

На правах рукописи



СТОЦКИЙ Андрей Геннадиевич

**ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ
ДВУХФАЗНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ8М-1
С МИКРОВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ, ПОЛУЧЕННОЙ РОТАЦИОННОЙ
КОВКОЙ**

Специальность:

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Автореферат

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

Уфа – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

Научный руководитель: доктор технических наук,
Семенова Ирина Петровна

Официальные оппоненты: **Столяров Владимир Владимирович**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН). Главный научный сотрудник лаборатории узлов трения для экстремальных условий.

Найденкин Евгений Владимирович
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения им. В. Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН). Главный научный сотрудник лаборатории физического материаловедения сталей и сплавов.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита состоится «17» декабря 2026 г. в 13³⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.17 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте <https://uust.ru/dc/dissertations/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.479.17,
к.т.н.

Ю. М. Модина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Жаропрочные титановые сплавы, являющиеся одним из основных материалов для изделий в авиации, применяются в качестве дисков и лопаток газотурбинных двигателей (ГТД). Их применимость обоснована повышенной удельной прочностью и высоким сопротивлением ползучести при температурах 300–550 °С по сравнению со сталью или никелевыми сплавами. Однако создание новых двигателей или повышение эффективности существующих ГТД, как правило, связано с разработкой новых сплавов, либо применением к уже известным сплавам методов термической (ТО) или деформационно-термической обработки (ДТО) с целью повышения их эксплуатационных свойств. При этом традиционные подходы по изготовлению лопаток компрессора низкого или высокого давления (КНД, КВД) связаны с деформацией при температурах не ниже 900 °С из-за низкой деформируемости титановых сплавов, либо фрезеровкой лопаток из материала с дуплексной структурой после закалки и старения, в результате чего в обоих случаях в изделии формируется крупнозернистая структура с прочностью около 1000 МПа.

Ранее было показано, что применение ДТО, включая методы интенсивной пластической деформации (ИПД), значительно повышает механические свойства металлических материалов за счет измельчения структуры до ультрамелкозернистого (УМЗ) состояния. К тому же такой материал может проявлять низкотемпературную сверхпластичность, что позволяет снизить температуру последующего формообразования деталей по сравнению с традиционной штамповкой и тем самым сохранить повышенную прочность (на 20–25 %) и сопротивление усталости по сравнению с традиционными крупнозернистыми (КЗ) структурами, что уже было показано на примере изготовления опытных лопаток ГТД из УМЗ титанового сплава ВТ6 изотермической штамповкой. Однако длительное воздействие повышенной температуры и нагрузки при эксплуатации деталей из сплавов после ИПД может негативно влиять на стабильность микроструктуры, в частности, приводить к ускоренным нежелательным фазовым превращениям, деградации структурных элементов и эксплуатационных свойств. Обширных исследований на ползучесть подвергнутых ИПД титановых сплавов, которые бы однозначно определили границу их применимости, практически не проводилось. Например, в работе по титановому сплаву Ti-6Al-4V (ВТ6) было проведено сравнение между КЗ и УМЗ состояниями при температуре 400 °С в диапазоне напряжений 300–600 МПа, которое показало, что классическая УМЗ структура обладает меньшей жаропрочностью по сравнению с КЗ. Исследования на ползучесть других УМЗ металлов и их сплавов также ограничены в рамках определенных задач исследования. Таким образом, в связи с отсутствием систематических исследований ползучести УМЗ титановых сплавов оценка их сопротивления ползучести и последующий анализ изменения микроструктуры остается актуальным и необходимым. Это обусловлено тем, что в сплавах, обладающих повышенной прочностью за счет формирования большого количества большеугловых и малоугловых границ (БУГ, МУГ), могут происходить ускоренные процессы диффузии. Особенно это актуально для жаропрочных титановых сплавов, применяемых в авиации.

Известно, что формирование объемных заготовок из труднодеформируемых титановых сплавов с измельчением структуры и значительным повышением прочности возможно такими методами как винтовая экструзия, абс-ковка, радиально-сдвиговая прокатка. Перспективным методом ДТО, который позволяет изготавливать длинномерные заготовки для дальнейшего формообразования изделий, является ротационная ковка (РК). Она позволяет вносить значительные степени деформации как при ИПД, приводит к однородной проработке структуры, повышению механических характеристик, формированию металлографической текстуры и

сильно вытянутых зерен в сочетании с их частичным измельчением. Данный тип структуры, в подвергаемых деформации сплавах, может оказать положительное влияние на жаропрочность при повышенных температурах, как это было показано на примере литых жаропрочных никелевых сплавов с направленной кристаллизацией. В результате в таких структурах снижается зернограницное проскальзывание (ЗГП) за счет того, что большая часть границ зерен находится под минимальными касательными напряжениями.

Объектом исследования является двухфазный сплав ВТ8М-1 (Ti-5,7Al-3,8Mo-1,2Zr-1,3Sn-0,2Si) с дуплексной крупнозернистой структурой, который в последние 10 лет широко применяется для изготовления рабочих лопаток компрессора авиационных ГТД взамен сплава ВТ6 с более низкой жаропрочностью. В рамках настоящей работы предлагается решение научно-технической задачи повышения механических характеристик и сопротивления ползучести при эксплуатационных температурах титанового сплава ВТ8М-1 путем формирования микроволокнистой структуры с УМЗ составляющей (МВ) за счет использования технологической схемы, включающей ротационную ковку.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями, позволяющими повысить прочностные характеристики, сопротивление ползучести и сохранить термостабильность титановых сплавов, занимаются как российские так и иностранные ученые: Валиев Р. З., Столяров В. В., Найденкин Е. В., Скворцова С. В., Жеребцов С. В., Салищев Г. А., , Кашапов О. С., Павлова Т. В., Семенова И. П., Попов А. А., Дьяконов Г. С., Dvorak J., Kostka A., Kral P., Krapilova M., Langdon T., Sklenicka V., Svoboda M. и др. Научно-исследовательские работы российских и зарубежных ученых основываются на анализе взаимосвязи микроструктуры и механизмов ползучести металлов и сплавов в УМЗ или наноструктурном состоянии в сравнении их с КЗ аналогом. При этом результаты исследований показывают, что механизмы деформации в УМЗ и КЗ структурах могут иметь подобный характер и некоторые различия в зависимости от условий деформации. В целом, по имеющимся публикациям в данной области отсутствует однозначный вывод о том, что УМЗ сплавы имеют более низкое сопротивление ползучести в широком интервале температур по сравнению с КЗ состоянием.

Цель работы: повысить эксплуатационные свойства двухфазного титанового сплава ВТ8М-1 за счет формирования микроволокнистой структуры с ультрамелкозернистой составляющей методом ротационнойковки для изготовления лопаток компрессора низкого давления перспективных газотурбинных двигателей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучить фазовые и структурные превращения при формировании микроволокнистой структуры в титановом сплаве ВТ8М-1 методом ротационнойковки, способствующей повышению его механических свойств.
2. Экспериментально исследовать закономерности изменения термической стабильности титанового сплава ВТ8М-1 с микроволокнистой структурой при термических и механических воздействиях в интервале температур эксплуатации КНД.
3. Обосновать метод повышения сопротивления ползучести титанового сплава ВТ8М-1 в интервале температур эксплуатации лопаток КНД на основе формирования в сплаве микроволокнистой структуры с ультрамелкозернистой составляющей.
4. Разработать технологические рекомендации по изготовлению лопаток КНД методом изотермической штамповки из титанового сплава ВТ8М-1 с микроволокнистой структурой и показать обеспечение повышенных эксплуатационных свойств по сравнению со стандартной производственной технологией.

Научная новизна:

1. Сформированная впервые в титановом сплаве ВТ8М-1 микроволокнистая структура методом ротационнойковки, характеризующаяся вытянутыми вдоль оси прутка зернами первичной α -фазы, отличается от подобной структуры в других титановых сплавах вытянутыми и равноосными ультрамелкими зернами со средним размером 0,25 мкм и выделением на границах наноразмерных силицидов $(\text{Ti,Zr})_6\text{Si}_3$, что позволяет повысить механические свойства сплава в осевом направлении.
2. Экспериментально показано, что титановый сплав ВТ8М-1 с микроволокнистой структурой с ультрамелкозернистой составляющей сохраняет термическую стабильность вплоть до 450 °С и отличается от сплава с дуплексной крупнозернистой структурой повышенными на 20% пределом прочности и текучести в диапазоне температур 300–450 °С, что позволяет повысить механические свойства лопаток КНД.
3. Новизна метода повышения сопротивления ползучести титанового сплава ВТ8М-1 заключается в формировании направленной вдоль оси нагружения микроволокнистой структуры с ультрамелкозернистой составляющей методом ротационнойковки, отличающейся уменьшением поперечного и увеличением продольного размера зерен со средним соотношением 1 к 25, а также вытягиванием границ зерен вдоль оси нагружения, что позволяет повысить эксплуатационные характеристики лопаток КНД вплоть до 350 °С.
4. Новизна технологических рекомендаций заключается в возможности проводить низкотемпературную изотермическую штамповку лопаток КНД из титанового сплава ВТ8М-1 с микроволокнистой структурой при температуре 750 °С, отличающуюся от традиционной горячей штамповки, проводимой при температуре выше 900 °С тем, что позволяет обеспечить повышенные эксплуатационные свойства сплава.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что уточнены механизмы ползучести и определена энергия активации титанового сплава ВТ8М-1 с микроволокнистой структурой в интервале эксплуатационных температур 350–450 °С, что позволило обосновать метод повышения сопротивления ползучести данного сплава. Установлено, что, согласно методу, формирование микроволокнистой структуры способствует повышению сопротивления ползучести титанового сплава ВТ8М-1 за счет уменьшения размера зерен в поперечном сечении и формирования вытянутых границ зерен, подавляющих зернограничное проскальзывание при растягивающих напряжениях. Выявлены такие фазовые превращения, как выделение силицидов S2, образующихся при деформации методом ротационнойковки, и третичной α -фазы, имеющей деформационно-индуцированную природу в условиях ползучести, которые способствуют повышению термической стабильности и сопротивления ползучести титанового сплава ВТ8М-1 при его эксплуатации в компрессоре низкого давления ГТД.

Практическая значимость работы:

1. Формирование микроволокнистой структуры с ультрамелкозернистой составляющей в титановом сплаве ВТ8М-1 методом ротационнойковки позволяет повысить предел прочности и условный предел текучести на 20–25 % по сравнению со сплавом с дуплексной крупнозернистой структурой при сохранении пластичности на уровне 9 %.
2. Установлено, что титановый сплав ВТ8М-1 с микроволокнистой структурой с ультрамелкозернистой составляющей сохраняет термическую стабильность при температурах 300–450 °С при термических и механических воздействиях и обладает повышенными на 20 % механическими свойствами по сравнению со сплавом с дуплексной крупнозернистой структурой.

3. Практическая значимость метода повышения сопротивления ползучести в титановом сплаве BT8M-1 с микроволокнистой структурой заключается в повышении на 20 % сопротивления ползучести при температуре 350 °С по сравнению со сплавом с дулексной крупнозернистой структурой. Также установлено, что в ходе эксплуатации происходит выделение деформационно-индуцированной третичной α -фазы в титановом сплаве BT8M-1 с микроволокнистой структурой с ультрамелкозернистой составляющей, что дополнительно повышает сопротивление ползучести на 10 %.

4. Предложены технологические рекомендации, позволяющие изготавливать из титанового сплава BT8M-1 лопатки компрессора низкого давления с повышенными на 10–15 % эксплуатационными свойствами за счет термдеформационного воздействия методом ротационнойковки (при температуре 750 °С) и низкотемпературной изотермической штамповки при 750 °С.

Результаты диссертационной работы были использованы при разработке опытной технологии изготовления заготовок лопаток из ультрамелкозернистых титановых сплавов в рамках выполнения НИОКР между ПАО «ОДК-УМПО», НПА «Технопарк авиационных технологий» и ФГБОУ ВО «УГАТУ», а также в учебном процессе кафедры материаловедения и физики металлов Уфимского университета науки и технологий при подготовке лабораторного практикума, чтении лекций и проведения практических занятий по дисциплине «Физика ползучести и сверхпластичности» при подготовке бакалавров по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов. Дизайн и цифровые технологии перспективных материалов», что подтверждено тремя актами использования результатов.

Методология и методы исследования:

Работа выполнена с использованием теоретических и экспериментальных методов исследования. Применялись стандартизированные методики проведения механических испытаний. Для формирования микроволокнистой структуры применялась деформация методом ротационнойковки при температуре 750 °С. Для сохранения заданной структуры в изделиях применялась низкотемпературная изотермическая штамповка. В работе для решения поставленных задач использовались современные методы исследования на аттестованном и поверенном оборудовании: сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), рентгеновская дифрактометрия, а также оборудование для механических испытаний на растяжение и ползучесть.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности фазовых и структурных превращений при формировании микроволокнистой структуры в титановом сплаве BT8M-1 методом ротационнойковки, обосновывающие повышение его механических свойств (соответствует п. 2 паспорта специальности 2.6.1).

2. Закономерности изменения термической стабильности титанового сплава BT8M-1 с микроволокнистой структурой от термических и механических воздействий (соответствует п. 4 паспорта специальности 2.6.1).

3. Метод повышения сопротивления ползучести титанового сплава BT8M-1 в условиях эксплуатации лопаток КНД на основе формирования микроволокнистой структуры с ультрамелкозернистой составляющей (соответствует п.8 паспорта специальности 2.6.1).

4. Технологические рекомендации по изготовлению лопаток компрессора низкого давления методом изотермической штамповки из титанового сплава BT8M-1 с микроволокнистой структурой, позволяющие обеспечить повышенные механические свойства сплава (соответствует п. 6 паспорта специальности 2.6.1).

Степень достоверности результатов диссертационной работы обеспечивается использованием независимых, современных методов исследования, которые применяются в материаловедении, значительного объема полученных данных и современного аналитического оборудования. Полученные результаты не противоречат исследованиям других авторов и позволяют дополнить общую картину исследования и области применения жаропрочных сплавов, подвергаемых деформационно-термическим обработкам.

Апробация основных результатов работы осуществлялась в виде публикаций в отечественных научных изданиях ВАК, а также международных базах научных данных Web of Science и Scopus. Результаты научных исследований диссертационной работы представлены на Международной конференции по титану «Titanium-2019», Международной конференции «BNM-2019», Международной конференции «Thermec 2021», Всероссийской научной конференции «IV Байкальский материаловедческий форум», Международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии – 2023», конференции «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы – 2024», Международной научно-практической конференции «ICMSM 2025».

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РНФ № 18-79-10158, РФФИ № 20-38-70105, РНФ № 23-79-00074, госзадания проектная часть № 11.1235.2017/ПЧ, НИОКР №40/10-43453, государственного задания №FRRR-2026-0005.

Личный вклад автора. Автором работы был проведен анализ литературы по теме прочности и ползучести металлов и сплавов, подвергнутых ДТО и/или ИПД в том числе титановых сплавов. Автор работы непосредственно участвовал в постановке цели, задач исследования и плана диссертационной работы. Соискатель принимал участие в выполнении всех экспериментальных исследований, проводил анализ полученных результатов. Автор совместно с научным коллективом участвовал в подготовке статей к публикации в научных журналах.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них 1 работа в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 6 работ входят в международные базы цитирования Web of Science и/или Scopus, 11 публикаций в сборниках трудов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 150 страницах, включает 66 рисунков и 11 таблиц. Список использованной литературы содержит 118 наименований. Работа состоит из введения и шести глав с выводами, заключения и списка литературы.

Благодарности. Автор выражает признательность научному руководителю И. П. Семенову за наставничество и консультативную помощь. Автор выражает признательность Г. С. Дьяконову, В. В. Астанину, О. В. Голубеву, Е. В. Парфенову за консультативную помощь. Автор выражает благодарность сотрудникам ЦКП «Нанотех» И. А. Рамазанову и Н. А. Хайбулиной за проведение испытаний на ползучесть.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обобщена проблема повышения эксплуатационных свойств металлов и сплавов за счет использования ДТО и ИПД, применимости различных методов деформации в машиностроении и авиадвигателестроении. Обоснована актуальность темы диссертационной работы. Сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследования, выносимые на защиту положения.

В первой главе представлена классификация титановых сплавов в зависимости от легирования другими химическими элементами. Рассмотрены жаропрочные титановые сплавы,

сравнение их прочности, длительной прочности и предела ползучести в широких интервалах температур. Показаны области применимости тех или иных титановых сплавов в авиации в зависимости от температуры эксплуатации. Представлены результаты исследований, в которых показано, что соотношение между прочностью сплава и его ползучестью/длительной прочностью имеет однозначно установленную зависимость для различных титановых сплавов. Также в литературном обзоре представлен обобщенный раздел по исследованиям российских и зарубежных ученых в области ползучести различных УМЗ металлов и сплавов и их сравнение с КЗ аналогами. Данные исследования показывают, что сплавы, обработанные методами ИПД, такие как Al-Sc, Al-Mg-Sc, Ti-6Al-4V, Inconel 718 или Zr-Nb демонстрировали значительно более низкое сопротивление ползучести по сравнению с их КЗ состояниями. В тоже время на примере мартенситных Cr-сталей, подвергнутых ИПД, было установлено, что УМЗ сплавы могут иметь повышенное сопротивление ползучести.

В данном литературном обзоре было показано, что установление области применимости металлов и сплавов, подвергнутых ДТО или ИПД, остается актуальным, поскольку повышение прочностных характеристик связано со значительными изменениями микроструктуры, такими как повышенная плотность МУГ и БУГ, что определенно может повлиять на характеристики жаропрочности. Соответственно, на основе этого были сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлен материал и описаны методики проведения исследований. В качестве материала исследования был использован жаропрочный двухфазный титановый сплав BT8M-1 в горячекатаном состоянии. Для модификации структуры применялась ротационная ковка при температуре 750 °C с постепенным обжатием по диаметру с 70 до 32 мм. Это позволило внести в материал истинную деформацию равную 1,56. Последующая деформация в виде изотермической штамповки проводилась при температуре 750 °C для формирования лопатки КНД. Исследование микроструктуры в КЗ и МВ состоянии проводилось с помощью СЭМ (Tescan Mira 3 и JEOL JSM-6390) и ПЭМ (JEOL JEM-2100 и Titan Themis). Анализ кристаллографической текстуры проводили путем регистрации частичных прямых полюсных фигур (ППФ) методом наклона. Полные ППФ были реконструированы с помощью программного обеспечения Labotex. Механические испытания на растяжение проводились на машине Instron 5982. Механические испытания на ползучесть осуществлялись на машине CTM105-B1. Микротвердость образцов по Виккерсу определяли на микротвердомере EmcoTest DuraScan-50.

В третьей главе изложены результаты микроструктурных исследований и изменение механических характеристик сплава BT8M-1, подвергнутого деформации методом ротационной ковки. Микроструктура сплава BT8M-1 в КЗ состоянии представляла собой глобулярно-пластинчатую структуру (рисунок 1а), состоящую из глобуль первичной α -фазы и пластинчатой смеси из вторичной α -фазы и β -прослоек. В КЗ состоянии средний размер зерен первичной α -фазы составляет около 3 мкм, а ее объемная доля $\alpha_{\text{глоб}} \approx 60\text{-}65\%$.

Ротационная ковка при 750 °C приводит к значительной и однородной трансформации микроструктуры по всему поперечному сечению и способствует повышению прочности BT8M-1. После РК сплав сохраняет дуплексную структуру, однако зерна первичной α -фазы вытягиваются вдоль оси прутка и искривляются в поперечном сечении, а пластинчатая смесь ($\alpha+\beta$) фаз вытягивается или фрагментируется с образованием равноосных или удлиненных мелких зерен (рисунок 1б, в). В результате формируется микроволокнистая структура с равноосной и вытянутой УМЗ составляющей (МВ состояние). Таким образом, за счет схемы деформации методом РК происходит формирование острой металлографической текстуры.

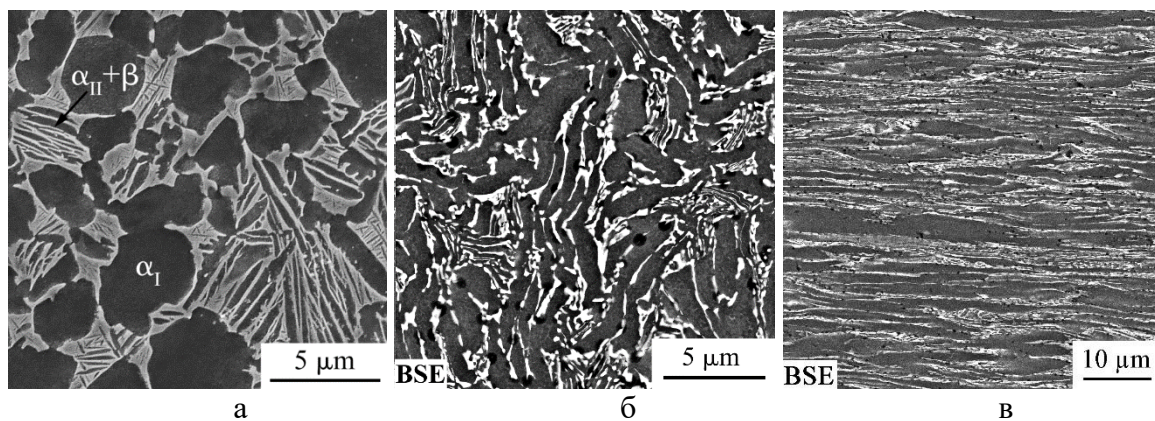


Рисунок 1 – Микроструктура сплава VT8M-1 в КЗ состоянии (а) и после РК: поперечное (б) и продольное (в) сечение

Анализ ТКД-карты также показал неравномерность деформации и измельчения бимодальной микроструктуры сплава VT8M-1. Если пластинчатая составляющая фрагментируется с формированием равноосных или вытянутых мелких зерен, то крупная первичная α -сохраняет свою целостность с образованием внутри них большого количества малоугловых границ (рисунок 2). Основная доля МУГ приходится на первичную α -фазу и составляет около 64 % от общего количества МУГ. Доля МУГ, БУГ и межфазных границ от общего количества составляет 41,7, 23,6 и 34,7 % соответственно. Карта КАМ показывает, что в первичной α -фазе при РК происходят значительные процессы деформации, приводящие к накоплению дислокаций и локальным разворотам решетки в зерне, вследствие чего наблюдается формирование МУГ и даже частично фрагментация первичной α -фазы.

Вследствие того, что структура имеет острую металлографическую текстуру, был оценен меньший диаметр подобранного овала, который описывает форму зерен. Результаты анализа структуры показали бимодальное распределение, где УМЗ составляющая имеет максимум при 0,25 мкм, а первичная α -фаза, представляющая собой сплюснутый эллипсоид и случайным образом повернутая относительно оси прутка, показывает два других максимума – 0,85 и 2,0 мкм соответственно (рисунок 2в). В β -фазе наблюдается мономодальное распределение с максимумом 0,15 мкм (рисунок 2г). Анализ EBSD-карты по распределению размера зерен показал, что структура сплава VT8M-1 до 0,8 мкм представляет собой мелкие вытянутые и равноосные зерна и их доля может достигать 50 %. Зерна с размером больше 0,8 мкм являются вытянутыми первичными α -зернами.

Исследование микроструктуры на ПЭМ сплава VT8M-1, подвергнутого РК, показало, что на границах зёрен и вдоль межфазных границ выделяются цепочки сложных силицидов титана с цирконием, что подтверждается результатами картирования методом энергодисперсионной спектроскопии (рисунок 3). Данные частицы имеют в основном эллипсоидную форму со средними размерами осей 68 ± 5 и 126 ± 10 нм. Анализ электронограмм показывает, что данные силициды принадлежат к типу S_2 со стехиометрическим составом $(Ti,Zr)_6Si_3$ и гексагональной кристаллической решёткой с параметрами $a = 7,05 \text{ \AA}$, $c = 3,67 \text{ \AA}$.

По результатам механических испытаний на растяжение сплава VT8M-1 в КЗ и РК состоянии при комнатной температуре можно отметить, что предел прочности после РК в зависимости от направления повысился на 20–25 % в сравнении с КЗ состоянием. Так в продольном сечении предел прочности и текучести составили 1290 и 1195 МПа, а в поперечном сечении около 1320 и 1290 МПа соответственно. Удлинение в продольном и поперечном сечении снизилось по сравнению с КЗ аналогом и составило $\delta = 9,0$ и 5,8 %. Значительная разница в механическом поведении сплава после РК в двух сечениях связана, как с формированием ярко

выраженной металлографической текстуры, так и кристаллографической текстуры близкой к текстуре аксиального типа с направлением $\langle 210 \rangle$ вдоль оси прутка. В результате чего в поперечном сечении сформированная структура сложнее деформируется, во-первых, из-за меньшего среднего размера структурных элементов, то есть большей плотности границ зерен и соответственно затруднения для движения дислокаций, во-вторых, влияния образованной кристаллографической текстуры. Анализ фактора Шмидта в диапазоне 0,4–0,5 показал, что в продольном сечении облегченное скольжение будет обеспечиваться до 45 % системой скольжения $\{10\text{-}10\}$, а $\{0001\}$ подавлено, а в поперечном сечении облегченное скольжение будет только за счет 15 % $\{10\text{-}10\}$ и 12 % $\{0001\}$.

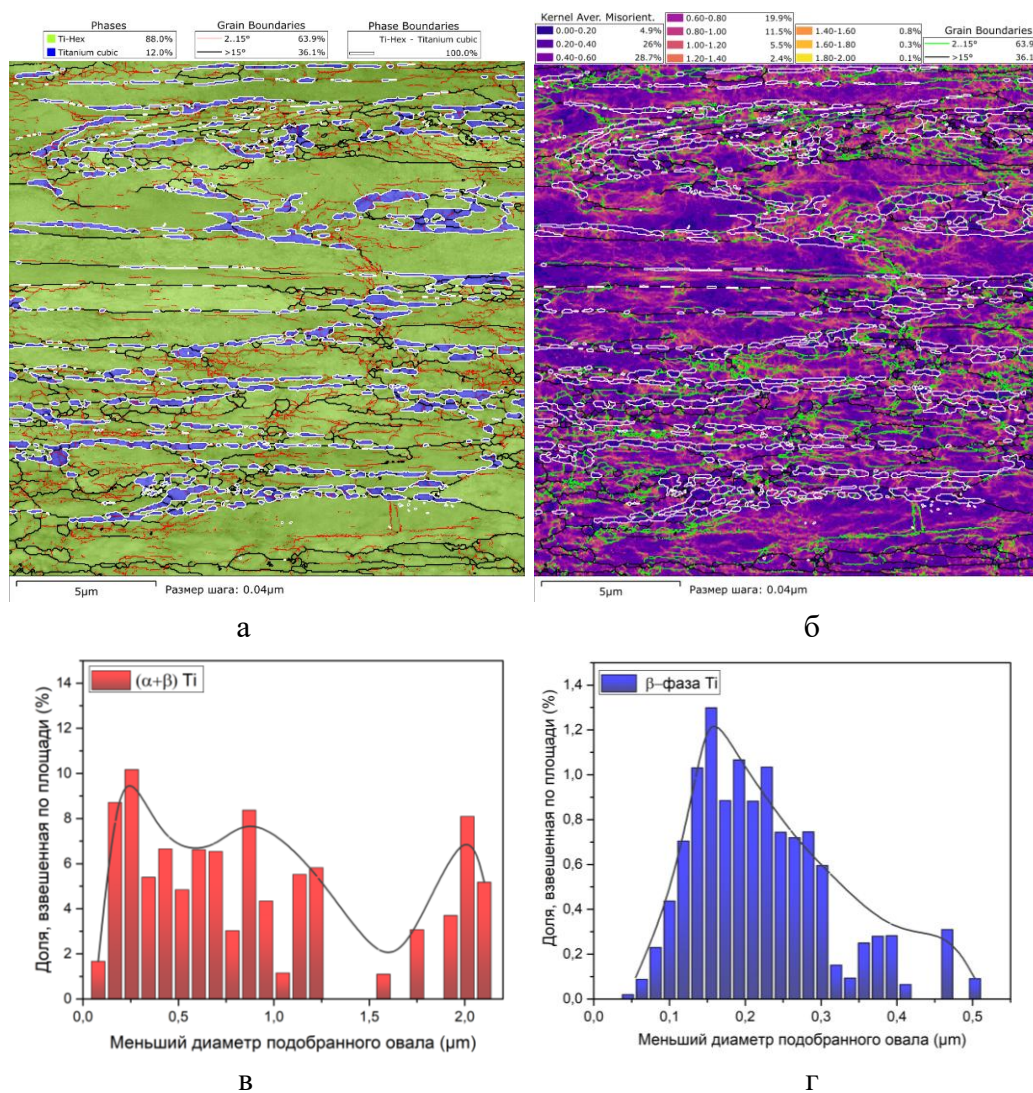


Рисунок 2 – ТКД-карта (а) и КАМ-карта (б) сплава VT8M-1 после РК, распределение размера зерен от доли, взвешенной по площади для всей структуры (в) и β -фазы (г)

В четвертой главе проводилась оценка термостабильности микроструктуры и механических свойств титанового сплава VT8M-1. При оценке термической стабильности МВ структуры была проведена серия коротких отжигов при 500, 550, 600, 700, 750 °С. Данные температуры были выбраны для оценки деградации микроструктуры и механических свойств в случае возможных температурных забросов при работе ГТД. При 500 и 550 °С в структуре каких-либо изменений не наблюдалось, что свидетельствует о стабильности МВ состояния при данных температурах. После отжига при 600 °С наблюдали единичные укрупнения частиц β -фазы и небольшой прирост ее объемной доли из-за начала процесса собирательной рекристаллизации

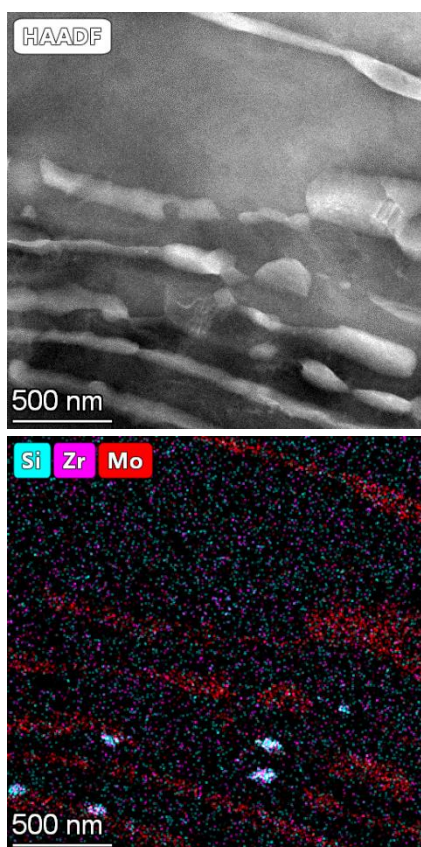


Рисунок 3 – Карта распределения химических элементов в сплаве VT8M-1

(рисунок 4). При 700 и 750 °С происходит рост и глобуляризация β -фазы во всей структуре (рисунок 4). Остаточные тонкие пластины после РК, не подвергшиеся дроблению, с повышением температуры либо утолщаются, либо растворяются в пользу укрупняющихся равноосных частиц. Таким образом в МВ структуре сплава VT8M-1 при нагреве на 600-750 °С наблюдаются процессы собирательной рекристаллизации, которые приводят к укрупнению β -фазы. Измерение микротвердости после отжигов указывает на то, при 700 °С и выше происходит разупрочнение материала из-за роста структурных элементов. Результаты коротких отжигов для оценки термостабильности МВ структуры показали, что сплав без изменения структурных составляющих может сохранять повышенную твердость и выдерживать забросы температур вплоть до 550 °С.

Для оценки поведения сплава VT8M-1 при напряженно-температурных условиях были проведены механические испытания на растяжение в интервале температур 300–550 °С (рисунок 5). Видно, что МВ сплав VT8M-1 показывает более высокие значения предела прочности σ_b и предела текучести $\sigma_{0,2}$ почти на 200 МПа вплоть до 450 °С по сравнению с исходным КЗ состоянием.

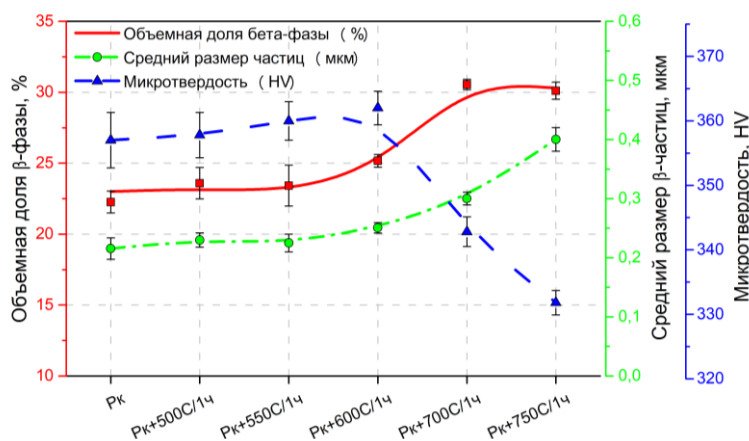


Рисунок 4 – Изменение объемной доли, размера частиц β -фазы и микротвёрдости после отжигов при 500–750 °С в течение 1 часа в РК сплаве VT8M-1

Далее при температурах 500-550 °С МВ сплав начинает разупрочняться в сравнении с КЗ состоянием. Если при 500 °С разница в прочности сохраняется и составляет 130 МПа между обоими состояниями, то при 550 °С σ_b и $\sigma_{0,2}$ для МВ и КЗ состояний становятся близкими, при этом заметно возрастает удлинение сплава с МВ структурой по сравнению с КЗ (40 и 20 %, соответственно). По-видимому, создание напряжений при деформации растяжением может способствовать развитию динамической рекристаллизации и

более интенсивному укрупнению структурных элементов. Таким образом, VT8M-1 после ротационнойковки имеет повышенные прочностные характеристики при температурах 300–500 °С, то есть в температурном диапазоне эксплуатации деталей ГТД, что является преимуществом перед КЗ сплавом в случае температурных забросов до 500 °С.

В титановых сплавах длительная термостабильность микроструктуры связана с тем, что в структура не должна подвергаться значительным изменениям, например, рекристаллизации или фазовым превращениям, которые приводят к снижению механических характеристик. Поэтому

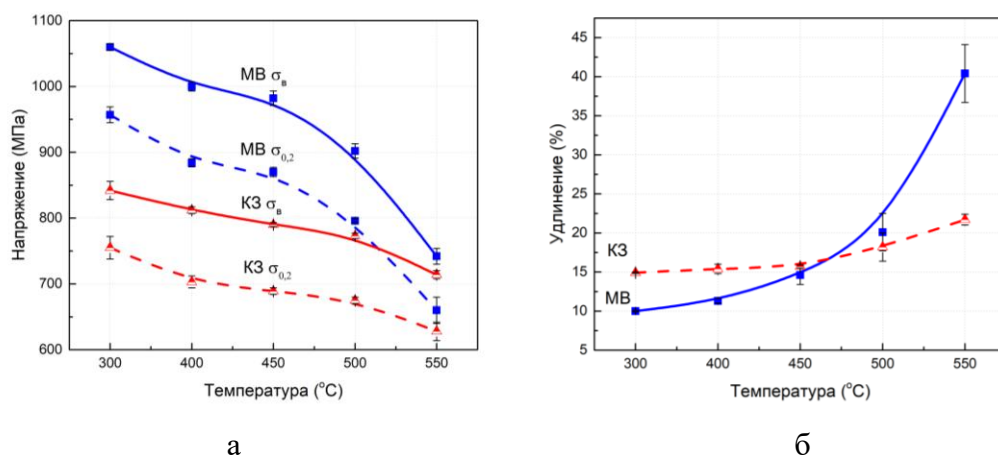


Рисунок 5 – Зависимость прочности (а) и удлинения (б) от температуры испытаний сплава VT8M-1 в обоих состояниях

титановый сплав VT8M-1 подвергали нагревам при максимальной рабочей температуре 450 °C в течение 500 часов в обоих состояниях. Далее были оценены изменения в микроструктуре и механических свойствах после времени выдержки 50, 100, 200, 300, 400 и 500 часов. Длительный отжиг КЗ состояния с увеличением времени вплоть до 300 часов показал рост прочности сплава, далее наоборот происходит небольшое разупрочнение (рисунок 6а). После 300 часов отжига предел прочности повышается на 100 МПа по сравнению с исходным состоянием. В то же время относительное удлинение до разрушения начинает снижаться только после 100 часов отжига и имеет минимальное значение после 300 часов отжига (рисунок 6б). Такое поведение связано с низкотемпературным процессом распада $\beta_0 \rightarrow \alpha + \beta_2$ при длительном нагреве в 450 °C: начальное повышение прочности и снижение пластичности, вероятно, обусловлено выделением дисперсной третичной α -фазы, а затем происходит рост и уширение α_{III} , что приводит к обратному эффекту. Исследование термостабильности MB состояния не показывает значительных скачков в прочности и пластичности по сравнению с КЗ состоянием. Упрочнение в MB сплаве наблюдается только после 50-100 часов на 30 МПа. Дальнейший отжиг не приводит к подобным КЗ сплаву изменениям в прочности. Микроструктуры сплава VT8M-1 в КЗ и MB состояниях после отжигов в 50-500 часов не показывают каких-либо изменений структурных составляющих в виде рекристаллизации, либо укрупнения и изменения формы β -фазы. Данные испытания указывает на стабильность микроструктуры сплава в обоих состояниях при 450 °C

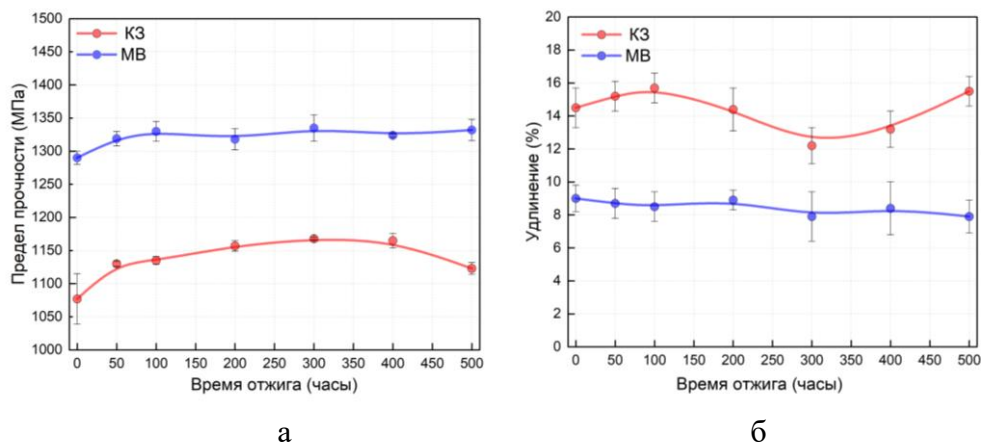


Рисунок 6 – Кривые изменения механических свойств сплава VT8M-1 при растяжении в КЗ и MB состояниях от длительности выдержки в интервале от 0 до 500 часов при температуре 450 °C: предел прочности (а), удлинение до разрушения (б)

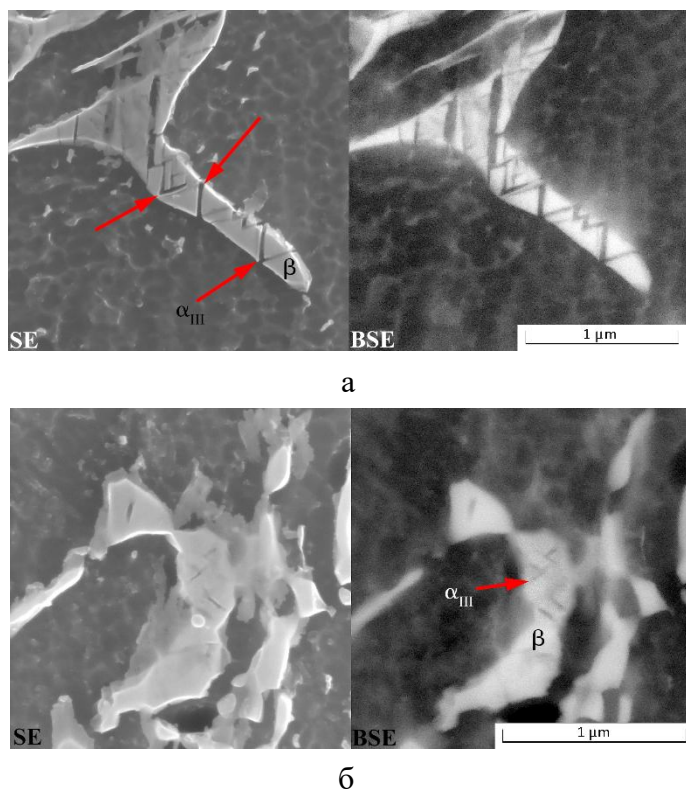


Рисунок 7 – Микроструктура сплава VT8M-1 после 500 ч. отжига в КЗ (а) и МВ (б) состоянии

сплаве доля β -фазы составляет 27-29 %, в тоже время в МВ сплаве ее доля уменьшается до 21-23 %. Поскольку деформация методом РК значительно фрагментирует β -пластины, то вполне вероятно, что в местах зарождения канавок на межфазной поверхности происходит частичное растворение β -пластин. При этом молибден как β -стабилизатор, скорее всего, будет перераспределяться в оставшейся β -фазе, тем самым повышать ее концентрацию. Следовательно образование третичных α -пластин может быть затруднено в β -фазе в МВ состоянии из-за ее более высокой стабильности.

В пятой главе представлены результаты анализа ползучести и микроструктуры сплава VT8M-1 в обоих состояниях после испытаний. Оценка сопротивления ползучести проводилась при температурах 350, 400 и 450 °С. При анализе зависимостей «напряжение–линейная скорость ползучести» были определены показатели напряжения n . В классическом представлении зависимость линейной скорости ползучести от напряжения имеет вид:

$$\dot{\varepsilon} = A\sigma^n e^{\left(-\frac{Q}{RT}\right)} \quad (1)$$

Степень напряжения n определялась на графике $\log \dot{\varepsilon} - \log \sigma$. Однако показатель n часто имеет завышенные значения для двухфазных и жаропрочных сплавов (> 7) по сравнению с чистыми металлами и однофазными сплавами. Для этого можно применить модифицированную зависимость с учетом пороговых напряжений:

$$\dot{\varepsilon} = A(\sigma - \sigma_0)^p e^{\left(-\frac{Q^*}{RT}\right)} \quad (2)$$

где, A – константа, σ_0 – пороговые напряжения, n – степенной показатель напряжения, p – истинный степенной показатель напряжения, Q^* – кажущаяся энергия активации. Пороговое напряжение оценивалось графически путем построения зависимости $\dot{\varepsilon}^{1/p} - \sigma$ в линейных координатах. График экстраполируется линейно и находится напряжение при нулевой скорости деформации.

вплоть до 500 ч. При этом более детальный анализ микроструктуры показал, что в КЗ сплаве после отжигов происходит выделение α_{III} -фазы в прослойках β -фазы (рисунок 7а). Оценка ширины α_{III} -пластин показал, что после 300 часов в основном наблюдаются тонкие α_{III} -пластины около 17 нм, а после 500 часов появляются более широкие укрупненные пластины α_{III} -фазы с размером 25-30 нм, некоторые из них достигают размеров 40-50 нм. В МВ состоянии поскольку прочность незначительно изменилась, анализ микроструктуры показывает, что формирование мелких пластин α_{III} -фазы практически подавлено, либо носит единичные случаи (рисунок 7б).

Возможной причиной разного поведения между обоими состояниями является то, что при РК объемная доля β -фазы в структуре уменьшается. Так в КЗ

Для определения энергии активации были построены зависимости $\ln(\dot{\epsilon}) - \frac{1}{R \times T}$ при постоянном напряжении и вычислен коэффициент наклона:

$$Q^* = -R \times \frac{\partial \ln(\dot{\epsilon})}{\partial (\frac{1}{T})_{\sigma = \sigma_0}} \quad (3)$$

В результате оценки кривых «напряжение – линейная скорость» ползучести видно, что МВ сплав при 450 °С имеет более низкое сопротивление ползучести (рисунок 8а), то есть при идентичном нагружении обоих состояний скорость ползучести сплава в МВ состоянии выше, что говорит о более активных процессах возврата и диффузии в сравнении с КЗ аналогом. Так разница в напряжениях достигает 50 МПа при одинаковой $\dot{\epsilon}$. При 400 °С можно отметить обратную тенденцию на кривых $\log \dot{\epsilon} - \log \sigma$. Сплав с МВ структурой показывает небольшое превышение сопротивления ползучести по сравнению с КЗ состоянием. При испытаниях на ползучесть ВТ8М-1 с МВ структурой при 350 °С можно отметить усиление тенденции в повышении сопротивления ползучести по сравнению КЗ сплавом. Так при сопоставимых линейных скоростях ползучести МВ сплав способен выдержать нагрузки как минимум на 130 МПа больше, чем КЗ аналог.

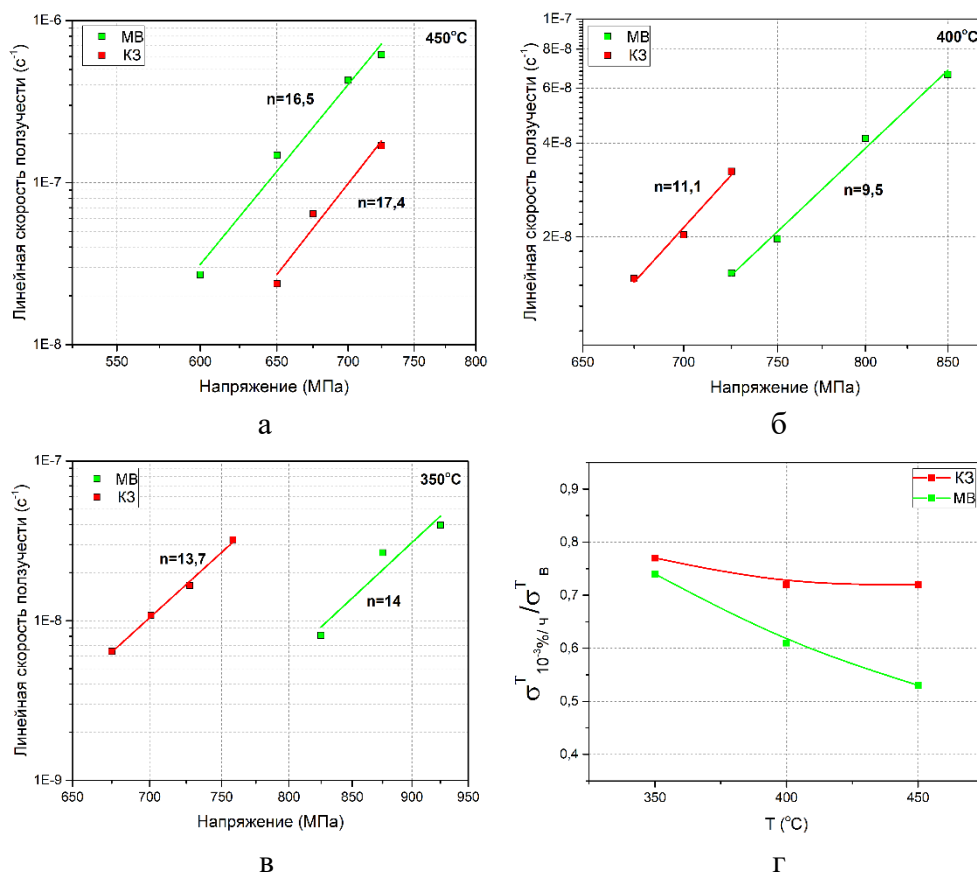


Рисунок 8 – Кривые зависимости скорости установившейся ползучести от напряжения титанового сплава ВТ8М-1 в КЗ и МВ состояниях при температурах 450 (а), 400 (б) и 350 °С (в) и соотношение предела ползучести к пределу прочности (г)

Также было оценено соотношение между напряжением ползучести при скорости $10^{-3} \%$ /ч (σ_v^T) и пределом прочности для обоих состояний. Для КЗ сплава отношение σ_v^T / σ_b плавно снижается с 0,77 до 0,72 с повышением температуры, в то время как МВ состояние имеет более резкое изменение данного параметра. Так при 450 и 400 °С σ_v^T / σ_b показывает относительно низкое значения равное 0,53 и 0,61 соответственно. Однако при 350 °С σ_v^T / σ_b становится равным 0,74, что сопоставимо с результатами КЗ состояния. Для жаропрочных титановых сплавов в их

рабочем температурном диапазоне данное соотношение σ_v^T/σ_b находится в диапазоне 0,65–0,8. Таким образом, результаты оценки жаропрочности титанового сплава ВТ8М-1 показывают, что в МВ состоянии сплав имеет повышенные жаропрочные свойства при температурах до 350 °С. Таким образом преимущество при эксплуатации сплава с МВ структурой по сравнению со дуплексной крупнозернистой структурой будет проявляться при температурах вплоть до 350 °С.

Оценка степени p для КЗ и МВ сплава показывает, что его значение находится в диапазоне 4–5, что указывает на такой доминирующий механизм ползучести как скольжение и переползание дислокаций. Далее была определена кажущаяся энергия активации по формуле 3. Результаты расчета Q^* показали, что для КЗ состояния она равна 109 кДж/моль, а для МВ состояния – 163 кДж/моль. Их величины находятся в удовлетворительной корреляции со значениями энергии активации для самодиффузии титана и ВТ6, что согласуется с утверждением о том, что ползучесть, как диффузионно-активируемый процесс, контролируется дислокационным механизмом деформации в рассматриваемом интервале температур. Сравнение Q^* обоих состояний показывает, что сплав с МВ структурой имеет более высокие значения энергии активации по сравнению с КЗ состоянием. Это позволяет утверждать, что формирование такой типа структуры приводит к повышению жаропрочности сплава ВТ8М-1.

В диссертации рассматриваются причины повышения жаропрочности сформированной микроволокнистой структуры на примере условной схемы микроволокнистой структуры (рисунок 9). Так в образованных волокнах зарождение и движение дислокаций происходит также как в КЗ структурах, но из-за сужения зерен в поперечном сечении и образования большого количества МУГ, как показано в α_1 -фазе на рисунке 9, скольжение и переползание дислокаций усложняется. Так в вытянутой α_{II} -фазе и β -фазе из-за малого поперечного размера и нарушения ориентационного соотношения между α - и β -фазами движение дислокаций усложняется еще больше. Второй особенностью является то, что из-за формирования сильно вытянутых зерен образование скооперированных полос из мелких зерен, как в случае УМЗ или нано-структур, становится невозможным, поскольку для ЗГП нужны сдвиговые напряжения, и, соответственно, данный механизм будет малоактивным при ползучести. К тому же приблизительная оценка доли границ зерен, которые расположены параллельно оси растяжения и в которых сдвиг по ГЗ отсутствует, составляет 20 %, что позволяет говорить о их значительном влиянии на сопротивление ползучести МВ структуры. К тому же образование цепочек силицидов на границах зерен может создавать дополнительные трудности для локальных актов ЗГП. Таким образом, формирование микроволокнистой структуры в сплаве ВТ8М-1 способствует повышению его жаропрочности за счет уменьшения размеров зерен при вытягивании, тем самым повышения его прочности, образования множества МУГ и сдерживании дополнительного механизма ползучести в виде ЗГП.

Исследование тонкой структуры МВ сплава ВТ8М-1 после ползучести при температурах 350, 400 и 450 °С показало, что происходит выделение третичной α -фазы в β -фазе в виде тонкопластинчатых ламелей с размером в поперечном сечении в диапазоне 10–40 нм. Причем повышение температуры испытаний ведет к утолщению данных пластин (рисунок 10). Определение ориентационного соотношения (ОС) между третичной α фазой и β фазой в точности удовлетворяет ОС Бюргерса: $[010]_\alpha // [1\bar{1}1]_\beta$; $(001)_\alpha // (\bar{1}01)_\beta$. Анализ МВ сплава позволяет утверждать, что образование α_{III} -фазы в МВ структуре является деформационно-индуцированным. Также в работе было установлено, что дополнительное выделение дисперсной третичной α -фазы в β -фазе способствует повышению сопротивления ползучести при 350 °С на 10 %. Поскольку бета-фаза является более пластичной из-за большего количества систем

скольжения и пониженного модуля упругости чем α -фаза, то образованные пластины α_{III} -фазы являются препятствием для движения дефектов в структуре, что способствует повышению сопротивления ползучести.

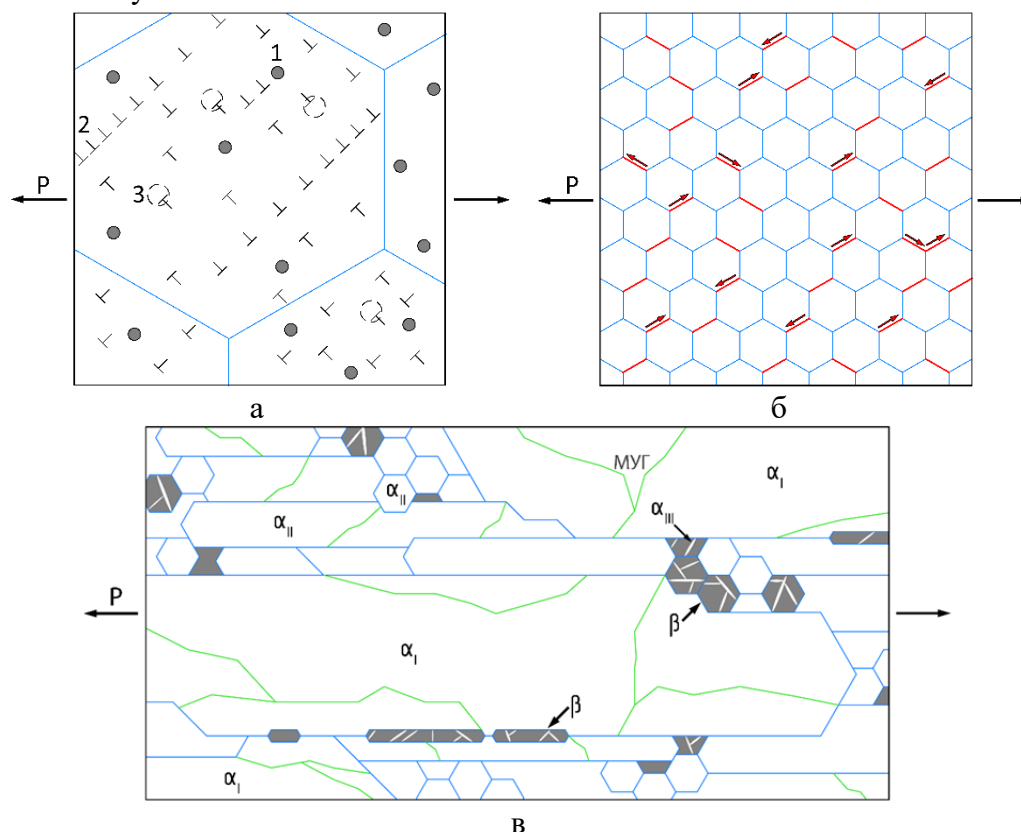


Рисунок 9 – Схема крупнозернистой жаропрочной структуры (а), классической УМЗ структуры (б) и микроволокнистой структуры в титановом сплаве ВТ8М-1

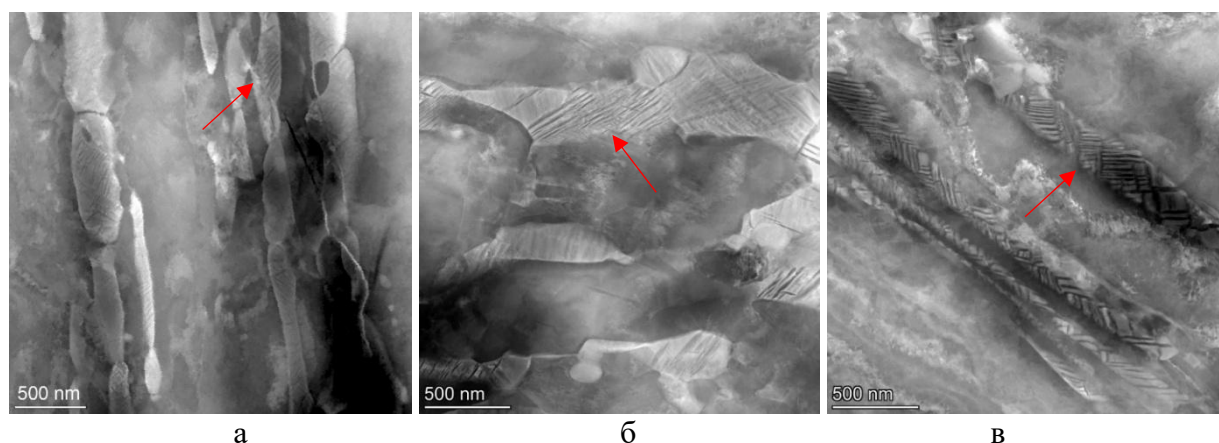


Рисунок 10 – ПЭМ изображения титанового сплава ВТ8М-1 в МВ состоянии после ползучести при 350 (а), 400 (б) и 450 °С (в)

Получаемый методом РК сплав ВТ8М-1 с МВ структурой показал повышенные эксплуатационные свойства вплоть до 350 °С. Однако, если в случае изготовления лопаток методом фрезеровки, например, для ГТД вертолетного типа, или применения вальцовки для формообразования лопаток механические характеристики МВ сплава останутся неизменными в готовых изделиях, то для изготовления крупных лопаток компрессора ГТД необходимо применять изотермическую штамповку. Традиционные режимы для титановых сплавов с температурой 900 °С и выше не позволят сохранить МВ структуру и, соответственно,

повышенные механические характеристики. В главе 6 представлены результаты изменения микроструктуры и механических свойств МВ сплава ВТ8М-1 после низкотемпературной изотермической штамповки (ИШ) при 750 °С. После ИШ сохраняется металлографическая текстура и бимодальность структуры (рисунок 11а), а именно, первичная α -фаза также имеет форму вытянутого расплющенного эллипсоида, а фрагменты мелкой глобулярной формы ($\alpha+\beta$) подрастают до 0,6 мкм в результате динамической рекристаллизации. Оценка механических характеристик лопатки из МВ сплава ВТ8М-1 показывает, что после штамповки сохраняются повышенные прочностные свойства по сравнению с КЗ аналогом (рисунок 11б). Кристаллографическая текстура также подверглась небольшим изменениям, но сохранила ориентировку близкую к аксиальной текстуре после РК.

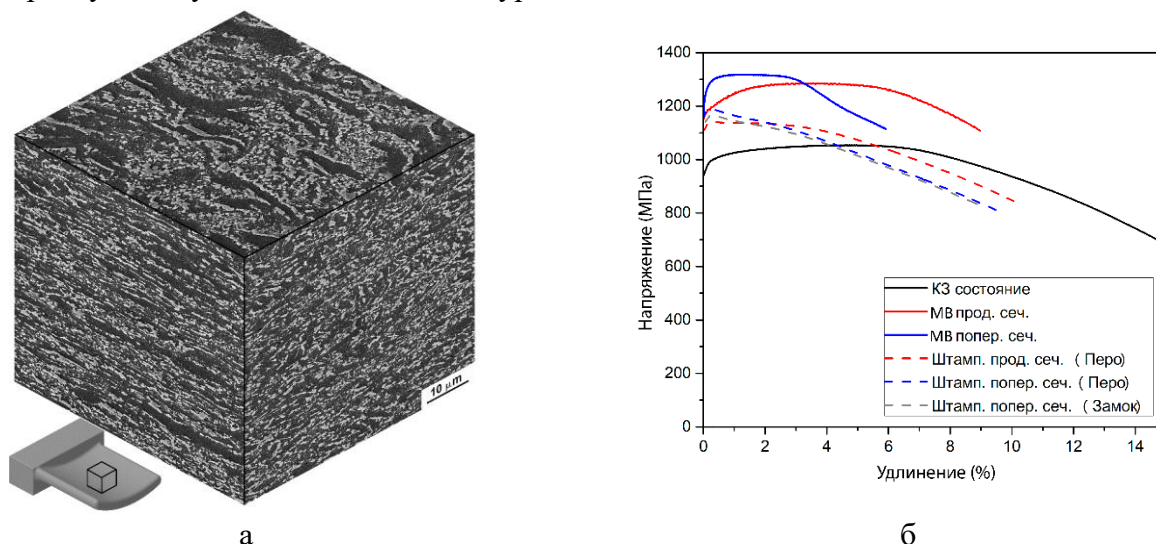


Рисунок 11 – Микроструктура и механические свойства сплава ВТ8М-1 после РК и ИШ

Для оценки усталостной долговечности из лопаток были подготовлены образцы имитаторов лопаток. Результаты испытаний на усталость показывают, что МВ сплав ВТ8М-1 имеет повышенный предел выносливости по сравнению с КЗ сплавом – 610 против 540 МПа, соответственно. Таким образом, применение промышленного метода деформации, такого как ротационная ковка, и последующей изотермической штамповки позволяет повысить эксплуатационные характеристики сплава ВТ8М-1 до 350 °С с короткими температурными забросами в течение часа до 500 °С для перспективного применения в ГТД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами диссертационной работы установлено, что применение ротационнойковки и низкотемпературной изотермической штамповки позволяет повысить эксплуатационные свойства титанового сплава ВТ8М-1 при рабочих температурах лопаток компрессора низкого давления в перспективных газотурбинных двигателях.

1. Установлено, что сформированная в титановом сплаве ВТ8М-1 методом ротационнойковки микроволокнистая структура с ультрамелкозернистой составляющей, характеризующаяся вытянутыми вдоль оси прутка зернами первичной α -фазы, ультрамелкими зернами со средним размером 0,25 мкм и наноразмерными силицидами $(\text{Ti,Zr})_6\text{Si}_3$ на границах, способствует повышению на 20–25 % предела прочности и условного предела текучести (при комнатной температуре) при сохранении пластичности на уровне 9 %.

2. Установлено, что титановый сплав ВТ8М-1 с микроволокнистой структурой с ультрамелкозернистой составляющей сохраняет термическую стабильность вплоть до 450 °С при термических и механических воздействиях и обеспечивает повышенные на 20 % механические

свойства при температурах 300–450 °С по сравнению со сплавом с дуплексной крупнозернистой структурой за счет большой плотности межфазных границ и наличия частиц силицидов $(\text{TiZr})_6\text{Si}_3$ по границам вытянутых ультрамелких зерен.

3. Обоснован метод повышения сопротивления ползучести титанового сплава ВТ8М-1 за счет формирования направленной вдоль оси нагружения микроволокнистой структуры с ультрамелкозернистой составляющей методом ротационнойковки, который обеспечивает повышенное на 20 % сопротивление ползучести при температуре 350 °С по сравнению со сплавом с дуплексной крупнозернистой структурой. Установлено, что деформационно-индуцированное выделение третичной α -фазы в титановом сплаве ВТ8М-1 с микроволокнистой структурой при эксплуатации дополнительно повышает сопротивление ползучести на 10 %.

4. Разработаны технологические рекомендации по изготовлению лопаток КНД методом изотермической штамповки при 750 °С из титанового сплава ВТ8М-1 с микроволокнистой структурой, получаемой методом ротационнойковки при температуре 750 °С, что обеспечивает повышенные на 10–15 % эксплуатационные свойства по сравнению со стандартной производственной технологией.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в научных изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК, либо в научных изданиях, индексируемых базой данных RSCI:

1. Стоцкий А. Г., Двухэтапная деформация титанового сплава ВТ8М-1 с формированием ультрамелкозернистой структуры в деталях для авиации / А. Г. Стоцкий // Materials.Technologies.Design. – 2026. Т. 8. – № 2(25). – с. 58-66. (К3, ВАК, 2.6.1)

Научные публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и международные реферативные базы данных и систем цитирования Web of Science, Scopus:

2. Stotskiy, A. G. The Effect of Long-Term Heating on Thermal Stability of Ultra-Fine Grained Titanium Alloy VT8M-1 Processed by Rotary Swaging / A. Stotskiy, T. Yakovleva, G. Dyakonov, A. Polyakov, I. Semenova. // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 1016. – pp. 1398-1403. (K3 = Q4)

3. Yakovleva, T. Investigation of the Role of Intermetallic Phases in Microstructure of UFG Titanium VT8M-1 Alloy / T. Yakovleva, G. Dyakonov, A. Stotskiy, Iu. Modina, I. Semenova // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 1016. – pp. 1659-1663. (K3 = Q4)

4. Dyakonov, G. Evolution of the Microstructure and Mechanical Properties of the Ultrafine-Grained VT8M-1 during Isothermal Die Forging and Thermal Treatment / G. Dyakonov, T. Yakovleva, A. Stotskiy, A. Ibatullin, I. Semenova // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 1016. – pp. 418-422. (K3 = Q4)

5. Modina, Iu. Creep Resistance of Ultrafine-Grained VT8M-1 Alloy / Iu. Modina, A. Polyakov, G. Dyakonov, T. Yakovleva, A. Stotskiy, R. Valiev, I. Semenova // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 1016. – pp. 922-927. (K3 = Q4)

6. Semenova, I. Fatigue Properties of Ti Alloys with an Ultrafine Grained Structure: Challenges and Achievements / I. P. Semenova, Yu. M. Modina, A. G. Stotskiy, A. V. Polyakov, M. V. Pesin // Metals. – 2022. – Vol. 12. – № 312. (K1 = Q1)

7. Dyakonov, G. S. Microstructure of the Advanced Titanium Alloy VT8M-1 Subjected to Rotary Swaging / G.S. Dyakonov, T.V. Yakovleva, S.Y. Mironov, A.G. Stotskiy, I.M. Modina, I.P. Semenova // Materials. – 2023. – 16. – № 6851. (K1 = Q2)

Публикации в трудах научных конференций:

8. Stotskiy, A. G. Mechanical behavior at elevated temperatures of the ultrafine-grained titanium alloy VT8M-1 processed by rotary / A. G. Stotskiy, T. V. Yakovleva, Yu. M. Modina, A. V. Polyakov, I. A. Ramazanov, I. P. Semenova. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2019. – Vol. 672. – № 1. – P. 012060.

9. Yakovleva, T. V. Microstructure and mechanical properties of workpieces of the ultrafine-grained two-phase Ti alloy produced by die forging / T. V. Yakovleva, G. S. Dyakonov, **A. G. Stotskiy**, I. P. Semenova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2019. – Vol. 672. – № 1. – P. 012065.
10. **Stotskiy, A. G.** Thermal Stability of Titanium Alloy VT8M-1 with Ultrafine-Grained Structure / A. G. Stotskiy, A. V. Polyakov, G. S. Dyakonov, I. P. Semenova. // The 14th World Conference on Titanium. – MATEC Web of Conferences. – 2020. – Vol. 321. – № 11026.
11. Дьяконов, Г. С. Термическая стабильность и механические свойства ультрамелкозернистого титанового сплава VT8M-1 / Г. С. Дьяконов, Т. В. Яковлева, **А. Г. Стоцкий**, Ю. М. Модина, А. Р. Ибатуллин, И. П. Семенова // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: сборник тезисов докладов XXV Уральской школы металловедов-термистов. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. — 270 с.
12. **Стоцкий, А.Г.** Механическое поведение титанового сплава VT8M-1 при повышенных температурах после ротационнойковки / А. Г. Стоцкий, Т. В. Яковлева, Г. С. Дьяконов, А. В. Поляков, И. П. Семёнова // Уральская школа молодых металловедов: сборник материалов XX Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов — молодых ученых. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. — с. 160–163.
13. **Стоцкий, А. Г.** Микроструктура и механические свойства жаропрочного титанового сплава с УМЗ структурой после изотермической штамповки / А. Г. Стоцкий, Ю. М. Модина, Г. С. Дьяконов, И. П. Семенова // Материалы всероссийской научной конференции «IV Байкальский материаловедческий форум». – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2022. – с. 570-571.
14. Модина, Ю. М. Трещиностойкость и длительная прочность ультрамелкозернистых двухфазных титановых сплавов / Ю. М. Модина, **А. Г. Стоцкий**, Т. В. Яковлева, Г. С. Дьяконов, И. П. Семенова // Материалы всероссийской научной конференции «IV Байкальский материаловедческий форум». – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2022. – с. 542-543.
15. **Стоцкий, А.Г.** Механическое поведение, микроструктурные и текстурные особенности титанового УМЗ сплава VT8M-1 / А. Г. Стоцкий, Г. С. Дьяконов, Ю. М. Модина, И. П. Семенова // Тезисы докладов международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии», Томск, Россия. – 2023г.– с. 194-195.
16. Модина, Ю.М. Влияние микроструктурных и текстурных особенностей в ультрамелкозернистом титановом сплаве VT8M-1 на механические свойства / Ю. М. Модина, **А. Г. Стоцкий**, Г. С. Дьяконов // Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы: Сборник трудов открытой школы-конференции стран СНГ / отв. ред. А.А. Назаров. – Уфа: РИЦ УУНиТ, 2024. – с. 198-199.
17. **Стоцкий, А.Г.** Образование силицидов и низкотемпературный распад в жаропрочном титановом сплаве VT8M-1 / А. Г. Стоцкий, Г. С. Дьяконов // Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы: Сборник трудов открытой школы-конференции стран СНГ / отв. ред. А.А. Назаров. – Уфа: РИЦ УУНиТ, 2024. – с. 288-289.
18. **Стоцкий, А.Г.** Влияние отжига на эволюцию микроструктуры ультрамелкозернистого титанового сплава VT8M-1, полученного ротационной ковкой / А. Г. Стоцкий, Г. С. Дьяконов // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2022. – с. 581-586.

Соискатель

Стоцкий А. Г.

СТОЦКИЙ Андрей Геннадиевич

**ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ
ДВУХФАЗНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ8М-1 С МИКРОВОЛОКНИСТОЙ
СТРУКТУРОЙ, ПОЛУЧЕННОЙ РОТАЦИОННОЙ КОВКОЙ**

Специальность:

2.6.1 – Metalловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук