

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе  
и инновациям НИ ТПУ  
доктор технических наук



И. Б. Степанов

09 2018 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национального исследовательского Томского  
политехнического университета» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Диссертация **«Структурно-масштабные уровни пластической деформации и разрушения сварных соединений высокопрочных титановых сплавов»**, представляемая на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, выполнена в отделении материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий (ИШ НПТ) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национального исследовательского Томского политехнического университета (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

В период подготовки диссертации соискатель Смирнова Анастасия Сергеевна (дата рождения 7 июня 1991 г.) обучалась в очной аспирантуре ФГАОУ ВО НИ ТПУ (с 1 октября 2014 г. по 19 июня 2018 г.) по направлению подготовки 22.06.01 Технологии материалов.

В июне 2012 г. Смирнова А.С. окончила бакалавриат ФГБОУ ВПО НИ ТПУ по направлению «Материаловедение и технология новых материалов» с отличием.

В июне 2014 г. Смирнова А.С. окончила магистратуру ФГАОУ ВО НИ ТПУ по направлению подготовки «Материаловедение и технологии материалов» с отличием. Диплом об окончании аспирантуры выдан в ФГАОУ ВО НИ ТПУ 30.06.2018 г.

Научный руководитель – Панин Виктор Евгеньевич, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, советник РАН, заведующий лабораторией ЛФМиНМК ИФПМ СО РАН (основное место работы).

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

### **Актуальность темы и направленность исследования**

На сегодняшний день научно-техническая проблема увеличения ресурса эксплуатации потенциально опасных высоконагруженных объектов является одной из приоритетных и наиболее важных. Применяя титановые сплавы и

заменяя ими другие материалы, можно добиться значительного увеличения усталостной долговечности деталей и сэкономить в весе всей конструкции. Однако наличие сварного соединения может способствовать развитию процесса хрупкого разрушения механически нагруженных конструкций. Для сварных конструкций из титановых сплавов проведение термообработки или модификации химического состава поверхностного слоя требует габаритного дорогостоящего оборудования. Анализ методов и способов дополнительной технологической обработки показывает, что высокой технологичностью, возможностью обрабатывать локальные области сварного соединения и зоны термического влияния, высокой производительностью при приемлемой стоимости оборудования обладает ультразвуковаяковка (УЗК).

Поскольку сплавы такого класса работают в условиях циклического нагружения, особое внимание было уделено изучению влияния УЗК на их усталостную долговечность. На сегодняшний день остается актуальной задача формирования с помощью ультразвукового пластического деформирования высокодисперсного слоя с повышенными физико-механическими характеристиками, который обеспечивает высокий ресурс работы массивных сварных конструкций.

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. Он может способствовать диспергированию неравновесных высокопрочных фаз в сварных соединениях. Впервые предложено при УЗК сварных соединений использовать электропластический эффект. Он может способствовать диспергированию неравновесных высокопрочных фаз в сварных соединениях.

#### **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, их влияние на механические и усталостные характеристики, структурно-масштабные уровни пластической деформации и разрушения. Данные результаты имеют существенное значение для решения актуальной задачи формирования с помощью ультразвукового пластического деформирования высокодисперсного слоя с повышенными физико-механическими характеристиками и могут быть использованы в авиационно-космической отрасли промышленности для обеспечения высокого ресурса работы массивных сварных конструкций.

#### **Новизна результатов проведенного исследования**

1. Выявлены изменения в структурно-фазовом состоянии поверхностного слоя сварных соединений высокопрочных титановых сплавов, подвергнутых УЗК. Установлено, что в поверхностном слое под воздействием УЗК формируется градиентная дефектная структура с плотностью дефектов, монотонно снижающейся с удалением от поверхности.

2. Установлены закономерности влияния ультразвуковойковки (УЗК) и ультразвуковойковки в сочетании с высокочастотным электрофизическим 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- $\alpha$  сплава ВТ18У с малой долей ОЦК  $\beta$ -фазы. Тогда как в среднелегированном сплаве ВТ23 с высокой концентрацией  $\beta$ -фазы с сильно выраженной ковалентной связью при легировании Cr и Mo, воздействие УЗК на структурно-фазовое состояние  $\beta$ -фазы и усталостную долговечность сварных соединений сплава является не высоким.

4. Методами корреляции цифровых изображений и растровой электронной микроскопии выявлены особенности зарождения и распространения трещины в обработанном сварном соединении ВТ23(ЛС). Экспериментально показано снижение скорости распространения трещины в обработанном сварном соединении.

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

#### **Научная и практическая значимость результатов:**

Результаты, изложенные в диссертации, имеют фундаментальный характер и вносят вклад в металловедение, в частности, в представление о закономерностях эволюции структуры и фазового состава поверхностных слоев сварных соединений титановых сплавов под воздействием интенсивной пластической деформации, создаваемой ультразвуковойковкой и роли этих слоев в иерархии масштабных уровней пластической деформации и разрушения.

Разработанный подход УЗК+ВЭВ позволяет модифицировать структуру сварного шва ВТ23 по всей толщине, тем самым увеличить его усталостные характеристики. Результаты, полученные в работе, могут использоваться при последующем внедрении способа УЗК+ВЭВ изделий из титановых сплавов, содержащих сварное соединение. Часть результатов работы была получена при выполнении исследований по хоздоговорам с ПАО «Компания Сухой», «ОКБ Сухого» и ФГУП «ВИАМ».

**Степень достоверности 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.

Подготовка образцов, проведение металлографического и фрактографического исследования, измерение микротвердости и статистическая обработка полученных результатов, были получены автором лично. Все научные результаты, изложенные в работе, обсуждение и постановка задач, выполнение испытаний на статическое и циклическое растяжение, рентгеноструктурный анализ, были получены автором в совместной работе с научным руководителем В.Е. Паниным. По результатам исследования написаны статьи в соавторстве и подготовлены выступления с докладами на научных конференциях.

**Ценность научных работ соискателя, полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах**

По материалам диссертации А.С. Смирновой опубликовано 6 печатных работ, 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 соответствуют 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 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. (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).

#### **Соответствие содержания диссертации избранной специальности**

Цель, задачи, методы исследования, содержание диссертационной работы и положения, выносимые на защиту, соответствуют 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

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.

Диссертация «Структурно-масштабные уровни пластической деформации и разрушения сварных соединений высокопрочных титановых сплавов» Смирновой Анастасии Сергеевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Заключение принято на заседании Отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Присутствовало на заседании 14 чел, в том числе 6 докторов и 8 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 14 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол №2 от «10» сентября 2018 г.

Председатель семинара:  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент отделения материаловедения ИШ НППТ ТПУ



Борис Борисович Овечкин