

**УТВЕРЖДАЮ:**

Директор ИМАШ УрО РАН  
доктор техн

  
«    »   

И. Швейкин  
2023 г.



## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН)

Диссертация: «Влияние деформационно-термической обработки на структуру, механические свойства и характеристики трещиностойкости титанового сплава ВТ23» выполнена в лаборатории деформирования и разрушения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель, Веселова Валерия Евгеньевна, работала в Институте машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН в должности инженера лаборатории деформирования и разрушения (с 11.11.2013 г. по 20.11.2020 г.), младшего научного сотрудника лаборатории деформирования и разрушения (с 21.11.2020 г. по настоящее время).

В 2008 г. окончила Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный технический университет – УПИ», присуждена квалификация инженер по специальности «Материаловедение в машиностроении». В 2020 году окончила аспирантуру Института машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН по научной специальности 12.06.01 – Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии по направлению (профилю) подготовки – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (период обучения 01.11.2014-30.10.2020).

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Гладковский Сергей Владимирович, заведующий лабораторией деформирования и разрушения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук.

Выписка из протокола № 269 научно-технического семинара

Отдела физических проблем машиностроения

ИМАШ УрО РАН от 21 сентября 2023 г.

**Председатель семинара** Смирнов Сергей Витальевич д.т.н., с.н.с., г.н.с., зав. лаб. микромеханики материалов.

**Присутствовали:** Смирнов С.В. д.т.н., с.н.с., г.н.с., зав. лаб. микромеханики материалов; Швейкин В.П. д.т.н., доцент, директор; Каманцев И.С. к.т.н., зам. директора по научной работе, зав. сектором новых материалов и технологий; Привалова В.В. к.ф.-м.н., ученый секретарь; Гладковский С.В. д.т.н., доцент, зав. лаб. деформирования и разрушения; Задворкин С.М. к.ф.-м.н., зав. лаб. технической диагностики; Саврай Р.А. к.т.н., зав. лаб. конструкционного материаловедения; Пугачева Н.Б. д.т.н., доцент, г.н.с. лаб. микромеханики материалов; Владимиров А.П. д.т.н., с.н.с., с.н.с. лаб. технической диагностики; Вичужанин Д.И. к.т.н., с.н.с. лаб. микромеханики материалов; Мясникова М.В. к.т.н., с.н.с. лаб. микромеханики материалов; Путилова Е.А. к.т.н., с.н.с. лаб. технической диагностики; Соболева Н.Н. к.т.н., с.н.с. лаб. конструкционного материаловедения; Быкова Т.М., к.т.н., с.н.с. лаб. микромеханики материалов; Поволоцкая А.М. к.т.н., с.н.с. лаб. технической диагностики; Мушников А.Н. к.т.н., н.с. лаб. технической диагностики; Давыдова Н.А. к.т.н., н.с. лаб. конструкционного материаловедения; Крючков Д.И. к.т.н., н.с. лаб. системного моделирования; Худорожкова Ю.В. к.т.н., н.с. лаб. технической диагностики; Волков В.П. к.т.н., ведущий инженер, Черкасова Т.А. и.о. м.н.с. лаб. деформирования и разрушения; Горулева Л.С. инженер лаб. технической диагностики.

**Слушали:** младшего научного сотрудника лаборатории деформирования и разрушения Веселову Валерию Евгеньевну с докладом по теме диссертации «Влияние деформационно-термической обработки на структуру, механические свойства и характеристики трещиностойкости метастабильного титанового сплава VT23», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov i spлавов.

**Вопросы:**

**д.т.н. Смирнов С.В.:**

1. В докладе используется термин «осадка», почему вы не используете термин «сжатие»?
2. С какой целью вы проводили испытания на растяжение и сжатие?
3. Как был определен второй предел текучести в образце с метастабильной  $\beta$ -фазой?
4. Каким методом вы оценивали количество фаз после исследованных режимов термической обработки?
5. Существует ли ГОСТ для определения триггерного напряжения  $\sigma_{\text{trigger}}$ .

**к.т.н. Каманцев И.С.:**

Необходимо конкретизировать положения, выносимые на защиту.

**д.т.н. Пугачева Н.Б.:**

1. В каком Совете будет доложена данная диссертация?
2. Каково дальнейшее развитие темы?

**к. ф.-м. н. Задворкин С. М.:**

Каков объемный эффект мартенситного превращения при напряжении?

**к.т.н. Худорожкова Ю. В.:**

1. Как влияет повышение температуры старения на прочностные характеристики?
2. Как влияет температура предварительной закалки на изменение прочности после старения?

**Горулева Л.С.:**

1. Какова погрешность расчета параметра решетки  $\beta$ -фазы?
2. Необходимо уточнить название диссертационной работы и отразить в нем новизну.

**к.т.н. Соболева Н. Н.:**

Почему вы разделяете механические свойства и трещиностойкость?

**к.т.н. Волков В.П.:**

1. Какой максимальный уровень механических свойств достигнут в этом сплаве?
2. Возможно ли применение данного сплава в турбостроении?

На все вопросы даны исчерпывающие ответы.

**С положительной оценкой диссертационной работы выступили:**

Саврай Роман Анатольевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник, заведующий лаб. конструкционного материаловедения (рецензент).

Пугачева Наталия Борисовна, д.т.н., доцент, г.н.с. лаб. микромеханики материалов.

Смирнов Сергей Витальевич, д.т.н., с.н.с., г.н.с., зав. лаб. микромеханики материалов

По результатам рассмотрения диссертации «Влияние деформационно-термической обработки на структуру, механические свойства и характеристики трещиностойкости метастабильного титанового сплава VT23» принято следующее **заключение:**

**Актуальность темы диссертации.** Титановые сплавы за последние десятилетия благодаря сочетанию высокой удельной прочности, сопротивлению хрупкому разрушению и коррозионной стойкости находят все более широкое применение в авиакосмической технике, химическом машиностроении и медицине. Дальнейшее улучшение физико-механических свойств данных сплавов развивается в направлении разработки новых составов и режимов деформационно-термической обработки. В группе конструктивных титановых сплавов наиболее высокий уровень прочностных свойств ( $\sigma_B = 1300-1800$  МПа) достигается в сплавах с двухфазной ( $\alpha+\beta$ )-структурой. Вместе с тем повышение

двухфазной ( $\alpha+\beta$ )-структурой. Вместе с тем повышение прочности металлических материалов, как правило, сопровождается снижением пластичности, ударной вязкости и трещиностойкости, что усиливает опасность хрупкого разрушения изделий и элементов конструкций. В связи с этим первостепенное значение при выборе оптимальных составов и режимов термической обработки титановых сплавов приобретает оценка их конструкционной прочности с использованием критериев механики разрушения применительно к различным условиям нагружения. В отечественной авиакосмической промышленности до настоящего времени широко востребованным остается высокопрочный двухфазный ( $\alpha+\beta$ )-сплав ВТ23. Однако несмотря на всестороннее исследование данного сплава взаимосвязь между характеристиками его статической и циклической трещиностойкости, механизмами разрушения и сформированной при различных режимах закалки и старения обработки структурой систематически не изучалась. Малоизученным аспектом исследования этого сплава являются также особенности его механического поведения, связанные с развитием упруго-обратимого  $\beta\leftrightarrow\alpha$ "-мартенситного превращения при наличии в структуре метастабильной  $\beta$ -фазы.

#### **Оценка содержания диссертации.**

Диссертация является законченной квалификационной работой, в которой содержатся результаты исследования структуры и фазового состава титанового сплава ВТ23 после различных режимов деформационно-термической обработки. Выявлены закономерности формирования комплекса механических свойств и характеристик трещиностойкости изученных сплавов, определены оптимальные режимы деформационной и термической обработки для получения заданных свойств. Впервые в сплаве ВТ23 установлен двухстадийный характер пластического течения (двойной предел текучести) и обнаружен эффект мартенситной сверхупругости, обусловленный развитием упруго-обратимого  $\beta\leftrightarrow\alpha$ "-мартенситного превращения.

### **Личное участие соискателя.**

состоит в участии в постановке задач исследования, пробоподготовке образцов, получении и обработке данных рентгенофазового анализа, структурных и фрактографических исследований, а также результатов определения механических характеристик. Вошедшие в диссертационную работу результаты и выводы были получены и сформулированы совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

**Степень достоверности результатов** обеспечена использованием современного метрологически поверенного оборудования, взаимодополняющих методов структурного анализа (оптическая, растровая и просвечивающая электронная микроскопия), апробированных методов определения механических свойств, а также соответствием полученных результатов с известными данными по структуре и свойствам высокопрочных конструкционных титановых сплавов.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались на следующих конференциях и школах-семинарах: LVIII Международной конференции «АПП» (Пермь, 2017), XX Международной научно-технической уральской школе-семинаре металловедов – молодых ученых (Екатеринбург, 2020); XV и XVI международных конференциях «МРДМК» (Екатеринбург, 2020, 2022), XXVI Уральской школе металловедов-термистов (Екатеринбург, 2022); 5 и 6 всероссийских научно-практических конференциях с международным участием «ИТММ» (Пермь, 2021-2023), XI Международной школе «Физическое материаловедение» (Тольятти, 2023).

Исследования, представленные в диссертационной работе, выполнены в соответствии с основными направлениями научной деятельности ИМАШ УрО РАН в рамках госбюджетных тем № ААААА18-118020790147-4, № АААА-А18-118020790148-1; проектов РФФИ № 14-08-31673 мол\_а; № 16-08-01077 А.

**Научная новизна** представленной работы заключается в следующем:

1. Впервые на сплаве ВТ23 с метастабильной  $\beta$ -фазой установлен двухстадийный характер пластического течения (двойной предел текучести) и обнаружен эффект мартенситной сверхупругости, обусловленный развитием упруго-обратимого  $\beta \leftrightarrow \alpha''$ -мартенситного превращения.
2. Методом ПЭМ в шейке разрывного образца сплава с метастабильной  $\beta$ -фазой зафиксировано образование  $\alpha''$ -мартенсита напряжения и рентгенофазовым анализом выявлено изменение фазового состава на поверхности статического и циклического роста трещины.
3. Показано, что формирование в сплаве после закалки от 800 °С и старения при 550 °С ультрамелкозернистой бимодальной структуры, состоящей из смеси частиц  $\alpha$ - и  $\alpha''$ -фаз размером 100...300 нм. обеспечивает наибольшие значения статической трещиностойкости ( $K_{IC}$ ) и конструкционной прочности ( $T = K_{IC} \times \sigma_{0,2}$ ).
4. Выявлена различная чувствительность характеристик статической и циклической трещиностойкости к структурным изменениям закаленного от 800 °С сплава после старения при температурах 500 и 550 °С.

#### **Теоретическая значимость**

состоит в том, что с использованием подходов структурной механики разрушения определены регулируемые режимами термической обработки размеры структурных элементов состаренного сплава (длина  $\alpha''$ -частиц и расстояние между ними), обеспечивающие наибольшие показатели трещиностойкости и конструкционной прочности материала. Проанализировано соотношение между размерами структурных элементов и протяженностью зон статической и циклической пластической деформации в вершине трещины (предразрушения).

#### **Практическая значимость результатов работы.**

1. На основании данных пластометрических испытаний в однофазной и двухфазной ( $\alpha + \beta$ )-областях рекомендованы режимы горячего

деформирования сплава, обеспечивающие пониженное сопротивление пластической деформации и сохранение исходного размера  $\beta$ -зерна.

2. Предложен режим термической обработки сплава (закалка от 800 °С и старение 550 °С, 8ч.), позволивший получить наилучший комплекс механических свойств, статической и динамической трещиностойкости ( $\sigma_{0,2}=1050$  МПа,  $\sigma_B=1160$  МПа,  $\delta=9$  %,  $K_{CV}=187$  кДж/м<sup>2</sup>,  $K_{IC}=60,9$  МПа×м<sup>1/2</sup>,  $J_{id}=338$  Дж/м<sup>2</sup>).

3. Предложен режим термической обработки (закалка от 800 °С и старение 500 °С, 8 ч), обеспечивающий наибольшее сопротивление росту усталостной трещины в условиях циклического нагружения.

4. Показана эффективность использования инструментированных ударных испытания для определения составляющих энергии разрушения и динамической трещиностойкости сплава.

**Ценность научной работы** заключается в установлении закономерностей влияния структуры и фазового состава после различных режимов термической обработки на механические свойства и характеристики трещиностойкости титанового сплава ВТ23.

**Научная специальность, которой соответствует диссертация.**

Содержание диссертации соответствует пункту 2 «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях», 3 «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» и пункту 5 «Теоретические и экспериментальные исследования влияния фазового состава и структурного состояния на зарождение и распространение трещин при различных видах внешних воздействий» паспорта специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.



Диссертационная работа соответствует требованиям, установленным п. 14 Положения о присуждении ученых степеней. Текст диссертации представляет собой самостоятельную научно-квалификационную работу, не содержит заимствованного материала без ссылки на автора и (или) источник заимствования. Не содержит результатов научных работ, выполненных в соавторстве, без ссылок на соавторов. Материалы диссертации полностью представлены в работах, опубликованных соискателем.

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ:**

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. Влияние режимов термической обработки на характеристики трещиностойкости и механизмы разрушения метастабильного титанового сплава ВТ23 / С. В. Гладковский, **В. Е. Веселова**, С. В. Дубинский, Р. В. Воронков, Н. И. Ковалев, А. В. Кулемин, И. Е. Ковалев // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2023. – Т. 25. № 1. С. – 16-26.
2. Влияние режимов термической обработки на структуру и статическую трещиностойкость ( $\alpha+\beta$ )-титанового сплава ВТ23 / С. В. Гладковский, **В. Е. Веселова**, Д. И. Вичужанин, М. Ч. Зиченков, С. В. Дубинский, Н. И. Ковалев, А. В. Кулемин, И. Е. Ковалев // Деформация и разрушение материалов. – 2022. -№ 9. – С. 19-27
3. Влияние режимов термической обработки на структуру и механические свойства метастабильного титанового сплава ВТ23 // **В. Е. Веселова**, С. В. Гладковский, Н. И. Ковалев // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23. № 4. – С. 31-39.
4. Реологическое поведение сплава ВТ23 при деформировании в широком интервале температур / С. В. Гладковский, В. П. Волков, Д. Р. Салихьянов, **В. Е. Веселова**, А. М. Пацелов // Деформация и разрушение материалов. – 2020. – № 5. – С. 18-21.

*Переводная версия:* Rheological behavior of a VT23 alloy during deformation in a wide temperature range / S. V. Gladkovskii, V. P. Volkov, D. R. Salikhyanov, **V. E. Veselova**, A. M. Patselov // Russian Metallurgy (Metally). - 2020. – Т. 2020. – № 10. – С. 1147-1150. [Scopus, WoS].

5. Влияние деформационной стабильности  $\beta$ -фазы в титановом сплаве VT23 на фазовый состав, структуру и механические свойства при растяжении и ударном изгибе / С. В. Гладковский, **В. Е. Веселова**, А. М. Пацелов, В. А. Хотинков // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21. – № 4. С. 26-33.

6. Использование динамической спекл-интерферометрии для бесконтактной диагностики зарождения усталостной трещины и определения скорости ее роста / А. П. Владимиров, И. С. Каманцев, **В. Е. Веселова**, Э. С. Горкунов, С. В. Гладковский // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – № 4. – С. 85-90.

*Переводная версия:* Veselova, V. E. Use of dynamic speckle interferometry for contactless diagnostics of fatigue crack initiation and determining its growth rate A. P. Vladimirov, I. S. Kamantsev, **V. E. Veselova**, E. S. Gorkunov, S. V. Gladkovskii S.V. // Technical Physics. – 2016. – Т. 61. – № 4. – С. 563-568. [Scopus, WoS].

7. Изучение процесса зарождения усталостной трещины по изменению рельефа поверхности образца и ее спекловых изображений / А. П. Владимиров, И. С. Каманцев, А. В. Ищенко, **В. Е. Веселова**, Э. С. Горкунов, С. В. Гладковский, С. М. Задворкин // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 1. – С. 21-26.

Публикации в других изданиях:

8. Influence of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Characteristics of the Titanium Alloy Ti-5Al-5 V-2Mo-Cr with Metastable  $\beta$ -Phase / S. V. Gladkovsky, **V. E. Veselova**, S. N. Sergeev, A. M. Patselov // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2023. – V. 76. – P. 2091–2097 [Scopus, WoS].

9. Структурные аспекты трещиностойкости метастабильного титанового сплава ВТ23 / С.В. Гладковский, **В.Е. Веселова** // В сборнике: Физическое материаловедение: XI Международная школа – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2023. – С. 231.

10. Реологические свойства двухфазного титанового сплава ВТ23 при горячей деформации в широком температурном диапазоне / **В.Е. Веселова**, С.В. Гладковский, В. П. Волков, Д. Р. Салихьянов // В сборнике: Уральская школа молодых металлургов. Сборник материалов XX Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов-молодых ученых – 2020. – С. 270-273.

11. Изучение процессов образования и роста усталостных трещин в монолитных и слоистых металлических материалах физическими методами неразрушающего контроля / С. В. Гладковский, А. П. Владимиров, Э. С. Горкунов, И. С. Каманцев, **В. Е. Веселова**, Н. А. Друкаренко // В сборнике: Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. Сборник материалов. – 2016. – С. 106.

Диссертация «Влияние деформационно-термической обработки на структуру, механические свойства и характеристики трещиностойкости титанового сплава ВТ23» Веселовой В.Е. рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

В голосовании приняли участие 22 человек. Результаты голосования: за – 22 чел., против – нет, воздержалось – нет.

Смирнов Сергей Витальевич д.т.н., с.н.с., г.н.с., зав. лаб. микромеханики материалов ИМАШ УрО РАН,

председатель научно-технического семинара

Мясникова Марина Валерьевна

к.т.н., с.н.с. лаб. микромеханики материалов ИМАШ УрО РАН,

секретарь научно-технического семинара

