

На правах рукописи



**БЕРДИН НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ  
В ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ VT5-1  
ПРИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ**

Специальность

05.16.01 –Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технологический университет»

Научный руководитель: - доктор технических наук, профессор  
**Смыслов Анатолий Михайлович**

Официальные оппоненты: - **Салищев Геннадий Алексеевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «БелГУ», профессор

- **Ашмарин Артем Александрович**,  
кандидат технических наук,  
ФГБУН «ИМЕТ» РАН,  
и.о. ведущего научного сотрудника

Ведущая организация: - АО «Институт технологии и организации  
производства», г. Уфа

Защита диссертации состоится 01 декабря 2020 года в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.15 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvorcovasv@mati.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте [https://mai.ru/upload/iblock/5b9/Dissertatsiya\\_Berdin.pdf](https://mai.ru/upload/iblock/5b9/Dissertatsiya_Berdin.pdf)

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета



Скворцова С.В.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы.**

Широкое применение титановых сплавов в ведущих отраслях промышленности: аэрокосмической, атомной, нефтехимической и др. ограничено их высокой стоимостью и низкими технологическими свойствами. Однако необходимость использования этих материалов в современных инновационных проектах, таких как создание авиационного двигателя пятого поколения, остается очень высокой, благодаря привлекательному соотношению прочности, жесткости и веса. Кроме этого из титановых сплавов сравнительно легко можно изготавливать сложные детали методом диффузионной сварки в сочетании со сверхпластической формовкой, однако это требует наличия в сплавах микрокристаллической структуры регламентированного типа.

Одним из способов получения в сплавах титана такой микроструктуры является горячая пластическая деформация, при которой в результате развития динамической рекристаллизации в первичной  $\alpha$ - фазе и фазовых  $\alpha \rightarrow \beta$  превращений происходит преобразование исходной крупнокристаллической пластинчатой структуры в микрокристаллическую структуру глобулярного типа. Важным фактором, определяющим эффективность деформационной обработки, наряду с температурой, степенью и скоростью деформации, является вид нагружения и соответствующее ему напряженное и деформированное состояние.

Известен ряд работ, в которых изучалось влияние различных видов нагружения, наиболее близким из которых к практическому применению, является всесторонняя ковка с понижением температуры деформации. В этом способе, как и в большинстве других, основным фактором, обеспечивающим развитие трансформации структуры, является величина накопленной пластической деформации. В тоже время в других работах, наряду с величиной накопленной деформации, в качестве необходимого условия развития динамической рекристаллизации рассматривается траектория деформации, а и. ее соответствие критерию монотонности, или сложности нагружения.

Вместе с тем, остается неясным вопрос о влиянии на трансформацию крупнокристаллической пластинчатой структуры в микрокристаллическую динамической рекристаллизации в первичной  $\alpha$ -фазе, и основных параметров напряженного и деформированного состояния, которые формируются при горячей деформации сплава ВТ5-1 в однофазной  $\alpha$ - области.

Таким образом, изучение влияния температурно-скоростных режимов горячей деформации, а также параметров напряженного и деформированного состояния на формирование дислокационной структуры, развитие динамической рекристаллизации в  $\alpha$ - фазе, и разработка на этой основе технологического процесса получения заготовок из сплава ВТ5-1 и ВТ6 с регламентированной структурой для изготовления из них макетов полых конструкций методом сверхпластической формовки и диффузионной сварки является актуальной научной и практической задачей

### **Цель настоящей работы**

Установить связь между температурно-скоростными условиями деформации и видом напряженного и деформированного состояния, обеспечивающие формирование микроструктурной структуры в  $\alpha$ -титановом сплаве ВТ5-1 при горячей пластической деформации одно- и двух-компонентным нагружением и на этой основе разработать технологический процесс получения заготовок из сплава ВТ5-1 и ВТ6 с регламентированным типом микроструктуры для изготовления полых конструкций методом сверхпластической формовки и диффузионной сварки.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Установить влияние температурно-скоростных условий горячей деформации в однофазной  $\alpha$  – области и типовыми видами нагружения на формирование микроструктурной структуры;

2. Изучить влияние основных параметров напряженного состояния, формируемого в материале при горячей деформации одноосным сжатием на диаграммы нагружения и изменение структуры в сплаве ВТ5-1;

2. Определить влияние деформированного состояния - траектории результирующего вектора деформации на механическое поведение сплава ВТ5-1 и эффективность трансформации микроструктуры в рабочем объеме образцов;

4. С учетом особенностей формирования микроструктурной структуры в  $\alpha$ -фазе титанового сплава ВТ5-1 разработать технологическую схему получения полуфабрикатов для изготовления макетов полых титановых лопаток авиационного газотурбинного двигателя из сплава ВТ6 от этапа получения заготовок с регламентированным типом микроструктуры до изготовления полых конструкций методом сверхпластической формовки и диффузионной сварки.

### **Научная новизна.**

1. Установлена связь между температурно-скоростными условиями горячей деформации, типовыми видами (растяжение, сжатие, кручение) нагружения с формированием микроструктурной структуры. Наибольшая интенсивность измельчения микроструктуры при одинаковой температуре  $T=900^{\circ}\text{C}$ , степени накопленной деформации  $\epsilon \sim 0,6$  наблюдается при следующих скоростях деформации. При одноосном растяжении со скоростью  $\xi_0 \sim 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  средний размер зерен был равен 15,5 мкм. При одноосном сжатии с начальной скоростью  $\xi_0 \sim 1 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ,  $\epsilon \sim 0,6$  средний размер зерен был равен 2...5 мкм. При простом кручении с начальной скоростью деформации  $\xi_0 \sim 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  средний размер зерен на боковой поверхности равен 15...20 мкм.

2. Разработана реологическая модель механического поведения титанового сплав ВТ5-1 на основе результатов горячего деформирования образцов в однофазной  $\alpha$  – области одноосным растяжением, учитывающая микроструктурные изменения для определения параметров НДС при одно- и 2-х компонентном нагружении методом конечно - элементного моделирования.

3. Показано влияние напряженного состояния, формируемого в материале при горячей пластической деформации образцов с одинаковым диаметром и различной высотой одноосным сжатием на механическое поведение, развитие динамической рекристаллизации и формирование микроструктуры в сплаве ВТ5-1. Уменьшение значения относительного гидростатического давления  $K_2$  с  $-1,7$  до  $-9,0$  при горячей деформации приводит к уменьшению темпов развития динамической рекристаллизации за счет уменьшения количества зародышей и скорости их роста, приводя к образованию  $\alpha$ -зерен размером  $\sim 2,0$  мкм и одновременному снижению объема рекристаллизованной структуры до  $V_{рек} = 30\%$ .

4. Установлено влияние деформированного состояния (траектории вектора деформации) при 2х-компонентном (кручение + растяжение) нагружении. При соотношении кручения к растяжению  $0,47:0,2$  начальной скорости деформации  $\xi_0 = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  и значении модуля вектора деформации  $\epsilon = 0,5$  повышает эффективность преобразования крупнокристаллической микроструктуры в микрокристаллическую, формируя во всем рабочем объеме микроструктуру со средним размером зерна  $5,0..7,0$  мкм за счет распространения деформации вглубь исходных  $\alpha$ - зерен, образования устойчивых дислокационных скоплений, что интенсифицирует рекристаллизационные процессы и увеличивает объем превращенной микроструктуры в рабочей зоне образцов до значения  $V_{рек} = 80\%$ .

5. Дополнительная термическая и горячая деформационная обработка при выполнении формообразующих операций при изготовлении полых конструкций компенсируют увеличение среднего размера зерен при диффузионной сварке и сверхпластической формовки за счет развития динамического возврата, рекристаллизации и фазовых превращений, обеспечивая получение в готовых изделиях высоких статических, динамических и циклических свойств.

### **Теоретическая и практическая значимость:**

1. Проведенные исследования доказали, практическую возможность эффективно управлять процессами формирования микрокристаллической структуры в крупногабаритных заготовках из титановых сплавов ВТ5-1и ВТ6 за счет выбора оптимальной совокупности температурно-скоростных условий деформации и схемы 2-х компонентного (кручение + растяжение) нагружения, которые предназначены для изготовления макетов лопаток авиационного газотурбинного двигателя и моноколеса центробежного насоса для перекачки жидких сред при криогенной температуре.

2. Разработана технологическая схема получения заготовок макетов полых конструкций, получены заготовки, из которых изготовлены образцы с применением операций диффузионная сварка и сверхпластическая формовка.

3. Разработана и изготовлена установка для подготовки заготовок к диффузионной сварке в автоклаве (операция «сушка») и передана в ПАО «ОДК «УМПО» для последующего использования при изготовлении полых широкохордных лопаток современных ГТД.

## **Методология и методы исследования**

При выполнении работы были использованы современные методы исследования: металлографический, рентгеноструктурный и микро-рентгеноспектральный анализы, механические испытания, а также математический анализ, основанный на методе конечных элементов.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Температурно-скоростные условия горячей деформации в однофазной  $\alpha$  – области и типовые виды нагружения влияют на развитие динамической рекристаллизации и формирование микрокристаллической структуры в титановом сплаве VT5-1.

2. Параметры напряженного состояния – относительное гидростатическое давление, формируемое в образцах при горячей пластической деформации одноосным сжатием цилиндрических образцов с различной исходной высотой, определяют механическое поведение, формирование дислокационной структуры, развитие динамической рекристаллизации, интенсивность и полноту образования микрокристаллической структуры в титановом сплаве VT5-1.

3. Параметры деформированного состояния, модуль и траектория вектора результирующей деформации при двух компонентном (кручение + растяжение) нагружении влияют на механическое поведение сплава VT5-1, однородность формирования дислокационной структуры, развитие рекристаллизационных процессов и эффективность образования микрокристаллической структуры в рабочем объеме образцов;

4. Технологические рекомендации по выбору температурно-скоростных режимов получения регламентированной микроструктуры в заготовках из титановых сплавов VT5-1 и VT6 путем горячей деформации в условиях двух компонентного нагружения, режимов получения неразъемных соединений и формообразующих операций при изготовлении макетов полых изделий методом диффузионной сварки и сверхпластической формовки.

## **Степень достоверности результатов**

Все результаты исследований были получены на поверенном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Испытания, измерения получаемых значений выполняли в соответствии с требованиями ГОСТ.

Достоверность результатов подтверждается многообразием используемых современных методов исследований, хорошим совпадением экспериментальных данных и теоретических расчетов, применением методов конечно-элементного моделирования и математической статистики при обработке результатов экспериментов. Финальная оценка достигнутых результатов выполнена в процессе изготовления заготовок и макетов полых конструкций современных газотурбинных двигателей гражданского и военного назначения.

### **Апробация работы.**

Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на: Международном молодежном форуме «Будущее высоких технологий и инноваций за молодой Россией», Санкт-Петербург, Россия, 10-12 марта 2009г.; Международном молодежном форуме «Будущее авиации за молодой Россией» в рамках работы Международного авиационно-космического салона «МАКС-2009», Жуковский, Россия, 18-20 августа 2009 г.; X Международной уральской школе-семинаре металловедов-молодых ученых, Екатеринбург, Россия, 7–11 декабря 2009 г.; Международной научной школе для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов.» Екатеринбург, Россия, 8-12 ноября 2010 г.; XI Международной уральской школе-семинаре металловедов-молодых ученых, Екатеринбург, Россия, 8–12 ноября 2010 г.; Международной молодежной научной конференции «XXXIX ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ». Москва, 9-13 апреля 2013г.; Школе молодых ученых «Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов» 9-11 октября 2019 г. НИУ «БелГУ», г. Белгород.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в постановке цели и задач исследования, в проведении экспериментальных исследований, анализе и обработке полученных результатов, их обобщении, формулировке выводов по диссертации, а также в подготовке публикаций и докладов на научных конференциях.

### **Публикации**

Основное содержание диссертации опубликовано в 20 печатных работах, из них 8 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 6 тезисов докладов и материалов конференций, получено 6 патентов РФ. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

### **Объем диссертации и ее структура.**

Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 171 страниц, в том числе 81 рисунок, 26 таблиц. Список литературы содержит 128 наименований. В приложении представлен акт о применении результатов работы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цель и задачи исследования, раскрывается научная новизна и практическая значимость работы.

### **Глава 1. Анализ состояния вопроса и постановка задачи исследования**

В первой главе на основе литературного анализа показано, что в двухфазной области пластинчатая морфология  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз термодинамически стабильна. В

связи с этим, для преобразования пластинчатой крупнокристаллической в микрокристаллическую структуру в титановых сплавах принято использовать интенсивную горячую пластическую деформацию. В этих условиях преобразование пластинчатой структуры в глобулярную представляет собой комплексный процесс, обусловленный движением дефектов структуры (дислокаций, вакансий, границ), перераспределением легирующих элементов, полиморфным фазовым  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращением, динамической рекристаллизацией и зернограничного проскальзывания. При этом тип формируемой структуры зависит от многих факторов: исходной структуры материала, скорости и степени деформации и температуры обработки.

Важным фактором, влияющим на трансформацию пластинчатой микроструктуры в глобулярную, является вид нагружения, который формирует напряженное и деформированное состояние в обрабатываемой заготовке. По результатам одних работ монотонное пропорциональное нагружение имеет преимущества в кинетике преобразования пластинчатой микроструктуры в глобулярную по сравнению с однокомпонентным и двухкомпонентным нагружением. По результатам других работ предпочтительной схемой нагружения, с точки зрения преобразования структуры является циклическое кручением после предварительного растяжения. Также известно, что немонотонная деформация титановых сплавов, осуществляемая путем многократной всесторонней ковки, позволяет получать микрокристаллическую структуру с высокой степенью однородности. Однако отмечены технологические трудности получения микрокристаллической структуры в крупногабаритных заготовках, вызванные низкой теплопроводностью сплавов Ti, а также локализацией трансформации структуры по полосам сдвига, межзеренным и межфазным границам. Все это снижает качество, повышает трудоемкость и себестоимость производства заготовок для изготовления, например изделий полрой конструкции современных авиационных газотурбинных двигателей,

В заключительном разделе первой главы на основе обзора и анализа литературных данных сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

## **Глава 2. Материал и методика исследования**

Во второй главе обоснован выбор сплава VT5-1, в качестве модельного материала для изучения процессов формирования мелкозернистой структуры и возможности использования результатов исследования для практического применения при получении технологических заготовок из сплава VT5-1 и VT6 с регламентированным типом микроструктуры.

Было выбрано исходное структурное состояние титанового сплава VT5-1, которое обладает пониженной пластичностью и представляет собой крупные полиэдрические зерна «превращенной»  $\beta$ -фазы с колониями пластинчатой  $\alpha$ -фазы, полученное в результате отжига прутка в течение 1 ч в  $\beta$ -области при температуре  $T=1100^\circ\text{C}$  с последующим охлаждением на воздухе.

Горячую деформацию образцов проводили на машине сложного нагружения СНТ-10БД в изотермических условиях. Обработку результатов испытаний:



вычисление деформаций и напряжений при одно- и двухкомпонентном нагружении выполняли с учетом конечно-элементного анализа в учебной версии программного комплекса «ABAQUS».

Металлографические исследования проводили на оптических микроскопах «Metaval» и «Axiovert 100A» и растровом электронном микроскопе «JEM-6490 LV». Количественный анализ параметров микроструктуры проводили при помощи программных комплексов: «ImagePro Plus 4.5», «KS300», «SigmaPlot 10.0. Подсчет осуществляли по трем полям зрения с общим числом частиц не менее 2000, что позволило получить относительную ошибку определения параметров структуры 5% при доверительной вероятности 0,95.

Исследования тонкой структуры проводили на просвечивающем микроскопе «JEM-2100EX» и «Теснаі G2 20F S-TWIN» с ускоряющим напряжением 160 кВ.

Рентгеноструктурный анализ выполняли на диффрактометре Ultima IV фирмы Rigaku. Использовали медную рентгеновскую трубку (мощностью 3кВт) при напряжении 40 В и силе тока 40 мА,  $\kappa$ - $\beta$  фильтра (на основе Ni) и графитового монохроматора.

Исследование структуры и разориентировок между кристаллитами зерен проводили с применением автоматического анализатора дифракции обратно-рассеянных электронов (electron back scattering diffraction – EBSD) при ускоряющем напряжении 15 kV, детекторе HKLNordlysNano и программного обеспечения «AZTEC HKL и Channel 5».

Для получения заготовок макетов и самих макетов использовали гидравлический пресс, и установку для сушки, разработанную, изготовленную и переданную на ПАО «ОДК «УМПО». Макеты изготавливали с использованием сверхпластической деформации и диффузионной сварки.

### Глава 3. Формирование микрокристаллической структуры в сплаве VT5-1 при горячей деформации типовыми видами нагружения

В третьей главе рассмотрены типовые виды нагружения и соответствующее им напряженное и деформированное состояния (НДС) с учетом допущений о равномерном течении материала. Напряженное состояние количественно оценивали коэффициентом Лодэ ( $K_1$ ), определяющим вид нагружения и относительным гидростатическим давлением ( $K_2$ ), который показывает на сколько гидростатическое давление сжатия превышает величину напряжений течения при деформации материала (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Параметры НДС типовых видов нагружения

Деформированное состояние оценивали величиной накопленной и вектором результирующей деформации. Расчетные значения параметров НДС использовали для определения температурно - скоростных режимов нагружения при выполнении горячей пластической деформации цилиндрических образцов одноосным растяжением, сжатием и кручением.

Результаты горячих механических испытаний в однофазной  $\alpha$ - области служили исходной информацией при разработке реологической модели пластического поведения  $\alpha$ - титанового сплава ВТ5-1 в котором протекают процессы изменения микроструктуры в результате развития динамической рекристаллизации, а также для установления связи видов нагружения, НДС, температурно – скоростных условий деформации, развития рекристаллизации в крупнокристаллической  $\alpha$ - фазе и формированием микроструктуры.

В результате выполненных исследований установлено, что формирование микроструктуры при горячей деформации образцов типовыми видами нагружения происходит по-разному, о чем можно судить по графикам (Рисунок 2).

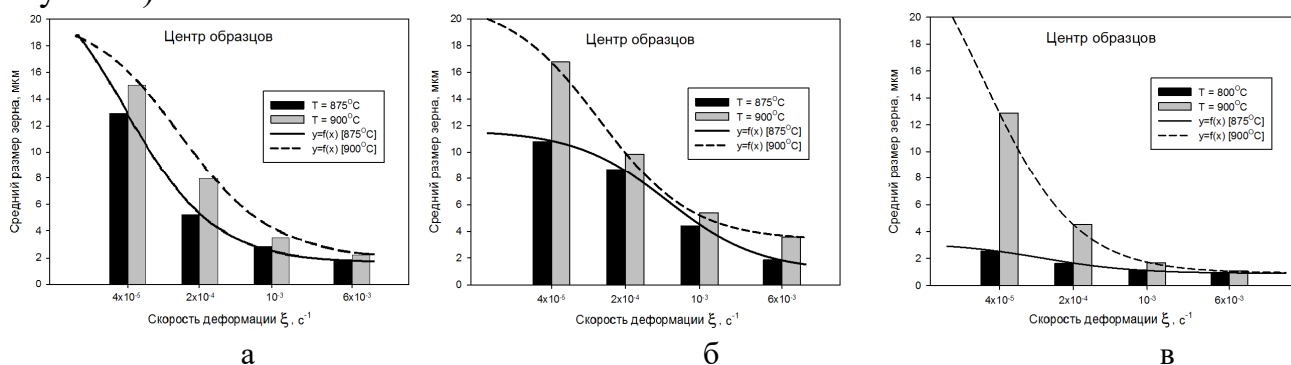


Рисунок 2 – Средний размер рекристаллизованных зерен в зависимости от скорости и температуры деформации,  $\nu \sim 0,8$ . а-растяжение; б-кручение; в-сжатие

При одноосном растяжении отмечена наименьшая чувствительность процессов структурообразования к температуре деформации и высокая к скорости деформации. Размер рекристаллизованных зерен изменяется в диапазоне от 13...15 мкм при  $\xi = 4 \cdot 10^{-5} \text{c}^{-1}$  до 2...3 мкм при  $\xi = 6 \cdot 10^{-3} \text{c}^{-1}$ .

При кручении повышенная чувствительность процессов структурообразования к температуре деформации наблюдается при малых и высоких скоростях деформации. А в диапазоне  $\xi = 10^{-4} \dots 10^{-3}$  она наименьшая. При этом размер рекристаллизованных зерен по сравнению с растяжением слегка выше. Например, при  $T=900^{\circ}\text{C}$  в зависимости от скорости деформации средний размер зерен изменяется в диапазоне от 18 мкм при  $\xi = 4 \cdot 10^{-5} \text{c}^{-1}$  до 4 мкм при  $\xi = 6 \cdot 10^{-3} \text{c}^{-1}$ .

При одноосном сжатии при  $T = 800^{\circ}\text{C}$  размер зерен рекристаллизованной структуры слабо зависит от скорости деформации. Размер рекристаллизованных зерен укладывается в диапазон от 2,5 мкм при  $\xi=4 \cdot 10^{-5} \text{c}^{-1}$  до 1,5 при  $\xi=6 \cdot 10^{-3} \text{c}^{-1}$ .

Однако при  $T = 900^{\circ}\text{C}$  чувствительность процессов рекристаллизации к  $\xi$  наибольшая. Средний размер зерен изменяется в диапазоне от 12,5 мкм при  $\xi = 4 \cdot 10^{-5} \text{c}^{-1}$  до 1,5 мкм при  $\xi = 6 \cdot 10^{-3} \text{c}^{-1}$ . Для выявления причин такой зависимости эволюции структуры от видов нагружения предложено изучить отдельно влияние напряженного состояния: относительного гидростатического давления  $K_2$  при неизменном  $K_1$  и величины накопленной деформации  $\epsilon$  и отдельно влияние деформированного состояния: разворота вектора результирующей деформации при неизменном его модуле (величине накопленной деформации  $\epsilon$ ) при 2-х

компонентном (кручение + растяжение) монотонном нагружении.

#### Глава 4. Напряженное состояние и эволюция микроструктуры при горячей деформации сплава ВТ5-1

В четвертой главе рассмотрено влияние напряженного состояния на структурные изменения при высокотемпературном одноосном сжатии цилиндрических образцов из  $\alpha$ -титанового сплава ВТ5-1 одного диаметра (10,0 мм) и различной исходной высотой (4,0 мм, 8,0 мм и 15,0 мм).

Анализ формируемого НДС (Рисунок 3), выполненный методом КЭ-

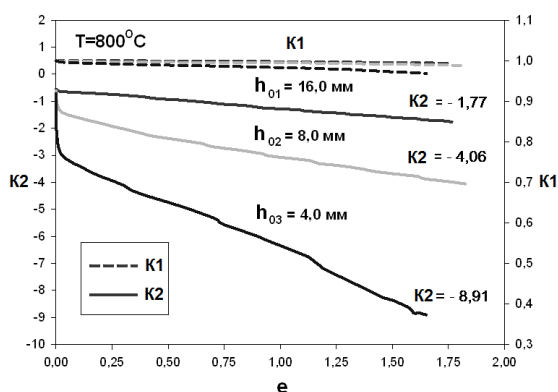


Рисунок 3 – Значения  $K_1$  и  $K_2$  в центральной точке образцов при одноосном сжатии на одинаковую величину  $\epsilon_k = 0,67$ .

моделирования показал, что уменьшение исходной высоты образцов приводит к значительному увеличению относительного гидростатического давления  $K_2$ . При этом вид нагружения остается неизменным, о чем свидетельствует неизменность значений параметра  $K_1$ . Значения деформации в центре образца изменились всего на 15%. Параметр  $K_2$  в образцах с начальной высотой 15,0 мм был равен -0,6, в образцах с начальной высотой 8,0 мм  $K_2$  уже равен -4,0, а в образцах с начальной высотой 4,0 мм  $K_2$  имеет наименьшее значение -8,9.

В результате выполнения горячих механических испытаний было установлено (Рисунок 4), что образцы с различной исходной высотой деформируются по-разному. Например, изменение скорости деформации не оказывает значительного влияние на форму кривых пластического течения. При этом исходная высота образца определяла начальные значения напряжения течения, и коэффициент деформационного упрочнения. С уменьшением исходной высоты с 15 до 4 мм начальные значения напряжений течений повышаются на 20-30%, а максимальные значения изменяются в 2-3 раза. Увеличение температуры деформации, не изменяя характер кривых, приводит лишь к понижению значений

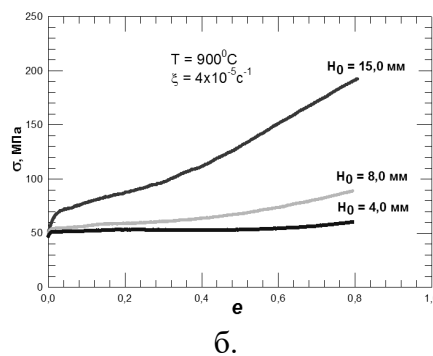
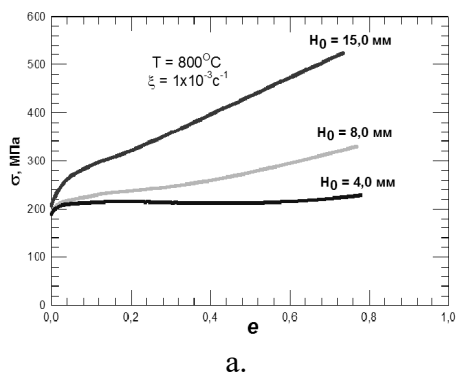


Рисунок 4. Влияние напряженного состояния на механическое поведение.

а)  $T=800\text{ }^\circ\text{C}$  и  $\xi=4\cdot 10^{-4}\text{ c}^{-1}$ ; б)  $T=900\text{ }^\circ\text{C}$  и  $\xi=1\cdot 10^{-3}\text{ c}^{-1}$ .

напряжений течения, а также уменьшает величину коэффициента

деформационного упрочнения и протяженность характерных стадий деформации.

Анализ эволюции микроструктуры сплава ВТ5-1 в процессе горячей деформации в очаге деформации и застойной зоне (Рисунок 5) показал, что в

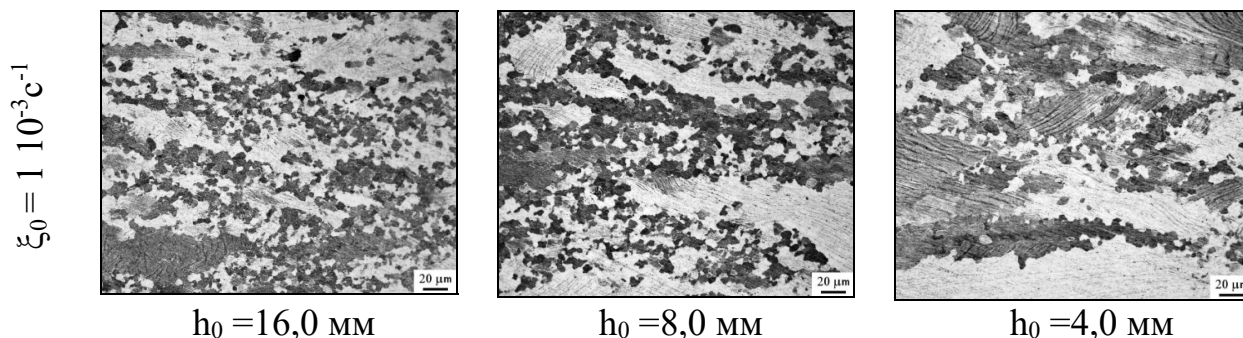


Рисунок 5 – Изменение микроструктуры в центре образца после горячей деформации сжатием при 900°C, до высотной деформации  $\varepsilon = 60\%$ .

образцах с начальной высотой 15,0 мм процессы рекристаллизации охватывает большой объем  $\alpha$ - зерен. В образцах с исходной высотой 4 мм рекристаллизованный объем сосредотачивается вблизи границ колоний  $\alpha$ - зерен.

В застойной зоне в образцах с начальной высотой 15,0 мм процесс рекристаллизации не наблюдается, а в образцах с начальной высотой 8,0 мм наблюдаются незначительные области начала рекристаллизации, которые расположены вблизи границ колоний исходных  $\alpha$ - зерен. В образцах с начальной высотой 4,0 мм наблюдаются незначительные участки начала рекристаллизации, которые расположены вблизи границ колоний исходных  $\alpha$ - зерен. Повышение температуры деформации до  $T = 900^\circ\text{C}$  приводит к увеличению объема

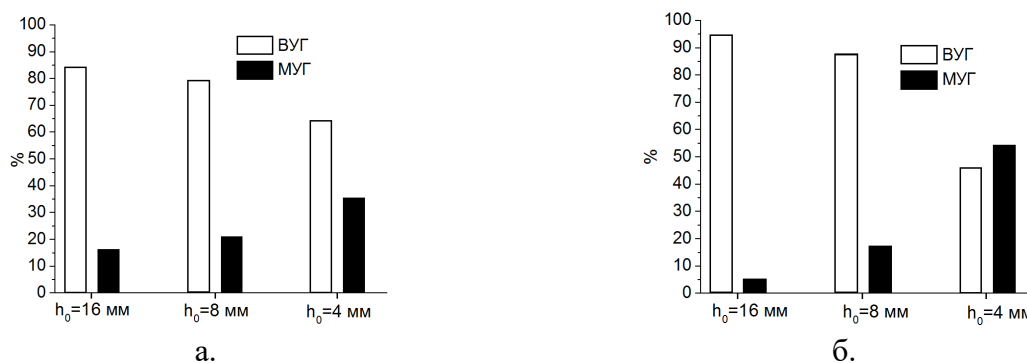


Рисунок 6 - Доля высоко- и малоугловых границ зерен в образцах с различной высотой после сжатия.  $T = 800^\circ\text{C}$ ,  $\xi = 1 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 60\%$ :  
а. – центральная зона; б. – застойная зона

рекристаллизованной микроструктуры. При этом локальность развития рекристаллизации уменьшается. В застойной зоне, где величина накопленной деформации минимальна, процесс рекристаллизации вообще не наблюдается.

Результаты EBSD анализа (Рисунок 6) свидетельствуют о том, что трансформация структуры проходит вдоль границ колоний  $\alpha$ -зерен и характер разориентации зерен относительно друг друга идентичен и не зависит напряженного состояния.

По результатам распределения высоко- и мало- угловых границ стоит отметить, что с увеличением параметра напряженного состояния количество мало угловых границ увеличивается и даже в зоне минимальной деформации в образцах с начальной высотой 4,0 мм наблюдаются скопление мало угловых границ вблизи границ колоний  $\alpha$ -зерен. Так же видно, что количество высоко – угловых границ уменьшается. Вследствие чего наблюдается уменьшение объема рекристаллизованной структуры, с увеличением параметра напряженного состояния.

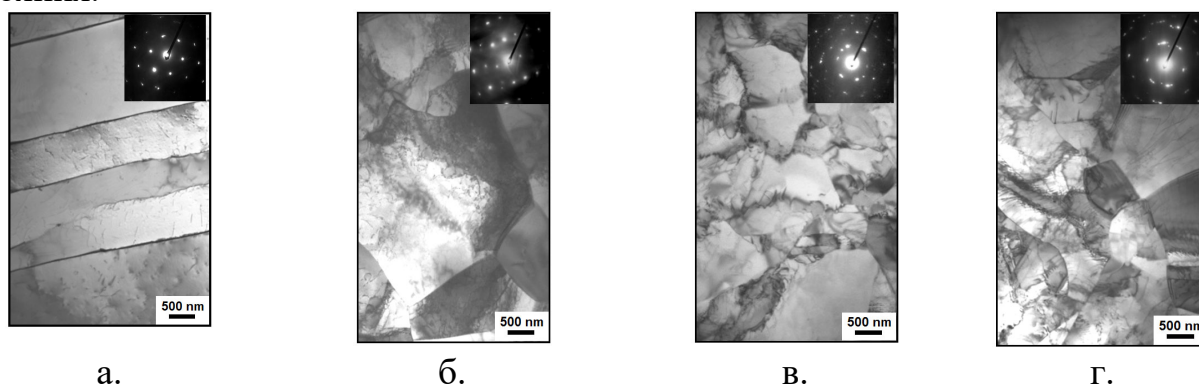


Рисунок 8 - Тонкая структура. а. - исходное состояние; б-г - после горячей деформации при  $900^{\circ}\text{C}$ ,  $\xi=1 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ,  $\varepsilon=60\%$ , б.  $h_0=16 \text{ мм}$ ; в.  $h_0=8 \text{ мм}$ ; г.  $h_0=4 \text{ мм}$

Анализ тонкой структуры показал, что увеличение значения  $K_2$  приводит к увеличению плотности дефектов вблизи границ (Рисунок 8). При  $K_2= - 0,6$  большая часть границ свободны от рекристаллизованных зерен, а при  $K_2= - 4,0$  их плотность наибольшая. При  $K_2= - 8,0$  наблюдаются границы с повышенным содержанием дефектов вблизи которых зародыши рекристаллизации отсутствуют.

Таким образом показатель напряженного состояния  $K_2$ , при прочих равных условиях (температура, скорость и степень, а также вид НДС) оказывает влияние на развитие процессов динамической рекристаллизации. Можно предположить, что это влияние выражается в подавлении процессов зернограничной и объемной диффузии, которая определяет зарождение зародышей динамической рекристаллизации и их дальнейший рост.

## **Глава 5. Вектор деформации и формирование микрокристаллической структуры в сплаве ВТ 5-1 при горячей деформации в условиях 2-х компонентного (кручение + растяжение) нагружения**

В пятой главе изучена эволюция крупнокристаллической структуры сплава ВТ5-1 с исходным размером зерен  $d=300...500 \text{ мкм}$  в микрокристаллическую, до  $d=5,0...25,0 \text{ мкм}$  при горячей деформации 2-х компонентным (кручение + растяжение) нагружением, при температуре  $900^{\circ}\text{C}$ , начальной скорости деформации  $\xi_0=1,0 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  и степени результирующей деформации  $\varepsilon \sim 0,5$ .

Используя реологическую модель, разработанную в главе 3, методом КЭ – моделирования проведен подробный анализ формирования НДС в деформируемых образцах, определены параметры  $K1$  и  $K2$ , а также значения компонент скорости  $\xi$  и степени деформации, обеспечивающие реализацию выбранных схем нагружения (Рисунок 9а). На кривых механического поведения для всех видов нагружения установлено протекание процессов разупрочнения, наиболее сильное на кривых 2 и 3 (Рисунок 9б), а наименьшая на кривых 5, 4 и 1.

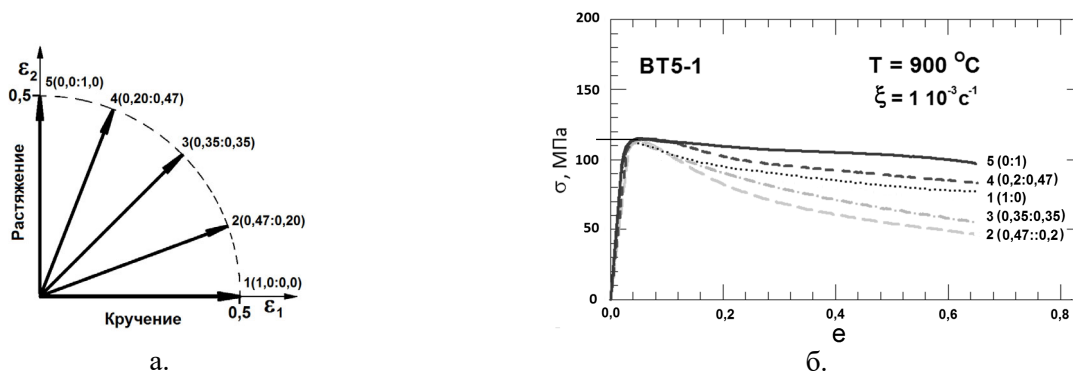


Рисунок 9 - Механические характеристики деформирования.  
а – схема нагружения. б – механическое поведение сплава BT5-1.

Разупрочнение кривых  $\sigma = f(e)$  коррелирует с макро течением материала в образцах (Рисунок 10). Образец после одноосного растяжения деформируется с образованием шейки. По мере добавления компоненты кручения и уменьшения компоненты растяжения локализация деформации, характерная для растяжения (локализация по радиусу, сменяется на локализацию деформации кручением по образующей).

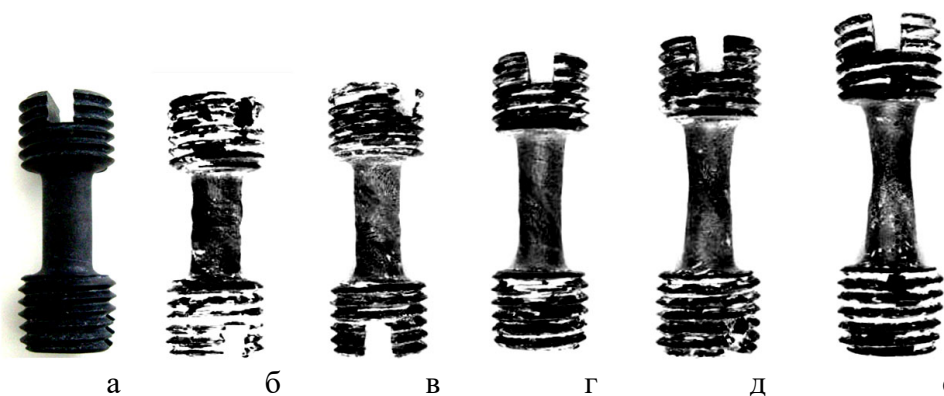


Рисунок 10 – Образцы после горячего деформирования 2-х компонентным (кручение +растяжение) нагружением.

а- исходное состояние; б- вид 1; в- вид 2; г- вид 3; д- вид 4; е- вид 5.

Микроструктурный анализ проводили в двух сечениях: поперечном и продольном. Установлено, что при кручении в центре образца микроструктура практически не изменилась (Рисунок 11,12). Очевидно, что это произошло из-за отсутствия растягивающей и присутствия сдвиговой компонент деформации, при неизменности формы образца до и после деформации.

При растяжении образцов, в центре наблюдаются области рекристаллизованных зерен, которые формируются вблизи границ исходных  $\alpha$ -колоний. Отмечено, что отсутствие выраженной пластинчатой микроструктуры связано с интенсификацией протекания динамической рекристаллизации, обусловленной разворотом  $\alpha$ -колоний при пластическом течении в направлении растяжения и изменением геометрических размеров исходных образцов - уменьшение диаметра и увеличение длины образцов.

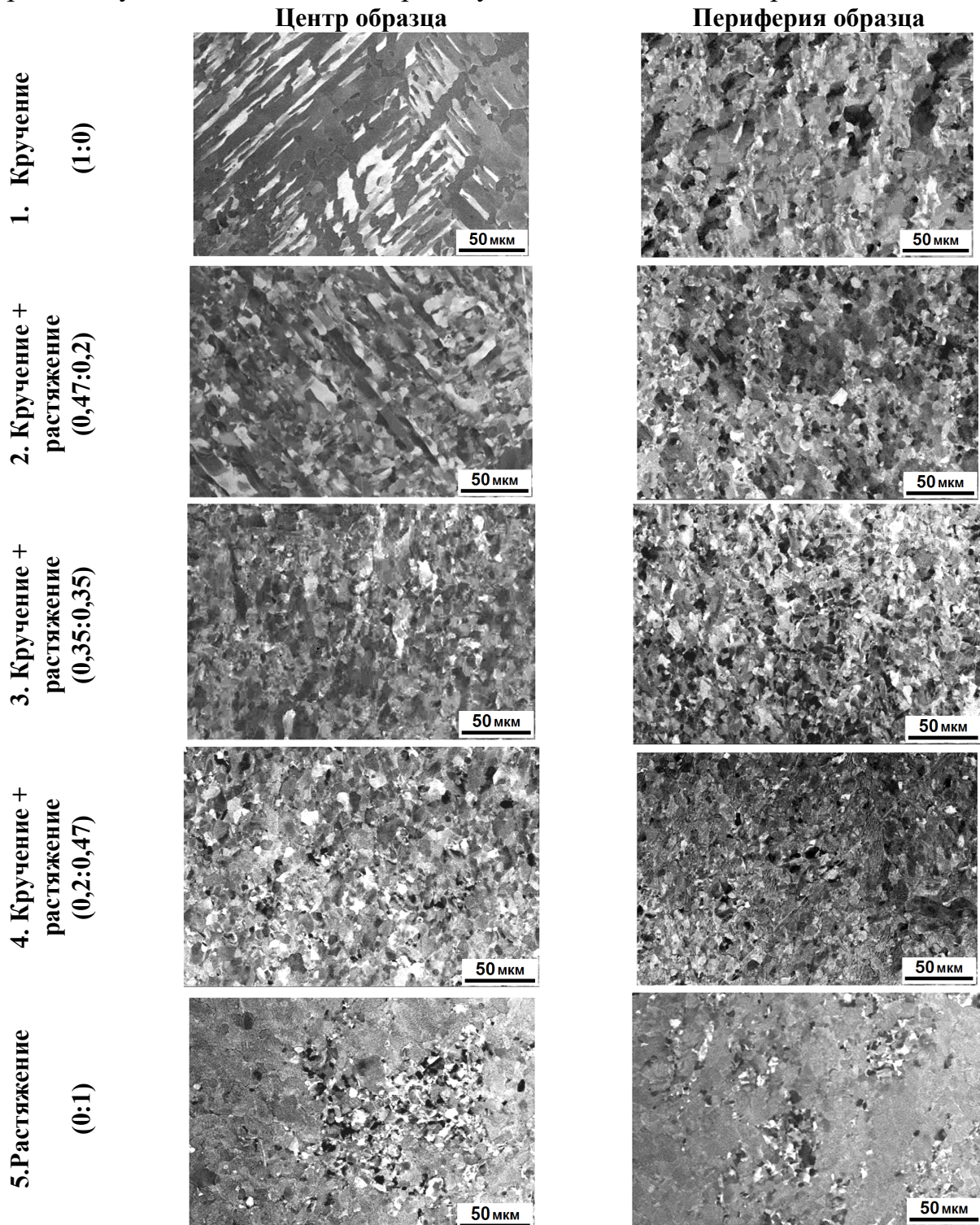


Рисунок 11 – Микроструктура в поперечном сечении образцов после горячей деформации 2-х компонентным нагружением.

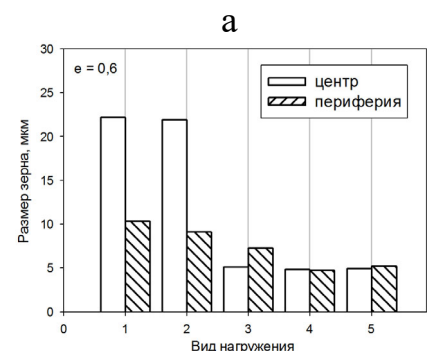
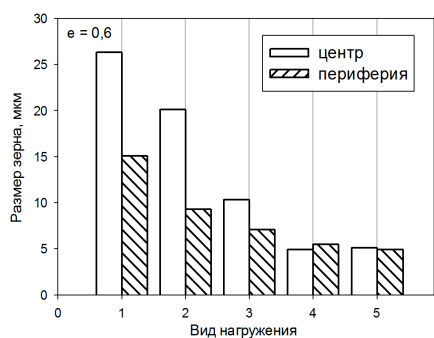


Рисунок 12- Размер зерна в сплаве ВТ5-1 после горячей деформации.

а- поперечное сечение ;  
б- продольное сечение.

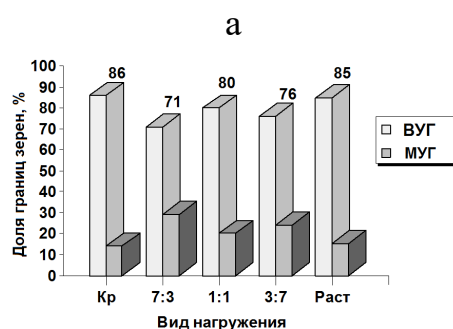
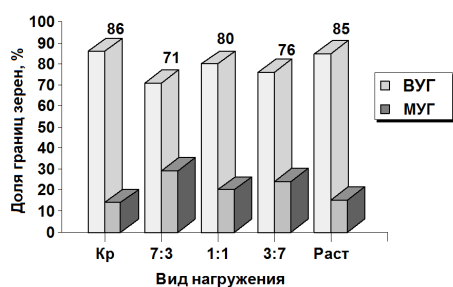


Рисунок 13 – Доля ВУГ и МУГ для различных видов нагружения.

а – периферия образца. б – центр образца

Добавление к кручению компоненты растяжения представляет собой некоторое промежуточное состояние, где наблюдаются как пластинчатые, так и глобулярные зерна.

При этом уменьшение сдвиговой и увеличение растягивающей компонент деформирования приводит к уменьшению количества наблюдаемых пластинчатых зерен. В центре продольного сечения, как и в случае поперечного продольного сечения, сохраняются вытянутые зерна при кручении. С увеличением растягивающей компоненты деформации их количество уменьшается.

Рассматривая периферию поперечного сечения, в случае растяжения вид структуры вдоль радиуса не меняется, в то время, как при кручении интенсивность преобразования крупнозернистой структуры в мелкозернистую возрастает. В центре рабочей зоны образцов появляется рекристаллизованная глобулярная микроструктура.

Оптимальным, с точки зрения формирования микрокристаллической структуры, является 3- и 4-схемы нагружения, что коррелирует с зависимостью  $\sigma=f(\epsilon)$  и макро - пластическим течением материала.

В зависимости от вида горячей нагружения меняется и разориентация зерен друг относительно друга (Рисунок 13а,б). Так для случая растяжения на периферии преобладают кристаллиты с ориентацией [001]. При кручении на периферии преобладают кристаллиты с ориентацией [120]. Можно отчетливо видеть направление деформации для случая растяжения, кручения и двухкомпонентного кручение + растяжение 4(0,20;0,47) нагружения.

Результаты разориентировок границ зерен и средний размер зерен, показал, что вид нагружения не оказывает значительного влияния на размер зерен и колеблется в пределах 6...8 мкм. При этом доля высоко угловых границ при различных видах нагружения была одинаковой, а протяженность малоугловых границ преобладала в случаях двухкомпонентного нагружения (Рисунок 13).

Текстурные исследования показали, что в образце при горячей деформации происходит эволюция текстуры. В исходном состоянии текстура не наблюдается. При этом ярко выраженная базисная



текстура вдоль оси  $Z_0$  наблюдается в случае двухкомпонентного нагружения (схема 4 (0,2:0,47) и в образце после одноосного растяжения вдоль его оси (схема 5 (0:1)).

А для кручения, и двух видов двухкомпонентного нагружения наблюдаемые пики более размыты по сравнению с исходным состоянием.

Анализ прямых полюсных фигур показал, что в случае кручения явно выраженного пика текстурных максимумов не наблюдается, а в случае растяжения формируется текстура. Во всех случаях двух компонентного нагружения в образцах происходит размытие текстуры. Размытие текстурных максимумов усиливается с уменьшением растягивающей и увеличением крутящей компонент нагружения.

Рассматривая максимальные интенсивности полюсных фигур видно, что они значительно ниже интенсивностей исходного состояния и зон минимальной деформации (головка образца). Однако максимальные значения характерны для случая растяжения, а с уменьшением растягивающей компоненты интенсивность падает.

Таким образом, экспериментально установлена возможность формирования в образцах из сплава ВТ5-1 при горячей пластической деформации методом 2-х компонентного (кручение + растяжение) нагружения в изотермических условиях микрокристаллической регламентированной структуры (с точки зрения размеров зерен, текстуры и структуры границ зерен), равномерно распределенной во всем рабочем объеме деформированных образцов.

## **Глава 6. Получение заготовок из титановых сплавов ВТ5-1 и ВТ6 с регламентированной микроструктурой и изготовление из них многослойных ячеистых конструкций методом СПФ/ДС**

В шестой главе рассмотрено практическое использование результатов исследований, выполненных в предыдущих разделах на примере изготовления деталей полых конструкции двигателей современных летательных аппаратов, начиная от получения заготовок с регламентированным типом микроструктуры, заканчивая получением деталей с заданным комплексом эксплуатационных свойств.

В качестве примера рассмотрена технологическая схема изготовления макета рабочего колеса центробежного насоса для перекачки жидких сред при криогенных температурах из  $\alpha$ - титанового сплава ВТ5-1 и схема изготовления макета полых лопаток первой ступени компрессора из  $(\alpha+\beta)$ - титанового сплава ВТ6. Заготовкой служил длинномерный прутки диаметром 100...120 мм с исходной крупнозернистой структурой с размером первичной  $\alpha$ - фазы 300-500 мкм.

Технологическая схема изготовления изделий включала получение определенного типа заготовок в зависимости от типа изделий методом горячей деформации двух компонентным (кручение + растяжение) нагружением, направленной на формирование на первом переходе микрокристаллической структуры в  $\sim 70...80\%$  объема заготовки и последующую формообразующую

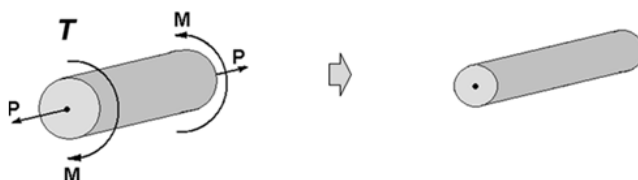
обработку- горячую протяжку, или осадку по- образующей прутка, или вдоль его оси для завершения процесса получения заданного типа микроструктуры.

На последующих операциях получения изделий при выполнении операций диффузионная сварка и сверхпластическая формовка вновь, наряду с выполнением

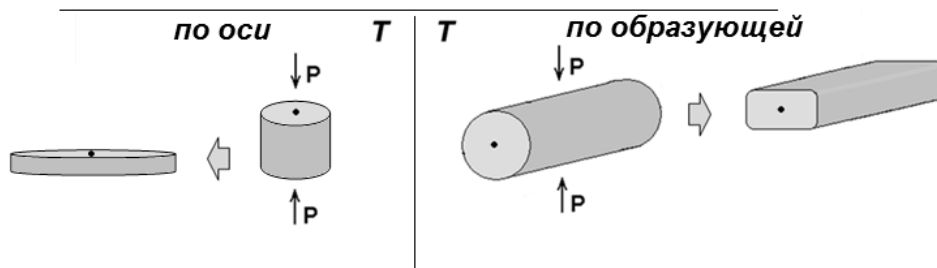
**Исходная заготовка**  
Длинномерный пруток



**Первый передел**  
Горячее деформирование 2-х компонентным нагружением



**Второй передел**  
Горячая осадка



**Заготовка**

для изготовления рабочего колеса



для изготовления полый лопатки

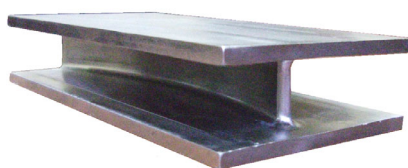


Рисунок 14 – Технологическая схема получения заготовок для изготовления макетов полого колеса и полый широкохордной лопатки .

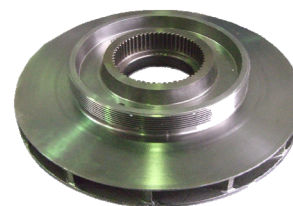
задачи формирования формы изделий, также решалась задача получения регламентированной структуры, а и. получение изделий без макро- и микродефектов структуры в зоне сварного соединения, что обеспечивало заданный конструктором комплекс механических характеристик.

Деформационную обработку на первом переходе заготовок из сплава ВТ5-1 и ВТ6 проводили в однофазных  $\beta$ - и  $\alpha$ - областях, а также в условиях протекания прямых  $\beta \rightarrow (\alpha + \beta)$  и обратных  $\alpha \rightarrow (\alpha + \beta)$  фазовых превращений.

На рисунке 16 представлены образцы изделий, изготовленные из заготовок с



а



б

Рисунок 15 – Макет рабочего колеса центробежного насоса из сплава ВТ5-1.  
а – макет рабочего колеса. б – рабочее колесо.

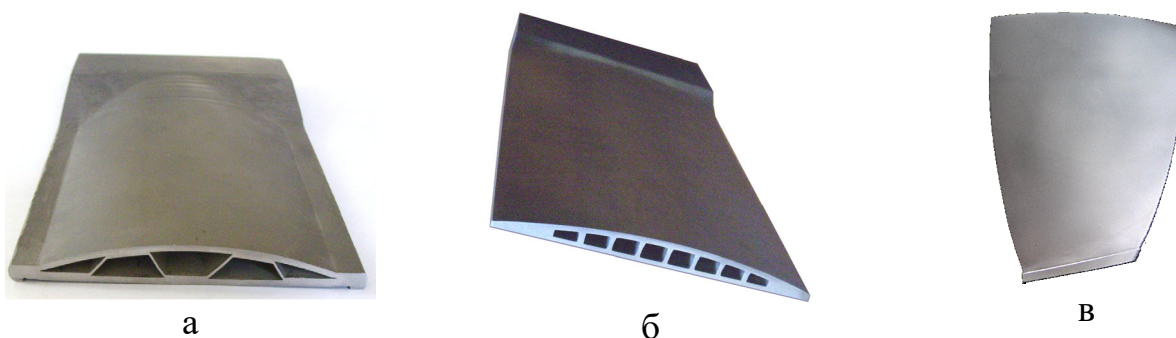


Рисунок 16 – Конструкторско-технологические решения изготовления полых лопаток из сплава ВТ6.

а – конструкция 3-х слойного типа. б – конструкции 2-х слойного типа. в - готовая лопатка полый конструкции.

микроструктурной структурой методом диффузионной сварки и сверхпластической формовки (СПФ/ДС).

Полученные результаты показали, что использованный в работе подход получения регламентируемой микроструктуры, учитывающей формирование микроструктурной структуры при получении заготовок, и далее при изготовлении изделий позволяет не только обеспечить требуемый комплекс механических свойств в изделиях, но и существенно снизить трудоемкость и себестоимость их изготовления.

### Основные выводы по работе.

Результаты проведенных исследований показали наличие связи между видами нагружения, формируемым напряженно-деформированным состоянием и эволюцией микроструктуры при горячей пластической деформации в сплаве ВТ5-1 в однофазной  $\alpha$ -области.

1. Установлена связь между температурно-скоростными условиями горячей деформации, типовыми видами (растяжение, сжатие, кручение) нагружения с формированием мелкозернистой структуры. Наибольшая интенсивность измельчения микроструктуры при одинаковой температуре  $T=900^{\circ}\text{C}$ , степени накопленной деформации  $\epsilon \sim 0,6$  наблюдается при следующих скоростях деформации. При одноосном растяжении со скоростью  $\dot{\xi}_0 \sim 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  средний размер зерен равен 4...5 мкм. При одноосном сжатии с начальной скоростью  $\dot{\xi}_0 \sim 1 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ,  $\epsilon \sim 0,6$  средний размер зерен равен 2..3 мкм. При простом кручении с начальной скоростью деформации  $\dot{\xi}_0 \sim 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  средний размер зерен на боковой поверхности равен 5...6 мкм.

2. Разработана реологическая модель механического поведения титанового сплав ВТ5-1 на основе результатов горячего деформирования образцов в однофазной  $\alpha$  – области одноосным растяжением, учитывающая микроструктурные изменения для определения параметров НДС при одно- и 2х-компонентном нагружении методом конечно-элементного моделирования.

3. Показано влияние напряженного состояния, формируемого в материале при горячей пластической деформации образцов с одинаковым диаметром и различной

высотой одноосным сжатием на механическое поведение, развитие динамической рекристаллизации и формирование микроструктуры в сплаве ВТ5-1. Уменьшение значения относительного гидростатического давления  $K_2$  с  $-1,7$  до  $-9,0$  при горячей ( $T=800^\circ\text{C}$ ) деформации со скоростью  $10^{-3}\text{c}^{-1}$  приводит к уменьшению темпов развития динамической рекристаллизации за счет уменьшения количества зародышей и скорости их роста, приводя к образованию  $\alpha$ -зерен размером  $1,0\dots 2,0$  мкм и одновременному снижению объема рекристаллизованной структуры до  $V_{\text{рек}}=30\%$ . Напротив, повышение температуры деформации до  $900^\circ\text{C}$  при скорости деформации  $10^{-3}\text{c}^{-1}$  увеличивает чувствительность развития рекристаллизационных процессов к значениям  $K_2$ , приводя к формированию структуры с  $d_{\text{ср}}=15$  мкм при  $K_2=-1,7$  ( $H_0=15$  мм) и  $d_{\text{ср}}=2,0$  мкм при  $K_2=-9$  ( $H_0=4,0$  мм).

4. Установлено влияние деформированного состояния (траектории вектора деформации) при 2х-компонентном (кручение + растяжение) нагружении. При соотношении кручения к растяжению  $0,47:0,2$  начальной скорости деформации  $\xi_0=1,0 \cdot 10^{-3}\text{c}^{-1}$  и значении модуля вектора деформации  $e=0,5$  повышает эффективность преобразования крупнокристаллической структуры в микрокристаллическую, формируя во всем рабочем объеме микроструктуру со средним размером зерна  $5,0\dots 7,0$  мкм за счет распространения деформации вглубь исходных  $\alpha$ - зерен, образования устойчивых дислокационных скоплений, что интенсифицирует рекристаллизационные процессы и увеличивает объем превращенной микроструктуры в рабочей зоне образцов до значения  $V_{\text{рек}}=70\%$ .

5. Дополнительная термическая и горячая деформационная обработка при выполнении операций СПФ и ДС при изготовлении полых конструкций компенсируют увеличение размера зерен при диффузионной сварке и сверхпластической формовки за счет развития динамического возврата, рекристаллизации и фазовых превращений для сплава ВТ5-1 и ВТ6, обеспечивая получение в готовых изделиях высоких эксплуатационных свойств. Прочность основного материала макетов моноколеса из сплава ВТ5-1 со средним размером зерен  $d_{\text{ср}}=15\dots 20$  мкм:  $\sigma_{\text{в}}=963$  МПа;  $\sigma_{02}=943$  МПа;  $\delta=14\%$ ;  $\psi=40\%$ . Прочность основного материала полых лопаток из сплава ВТ6 со средним размером зерен  $6\dots 10$  мкм:  $\sigma_{\text{в}}=1010$  МПа,  $\sigma_{02}=947$  МПа;  $\delta=15,6\%$ ;  $\psi=35\%$ .

Полученные результаты были использованы при создании опытного технологического процесса получения заготовок для производства моноколеса компрессора полноразмерного фрагмента насоса высокого давления из титанового сплава ВТ5-1 и имитаторов полых титановых лопаток из титанового сплава ВТ6 рабочего колеса первой ступени компрессора современного газотурбинного двигателя.

#### **Основные публикации по теме работы**

1. Бердин Н.В. Моделирование одноосного сжатия цилиндрических образцов с различной исходной высотой / В.К.Бердин, Н.В.Бердин // «Кузнечно-штамповочное производство. ОМД». - 2011. - №3. - С.33 - 39.

2. Бердин Н.В. Моделирование сверхпластической формовки многослойных ячеистых конструкций в программном комплексе ABAQUS / В.К. Бердин, Н.В. Бердин, В.В. Лукьянов, А.В. Колесников // «Кузнечно-штамповочное производство. ОМД». – 2014. – №1. – С. 32 - 38.
3. Бердин Н.В. Особенности формирования НДС при сверхпластической формовке многослойной ячеистой конструкции / А.М. Смыслов, В.К. Бердин, Н.В. Бердин, В.В. Лукьянов // «Вестник УГАТУ». – 2014. – №4(65). – Т.4. – С. 53 - 60.
4. Бердин Н.В. Упруго-вязкопластическое поведение материала в задачах численного моделирования одноосного сжатия, растяжения и чистого сдвига / В.К. Бердин, Н.В. Бердин, В.В. Лукьянов // «Кузнечно-штамповочное производство. ОМД». – 2015. – №3. – С. 33 - 42.
5. Бердин Н.В. Модель упруго - вязкопластического поведения материала «Perice» в задачах конечно-элементного моделирования одноосного растяжения, сжатия и чистого сдвига / А.М. Смыслов, В.К. Бердин, Н.В. Бердин, В.В. Лукьянов // «Титан». – 2015. – №2(48). – С. 16 - 24.
6. Бердин Н.В. Анализ напряженного состояния в зоне перехода «замок» – «перо» полых широкохордных лопаток / А.М. Смыслов, В.К. Бердин, Н.В. Бердин, В.В. Лукьянов // «Известия ВУЗов. Авиационная техника». – 2016. – №1. – С. 123 - 125.
7. Berdin N.V. Analysis of stress state in a root-airfoil transition zone of hollow wide chord fan blades / A.M. Smyslov, V.K. Berdin, N.V. Berdin, V.V. Luk'yanov // «Russian aeronautics». – 2016 – №1. С. 134 - 137.
8. Бердин Н.В. Формирование микрокристаллической структуры деформацией сжатием сплава ВТ5-1 при 800 и 900<sup>0</sup>С / Н.В. Бердин, С.Я. Бецофен А.М. Смыслов, И.А. Грушин// Деформация и разрушение материалов. – 2019. – №11. – С. 20-31.
9. Бердин Н.В. Смыслов А.М. Эволюция структуры в сплаве ВТ5 при одноосном сжатии. «Будущее авиации за молодой Россией»: Материалы Международного молодежного форума. г. Рыбинск: РГАТА, 2009. - С.18-21.
10. Бердин В.К., Смыслов А.М, Бердин Н.В. Динамическая рекристаллизация в титановом сплаве ВТ5-1 при горячей деформации одноосным сжатием. «X Международная уральская школа-семинар металловедов - молодых ученых». Материалы семинара, г. Екатеринбург, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. - С.16-18.
11. Бердин В.К., Калинина И.М., Бердин Н.В. Влияние соотношения осевой и сдвиговой компонент горячей деформации на механическое поведение и эволюцию пластинчатой микроструктуры в сплаве ВТ5-1. «XI Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых – металловедов»: Сборник научных статей. г. Екатеринбург: УрФУ, 2010. – С. 196–198.
12. Бердин Н.В., Бердин В.К., Смыслов А.М. Изучение формирования тонкой структуры в промышленном, однофазном  $\alpha$ - титановом сплаве ВТ5-1 при двухкомпонентном нагружении. «Материаловедение и металлофизика легких сплавов». Международная научная школа для молодежи: сборник научных

статей. г. Екатеринбург: УрФУ, 2010. – С. 48 - 50.

13. Бердин Н.В., Смыслов А.М., Бердин В.К. Изучение формирования структуры в промышленном, однофазном,  $\alpha$ - титановом сплаве ВТ5-1 при одно- и двухкомпонентном нагружении. «XXXIX ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ». Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. М.: МАТИ, Т.1, 2013. – С.11-13.

14. Формирование микрокристаллической структуры в сплаве ВТ5-1 при горячей деформации сжатием в однофазной  $\alpha$ - области. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и покрытий: Техническая программа и тезисы школы молодых ученых. – Белгород: Н ИУ БелГУ, 2019. – С.28.

15. Патент RU 2490613, Образец для испытания диффузионного соединения листовых заготовок на сдвиг, способ его изготовления и испытания/ Бердин В.К., Бердин Н.В., 20.08.2013, Бюл. № 23.

16. Патент 2525010, Заготовка для изготовления полой лопатки турбомашин способом сверхпластической формовки / Бердин В.К., Бердин Н.В., 10.08.2014, Бюл. №22.

17. Патент RU 2570714, Пакет для изготовления полого многослойного ячеистого изделия способом диффузионной сварки и сверхпластической формовки / Бердин В.К., Фомичев А.В., Заикин П.Б., Бердин Н.В., Лукьянов В.В., Никонов В.В. 10.12.2015, Бюл. № 34.

18. Патент RU 117516, Лопатка регулируемого входного аппарата / Бердин В.К., Бердин Н.В., Лукьянов В.В. 28.02.2018, Бюл. № 7.

19. Патент RU 2687855, Способ изготовления моноколеса газотурбинного двигателя / Бердин В.К., Бердин Н.В., Лукьянов В.В. Манапов И.У. 16.05.2019, Бюл. №14.

20. Патент RU №2711697, Способ изготовления упрочняющей накладке передней кромки лопатки вентилятора / Астанин В.В., Бердин Н.В., Лукьянов В.В., Старовойтов С.В., Уткин А.Ю., Каримбаев Т.Д., Чернышов А.А. 21.01.2020, Бюл. №3.