

ответственного назначения является одной из приоритетных и наиболее важных задач современного материаловедения. Применяя титановые сплавы или заменяя ими другие материалы, можно добиться значительного увеличения усталостной долговечности деталей и снижения веса всей конструкции. Однако соединение деталей из титановых сплавов в конструкции путем сварки является сложной технологической задачей и может приводить к снижению ее служебных характеристик. Поэтому для сварных конструкций из титановых сплавов требуется проведение дополнительной термической или механической обработки. Анализ методов и способов дополнительных технологических обработок показывает, что высокой технологичностью, возможностью обрабатывать локальные области сварного соединения и зоны термического влияния и высокой производительностью при приемлемой стоимости оборудования обладает ультразвуковая ковка (УЗК). Однако применение УЗК к сварным соединениям титановых сплавов в настоящее время мало отражено в литературе, что делает актуальным проведение исследований о влиянии УЗК на структуру, фазовый состав и механические свойства для сварных соединений титановых сплавов и разработку технологий и методов на ее основе.

В настоящей работе изложены результаты экспериментальных исследований (проведенных в ИФПМ СО РАН) структурно-фазовых превращений в поверхностных слоях под воздействием УЗК и их влияния на механические и усталостные характеристики высокопрочных титановых сплавов авиационного назначения. Впервые предложено при УЗК сварных соединений использовать электропластический эффект, который способствует диспергированию неравновесных фаз в сварных соединениях титановых сплавов. Основное внимание уделено рассмотрению активации наномасштабных структурных уровней деформации и разрушения при обработке ультразвуковой ковкой и ультразвуковой ковкой с высокочастотным электроимпульсным воздействием.

Поскольку сплавы такого класса работают в условиях циклического нагружения, особое внимание было уделено изучению влияния УЗК на их усталостную долговечность.

Оценка выполненной соискателем работы

Диссертация А.С. Смирновой является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые экспериментальные результаты исследований структурно-фазовых превращений в поверхностных слоях сварных соединений среднелегированных титановых сплавов авиационного назначения под воздействием УЗК и УЗК+ВЭВ. Выявлено их влияние на механические и усталостные характеристики, структурно-масштабные уровни пластической деформации и разрушения в условиях высокой кривизны кристаллической решетки. Данные результаты имеют существенное значение для решения актуальной задачи формирования высокодисперсного слоя с повышенными физико-механическими характеристиками путем

ультразвукового пластического деформирования и могут быть использованы в различных отраслях промышленности для обеспечения высокого ресурса работы сварных конструкций ответственного назначения.

Основные результаты, полученные соискателем впервые

1. 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 (УЗК) и ультразвуковой ковки в сочетании с высокочастотным электроимпульсным воздействием (УЗК+ВЭВ) 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 Cr и Mo, 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 вносят вклад в существующее представление о закономерностях эволюции структуры и фазового состава поверхностных слоев сварных соединений титановых сплавов под воздействием интенсивной пластической деформации, создаваемой ультразвуковой ковкой и роли этих слоев в иерархии структурно-масштабных уровней пластической деформации и разрушения.

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».

Достоверность результатов проведенного исследования. Результаты, полученные в данном исследовании, подтверждены систематическим характером проведения экспериментальных исследований и их статистической обработкой, с использованием высокоточного научно-исследовательского оборудования, а также согласованностью полученных данных с результатами исследований других авторов в смежных направлениях.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации. Диссертация является обобщением научных исследований, выполненных А.С. Смирновой (в том числе в соавторстве) в ИФПМ СО РАН с 2014 по 2018 г.

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

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 научных публикациях, из них 2 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, и 4 статьи в зарубежных изданиях, включенных в библиографические базы данных Web of Science и Scopus. В опубликованных работах достаточно полно изложены материалы диссертации, а объем и уровень работ соответствует требованиям Высшей аттестационной комиссии РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Работы автора в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Панин В.Е. Мезоскопические структурные состояния в пластической деформации наноструктурных металлических материалов / 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.

В зарубежных изданиях, индексируемых в 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.

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 молодёжной 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. (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).

Научная специальность диссертации. Анализ структуры и содержания диссертационной работы Смирновой А.С. «Структурно-масштабные уровни пластической деформации и разрушения сварных соединений высокопрочных титановых сплавов» показал, что по содержанию и полноте изложения материала она соответствует специальности 05.16.01 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов по областям исследования «Теоретические и экспериментальные исследования влияния структуры (типа, количества и характера распределения дефектов кристаллического строения) на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов» (паспорт специальности, п. 3), «Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химико-термической, термомеханической и других видов обработок, связанных с термическим воздействием, а также специализированного оборудования» (паспорт специальности, п. 6) и всем требованиям п. II. Положения о присуждении ученых степеней.

Заключение принято на заседании экспертного научного семинара ИФПМ СО РАН по специальности 05.16.01 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Присутствовало на заседании 27 чел, в том числе 11 докторов и 13 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 27 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол №1/18 от «13» сентября 2018 г.

Председатели семинара:

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией материаловедения
сплавов с памятью формы ИФПМ СО РАН



Александр Иванович Лотков

Секретарь семинара:

кандидат физико-математических наук,
младший научный сотрудник лаборатории
материаловедения сплавов с памятью формы ИФПМ СО РАН



Доржима Юрьевна Жапова