

«УТВЕРЖДАЮ»

проректор по научной работе
и инновациям ФГБОУ ВО
«Новосибирский
государственный
технический университет»



А.И. Отто

03 20 24 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» на диссертационную работу Веселовой Валерии Евгеньевны на тему: «Влияние деформационно-термической обработки на структуру, механические свойства и характеристики трещиностойкости титанового сплава ВТ23» по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Актуальность темы выполненного исследования.

Для обеспечения надежности элементов авиационных конструкций из высокопрочных титановых сплавов с $(\alpha+\beta)$ -структурой необходимо обеспечить наилучшее соотношение между прочностными свойствами материала и характеристиками сопротивления хрупкому разрушению. Поэтому оценка конструкционной прочности с использованием критериев механики разрушения является важным элементом выбора оптимальных составов и режимов обработки титановых сплавов. В этом отношении диссертационная работа Веселовой В.Е., направленная на изучение влияния сформированной при деформационно-термической обработке структуры на комплекс механических свойств, характеристик трещиностойкости и механизмы разрушения широко востребованного в отечественном авиастроении титанового сплава ВТ23, является актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы Веселовой В.Е. подтверждаются значительным объемом представленных экспериментальных данных, полученных с использованием современных методов изучения структуры и определения механических характери-

стик, их всесторонним анализом и сопоставлением с аналогичными результатами работ российских и зарубежных авторов по титановым сплавам различных систем легирования, в том числе сплавов с деформационно-нестабильной β -фазой.

Научная новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

- Впервые на сплаве VT23 с метастабильной β -фазой установлен двухстадийный характер пластического течения и обнаружен эффект мартенситной сверхупругости, обусловленный развитием упруго-обратимого $\beta \leftrightarrow \alpha''$ -мартенситного превращения.
- Методом ПЭМ и рентгенофазового анализа подтверждено образование при механическом нагружении сплава с метастабильной β -фазой α'' -мартенсита напряжения и выявлены различия в изменении фазового состава на поверхности статического и циклического излома.
- Показано, что формирование в сплаве субмикроструктурной бимодальной структуры, состоящей из ультрамелкодисперсной смеси частиц α - и α'' -фаз после закалки от 800 °С и старения при 550 °С, 8 ч. обеспечивает наибольшие значения статической трещиностойкости и конструкционной прочности.
- Установлено влияние соотношения между протяженностью пластической зоны в вершине трещины и параметрами структуры сплава на показатели статической и циклической трещиностойкости.

Значимость результатов для науки.

Выявлены особенности механического поведения (эффекты двойного пластического течения и мартенситной сверхупругости) сплава VT23 с метастабильной β -фазой при испытаниях на растяжение, вызванные образованием α'' -мартенсита напряжения. Определены размеры структурных элементов состаренного сплава (длина α -частиц и расстояние между ними), обеспечивающие наибольшие показатели трещиностойкости и конструкционной прочности материала. С использованием подходов структурной механики разрушения проанализировано соотношение между размерами структурных элементов сплава и протяженностью зон статической и циклической пластической деформации в вершине трещины (зон предразрушения).

Практическая значимость полученных автором диссертации результатов.

- 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 β -зерна.

- Предложен режим термической обработки сплава (закалка от 800 °С и старение 550 °С, 8ч.), позволивший получить наилучший комплекс механических свойств, статической и динамической трещиностойкости.
- Предложен режим термической обработки (закалка от 800 °С и старение 500 °С, 8 ч), обеспечивающий наибольшее сопротивление росту усталостной трещины в условиях циклического нагружения.
- Показана эффективность использования инструментированных ударных испытания для определения составляющих работы разрушения и динамической трещиностойкости сплава.

Результаты диссертационной работы внедрены в НИР по государственному контракту от 02.10.2019 г. № 19411.1770290019.18.015, заключенному между ФАУ «ЦАГИ» и Министерством промышленности и торговли РФ, в части рекомендаций по режимам термической обработки сплава ВТ23, обеспечивающим получение комплекса повышенных механических свойств и характеристик статической трещиностойкости.

Рекомендации, сформулированные на основе результатов исследований, имеют практическую значимость для оптимизации режимов термической обработки титанового сплава ВТ23 с целью повышения его конструкционной прочности и могут быть использованы в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». ФАУ ЦАГИ имени проф. Н.Е. Жуковского, ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», НИЦ «Курчатовский институт – ВИАМ» и в других организациях.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений.

Научные положения, выводы и заключения, представленные в диссертации, характеризуется логичностью построения, аргументированностью, а также четкостью и последовательностью изложения. Работа прошла апробацию на авторитетных российских и международных научно-технических конференциях. По результатам диссертационного исследования опубликовано 11 научных трудов, из них 7 статей в рецензируемых научных журналах из списка ВАК, 4 в рецензируемых научных журналах из списка WoS и Scopus.

Оценка содержания диссертации и автореферата.

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, включающего 164 наименований. Общий объем диссертации – 154 страниц. Диссертация содержит 70 рисунков и 11 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, представлена научная новизна, практическая и теоретическая значимость, методология и методы исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, описан личный вклад соискателя, степень достоверности и апробация полученных результатов.

В **первой главе** проведено обобщение результатов проведенных ранее исследований по изучению влияния деформационно-термической обработки на структуру, механические свойства и характеристики трещиностойкости титановых сплавов, в том числе с метастабильной β -фазой.

Во **второй главе** указаны объект исследования и режимы деформационно-термической обработки, представлено оборудование и описаны методики исследования.

Третья глава посвящена исследованию реологии сплава методом пластометрических испытаний при различных температурах, что позволило построить кривые деформирования в области температур 700...1200° С и определить значения напряжения пластического течения (σ_s). Показано, что деформация в ($\alpha+\beta$)-области характеризуется выраженными пиковыми напряжениями, за которыми следуют участки разупрочнения. Снижение пикового напряжения с увеличением температуры испытаний вызвано растворением α -фазы в β -матрице. Установлено, что при деформации в β -области пики напряжений на кривых деформирования не наблюдаются и в зависимости от температуры испытаний величина σ_s соответствует значениям 50...150 МПа. Рекомендованы режимы обработки давлением с целью снижения энергетических затрат и предотвращения роста β -зерна.

В **четвертой главе** с использованием методов металлографии, EBSD- и ПЭМ-анализа детально исследованы фазовый состав и структура сплава после закалки и старения по различным режимам. На ПЭМ-изображениях сплава после закалки от 860 °С выявлен твидовой контраст, свидетельствующий о метастабильной β -фазы по отношению к механическому нагружению, а в зоне шейки разрывного образца зафиксирован тонкоиглочатый α'' -мартенсит напряжения. Показано, что старение при температуре 550 °С после закалки от 800 °С способствует формированию бимодальной структуры с крупными пластинами α -фазы и ультрамелкодисперсной смеси упрочняющих частиц α - и α'' -фаз, расположенных в β -матрице. Предложена общая схема развития фазовых превращений при закалке и старении титанового сплава ВТ23 по различным режимам.

В **пятой главе** изучены механические свойства сплава ВТ23 при статическом растяжении и ударном изгибе после закалки от 800 и 860 °С и старения при 500 и 550 °С. Выявлены аномалии механического поведения сплава с метастабильной β -фазой при испытаниях на растяжение, заключающиеся в проявлении эффектов двойного пластического течения и мартенситной сверхупругости. Установлен режим термической обработки, способствующий достижению наиболее высоких прочностных свойств упрочненного старением сплава при минимальной пластичности и ударной вязкости (закалка от 860 °С и старение при 500 °С), а также режим, обеспечивающий оптимальный комплекс стандартных механических свойств (закалка от 800 °С и старение при 550 °С). Методом инструментированных ударных испытаний наряду с ударной вязкостью KCV определены ее составляющие: работа, затрачиваемая на зарождение (A_z) и на распространение трещины (A_p), и определена их зависимость от температуры закалки и старения. Выявлена связь между механическими свойствами сплава после различных режимов термической обработки и строением макро- и микрорельефа поверхности излома разрывных и ударных образцов.

В шестой главе представлены результаты испытаний на статическую и циклическую трещиностойкость, а также описаны микромеханизмы разрушения сплава ВТ23. Установлено, что перевод β -фазы в метастабильное состояние при повышении температуры закалки с 800 до 860 °С приводит к росту статической трещиностойкости закаленного сплава ВТ23 и улучшает его циклическую трещиностойкость в области значений $\Delta K \leq 25 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$. Проанализирована связь между фазовым составом, параметрами структуры и показателями трещиностойкости упрочненного старением сплава. Показано, что наибольшие значения статической трещиностойкости K_{1C} и показателя конструкционной прочности ($T = K_{1C} \times \sigma_{0.2}$) реализуются после старения при 550 °С с предварительной закалкой от 800 °С, что обусловлено формированием ультрамелкодисперсной бимодальной структуры. При этом наиболее высокая циклическая трещиностойкость сплава после закалки от 800 °С и старения при 500 °С, связывается с повышенным содержанием удлиненных частиц α -фазы, способствующих торможению трещины за счет ее ветвления. Выявлены особенности строения изломов и различия в механизмах роста трещины при статическом и циклическом нагружении в зависимости от режимов термической обработки сплава.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.

Диссертационная работа Веселовой В.Е. соответствует паспорту научной специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» в пунктах:

п. 2. «Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях, включая технологические воздействия, и влияние сварочного цикла на металл зоны термического влияния, их моделирование и прогнозирование»;

п. 3. «Теоретические и экспериментальные исследования влияния разнородных структур, в том числе кооперативного, на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов, их моделирование и прогнозирование»;

п. 5. «Теоретические и экспериментальные исследования механизмов деформации, влияния фазового состава и структуры на зарождение и распространение трещин при различных видах внешних воздействий, их моделирование и прогнозирование».

Вопросы и замечания по диссертационной работе.

1. В разделе 1.2.1 «Составы и структура $\alpha+\beta$ - и β -титановых сплавов» следовало бы привести не только марки отечественных титановых сплавов, но и их химические составы.

2. Из главы 2 не понятно каковы были размеры образцов, используемых для термической обработки, реологических исследований и других видов испытаний. Не понятно выполнялись ли реологические испытания на воздухе, в вакууме или атмосфере инертного газа?

3. На странице 62 диссертационной работы при анализе результатов металлографических исследований отмечается, что внутри β -зёрен располагаются фрагменты α -фазы и тонкие пластины α'' -фазы. На рисунках 3.5 б и в пластины α'' -фазы не указаны.

4. Какой метод использовался для количественной оценки фазового состава образцов, результаты которого представлены на рисунке 4.12?

5. Ряд дифрактограмм, представленных в работе, был получен с поверхности разрушения образцов. Какова была площадь поперечного сечения и шероховатость поверхности, используемой для исследований методом рентгеновской дифракции? Были ли образцы достаточно плоскими и гладкими для того, чтобы исключить влияние их геометрии и шероховатости поверхности на справедливость выводов, сделанных автором работы?

6. На стр. 72 диссертационной работы отмечается, что повышение температуры закалки приводит к уменьшению размера частиц α -фазы в процессе последующего старения. В чём причина данного явления?

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, обладает научно-практической значимостью, характеризуется логически выстроенными и обоснованными научными положениями и выводами, отражающие результаты исследований. Работа написана грамотным научно-техническим языком и хорошо проиллюстрирована графиками, изображениями микроструктур и поверхностей строения изломов.

Таким образом, диссертация Веселовой Валерии Евгеньевны на тему «Влияние деформационно-термической обработки на структуру, механические свойства и характеристики трещиностойкости титанового сплава ВТ23» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи повышения конструкционной прочности материалов авиакосмической техники, имеющей значение для развития физического металловедения, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.


Диссертационная работа и содержание отзыва обсуждены и одобрены на заседании научного семинара кафедры материаловедения в машиностроении Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», протокол № 3 от 07.03.2024 г.

Присутствовало на заседании 27 человек.

Результаты голосования: «за» - 27 человек, «против» - нет, «воздержалось» - нет.


Отзыв подготовлен д.т.н. (2.6.17 – материаловедение), профессором, заведующим кафедрой материаловедения в машиностроении Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), Батаевым Владимиром Андреевичем.

Заведующий кафедрой
материаловедения В
машиностроении НГТУ, д-р. техн.
наук, профессор


Батаев Владимир
Андреевич

Подпись Батаева В.А. заверено
начальник ОК НГТУ

Пустовалова О. К.


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»
Адрес: 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20
Тел.: +7(383)-346-06-12
E-mail: vabataev@yandex.ru
Сайт: <https://www.nstu.ru>