

**ВЕСЕЛОВА Валерия Евгеньевна**

**ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА  
СТРУКТУРУ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT23**

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова» Уральского отделения Российской академии наук

**Научный  
руководитель:**

**Гладковский Сергей Викторович,**  
доктор технических наук, доцент

**Официальные  
оппоненты:**

**Колобов Юрий Романович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий лабораторией физико-химической инженерии  
композиционных материалов Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки  
Федеральный исследовательский центр проблем  
химической физики и медицинской химии Российской  
академии наук

**Дьяконов Григорий Сергеевич**

кандидат технических наук, заведующий лабораторией  
многофункциональных материалов Федерального  
государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Уфимский университет  
науки и технологии»

**Ведущая  
организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Новосибирский  
государственный технический университет» (Новосибирск)

Защита состоится «05» апреля 2024 года в 15.00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ05.13 по адресу 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (сайт <http://pstu.ru>)

Автореферат разослан «09» февраля 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Е. М. Федосеева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** 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 создания новых составов и проведения дополнительной деформационно-термической обработки. В группе конструкционных титановых сплавов наиболее высокий уровень прочностных свойств ( $\sigma_B = 1300-1800$  МПа) достигается в сплавах с 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 деформационно-термической 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.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Фазовые и структурные превращения, механические свойства и характеристики трещиностойкости титановых сплавов конструкционного назначения подробно исследованы в работах отечественных и зарубежных учёных – Хорева А. И., Ильина А. А., Колачева Б. А., Дроздовского Б. А., Горынина И. В., Чечулина Б. Б., Полькина И. С., Попова А. А., Томсинского В. С., Иванова А. С., Валиева Р. З., Семеновы И. П., Колобова Ю.Р., Салищева Г. А., Швецова О. В., Контратьева С. Ю., Шереметьева В. А., Прокошкина С. Д., а также Williams J. C., Collings E. W, Paradkar A., Niinomi M., Chakraborty S. B., Richards N. L., Liang R., Ritchie R., Grosdidier T., Xu L., Li C..

Выявлены основные закономерности формирования структурно-фазового состава высокопрочных  $\beta$ - и ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавов при деформационно-термическом воздействии. Рассмотрена возможность развития в метастабильных титановых сплавах деформационного  $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения и его влияние на механическое поведение. Значительное количество работ посвящено изучению механических свойств и характеристик трещиностойкости конструкционных титановых сплавов, включая метастабильный сплав ВТ23. Для этого сплава в зависимости от режимов обработки в литературе указан очень широкий разброс значений  $K_{IC} = 18...145$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup>. Вместе с тем влияние фазового состава и

морфологии фаз после различных режимов закалки и старения на механические свойства и сопротивление росту трещин в рамках подхода структурной механики разрушения для сплава ВТ23 остается малоизученным. В связи с этим была сформулирована следующая

**Цель диссертационной работы –**

- оптимизация структурно-фазового состава титанового сплава ВТ23 методом деформационно-термической обработки для повышения механических свойств и комплекса характеристик трещиностойкости изделий авиакосмической техники с заданным уровнем прочности.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить реологическое поведение и процессы структурообразования в сплаве ВТ23 при деформации осадкой в интервале температур 700...1200 °С.
2. Провести комплексное исследование эволюции фазового состава и структуры при различных температурах закалки и старения в исходном металле и зонах деформации и разрушения.
3. Выявить связанные с образованием  $\alpha''$ -мартенсита напряжения особенности механического поведения сплава в условиях проявления деформационной нестабильности  $\beta$ -фазы при испытаниях на растяжение.
4. Изучить влияние температуры закалки и старения на механические свойства, характеристики трещиностойкости и механизмы разрушения при различных условиях нагружения во взаимосвязи с изменением фазового состава и структуры сплава.

**Научная новизна:**

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 и рентгенофазового анализа подтверждено образование при механическом нагружении сплава с метастабильной  $\beta$ -фазой  $\alpha''$ -мартенсита напряжения и выявлены различия в изменении фазового состава на поверхности статического и циклического излома.
3. Показано, что формирование в сплаве субмикроструктурной бимодальной структуры, состоящей из ультрамелкодисперсной смеси частиц  $\alpha$ - и  $\alpha''$ -фаз (размер частиц 100-300 нм) после закалки от 800 °С и старения при 550 °С, 8 ч. обеспечивает наибольшие значения статической трещиностойкости и конструкционной прочности.
4. Установлено влияние соотношения между протяженностью пластической зоны ( $\tau_{зпд}$ ) в вершине трещины и параметрами структуры сплава (длина  $\alpha$ -пластин, ширина  $\beta$ -прослойки) на показатели статической и циклической трещиностойкости сплава.

**Теоретическая значимость работы** 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 (зон предразрушения).

#### **Практическая значимость 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 механический свойств, статической и динамической трещиностойкости ( $\sigma_{0,2}=1050$  МПа,  $\sigma_B=1160$  МПа,  $\delta=9\%$ ,  $KCV=187$  кДж/м<sup>2</sup>,  $K_{IC}=60,9$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup>,  $J_{id}=338$  кДж/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.

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, статической трещиностойкости и конструкционной прочности.

#### **Методология и методы исследования.**

Для решения поставленных задач использовались современные методики рентгенофазового, структурного и фрактографического анализа. Применялись стандартизованные и прецизионные методы механических испытаний на осадку, одноосное растяжение и ударный изгиб, а также на статическую, циклическую и динамическую трещиностойкость.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Влияние температуры деформации осадкой при пластометрических испытаниях в диапазоне 700...1200 °С на напряжение пластического течения и изменение структурно-фазового состава сплава.

2. Закономерности изменения фазового состава и морфологии упрочняющих фаз при температурах закалки 800 и 860 °С и старения 500 и 550 °С.

3. Эффекты двойной текучести и сверхупругости в сплаве с метастабильной  $\beta$ -фазой, вызванные развитием  $\beta\rightarrow\alpha$  мартенситного превращения при растяжении.

4. Установленное влияние сформированной после закалки от 800 °С и старения при 550 °С ультрамелкодисперсной смеси частиц  $\alpha$ - и  $\alpha''$ -фаз размером 100...300 нм на повышение статической трещиностойкости и конструкционной прочности сплава.

5. Выявленные изменения механизма роста усталостной трещины в закаленном и состаренном сплаве с различным фазовым составом и структурой с ростом величины размаха  $\Delta K$ .

**Достоверность результатов работы** 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 известным данным 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 № АААА-А18-118020790147-4, № АААА-А18-118020790148-1; проектов РФФИ № 14-08-31673 мол\_а; № 16-08-01077.

**Личный вклад автора** 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.

#### **Публикации.**

По теме диссертационной работы 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.

#### **Структура и объем диссертации.**

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.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели 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.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору научных работ по формированию структуры, механических свойства и сопротивления разрушению конструкционных титановых сплавов. Приведены результаты исследований востребованного в отечественной промышленности высокопрочного ( $\alpha+\beta$ )-сплава ВТ23. Отмечается недостаточная проработка вопросов, связанных с влиянием превращения метастабильной  $\beta$ -фазы в  $\alpha$ "-мартенсит напряжения, способствующего проявлению аномального механического поведения сплава ВТ23.

Во **второй главе** представлены материалы исследования, режимы термической обработки и методики исследования. Материалом исследования служил титановый сплав ВТ23 производства Корпорации ВСМПО-АВИСМА. Химический состав сплава приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав сплава ВТ23

Элемент	Ti	V	Al	Mo	Cr	Fe	Si	Zr
Содерж., мас. %	85,87	4,78	4,855	1,865	1,305	0,80	0,15	0,025

Заготовки из титанового сплава ВТ23 в состоянии поставки после отжига при 750 °С закаливались от температур 800 и 860 °С в воду. Часть закаленных образцов подвергалась старению при температурах 500 и 550 °С в течение 8 часов.

Для изучения структурного состояния и строения изломов образцов сплава ВТ23 использовались современные методы оптической металлографии, просвечивающей и растровой электронной микроскопии, рентгенофазового и фрактографического анализа. Испытания сплава на осадку проводились в интервале температур 700...1200 °С на кулачковом пластометре ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН. Применялись стандартные и прецизионные механические испытания на одноосное растяжение. Использование методики инструментированных ударных испытаний на копрах позволило наряду с определением значений KCV разделить общую работу удара (А) на составляющие – работу на зарождение трещины (Аз) и на распространение трещины (Ар), а также определить значения показателя динамической трещиностойкости  $J_{id}$ . Испытания на статичную и циклическую трещиностойкость проводились на компактных образцах толщиной 12 мм тип 3 по ГОСТ 25.506-85 и РД 50-345-82 на испытательной машине INSTRON 8801. Для оценки циклической трещиностойкости строились кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР) в координатах «скорость роста усталостной трещины da/dN – размах ΔK». Механические характеристики определялись при комнатной температуре и усреднялись по результатам испытаний не менее 3 идентичных образцов. Разброс экспериментальных значений не превышал ±2,5 %.

**Третья глава** посвящена определению реологических свойств титанового сплава ВТ23 при пластометрических испытаниях в интервале температур 700–1200 °С и изучению его фазового состава и структуры после деформации.

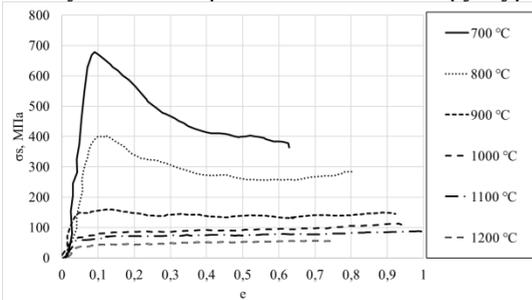


Рисунок 1 – Кривые напряжение-деформация при испытаниях на осадку в диапазоне температур 700...1200 °С

Как видно на кривых напряжение-деформация (рис. 1), повышение температуры осадки меняет форму кривых деформирования и снижает напряжения пластического течения. Наиболее заметно реологическое поведение сплава меняется в интервале повышения температуры деформирования от 700 до 900 °С. При деформации сплава ВТ23 в ( $\alpha+\beta$ )-области зафиксированы выраженные пиковые напряжения при степенях деформации, близких к 0,1, за которыми следуют

участки разупрочнения. С повышением температуры деформации значения пиковых напряжений снижаются от 700 до 160 МПа. При деформации в  $\beta$ -области величина  $\sigma_s$  находится на установившемся уровне, соответствующем  $\sigma_s = 50...150$  МПа.

Структура сплава после осадки в  $(\alpha+\beta)$ -области характеризуется наличием искривленных границ  $\beta$ -зерен, измельчением исходных  $\alpha$ -пластин в результате развития процессов возврата и рекристаллизации. При испытаниях в  $\beta$ -области происходит измельчение, возврат и рекристаллизация  $\beta$ -зерен. Наличие пикового напряжения при испытаниях в  $(\alpha+\beta)$ -области связано с протеканием деформации преимущественно по  $\alpha$ -фазе, имеющей меньшее число плоскостей скольжения, чем  $\beta$ -фаза.

В четвертой главе проведено сравнительное исследование структурных состояний при различных температурах закалки и старения методами металлографии, EBSD- и ПЭМ-анализа. Изучен фазовый состав в зонах деформации разрывных образцов и на поверхности изломов. Выявлено увеличение параметра решетки  $\beta$ -фазы с повышением температуры закалки с 800 до 860 °С от 0,321 до 0,328 нм, что указывает на формирование метастабильного состояния по отношению к механическому нагружению. Показано, что размер бывшего  $\beta$ -зерна находился в пределах 250...300 мкм. Как видно из табл. 2, структурные параметры состаренного сплава существенно меняются в зависимости от режимов термической обработки.

Таблица 2. Структурные параметры сплава VT23 после старения

Режим термообработки	Толщина $\beta$ -прослойки, мкм	Толщина $\alpha$ -частицы, мкм	Длина $\alpha$ -частицы, мкм
Зак. 800 °С и стар. 500 °С	1...3	2...4	7...10
Зак. 860 °С и стар. 500 °С	3...6	1...2	4...7
Зак. 800 °С и стар. 550 °С	0,2...0,8	0,5...1,5	2...6
Зак. 860 °С и стар. 550 °С	1...5	0,5...1	1...5

Результаты металлографического анализа закалённых образцов (рис. 2, а, б) показали, что внутреннее строение бывших  $\beta$ -зерен характеризуется колониями первичной  $\alpha$ -фазы, а также более дисперсными пластинами  $\alpha'$ -мартенсита, количество которого увеличивается с повышением температуры закалки. После старения при температуре 500 °С микроструктура образцов, представляют собой равномерно распределённые глобулярные (эллипсообразные)  $\alpha$ -частицы, равномерно распределённые в  $\beta$ -матрице (рис. 2, в, г), размер которых с повышением температуры закалки уменьшается (табл. 2), а расстояние между ними увеличивается. Микроструктура образцов после старения при температуре 550 °С представлена вытянутыми  $\alpha$ -частицами, имеющими пластинчатое строение, равномерно расположенными в  $\beta$ -матрице (рис. 2, д, е). Старение при температуре 550 °С после закалки от 800 °С обеспечивает наименьшую толщину  $\beta$ -прослойки 0,2...0,8 мкм (расстояние между  $\alpha$ -частицами).

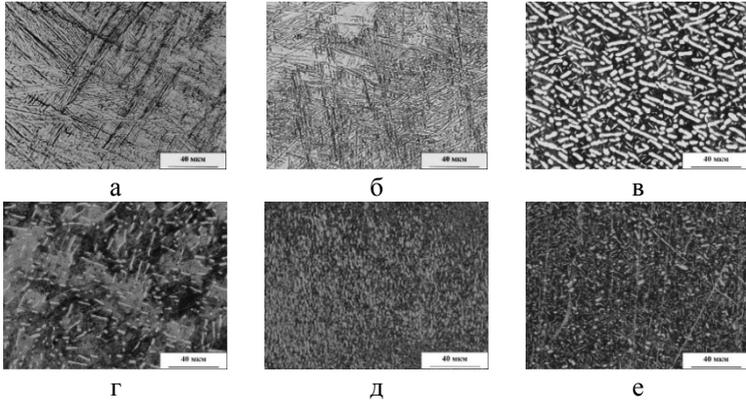


Рисунок 2 – Микроструктура сплава VT23: а – зак. 800 °С; б – зак. 860 °С; в – зак. 800 °С и стар. 500 °С; г – зак. 860 °С и стар. 500 °С; д – зак. 800 °С и стар. 550 °С; е – зак. 860 °С и стар. 550 °С

ПЭМ-анализ образцов после закалки от температуры 860 °С (рис. 3, а) выявил в  $\beta$ -матрице твидовый контраст, который указывает на пониженную стабильность  $\beta$ -фазы по отношению к мартенситному превращению, инициированным приложенным напряжением. На ПЭМ-изображениях образцов, закаленных при температуре 860 °С (рис. 3, б), после одноосного растяжения в зоне шейки образца был обнаружен игольчатый орторомбический  $\alpha''$ -мартенсит. Тонкая структура сплава после старения при 500 °С представлена  $\alpha$ -частицами с расположенными в поперечном направлении тонкими прослойками (рис. 3, в).

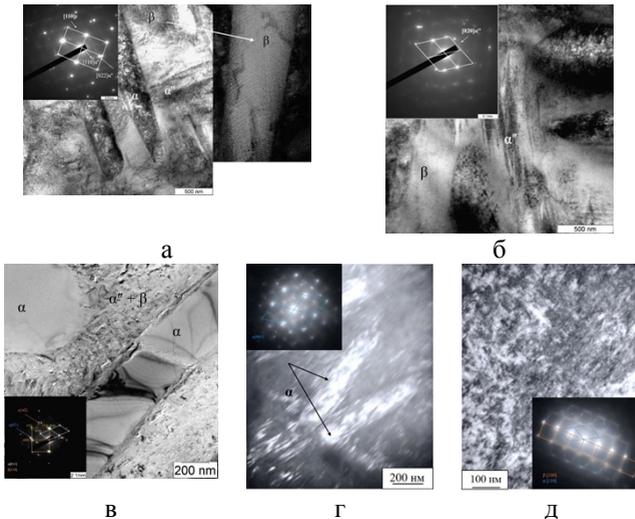


Рисунок 3 – ПЭМ-изображения: а – зак. 860 °С; б - зак. 860 °С и деформация; в - зак. 800 °С и стар. 500 °С; г – д – зак. 800 °С и стар. 550 °С

Сложное строение  $\alpha$ -частиц может быть связано с наличием двойникованных ориентировок внутри одного выделения. На ПЭМ-изображениях сплава после закалки от 800 °С и старения при 550 °С (рис. 3, г, д) выявлены пластины  $\alpha$ -фазы простого строения без внутренних двойников, окруженные ультрамелкодисперсной смесью  $\beta$ ,  $\alpha$  и  $\alpha''$ -частиц размером 100...300 нм, что указывает на наличие структуры бимодального типа.

Согласно данным металлографии и EBSD-анализа закалка отожженного сплава приводит к переходу от двухфазного ( $\alpha+\beta$ ) к трехфазному ( $\alpha+\beta+\alpha''$ )-состоянию (табл. 3).

Увеличение температуры нагрева под закалку способствует более полному растворению  $\alpha$ -частиц в  $\beta$ -матрице и увеличению атермического мартенсита с 18 до 85 %. Старение сплава при 500 °С приводит к распаду  $\alpha''$ -мартенсита и метастабильной  $\beta$ -фазы на дисперсную смесь  $\alpha$ -частиц в  $\beta$ -матрице и способствует росту количества  $\beta$ -фазы до 65 и 82 %.

Таблица 3. Количество фаз в титановом сплаве BT23 после различных режимов термообработки

Режим термообработки	$\alpha$	$\beta$	$\alpha''$
Отжиг 750 °С	65	35	-
Зак. 800 °С	32	50	18
Зак. 860 °С	7	8	85
Зак. 800 °С + стар. 500 °С	31	65	4
Зак. 860 °С + стар. 500 °С	12	82	6
Зак. 800 °С + стар. 550 °С	48	УМЗ ( $\alpha, \beta, \alpha''$ )	
		52	
Зак. 860 °С + стар. 550 °С	24	УМЗ ( $\alpha, \beta, \alpha''$ )	
		76	

В процессе старения при 550° С происходит увеличение количества  $\alpha$ -фазы и в структуре сплава формируется ультрамелкодисперсная смесь ( $\alpha+\beta+\alpha''$ )-фаз с суммарным содержанием 52 и 76%. Определить количество фазовых составляющих смеси использованными методами

анализа не представилось возможным.

В пятой главе изучены механические свойства сплава BT23 при статическом и динамическом и нагружении. Повышение температуры закалки до 860 °С в результате изменения фазового состава и дестабилизации  $\beta$ -фазы приводит к заметному повышению временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$ , ударной вязкости KCV при одновременном снижении относительного удлинения  $\delta$ , твердости HRC (табл. 4).

Таблица 4. Механические и свойства твердость сплава BT23 после различных режимов термической обработки

Режим термообработки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	HRC
Зак. 800 °С	870	990	17	45
Зак. 860 °С	375/960*	1050	11	42
Зак. 800 °С + стар. 500 °С	1130	1252	5	54
Зак. 860 °С + стар. 500 °С	1407	1576	1,5	58
Зак. 800 °С + стар. 550 °С	1050	1160	9	42
Зак. 860 °С + стар. 550 °С	1200	1360	4	44

\*Приведены значения двух условных пределов текучести

Из сравнения кривых растяжения образцов, закаленных от температур 800 и 860 °С (рис. 4, а, б) видно, что после закалки от 860 °С кривая имеет несколько участков и характеризуется типичным для метастабильных титановых сплавов «двойным пределом текучести» (табл. 4). Первый «фазовый» предел текучести образца,  $\sigma_{1,0,2}=375$  МПа, обусловлен развитием  $\beta \rightarrow \alpha''$ -мартенситного превращения под напряжением. Второй «дислокационный» предел текучести ( $\sigma_{2,0,2}=960$  МПа) соответствует началу пластической деформации после образования  $\alpha''$ -мартенсита

напряжения. Величина триггерного напряжения ( $\sigma_{\text{trigger}} = 400$  МПа.) начала инициированного напряжением  $\beta \rightarrow \alpha''$  превращения определялась как точка пересечения касательной к первичной упругой линии и касательной к новому линейному участку кривой нагружения [A. Paradkar et al., Mater. Sci. Eng., 2008].

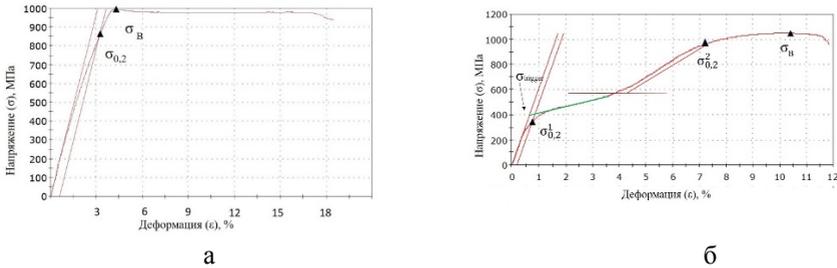


Рисунок 4 – Кривые напряжение-деформация после закалки от: а – 800 °С; б – 860 °С

Прецизионные механические испытания разрывных образцов по схеме знакопостоянного отнулевого «нагружения-разгрузки» с записью диаграммы в координатах «нагрузка-деформация образца» с использованием экстензометра показали, что линии нагрузки и разгрузки закаленного от 800 °С сплава со стабильной  $\beta$ -фазой после 1, 10 и 100 циклов нагружения имеют одинаковый наклон (рис. 5, а). Это указывает на отсутствие упруго-обратимых мартенситных превращений при механическом нагружении. Напротив, испытания сплава в метастабильном состоянии после закалки от 860 °С на первом цикле нагружения (рис. 5, б) выявлено пониженное значение предела пропорциональности  $\sigma_{\text{пр}} \approx 100$ -110 МПа. Увеличение количества циклов нагружения – разгрузки до 10 и далее до 100 при напряжении цикла 600 МПа, превышающем триггерное напряжение, приводит к появлению замкнутой петли механического гистерезиса, связанной с развитием упруго-обратимого мартенситного  $\beta \leftrightarrow \alpha''$  превращения (рис. 5, б), а степень возвращаемой упругой деформации составляет  $\epsilon = 0,8$  %.

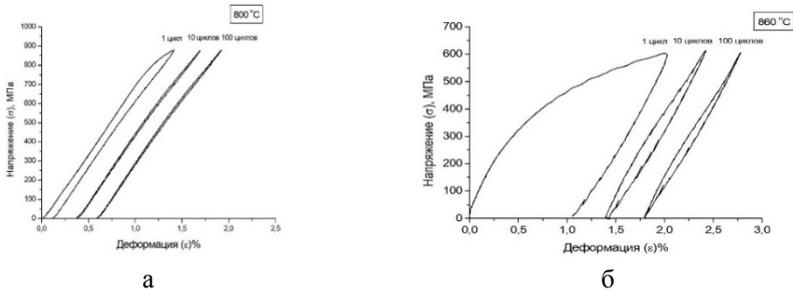


Рисунок 5 – Диаграммы 1, 10 и 100 циклов нагрузки – разгрузки сплава после закалки от: а – 800 °С ; б – 860 °С

Дополнительное старение сплава при температурах 500 и 500 °С при значительном росте прочностных свойств и твердости приводит к существенному снижению пластичности и ударной вязкости (табл. 4). Наиболее высокие значения ( $\sigma_{0,2} = 1407$  МПа и  $\sigma_B = 1576$  МПа) при минимальных значениях  $\delta$  и KCV достигаются после закалки от 860 °С и старения при 500 °С. Повышение температуры закалки с

800 до 860 °С за счёт образования дисперсной  $\alpha$ -фазы при всех изученных температурах старения способствует достижению более высоких прочностных и более низких вязкопластических свойств. Рост температуры старения с 500 до 550 °С снижает эффект упрочнения, но существенно улучшает пластичность и ударную вязкость. Наилучший комплекс механических свойств ( $\sigma_{0,2} = 1050$  МПа,  $\sigma_B = 1160$  МПа,  $\delta = 1,5\%$ ,  $KCV = 187$  кДж/м<sup>2</sup>) достигается после закалки от 800 °С и старении при 550 °С. Установлено, что для большинства режимов термической обработки значения  $A_z$  были в 6-7,5 раза выше по сравнению с  $A_p$  (табл. 5) за исключением закалки от 860 °С, после которой за счет развития  $\beta \rightarrow \alpha''$  превращения было получено наибольшее значение  $A_p = 6,8$  Дж и соотношение  $A_p/A_z = 0,44$ .

Таблица 5. Характеристики ударной вязкости сплава ВТ23 после различных режимов термической обработки

Режим термообработки	$A_z$ , Дж	$A_p$ , Дж	$A_p/A_z$	$KCV$ , кДж/м <sup>2</sup>	$J_{id}$ , кДж/м <sup>2</sup>
Зака. 800 °С	16,3	2,8	0,2	238	408
Зака. 860 °С	15,3	6,8	0,44	276	383
Зака. 800 °С + стар. 500 °С	10,8	1,6	0,15	125	270
Зака. 860 °С + стар. 500 °С	1,6	0,3	0,1	18	40
Зака. 800 °С + стар. 550 °С	13,5	1,8	0,2	187	338
Зака. 860 °С + стар. 550 °С	8,5	1,3	0,15	121	213

В главе шесть описано влияние режимов закалки и старения на трещиностойкость и микромеханизмы разрушения сплава ВТ23 при различных условиях нагружения.

Таблица 6. Сопrotивление пластической деформации, статическая трещиностойкость, конструкционная прочность и размер пластической зоны в вершине трещины СТ-образцов сплава ВТ23 ( $T_{неп} = 20$  °С)

Режим термообработки	$K_{IC}$ , МПа $\times$ м <sup>1/2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$T$ , МПа <sup>2</sup> $\times$ м <sup>1/2</sup> $\times$ 10 <sup>3</sup>	$r_{зпл}$ , мм
Зака. 800 °С	56,1	870	48,8	0,23
Зака. 860 °С	58,9	960	56,5	0,21
Зака. 800 °С + стар. 500 °С	39,3	1130	44,4	0,07
Зака. 860 °С + стар. 500 °С	24,8	1406	34,9	0,02
Зака. 800 °С + стар. 550 °С	60,9	1050	63,9	0,18
Зака. 860 °С + стар. 550 °С	47,9	1200	57,5	0,09

Повышение температуры закалки до 860 °С вызывает заметный прирост статической трещиностойкости сплава (табл. 6), что, главным образом, вызвано дестабилизацией  $\beta$ -фазы по отношению к образованию  $\alpha''$ -мартенсита напряжения. Дополнительное упрочняющее старение при 500 °С вызывает резкое снижение статической трещиностойкости  $K_{IC}$  и показателя конструкционной прочности  $T = K_{IC} \times \sigma_{0,2}$  [М. Шпайдель, МиТОМ, № 5, 2005]. В наибольшей степени это происходит после закалки от температуры 860 °С и связывается с глобуляризацией  $\alpha$ -фазы. Повышение температуры старения до 550 °С приводит к существенному росту статической трещиностойкости, особенно, после закалки от 800 °С, обеспечивающей наиболее высокие значения  $K_{IC} = 60,9$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup> и  $T = 63,9$  МПа<sup>2</sup> $\times$ м<sup>1/2</sup> $\times$ 10<sup>3</sup>.

Установлено, что повышенный уровень  $K_{IC} = 56,1...60,9$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup> сплава в закаленном и состаренном состоянии (табл. 6) реализуются в том случае, когда рассчитанные по методике [Е. Hornbogen, Acta Metall, 1978] зоны статической пластической деформации ( $r_{плд} = 0,18...0,23$  мм) в вершине трещины находится в пределах исходного  $\beta$ -зерна ( $0,25...0,30$  мм). Согласно [М. Niimata et al., ISIJ Int., 1991] это является одним из условий достижения высокой трещиностойкости ( $\alpha+\beta$ -титановых сплавов).

Разрушение образцов сплава с минимальной статической трещиностойкостью (зака. 860 °С и стар. 500 °С) развивается по границам  $\beta$ -зерен и носит межзеренный характер, а также сопровождается формированием фасеток квазискола и вытянутых углублений с элементами гребенчатого рельефа (рис. 6, а, б). Повышение температуры старения до 550 °С после закалки от 800 °С, способствующее достижению наибольших значений  $K_{IC}$  и  $T$  (табл. 6), меняет строение изломов сплава с межзеренного на преимущественно внутризеренный (рис. 6, в).

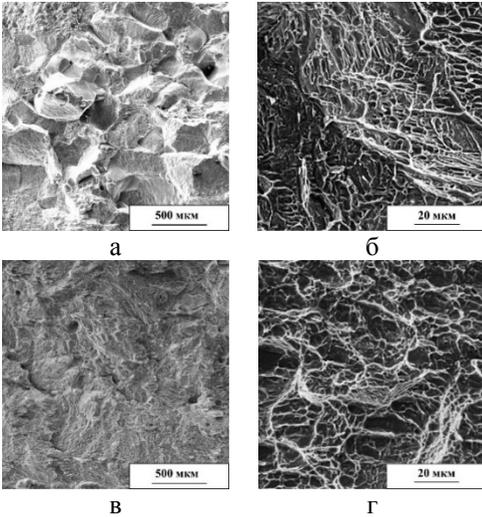


Рисунок 6 – Поверхность разрушения образцов после испытаний на статическую трещиностойкость: а, б – зака. 860 °С и стар. 500 °С; в, г – зака. 800 °С и стар. 550 °С

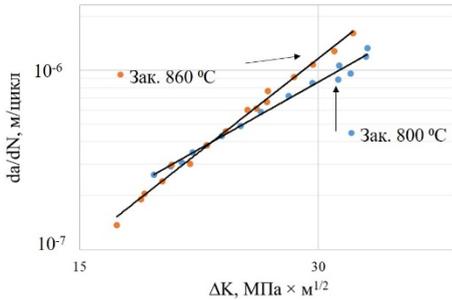
Как видно из рис. 7, б, самой низкой циклической трещиностойкостью даже при невысоких значениях размаха  $\Delta K \approx 13-15$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup> обладает сплав после закалки от 860 °С и старения при 500 °С, а наибольшей в интервале  $\Delta K \approx 18...35$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup> – после закалки от 800 °С и старения от 500 °С.

Наибольшее различие КДУР образцов, состаренных при 500 °С хорошо согласуется с выявленным изменением микростроения зон усталости, соответствующих начальным значениям размаха  $\Delta K$ . В сплаве с наименьшей циклической трещиностойкостью (зака. 860 °С + стар. 500 °С) ускоренный рост усталостной трещины при  $\Delta K \approx 14$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup> сопровождается появлением на

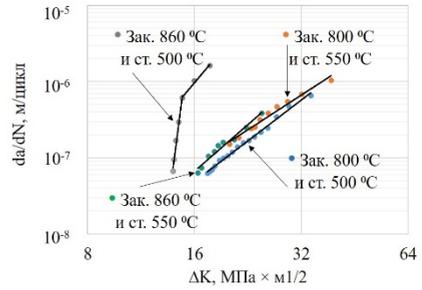
На поверхности разрушения появляются мелкие равноосные и крупные вытянутые вязкие ямки (рис. 6, г). Распространение трещины в этом случае осуществляется по границам раздела  $\beta$ -матрицы и  $\alpha$ -пластин, изменяющих траекторию развития трещины.

Результаты испытаний на циклическую трещиностойкость закалённых образцов (рис. 7, а), указывают на то, что образование  $\alpha$ -мартенсита в вершине трещины сплава с метастабильной  $\beta$ -фазой (зака. 860 °С) эффективно сказывается на повышение сопротивления усталостному разрушению только в области значений  $\Delta K \leq 25$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup>, а при значениях  $\Delta K > 25$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup> благоприятное влияние  $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения на торможение усталостной трещины ослабевает.

поверхности разрушения параллельных ступенек и гладких фасеток циклического скола в результате частичной реализации статической моды разрушения (рис. 8, а).

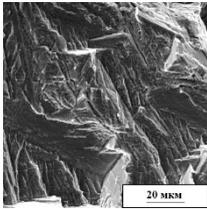


а

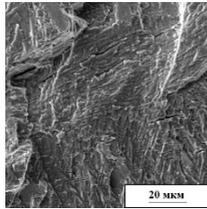


б

Рисунок 7 - КДУР сплава ВТ23: а - после закалки от 800 и 860 °С; б - после закалки от 800 и 860 °С и старения при 500 и 550 °С



а



б

Рисунок 8 – Поверхность разрушения СТ-образцов после испытаний на циклическую трещиностойкость: а, б – зак. 860 °С и стар. 500 °С; в, г – зак. 800 °С и стар. 500 °С

Распространение трещины в сплаве с наибольшей циклической трещиностойкостью (зак. 800 °С + стар. 500 °С) при значениях  $\Delta K \approx 20$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup> рост трещины происходит с образованием выраженных усталостных бороздок и сопровождается локальными изменениями направления ее роста, что способствует торможению трещины (рис. 8, б). Изменение микромеханизма разрушения при распространении усталостной

трещины в зависимости от режимов термической обработки сплава оказывает влияние на степенной показатель  $m$  в уравнении Париса ( $dl/dN = C(\Delta K)^m$ , где  $dl/dN$  – скорость роста трещины, а  $C$ ,  $m$  – постоянные материала), варьируется в пределах 2,49-5,51. При этом максимальные значения  $m = 4,05-5,51$  достигаются в состаренном сплаве после предварительной закалки от 860 °С.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлен различный характер влияния повышения температуры пластометрических испытаний сплава ВТ23 на осадку в  $(\alpha+\beta)$ -области и в  $\beta$ -области на форму кривых деформирования, напряжения пластического течения ( $\sigma_s$ ) и фазовый состав. Повышение температуры деформации с 700 до 900 °С способствует снижению количества  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз и появлению в структуре атермического  $\alpha''$ -мартенсита.

2. Повышение температуры закалки сплава до 860 °С приводит к увеличению количества атермического  $\alpha''$ -мартенсита и дестабилизации  $\beta$ -фазы по отношению к механическому нагружению, что подтверждается увеличенным параметром решетки

$a=0,328$  нм, наличием твидового контраста на ПЭМ-изображениях и появлением в зоне деформации игольчатых частиц  $\alpha''$ -мартенсита напряжения.

3. При испытаниях на растяжение в сплаве с метастабильной  $\beta$ -фазой определено значение триггерного напряжения ( $\sigma_{\text{trigger}} = 400$  МПа) начала образования  $\alpha''$ -мартенсита напряжения, выявлен двойной предел текучести и обнаружен эффект мартенситной сверхупругости, вызванный развитием упруго-обратимого  $\beta \leftrightarrow \alpha''$ -превращения.

4. Изменение фазового состава сплава и дестабилизация  $\beta$ -фазы при повышении температуры закалки до  $860$  °С приводит к росту значений  $\sigma_B$ , KCV и, особенно, Ar (в 2,4 раза), а также способствует увеличению параметра  $K_{IC}$  и улучшению циклической трещиностойкости в интервале значений размаха  $\Delta K \leq 25$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup>.

5. Старение сплава при температуре  $500$  °С, 8 ч. способствует образованию глобулярных частиц  $\alpha$ -фазы в  $\beta$ -матрице длиной 4...10 мкм, с расстоянием между ними 1...6 мкм, что вызывает прирост прочности до уровня  $\sigma_B = 1369...1576$  МПа при резком снижении относительного удлинения, ударной вязкости и характеристик статической и циклической трещиностойкости. Повышение температуры закалки до  $860$  °С усиливает прирост прочностных свойств и темп снижения показателей  $\delta$ , KCV и  $K_{IC}$  состаренного при температуре  $500$  °С сплава.

6. Увеличение температуры старения до  $550$  °С после закалки от  $800$  °С за счет формирования бимодальной ультрамелкозернистой структуры с крупными пластинами  $\alpha$ -фазы и упрочняющими частицами  $\alpha$ - и  $\alpha''$ -фаз размером 100...300 нм обеспечивает наилучшее сочетание механических свойств, показателей статической трещиностойкости и конструкционной прочности ( $\sigma_{0,2} = 1050$  МПа,  $\sigma_B = 1160$  МПа,  $\delta = 9\%$ , KCV = 187 кДж/м<sup>2</sup>,  $K_{IC} = 60,9$  МПа $\times$ м<sup>1/2</sup> и  $T = 63,9$  МПа<sup>2</sup> $\times$ м<sup>1/2</sup> $\times 10^3$ ).

7. Наиболее высокая циклическая трещиностойкость сплава достигается после предварительной закалки от  $800$  °С и старения при  $500$  °С, что обусловлено повышенным содержанием (32%) удлиненных частиц  $\alpha$ -фазы (7...10 мкм) и преимущественным распространением усталостной трещины по границам раздела  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз, способствующим ее торможению за счет формирования извилистого профиля излома.

8. Статический рост трещины в сплаве с минимальным значением  $K_{IC}$  развивается по механизму квазискола с формированием межзеренного излома камневидного типа. Увеличение значений  $K_{IC}$  после старения при  $550$  °С сопровождается восстановлением ямочного внутризеренного механизма разрушения. С повышением циклической трещиностойкости сплава после закалки от  $800$  °С и старения при  $500$  °С в изломе формируются более выраженные усталостные бороздки, и уменьшается доля фасеток циклического скола.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. Влияние режимов термической обработки на характеристики трещиностойкости и механизмы разрушения метастабильного титанового сплава BT23 / 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 VT23 / 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.

*Переводная версия:* Effect of Heat-Treatment Conditions on the Microstructure and the Static Fracture Toughness of an  $\alpha + \beta$  VT23 Titanium Alloy / S. V. Gladkovskii, **V. E. Veselova**, D. I. Vichuzhanin, M. Ch. Zichenkov, S. V. Dubinskii , N. I. Kovalev , A. V. Kulemin , and I. E. Kovalev // Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2023, No. 4, pp. 425–432. [Scopus, WoS].

3. **Веселова В. Е.**, Гладковский С. В., Ковалев Н. И. Влияние режимов термической обработки на структуру и механические свойства метастабильного титанового сплава VT23 // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23. № 4. – С. 31-39.

4. Реологическое поведение сплава VT23 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. Хошинов // 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:* 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. Гладковский С.В., **Веселова В.Е.** Структурные аспекты трещиностойкости метастабильного титанового сплава ВТ23 // 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 металлочедов. Сборник материалов XX Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлочедов-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.