соединений псевдо- α сплава ВТ18У с малой долей ОЦК β -фазы. В то же время в среднелегированном сплаве ВТ23 с высокой концентрацией β -фазы с сильно выраженной ковалентной связью при легировании хромом и молибденом, эффективность воздействия УЗК на структурно-фазовое состояние β -фазы и усталостную долговечность сварных соединений сплава является невысокой.

4. Для увеличения эффективности воздействия УЗК на усталостную долговечность сварного соединения сплава ВТ23 (электронно-лучевая (ЭЛС) и лазерная сварка (ЛС)) предложено проводить УЗК в условиях высокочастотного электроимпульсного воздействия.

5. Методами корреляции цифровых изображений и растровой электронной микроскопии выявлены особенности зарождения и распространения трещины в обработанном сварном соединении сплава ВТ23. Экспериментально количественно и качественно проиллюстрированы причины снижения скорости распространения трещины в обработанном сварном соединении.

Теоретическая значимость работы. Результаты, изложенные в диссертации, имеют фундаментальный характер и показывают важную роль активации наномасштабного структурного уровня в иерархии масштабов пластической деформации и разрушения сварных соединений титановых сплавов.

Практическая значимость работы. Результаты, полученные в работе, могут служить научной основой для разработки новых методов обработки сварных соединений современных конструкционных материалов с целью обеспечения высокой усталостной долговечности для работы в ответственных узлах и деталях авиационной техники, и других отраслях промышленности. Часть результатов работы была получена при выполнении исследований по хоздоговорам с ПАО «Компания Сухой», «ОКБ Сухого» и ФГУП «ВИАМ».

Связь работы с НИР и Государственными программами. Работа выполнялась в рамках следующих программ и проектов:

– направление фундаментальных исследований 23 «Механика деформирования и разрушения материалов, сред, изделий, конструкций, сооружений и триботехнических систем при механических нагрузках, воздействии физических полей и химически активных сред» проект 23.1.1. «Физическая мезомеханика нелинейных многоуровневых иерархически организованных систем в полях внешних воздействий», 2013–2016 г.; приоритетное направление Ш.23. проект Ш.23.1.1. «Мезомеханика самоорганизации процессов в мультискейлинге нелинейных иерархических структур и научные основы аддитивных технологий создания многослойных материалов», 2017–2020 г.;

– программа Президиума РАН № 32 «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации» проект «Наноструктурирование и модификация поверхностных слоев ответственных узлов машин, механизмов и сварных соединений с целью повышения их хладостойкости и коррозионной стойкости», 2014–2017 г.;

– грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ № НШ–10186.2016.1 «Научные основы новых производственных технологий создания многослойных керамических и металлокерамических материалов, технологий повышения хладостойкости и ресурса работы материалов, работающих в экстремальных условиях», 2016–2017 г.;

– комплексная программа фундаментальных исследований СО РАН П.1. проект «Научные основы технологий создания однородного распределения кривизны кристаллической решетки в конструкционных материалах и их сварных соединениях, получения эффекта демпфирования в структуре 3D–кристаллической и 2D–планарной подсистем, обуславливающего кратное возрастание усталостной долговечности, износостойкости и хладостойкости материалов» блока проекта «Разработка принципиально новых аддитивных технологий обработки конструкционных материалов и их сварных соединений для экстремальных условий нагружения», 2018–2020 г.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в диссертационной работе были использованы следующие методы: оптическая металлография, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, метод корреляции цифровых изображений с применением системы Vic-2D (Correlated solutions, США). Для оценки механических характеристик проведены испытания на статическое растяжение, малоцикловую усталость и измерение микротвердости. Структурно-фазовые трансформации в сварных соединениях реализовывали методом поверхностного пластического деформирования материала на ультразвуковой (УЗ) частоте. Для сварных соединений ВТ23, выполненных методами электронно-лучевой (ЭЛС) и лазерной сварки (ЛС), была разработана комбинированная обработка, заключающаяся в УЗК поверхностных слоев совместно с высокочастотным электроимпульсным воздействием.

Положения, выносимые на защиту:

1. В сварном соединении сплава ВТ18У, выполненном методом дуговой сварки в аргоне, в условиях высокой кривизны кристаллической решетки

происходит образование высокодисперсной структуры с размером зерен $\approx 30\text{--}270$ нм. Формирование такого структурного состояния в поверхностном слое подавляет зарождение трещин с поверхности и за счет этого обуславливает возрастание усталостной долговечности сварного соединения в 4,6 раза.

2. Способ обработки сварных соединений конструкционных титановых сплавов, заключающийся в совмещении ультразвуковойковки и высокочастотного электроимпульсного воздействия, при котором диспергируются полосы β -фазы и активируется процесс вязкого разрушения на наномасштабном структурном уровне.

3. Закономерности разрушения сварных соединений титанового сплава ВТ23, выполненного методом лазерной сварки, подвергнутых УЗК+ВЭВ, заключающиеся в чередовании на фрактограммах хрупких полос скола и участков вязкого разрушения с развитыми наноразмерными пластическими ротациями.

4. Снижение скорости распространения магистральной усталостной трещины в сварных соединениях ВТ23, выполненных методом лазерной сварки, в результате совмещения УЗК и высокочастотного электроимпульсного воздействия.

Достоверность полученных результатов. Результаты данной работы получены при систематическом характере проведения экспериментальных исследований и их статистической обработке, а их достоверность обеспечивается использованием современного научно-исследовательского оборудования, а также согласованностью полученных данных с результатами исследований других авторов в смежных направлениях.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международной конференции «Физическая Мезомеханика многоуровневых систем-2014. Моделирование, эксперимент, приложения», 5 сентября 2014 г. (г. Томск); V Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества», 6–10 октября 2014 г. (г. Суздаль); XIII Международной молодежной научной конференции «Королевские чтения», 6–8 октября 2015 г. (г. Самара); VI Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии», 11–13 мая 2016 г. (г. Томск); Международной конференции «Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении», 9–11 июня 2016 г. (г. Томск); Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» 2015 г., 2016 г., 2017 г., 2018г. (г. Томск); Международной научной конференции «Механика и трибология транспортных систем – 2016», 8–10 ноября 2016 г. (г. Ростов-на-Дону); Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике», 5–7 декабря 2016 г. (г. Томск); Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Современные технологии и материалы новых поколений», 9–13 октября 2017 г. (г. Томск); VII Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и

наноматериалов», 7–10 ноября 2017 г. (Москва).

Публикации. Основные результаты работы отражены в 6 печатных работах, из них 2 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 4 статьи в рецензируемых зарубежных изданиях, включенных в библиографическую базу данных Web of Science и Scopus.

Личный вклад автора.

Личный вклад автора состоит в анализе литературных данных, проведении металлографического анализа и фрактографического исследования, механических испытаний и статистической обработки полученных результатов. Постановка задач, обсуждение всех научных результатов и положений, изложенных в работе, проведены совместно с научным руководителем В.Е. Паниным. Результаты рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии были получены при совместной работе с Ю.И. Почиваловым. По результатам исследования написаны статьи в соавторстве и подготовлены выступления с докладами на научных конференциях.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 178 наименований и двух приложений. Всего 160 листов машинописного текста, включая 57 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и достоверность полученных в ней результатов, теоретическая и практическая значимость, кратко изложено содержание основных разделов, структура и объём диссертации, положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проведен анализ научно-технической литературы по титановым сплавам и их сварным соединениям, фазовым и структурным превращениям в титановых сплавах, происходящим в результате сварки плавлением, методам обработки титановых сплавов и их сварных соединений. Показано, что сварной шов характеризуется заметной структурной неоднородностью и является протяженным концентратором напряжений. По этой причине развитие пластической деформации в сварном шве не может протекать совместно с прилегающими зонами термического влияния; в результате в данные (сопряженные) зоны сварным швом генерируются мезоскопические полосы локализованного сдвига с последующим образованием в них трещин.

Создание ультрадисперсных и наноразмерных зеренных структур позволяет повысить физико-механические свойства металлических материалов на качественно новый уровень, что необходимо для практического применения в разных отраслях промышленности. Именно по этой причине макро- и микроструктуру зон материала шва и термического влияния необходимо диспергировать, активируя релаксационные процессы на наномасштабном структурном уровне пластической деформации и разрушения.

Рассмотрены основные методы поверхностной модификации, позволяющие создавать высокодисперсную структуру. Отмечено, что

технология ультразвукового поверхностного пластического деформирования является эффективной для обработки сварных соединений сталей и сплавов и позволяет существенно повысить служебные характеристики конструкционных материалов. Показано положительное влияние электропластического воздействия на механические и усталостные характеристики конструкционных материалов.

С позиции физической мезомеханики проанализирована проблема усталостного разрушения материалов. Рассмотрен подход физической мезомеханики, в котором деформируемое твердое тело представляет собой многоуровневую нелинейную иерархически организованную систему, для которой особое внимание должно уделяться проблеме самосогласования поведения структурно-масштабных уровней деформации твердого тела в любых полях внешних воздействий.

Во второй главе на основе анализа литературных данных обосновывается выбор материалов исследования и описываются методы проведения экспериментов. Рассмотрены свойства исследуемых титановых сплавов, а также описаны схемы и условия их испытаний. Дана характеристика оборудования, применявшегося для проведения экспериментов, и представлены сведения о способах и режимах обработки исследуемых сварных соединений.

В качестве объектов исследования выбраны следующие сварные соединения: псевдо- α титанового сплава ВТ18У с малым содержанием β -фазы до 3 % (Ti–6,5 Al–4 Zr–3 Sn–1 Nb–0,7 Mo–0,2 Si), выполненные дуговой сваркой в аргоне (ДСА); ($\alpha+\beta$)- титанового сплава ВТ8-1 с содержанием β -фазы до 10 % (Ti–6 Al–1,5 Zr–4,5 Mo–1,3 Sn), полученные линейной сваркой трением (ЛСТ); ($\alpha+\beta$)- титанового сплава ВТ23 с содержанием β -фазы до 30 % (Ti–5 Al–4,5 V–2 Mo–1 Cr–0,7 Fe), изготовленные электронно-лучевой (ЭЛС) и лазерной сваркой (ЛС).

Поверхность образцов была отшлифована и отполирована механически. Для травления микрошлифов использовался 2 % водный раствор плавиковой и азотной кислоты.

Механические испытания при одноосном растяжении и определение прочностных свойств были выполнены в соответствии с ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 6996–66 на универсальной испытательной машине «Instron-5582». Усталостные испытания были проведены на универсальной гидравлической испытательной машине «Schlenk Sinus.100.40» и «BISS Nano 15 кН» по ГОСТ 7855–84. Использовали цикл нагружения с асимметрией $R=0,1$.

Фрактографические исследования образцов после испытаний на малоцикловую усталость проводили с помощью метода растровой электронной микроскопии на «Tesla BS-300».

Металлографические исследования выполняли на стереомикроскопе «Stemi 2000-C» и оптическом микроскопе «Axiovert 25 CA». Микротвердость по Виккерсу измеряли с помощью прибора «ПМТ-3» с нагрузкой в 20 и 50 грамм. Рентгеноструктурный анализ проводили на установке ДРОН 4-07 в $\text{Co K}\alpha$ -излучении. При изучении исходной и модифицированной микроструктуры, полученной после УЗК и УЗК+ВЭВ, использовали метод автоматического анализа разориентировок кристаллов по картинам Кикучи-линий (EBSD – анализ) на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO–50, оснащенном

детектором обратно рассеянных электронов Nordlys (Oxford Instruments). Анализ результатов проводили при помощи пакета программ обработки EBSD данных Channel 5 (Oxford Instruments).

Модифицирование поверхности образца осуществляли методом поверхностного пластического деформирования материала на УЗ частоте. Для обработки поверхности сварных соединений применяли ультразвуковой технологический комплекс, который включает: УЗ генератор ИЛ4, предназначенный для выработки тока частотой 25 кГц с регулируемой мощностью до 630 Вт; для преобразования электрических колебаний в механические использовался магнитострикционный преобразователь. При комбинированной обработке длительность импульсов ВЭВ составляла 10 мкс, напряжение, подаваемое на поверхность металла, равнялось 50 В, частота импульсов тока составляла 1000 Гц.

Электронно-микроскопические исследования фольг из поверхностного слоя выполнены на двух просвечивающих электронных микроскопах JEM 100 СХП и JEOL-2100. Тонкие фольги для исследования готовили по стандартным методикам.

В третьей главе описаны результаты экспериментальных исследований влияния ультразвуковойковки на механические свойства, структуру и усталостную долговечность сварного соединения титанового сплава ВТ18У.

Основной металл в образцах сплава ВТ18У после травления имеет типичную для прокатанных титановых сплавов структуру и характеризуется ярко выраженной пластинчатой структурой псевдо α -сплавов титана; видны пластины α -фазы с характерным размером до 100×6 мкм и грубые границы исходных β -зерен. Для снятия остаточных сварочных напряжений и снижения содержания водорода в околошовной зоне, уменьшения коэффициента концентрации напряжений в месте перехода от основного металла к сварному шву был применен отжиг по стандартной технологии для ВТ18У при температуре 950°C и выдержке в течение 1 часа. Микроструктура отожженного сварного шва представлена длинными тонкими пластинами $\alpha(\alpha')$ -фазы, расположенными внутри крупных зерен кристаллизовавшейся β -фазы, имеющих структуру корзиночного плетения. Толщина α -пластин в сварном шве составляет 110×4 мкм, а размер β -зерен – от 120 до 1000×300 мкм. В результате УЗК в тонком поверхностном слое толщиной до ≈ 200 мкм в зоне термического влияния формируются полосы локализации деформации.

Электронно-микроскопические и микродифракционные исследования фольг показали, что в необработанном отожженном сварном соединении сплава ВТ18У наблюдаются крупные пластины зерен $\alpha(\alpha')$ -фазы шириной $\approx 0,8\text{--}1,5$ мкм, расположенные в β -матрице, и двойники размером $\approx 0,6\text{--}1$ мкм (рисунок 1, а). После ультразвуковойковки сварного соединения ВТ18У в поверхностном слое толщиной 7–15 мкм формируется высокодисперсная структура, состоящая из α - и α' -фазы, с размером зерен $\approx 30\text{--}270$ нм (рисунок 1, б, в). Такие структуры формируются в сварном соединении сплава ВТ18У в условиях высокой кривизны кристаллической решетки при содержании 2–3 % β -фазы.

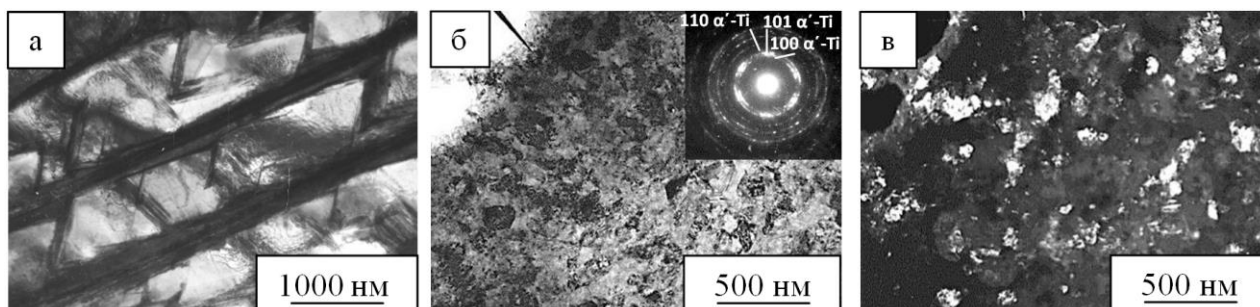


Рисунок 1 – Тонкая структура сварного шва титанового сплава ВТ18У: (а) – в исходном состоянии; после УЗК (б) – в светлом поле, (в) – в темном поле

После УЗК карта разориентаций границ субзеренной структуры (EBSD-анализ) сварных соединений выявила сильную фрагментацию исходных зерен в поверхностном слое и появление большей доли малоугловых границ (59 %), по сравнению с необработанным сварным швом (5,8 %).

Значение микротвердости по толщине сварного шва у образцов сварных соединений сплава ВТ18У в исходном отожженном состоянии составляет $\approx 4350 \pm 180$ МПа. После УЗК микротвердость в поверхностном слое возрастает до $\approx 5500\text{--}5600 \pm 150$ МПа, плавно снижаясь при увеличении расстояния от поверхности образца. На глубине образца порядка ≈ 300 мкм она становится равной исходному значению $\approx 4330 \pm 160$ МПа.

Испытания на одноосное растяжение показали, что предел прочности сварного соединения после УЗК остается на уровне прочности отожженного сварного соединения без обработки и составляет $\approx 1090 \pm 50$ МПа; пластичность при этом незначительно увеличивается.

При усталостных испытаниях в сварных соединениях без обработки УЗК зарождение усталостной трещины происходит со стороны корня сварного шва, между зоной ЗТВ и зоной сварного шва. Фрактографические исследования показывают, что усталостная трещина в обработанных образцах зарождается с боковой (необработанной) поверхности. Для сварных соединений сплава ВТ18У с высокодисперсным наноструктурированным поверхностным слоем количество циклов до разрушения составляет $> 150\,000$ циклов, что более чем в 4,6 раза превышает усталостную долговечность отожженных сварных соединений без обработки поверхностного слоя ($24\,400 \pm 7\,800$ циклов).

Четвертая глава посвящена исследованию влияния ультразвуковойковки на структуру, усталостную долговечность и механические свойства сварного соединения титанового сплава ВТ8-1, выполненного методом линейной сварки трением.

Заготовки из титанового сплава ВТ8-1 были сварены методом линейной сварки трением в ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь. Образцы были вырезаны в форме пластин с длиной рабочей части 50 мм и сечением 12×3 мм. Сплав ВТ8-1 имеет дуплексную структуру 3-го типа по шкале микроструктур двухфазных ($\alpha + \beta$)- титановых сплавов и состоит из зерен первичной α -фазы, расположенных в β -матрице, испытавшей превращение. Размер глобулярных α -зерен в среднем составляет ≈ 12 мкм; расстояние между α -зернами составляет около ≈ 8 мкм, в то же время α -пластины в пластинчатой $\alpha + \beta$ смеси имеют

толщину ≈ 1 мкм. В зоне сварного шва формируются крупные ламели бывшего β -зерна (размером $\approx 0,4-2,8$ мм) с тонким внутризеренным пластинчатым строением α' -фазы (размером ≈ 1 мкм) с игольчатой дуплексной структурой. В результате применения УЗК карта разориентаций границ субзеренной структуры показала сильную фрагментацию исходных зерен на расстоянии 50 мкм от поверхности и большую долю малоугловых границ; зерна вытянулись в наклепанном слое по направлению приложенного воздействия, средний размер элементов субструктуры составляет 0,9 мкм.

Проведенные испытания на статическое растяжение показали, что предел прочности сварного соединения ВТ8-1 (метод ЛСТ) после УЗК остается на уровне прочности сварного соединения без обработки. Однако относительное удлинение в результате УЗК возрастает от $\approx 14\pm 0,5$ % до $\approx 18\pm 2$ %.

Исследование микротвердости сварных соединений ВТ8-1 показало, что микротвердость основного металла составляет $\approx 2500\pm 210$ МПа. После сварки микротвердость в зоне сварного шва увеличивается до $\approx 3400\pm 320$ МПа. После УЗК микротвердость на поверхности сварного соединения возрастает до $\approx 5600\pm 310$ МПа за счет появления высокодисперсного слоя и снижается с увеличением расстояния от поверхности.

В результате проведенных малоцикловых усталостных испытаний сварных соединений титанового сплава ВТ8-1 с УЗК поверхностных слоев установлено, что количество циклов до разрушения составляет $11\ 100\pm 5\ 800$ циклов, что в $\approx 5,7$ раза превышает усталостную долговечность сварных соединений в исходном состоянии ($1\ 950\pm 250$ циклов). Большой разброс числа циклов до разрушения связан со структурными неоднородностями сварного шва.

В пятой главе проведено изучение влияния ультразвуковойковки и ВЭВ на структуру, механические свойства и усталостную долговечность сварных соединений титанового сплава ВТ23, выполненных методом электронно-лучевой и лазерной сварки. Микроструктура основного металла в образцах сварных соединений $\alpha+\beta$ титанового сплава ВТ23 состоит из слегка сплюснутых (близких к глобулярной форме) частиц α -фазы размером $\approx 1,5-3$ мкм, расположенных по границам зерен β -фазы размером $\approx 3-8$ мкм. Внутри зерен β -фазы наблюдается тонкопластинчатая структура на основе α -фазы. Микроструктура сварного шва представлена длинными тонкими пластинами α' -фазы размером $\approx 3-11$ мкм, расположенной внутри крупных зерен закристаллизовавшейся β -фазы. Пластинчатая α' -фаза, образуется из β -фазы в процессе охлаждения. В сварном шве макрозерна в основном столбчатые, в то же время в ЗТВ – равноосные, образованные в результате собирательной рекристаллизации β -фазы.

Предел прочности сварного соединения ВТ23 (метод ЭЛС) с УЗК поверхностных слоев остается на уровне прочности сварного соединения в состоянии поставки, однако относительное удлинение после УЗК снижается с $7\pm 1,7$ до $4\pm 0,3$ %.

Испытания на малоцикловую усталость образцов сварных соединений сплава ВТ23 (метод ЭЛС) были проведены при максимальном напряжении в

цикле 600 МПа. При этой нагрузке циклическая долговечность сварных соединений сплава ВТ23 без обработки составила $54\,600 \pm 11\,000$ циклов, что свидетельствует о высоком качестве сварного соединения. После УЗК поверхностных слоев количество циклов до разрушения возросло в 1,4 раза и составило $77\,120 \pm 13\,000$ циклов.

Микроструктура сварного соединения ВТ23 после лазерной сварки характеризуется наличием крупных зерен β -фазы размером $\approx 280\text{--}600$ мкм (рисунок 2, б) с внутренним тонкопластинчатым строением и характерным мартенситным рельефом зерен низкотемпературной α' -фазы размером $\approx 1,6\text{--}2$ мкм. Содержание в β -фазе сварного соединения сплава ВТ23 элементов VI группы (Cr, Mo), имеющих сильные ковалентные связи, затрудняет структурные трансформации ОЦК β -фазы в α'' - и α_2 (DO_{19})- фазы. В условиях лазерной сварки такие сварные соединения оказываются хрупкими.

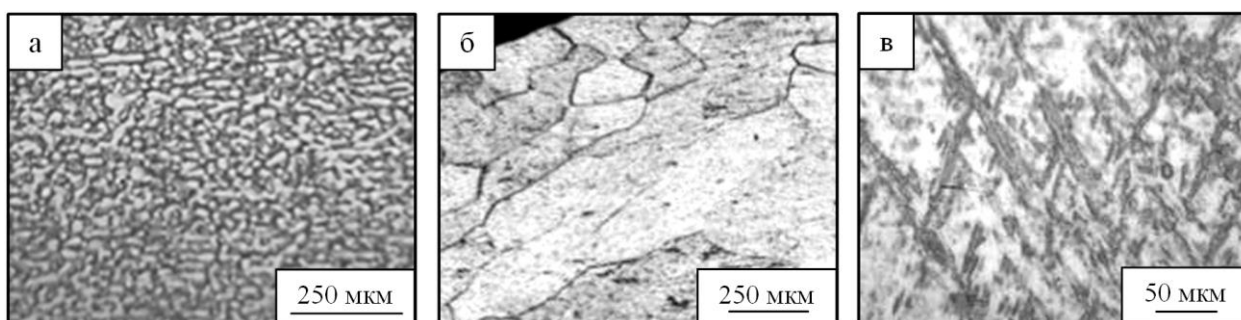


Рисунок 2 – Структура сварного соединения титанового сплава ВТ23, лазерная сварка: (а) – основной металл; (б) – зона сварного шва в исходном состоянии; (в) – зона сварного шва после УЗК+ВЭВ

После комплексной обработки УЗК+ВЭВ происходит фрагментация исходных зерен в результате деформационного двойникования (рисунок 2, в). В структуре поверхностного слоя толщиной до 5 мкм выявляются нанокристаллические зерна на основе α - и β -фаз (рисунок 3, б).

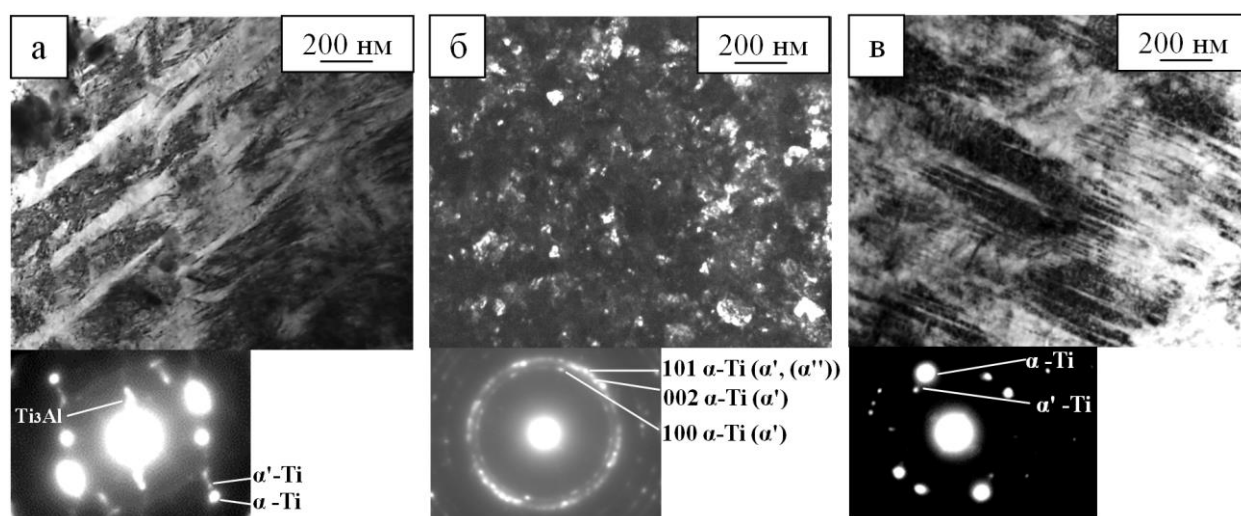


Рисунок 3 – Структура в тонком поверхностном слое сварного соединения ВТ23 (метод ЛС): (а) – зона сварного шва без обработки. С УЗК+ВЭВ: (б) – темнопольное изображение в рефлексе 100 α -фазы (5 мкм от поверхности); (в) – зона сварного шва (15 мкм от поверхности)

Анализ разориентировок границ зерен методом темного поля и EBSD-анализа выявил большую долю малоугловых границ с разориентацией 10° – 15° . На большей глубине в α -фазе наблюдаются тонкие мартенситные полосы α' -фазы, а в α' -фазе – тонкие рейки α'' -фазы толщиной 10–20 нм (рисунок 3, в).

Рентгеноструктурные исследования показывают, что после УЗК+ВЭВ в сварном соединении ВТ23 (метод ЛС) наблюдается снижение интенсивности пиков β -фазы, что свидетельствует об уменьшении ее содержания и о фазовой трансформации, происходящей в обработанном УЗК+ВЭВ сварном соединении. Уширение пиков говорит об уменьшении размеров кристаллитов, размер зеренной структуры в процессе УЗК+ВЭВ также уменьшился. Дифрактограммы исходных и обработанных образцов свидетельствуют о сильном перекрытии α - и α' -фазы, так как дифракционные линии первичной α -фазы имеют близкие кристаллографические периоды с мартенситной α' -фазой. Рентгенографический анализ раздваивающихся линий мартенситной фазы на рентгенограмме позволяет отметить переход матричной β -фазы в неравновесные α' - и α'' - фазы.

Прочность сварных соединений после лазерной сварки выше прочности основного материала и разрушение происходит по основному материалу независимо от факта проведения последующих обработок.

Малоцикловые усталостные испытания показали, что при верхнем напряжении в цикле 500 МПа среднее количество циклов до разрушения образцов с УЗК+ВЭВ составляет $58\,700 \pm 26\,000$, что в два раза превышает усталостную долговечность необработанных сварных соединений. Есть основания полагать, что эффект повышения усталостной долговечности сварного соединения сплава ВТ23 (метод ЛС) может быть значительно увеличен при возрастании мощности прикладываемых высокочастотных электрических импульсов.

Исследование фрактографических картин разрушения сварных соединений после малоцикловых усталостных испытаний показало, что после комбинированной УЗК+ВЭВ поверхность усталостного разрушения имеет четко выраженный многоуровневый характер (рисунок 4). Зарождение усталостной трещины начинается с боковой (необработанной) поверхности образцов, трещина движется радиально с менее развитым ручьистым узором, чем в образце без обработки и образце с УЗК, и меньшим количеством хрупких гребней отрыва. Это свидетельствует о более вязком характере роста усталостной трещины. Дальнейшее продвижение трещины формирует небольшую развитую зону излома с усталостными бороздками и протяженную зону волокнисто-полосчатого рельефа, создавая узкие зоны вязкого разрушения (рисунок 4, б). На профиле ее рельефа хорошо выражена нановолоконная структура, связанная с развитием динамических ротаций (рисунок 4, в). Следует отметить, что у образцов после комбинированной УЗК+ВЭВ доля чередующихся полос скола с участками вязкого разрушения (с нановолоконной структурой) на $\approx 25\%$ выше, чем у образцов без обработки; одновременно на $\approx 22\%$ снизилась площадь зоны лавинного разрушения. Это является принципиальным отличием в микрорельефе поверхности разрушения обработанных УЗК + ВЭВ образцов.

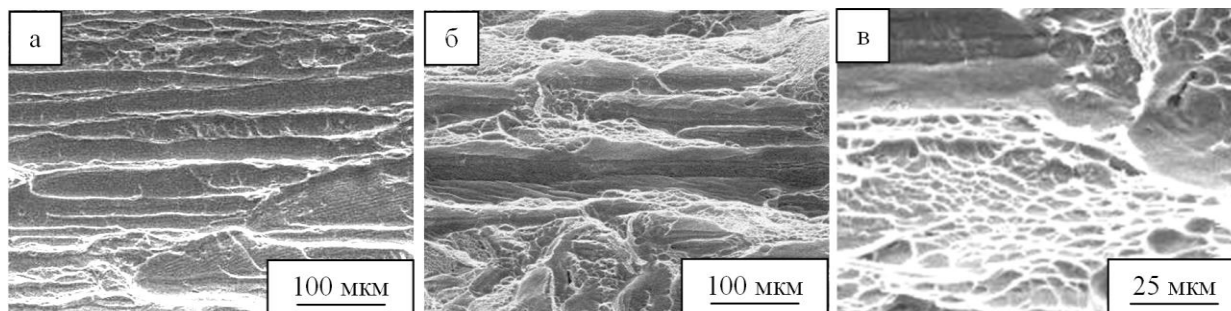


Рисунок 4 – РЭМ-фрактограммы сварного соединения титанового сплава ВТ23 (метод ЛС). Малоцикловая усталость: (а) – волокнисто-полосчатый рельеф зоны ускоренного распространения трещины (образец без обработки); (б), (в) – волокнисто-полосчатый рельеф (образец после УЗК+ВЭВ) с большой долей вязкой ротационной составляющей в рельефе

Метод корреляции цифровых изображений (DIC) с применением системы Vic-2D, позволил проследить процесс зарождения и распространения трещины как визуально, так и с анализом полей деформаций (рисунок 5 и 6). Скорость распространения трещины в исходном материале выше, чем для материала, подвергнутого комбинированной обработке. Особо следует отметить неоднородность скорости роста трещины в образце с необработанным сварным соединением (рисунок 6). В то же время в образце с обработанным швом скорость имеет в 2 раза меньшую величину и относительно плавно возрастает по мере увеличения циклической наработки.

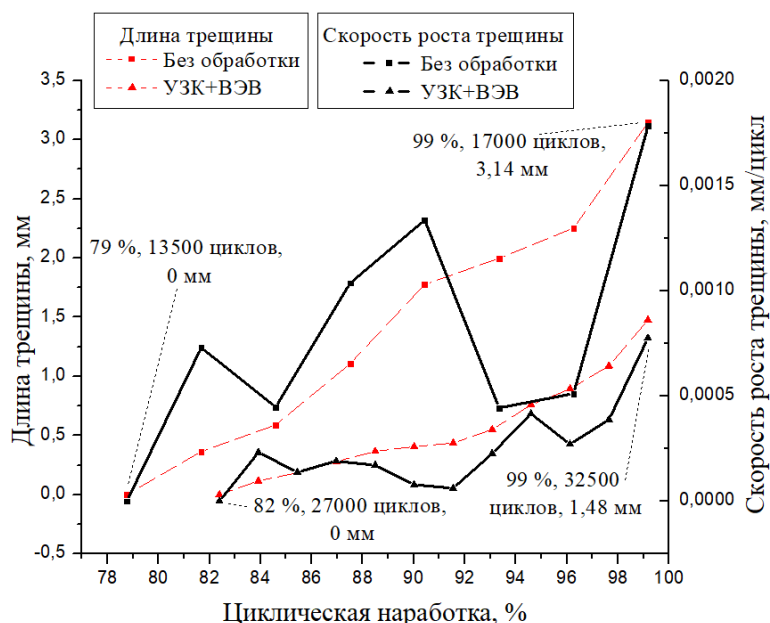


Рисунок 5 – Диаграмма зависимости длины трещины и скорости роста трещины от количества циклов до разрушения исходного сварного соединения ВТ23 (метод ЛС) и обработанного УЗК+ВЭВ

При визуальном анализе изображений полей деформации признаками зарождающейся трещины выступает появление локальных неоднородностей: для образца без обработки они выявляются при $N=11\ 000$ циклов, в то время как

для образца, подвергнутого УЗК+ВЭВ, – при $N=12\,000$ циклов. Появление визуально различимой трещины на поверхности в первом случае происходит при $N=13\,500$ циклов, тогда как после УЗК+ВЭВ это значение повышается до $N=27\,000$ циклов (рисунок 6, а, г). Результаты настоящего раздела свидетельствуют о перспективности предлагаемого метода обработки (УЗК+ВЭВ) для повышения вязкости разрушения сварных соединений, где возникают высокопрочные β -фазы с сильными ковалентными связями. Однако для диспергирования высокопрочных β -фаз требуются специальные исследования соотношения параметров ВЭВ, особенно длительности и частоты электрических импульсов.

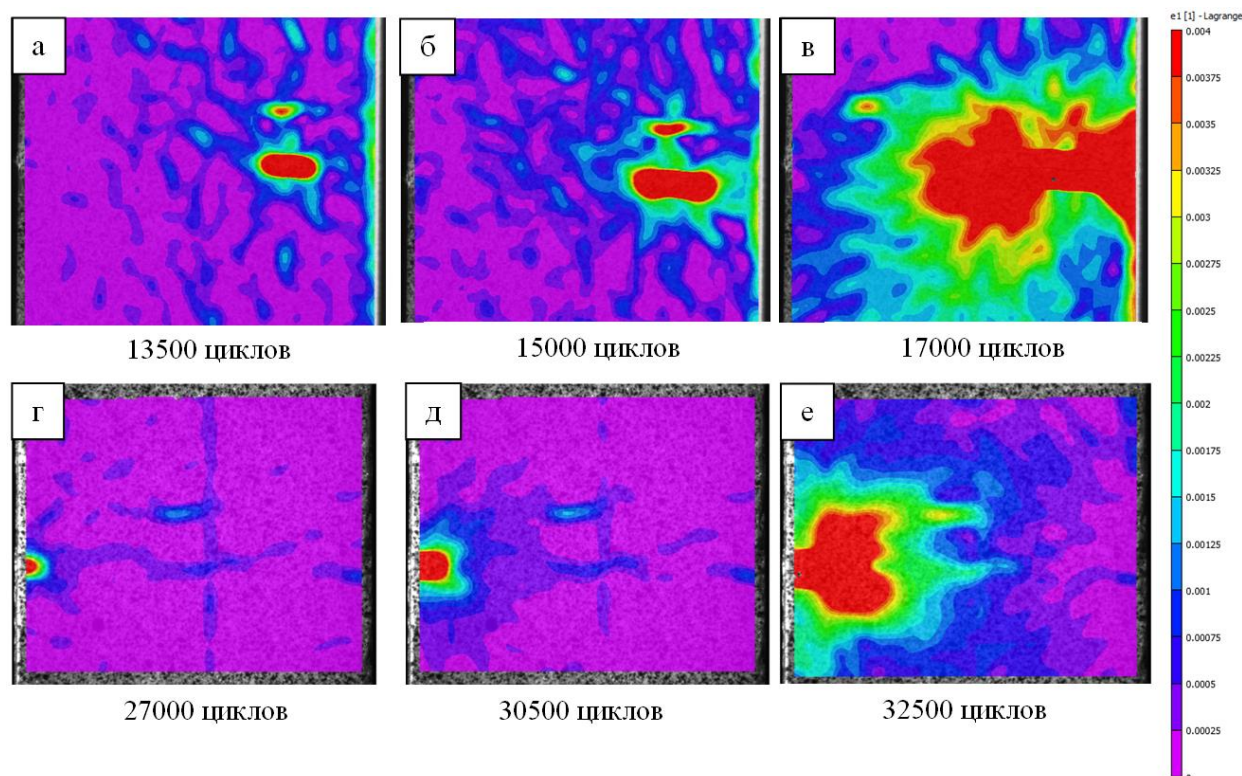


Рисунок 6 – Поля деформаций ϵ_1 в сварных соединениях ВТ23 (метод ЛС) с трещиной, вышедшей на поверхность. Малоцикловая усталость (напряжение 500 МПа): (а), (б), (в) – без обработки; (г), (д), (е) – с УЗК+ВЭВ

При большом содержании в сплаве ВТ23 (метод ЛС) ОЦК β -фазы хрупкие сварные соединения проявляют большую усталостную долговечность только при комбинированной обработке ударной ультразвуковой ковкой с высокочастотным электроимпульсным воздействием. Наномасштабные структурные уровни деформации и разрушения возникают механизмом распространения мартенситных наноструктурных полос α' (α'')-фаз.

Данный подход, связанный с анализом иерархии структурно-масштабных уровней пластической деформации и разрушения, является новым в объяснении электропластического эффекта и требует в дальнейшем всестороннего детального исследования. Однако образование на фрактограммах сварных соединений сплава ВТ23 (метод ЛС), обработанных методом (УЗК+ВЭВ) полос вязкого разрушения и возникновение в таких полосах нановолоконных

пластических ротаций, представленных на рисунке 4, является убедительным аргументом в пользу возрастания роли наномасштабного структурного уровня при деформации и разрушении сварных соединений в результате комплексной обработки (УЗК+ВЭВ).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлены закономерности влияния ультразвуковой ковки и ультразвуковой ковки в сочетании с высокочастотным электроимпульсным воздействием на структуру, механические свойства, усталостную долговечность, кинетику усталостного разрушения, макро- и микростроение изломов сварных соединений титановых сплавов ВТ18У, ВТ8-1 и ВТ23, выполненных различными видами сварки.

2. Показано, что при УЗК зоны термического влияния сварного соединения ВТ18У (метод ДСА) в поверхностном слое толщиной до 15 мкм формируется высокодисперсная структура, состоящая из α - и α' -фазы, с размером зерен ≈ 30 –270 нм. Установлено, что сдвиговая неустойчивость границ нанозерен обуславливает высокие релаксационные характеристики поверхностного слоя. Это наномасштабный структурный уровень деформации, играющий важную роль в повышении усталостной долговечности при циклическом нагружении материала. Карта разориентаций границ субзеренной структуры (EBSD-анализ) выявила сильную фрагментацию исходных зерен в поверхностном слое и появление большей доли малоугловых границ в результате УЗК сварных соединений сплава ВТ18У. Учитывая сопряжение наноструктурированного поверхностного слоя с упругонагруженной подложкой, которая задерживает зарождение трещин в нанокристаллической структуре УЗК сварных соединений ВТ18У, она оказывается очень перспективной и обуславливает многократное возрастание усталостной долговечности сварного соединения до 4,6 раза.

3. В результате УЗК сварного соединения сплава ВТ8-1 (метод ЛСТ) удается подавить зарождение трещин с поверхности и за счет этого повысить усталостную долговечность в $\approx 5,7$ раза.

4. Впервые предложено проводить УЗК сварных соединений сплава ВТ23 в сочетании с электроимпульсным воздействием. При УЗК+ВЭВ сварных соединений ВТ23 (метод ЛС) реализуется нано-структурирование, при котором происходит продольное диспергирование β -полос с образованием нанореек мартенситных $\alpha'(\alpha'')$ -фаз. Тем самым происходит иерархическое структурообразование в сварном соединении, в котором резко возрастает релаксационная роль наномасштабного структурного уровня.

5. С помощью сканирующей электронной микроскопии изломов сварных соединений сплава ВТ23 (метод ЛС), обработанных (УЗК+ВЭВ), выявлено чередование нановолоконных полос вязкого разрушения с развитыми наноразмерными пластическими ротациями.

6. Методом корреляции цифровых изображений при усталостном разрушении показано снижение в два раза скорости распространения

усталостной трещины в обработанном УЗК+ВЭВ сварном соединении сплава VT23 (метод ЛС), на фрактограмме которого имеются чередующиеся полосы скола и вязкого разрушения с развитыми наноразмерными пластическими ротациями.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Панин В.Е. Мезоскопические структурные состояния в пластической деформации наноструктурных металлических материалов / В.Е. Панин, Л.С. Сурикова, Ю.И. Почивалов, **А.С. Смирнова** // Физическая мезомеханика. – 2018. – Т. 21. – № 3. – С. 12–17.

2. Панин В.Е. Структурно-масштабные уровни пластической деформации и разрушения сварных соединений высокопрочных титановых сплавов / В.Е. Панин, С.В. Панин, Ю.И. Почивалов, **А.С. Смирнова**, А.В. Еремин // Физическая мезомеханика. – 2018. – Т. 21. – № 4 – С. 33–44.

Статьи, индексируемые в библиографических базах данных Web of Science и Scopus:

1. **Smirnova A.S.** The structure and mechanical properties of VT23 laser-welded joints / A.S. Smirnova, V.E. Panin, Yu.I. Pochivalov, A.V. Gorbunov, A.G. Malikov, A.M. Orishich // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1785. – P. 040071.

2. **Smirnova A.S.** The Investigation of Ultrasonic Mechanical Forging Influence on the Structure and Mechanical Properties of VT23 Welded Joints by Method of Laser and Electron Beam Welding / A.S. Smirnova, Yu.I. Pochivalov, V.E. Panin, A.M. Orishich, A.G. Malikov, V.M. Fomin // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1783. – P. 020212.

3. **Smirnova A.S.** The effect of advanced ultrasonic forging on fatigue fracture mechanisms of welded Ti-6Al-4V alloy / A.S. Smirnova, Yu.I. Pochivalov, V.E. Panin, S.V. Panin, A.V. Eremin, A.V. Gorbunov // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1909. – P. 020206.

4. **Smirnova A.S.** The Structure and Mechanical Properties of VT23 Welded Joints with Surface Layer Modified by Ultrasonic Mechanical Forging / A.S. Smirnova, Yu.I. Pochivalov, V.E. Panin, A. Orishich, A. Malikov, A.V. Gorbunov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 743. – P. 264–268.