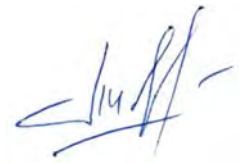


На правах рукописи



**ЛИДЖИЕВ АРСЛАНГ АЛЕКСЕЕВИЧ**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ  
СТРУКТУРОЙ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ  
СВОЙСТВАМИ ВЫСОКОМОДУЛЬНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА  
МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Научная специальность

2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»  
(технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва, 2024 г.

Работа выполнена на кафедре 1102 «Материаловедение и технология обработки материалов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор  
**Мамонов Андрей Михайлович**

Официальные оппоненты: – **Шаталов Валерий Константинович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский  
государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана (национальный  
исследовательский университет)»,  
заведующий кафедрой

– **Давыденко Людмила Васильевна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГАОУ ВО «Московский политехнический  
университет», доцент

Ведущая организация: – ФГАОУ ВО «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина»

Защита диссертации состоится «26» декабря 2024 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 212.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 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 skvortsovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте <https://mai.ru/events/defence/?bypost=Y>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета



Скворцова С.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Титановые сплавы с высоким содержанием алюминия, превышающим его предельную растворимость в  $\alpha$ -титане, традиционно рассматривались как высокожаропрочные материалы. Однако в последнее время они привлекли внимание и как перспективные материалы для изготовления крупногабаритных хирургических инструментов для ортопедических операций по эндопротезированию крупных суставов человека (рашпилей, разверток, долот и др.). Инструменты должны иметь высокую прочность, износостойкость, жесткость конструкции, коррозионную стойкость. В настоящее время их изготавливают преимущественно из высокопрочных нержавеющей сталей типа 316L. Почти в 2 раза меньший удельный вес титановых сплавов по сравнению со сталью определяет их преимущество в эргономичности, учитывая габариты и массу инструмента и длительность непрерывной работы хирурга. С точки зрения обеспечения жесткости конструкции инструментов, особенно рашпиля, необходимой для точной разработки плотных костных структур, предпочтительно использовать высокомодульные титановые сплавы с содержанием алюминия, превышающим его предельную растворимость в  $\alpha$ -фазе ( $\alpha+\alpha_2$  или  $\alpha+\beta+\alpha_2$ -сплавы). Сплавы данного класса имеют на 20–40 % больший модуль упругости, чем промышленные сплавы титана, что обеспечивает и большую жесткость конструкции. Проблемы недостаточной твердости и износостойкости титановых сплавов успешно решаются применением вакуумного ионно-плазменного азотирования.

Технология изготовления рашпилей из титановых сплавов предполагает либо большой объем обработки резанием, либо изотермическую штамповку заготовок. В последнем случае экономически целесообразно проводить штамповку с использованием того же штампового инструмента и тех же температурных (800-850°C) и скоростных режимов, что и при массовом производстве заготовок имплантируемых ножек эндопротезов тазобедренного сустава из титанового сплава ВТ6, т.к. геометрия рабочей части рашпиля и

погружаемой в костномозговой канал части ножек практически совпадает. Однако технологическая пластичность высокомодульных титановых сплавов с содержанием алюминия 8–10 масс. % низка и не позволяет штамповать заготовки при этих температурах.

Известно, что технологическая пластичность этих сплавов может быть повышена применением водородного пластифицирования. Однако проблема объемной изотермической штамповки заготовок сложной формы из этих сплавов практически не изучалась.

Обработка резанием титановых сплавов гораздо более трудоемка по сравнению со сталями. Это выражается более высокими температурами в зоне резания и усилиями резания, повышенным износом инструмента и, как следствие, необходимостью понижения скорости и глубины резания, подачи и, соответственно, производительности операций. Перспективным способом улучшения обрабатываемости титановых сплавов резанием является обратимое легирование водородом, лежащее в основе механоводородной и термоводородной обработок. Однако влияние механоводородной и термоводородной обработок на обрабатываемость резанием (силы резания, температуру в зоне резания, износ инструмента) сплавов с повышенным содержанием алюминия не изучено.

Решение указанных проблем представляет как научный, так и практический интерес.

В связи с этим актуальной является разработка комплексной технологии изготовления и обработки ортопедических режущих инструментов из высокомодульных титановых сплавов, основанной на сочетании водородных технологий и вакуумного ионно-плазменного азотирования.

### **Цель и задачи**

**Цель** диссертационной работы состояла в установлении влияния водородных технологий на фазовый состав, структуру, технологические и эксплуатационные свойства сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo и разработке на этой основе технологии получения и обработки заготовок крупногабаритных

хирургических инструментов для ортопедии и травматологии.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Установить влияние термобарических и концентрационных параметров наводороживающего отжига при термоводородной обработке на фазовый состав и структуру сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo.

2. Установить влияние режимов вакуумного отжига при термоводородной обработке на фазовый состав и структуру сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo.

3. Методом математического компьютерного моделирования определить температурные, силовые и деформационные параметры изотермической штамповки заготовок рашпелей из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo, легированного водородом. Оценить возможность штамповки заготовок по термосиловым режимам, применяемым для штамповки ножек эндопротеза тазобедренного сустава из сплава ВТ6.

4. Установить влияние легирования водородом и термоводородной обработки на обрабатываемость резанием сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo в процессе фрезерования.

5. Установить влияние термоводородной и вакуумной ионно-плазменной обработок на ударную вязкость образцов из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo.

### **Научная новизна**

1. Установлены закономерности формирования структуры и фазового состава сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo в процессе наводороживающего отжига при различных давлениях водорода. Показано, что повышение исходного давления водорода со 100 до 130 кПа при температуре 850°C приводит к формированию неоднородной структуры с образованием крупнопластинчатой  $\alpha$ -фазы в поверхностном слое. Этот эффект обусловлен резким повышением интенсивности экзотермической реакции сорбции водорода на поверхности образцов, приводящей к разогреву поверхностного слоя до температур  $\beta$ -области.

2. Установлены закономерности формирования различных структур в наводороженном титановом сплаве Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo в процессе вакуумного отжига. Показано, что при температуре вакуумного отжига 950°C в сплаве с исходным содержанием водорода 0,4 масс. % формируется градиентная ( $\alpha+\beta$ )-структура с глобулярной  $\alpha$ -фазой размером 6–9 мкм в поверхностном слое и крупнопластинчатой  $\alpha$ -фазой в сердцевине цилиндрических образцов вследствие эндотермического характера процессов десорбции на поверхности образцов. При более низкотемпературных режимах вакуумного отжига формируется однородная по сечению образцов структура с глобулярной  $\alpha$ -фазой с размером частиц менее 2 мкм.

3. Методом математического компьютерного моделирования определены температурные и деформационно-силовые характеристики процесса изотермической штамповки заготовок рашпилей из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo с 0,6 масс. % водорода и заготовок ножек эндопротеза из сплава ВТ6. Показано, что эти характеристики практически совпадают для обоих сплавов.

4. Установлено влияние легирования водородом и последующего вакуумного отжига на силу резания и температуру в зоне резания при фрезеровании образцов сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo. Показано, что максимальное снижение силы резания при содержании водорода 0,6 масс. % связано с увеличением содержания алюминия в  $\alpha$ -фазе, выделением вторичной  $\alpha$ -фазы, упорядоченной  $\alpha_2$ -фазы и гидрида. Установлено, что увеличение концентрации водорода в сплаве до 0,6 масс. % приводит к почти линейному росту температуры в зоне резания, вследствие уменьшения фононной и электронной составляющих теплопроводности сплава с такой структурой.

### **Теоретическая и практическая значимость**

1. Методом компьютерного моделирования установлена возможность изотермической штамповки заготовок рашпилей из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo, легированного 0,6 масс. % водорода, при тех же температурных и силовых параметрах процесса и с использованием того же оборудования и оснастки, что при штамповке ножек эндопротеза тазобедренного сустава из сплава ВТ6.

2. Предложена схема комплексной технологии получения и обработки заготовок рашпелей из высокомодульного сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo для ортопедических операций эндопротезирования, включающая наводороживание цилиндрических заготовок до концентрации 0,6 масс. %, изотермическую штамповку по режимам, принятым для штамповки ножек эндопротезов, обработку резанием в наводороженном состоянии, вакуумный отжиг, чистовую механическую обработку и вакуумное ионно-плазменное азотирование. Показано, что такая технология формирует в материале удовлетворительный уровень механических и эксплуатационных свойств изделия.

3. Технологические рекомендации использованы АО «Имплант МТ» при разработке конструкций и технологий производства ортопедических инструментов из титановых сплавов, что подтверждено Актом использования, приведенном в Приложении к диссертации.

### **Методология и методы исследования**

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных учёных, государственные стандарты РФ.

Диссертационная работа выполнена с использованием современных методов исследования: металлографический, рентгеноструктурный и фрактографический анализы, компьютерное моделирование, испытания на обрабатываемость резанием, испытания на ударную вязкость.

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

1. Закономерности влияния термобарических и концентрационных параметров наводороживающего отжига на фазовый состав и структуру сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo.

2. Закономерности влияния вакуумного отжига на фазовый состав и структуру сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo при термоводородной обработке.

3. Результаты расчетов методом конечных элементов и сравнительный анализ температурных, силовых и деформационных параметров изотермической штамповки заготовок рашпелей из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo, легированного

водородом до 0,6 масс. %, и заготовок ножек эндопротеза из сплава ВТ6.

4. Влияние легирования водородом и последующего вакуумного отжига на обрабатываемость резанием сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo в процессе фрезерования.

5. Влияние термоводородной и вакуумной ионно-плазменной обработок на ударную вязкость сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo.

### **Степень достоверности результатов**

Все результаты получены на поверенном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Стандартные испытания и исследования проводились в соответствии с требованиями научно-технической документации, действующей на территории Российской Федерации (ГОСТ и ISO).

### **Апробация результатов**

Материалы диссертационной работы доложены на 10 научно-технических конференциях, в том числе: XIX, XX Международных научно-технических конференциях «Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых», г. Екатеринбург, 2018, 2020; XLV, XLVI Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения», г. Москва, 2019, 2020; Научно-техническом семинаре «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов», г. Москва, 2019; 18-й, 20-й Международных конференциях «Авиация и космонавтика», г. Москва, 2019, 2021; VII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Колачевские чтения», г. Ступино, 2022; XXI Международной конференции «Ti-2024 в СНГ», г. Суздаль, 2024.

**Публикации.** Результаты проведенных исследований опубликованы в 20 научных работах, из них 10 в изданиях, входящих в перечень ВАК и 3 в журналах, включенных в международные системы цитирования.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка цитируемой литературы и одного приложения. Объем диссертации составляет 137 страниц, включая 55 рисунков, 16 таблиц и список литературы из 101 наименования.



## **Основное содержание работы**

### **Глава I Состояние вопроса и постановка задач исследований**

В главе рассмотрены целесообразность и проблемы применения высококомодульных титановых сплавов в качестве материала крупногабаритных хирургических инструментов для ортопедических операций по эндопротезированию. Отмечено, что высококомодульные титановые сплавы имеют недостаточные показатели твердости и износостойкости и низкую технологичность при обработке давлением и резанием.

Показана эффективность использования водородных технологий для снижения трудоемкости термомеханической и механической обработок и управления структурой и свойствами титановых сплавов разных классов. Показана эффективность применения технологии вакуумного ионно-плазменного азотирования для повышения твердости и износостойкости изделий из титановых сплавов.

Установлено, что возможность использования подобных технологий применительно к высококомодульным титановым сплавам практически не изучена. Сформулированы цель и задачи работы.

### **Глава II Объекты и методы исследования**

В качестве материала для исследования использовали опытный  $(\alpha+\alpha_2+\beta)$ -сплав Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo (масс. %). Образцы для исследований вырезали из горячекатаного прутка  $\varnothing 22$  мм.

Легирование образцов водородом проводили термодиффузионным способом в установке Сиверта. Вакуумный отжиг проводили в печи модели «ВЕГА-3М». Вакуумное ионно-плазменное азотирование образцов проводили в модифицированной установке «Булат-6Т» в смеси газов азота и аргона.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе AXIO Observer.A1m (ZEISS) при увеличениях до 1000 крат с обработкой результатов в программном комплексе NEXSYS ImageExpert Pro 3.

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре модели ДРОН-4 в фильтрованном медном излучении ( $\text{CuK}_\alpha$ ) при ускоряющем напряжении 35 кВ и анодном токе 25 мА.

Компьютерное моделирование процесса изотермической штамповки проводили методом конечных элементов с использованием программного обеспечения QForm v 10.2.3.

Силу резания при фрезеровании образцов измеряли специализированным динамометром УДМ-600. Для измерения температуры в зоне резания применяли метод естественной термопары. Измерение термо-э.д.с. проводили мультиметром MAS830B. Для перевода значений термо-э.д.с. в температуру проводили тарирование естественной термопары на простейшем стенде, включающем в себя печь с терморегулятором и естественную термопару. Термопара образована заготовкой из исследуемого сплава и фрезой.

Ударную вязкость определяли согласно ГОСТ 9454-78 с использованием маятникового копра ПСВ-30. Фрактограммы изломов образцов после испытаний на ударную вязкость получали с помощью сканирующего электронного микроскопа HITACHI SU3500.

### **Глава III Влияние термоводородной обработки на фазовый состав и структуру опытного титанового сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo**

В главе приведены результаты исследования влияния термобарических и концентрационных параметров наводороживающего отжига и режимов вакуумного отжига на фазовый состав и структуру исследуемого сплава при термоводородной обработке. Установлено, что легирование образцов водородом до 0,2 и 0,4 масс. % приводит к увеличению объемной доли  $\beta$ -фазы в сплаве (табл. 1). В процессе охлаждения образцов с 0,4 масс. % водорода в сплаве протекает атермическое  $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение с выделением небольшого количества мелкодисперсной вторичной  $\alpha^{\text{II}}$ -фазы. Охлаждение образцов с 0,6 масс. % водорода приводит к полному распаду  $\beta$ -фазы по эвтектоидной реакции  $\beta \rightarrow \alpha_3 + \text{TiH}_x$ .

Таблица 1 – Режимы наводороживающего отжига\* и фазовый состав образцов\*\* сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo в исходном состоянии и после легирования водородом

№ режима, состояние образца	Концентрация вводимого водорода, масс. %	Давление водорода перед насыщением образцов, кПа	Фазовый состав	Объемная доля $\beta$ -фазы, %
Исходное	–	–	$\alpha+\beta+\alpha_2$	12
1	0,2	100	$\alpha+\beta+\alpha_2$	20
2	0,4	100	$\alpha+\beta+\alpha_2+\alpha^{\text{II}}$	25
3	0,6	100	$\alpha+\alpha^{\text{II}}+\alpha_2+(\alpha_3+\delta)^{***}$	0
4	0,2	130	$\alpha+\beta+\alpha_2$	22
5	0,4	130	$\alpha+\beta+\alpha_2+\alpha^{\text{II}}$	28
6	0,6	130	$\alpha+\alpha^{\text{II}}+\alpha_2+(\alpha_3+\delta)$	0

\* Температура наводороживающего отжига – 850 °С, время выдержки до и после насыщения водородом – по 1 часу, охлаждение с печью для всех режимов.

\*\* Размер образцов:  $\varnothing 18 \times 60$  мм

\*\*\*  $\delta$  – гидридная фаза состава  $\text{TiN}_x$ , где  $1 \leq x \leq 2$ ;  $\alpha^{\text{II}}$  – вторичная  $\alpha$ -фаза

Показано, что в результате наводороживающего отжига при исходном давлении водорода 100 кПа (режимы 1–3) в сплаве происходит рекристаллизация исходной пластинчатой  $\alpha$ -фазы с образованием полиэдрических  $\alpha$ -зерен (рис. 1). При этом инициированное водородом  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращение приводит к уменьшению размера первичной  $\alpha$ -фазы в сплаве.

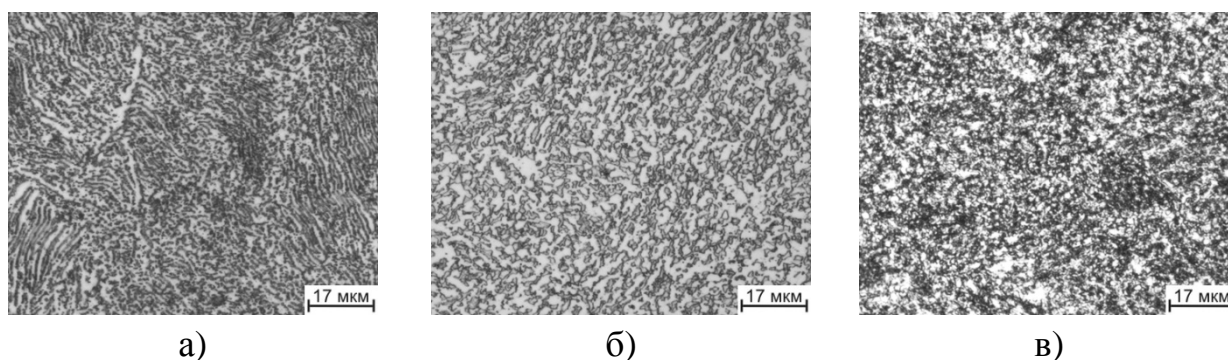


Рисунок 1 – Микроструктура образцов сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo в исходном состоянии (а) и после наводороживающего отжига по режимам 1 (б) и 3 (в)

Более интенсивная экзотермическая реакция поглощения сплавом водорода в процессе наводороживающего отжига при исходном давлении

130 кПа (режимы 4–6) приводит к дополнительному разогреву поверхности образцов до температур  $\beta$ -области и, как следствие, к формированию неоднородной по сечению структуры с образованием крупнопластинчатой  $\alpha$ -фазы в поверхностном слое (рис. 2). Глубина слоя с долей крупнопластинчатой  $\alpha$ -фазы растет с увеличением концентрации водорода в сплаве от 1 мм при 0,2 масс. % до 3 мм при 0,6 масс. %.

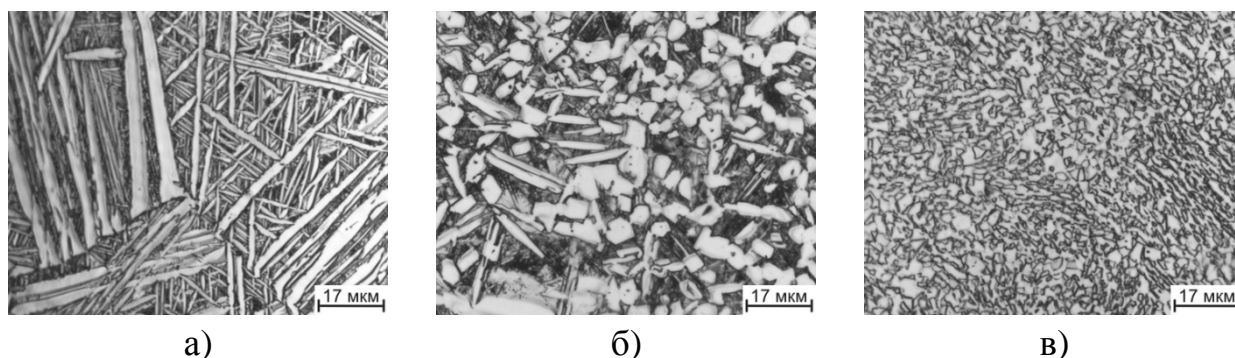


Рисунок 2 – Микроструктура образцов сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo после наводороживающего отжига по режиму 4: в поверхностном слое (а), переходной зоне (б) и сердцевине (в)

Структура после вакуумного отжига по режиму 1 (табл. 2) – однородная, с преимущественно глобулярной  $\alpha$ -фазой размером 1–3 мкм (рис. 3а). Сверхструктурных рефлексов  $\alpha_2$ -фазы на дифрактограмме не выявлено.

Таблица 2 – Режимы вакуумного отжига (ВО) образцов сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo с различной концентрацией водорода и фазовый состав после ВО

№ режима	Концентрация водорода, масс. %		Режим ВО	Фазовый состав после ВО	Объемная доля $\beta$ -фазы после ВО, %
	перед ВО	после ВО			
1	0,2	0,008	900°C, 1 час + 800°C, 1 час	$\alpha+\beta$	13
2	0,4	$\frac{0,008^*}{0,008}$	950°C, 1,5 часа	$\frac{\alpha + \beta}{\alpha + \beta}$	$\frac{12}{11}$
3	0,6	0,01	650°C, 5 часов	$\alpha+\alpha^{\text{II}}+\beta+\alpha_2$	13

\* В числителе – в сердцевине образцов, в знаменателе – в поверхностном слое

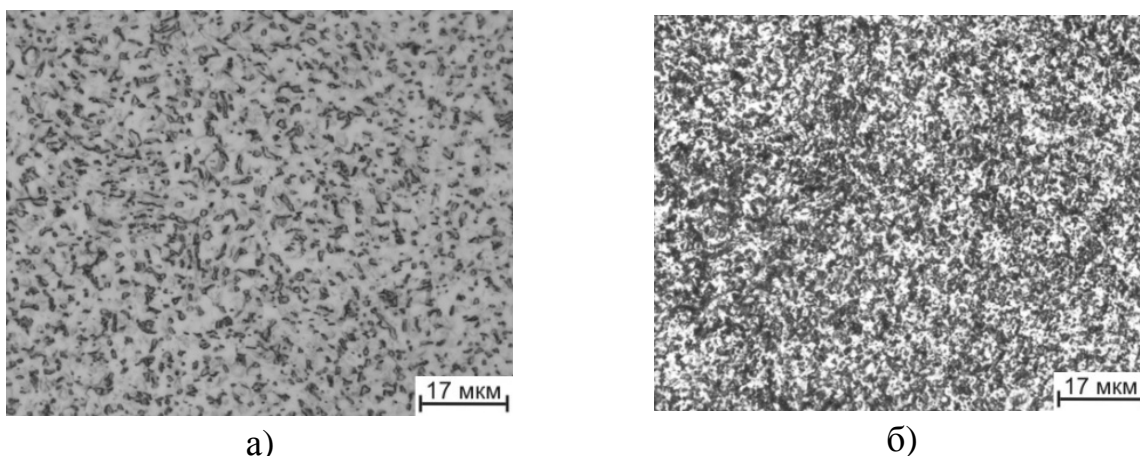


Рисунок 3 – Микроструктура образцов сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo после вакуумного отжига по режимам 1 (а) и 3 (б)

Аналогичное структурное состояние было сформировано после вакуумного отжига по режиму 3 (рис. 3б). Размеры структурных составляющих  $\alpha$ -фазы здесь заметно меньше, чем после режима 1, что обусловлено низкой температурой вакуумного отжига. Фазовый состав образцов отличается наличием вторичной  $\alpha^{\text{II}}$ -фазы, образовавшейся при распаде водородосодержащей  $\beta$ -фазы и сохранившейся в структуре ввиду низкой температуры отжига. Наличие этой фазы зафиксировано по существенной асимметрии всех рефлексов  $\alpha$ -фазы на дифрактограммах. Также был выявлен сверхструктурный рефлекс  $\alpha_2$ -фазы.

В результате вакуумного отжига по режиму 2 в сплаве формируется неоднородная по сечению цилиндрических образцов структура (рис. 4).

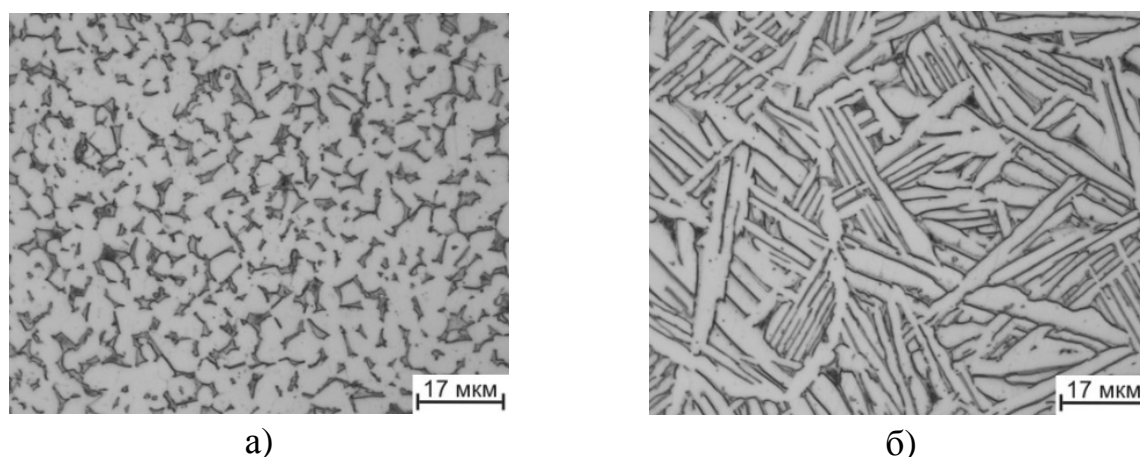


Рисунок 4 – Микроструктура образцов сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo после вакуумного отжига по режиму 2 в поверхностном слое (а) и в сердцевине (б)

Интенсивная эндотермическая реакция десорбции водорода приводит к более низкой температуре поверхности образцов, чем заданная и фиксируемая в печи и в сердцевине образцов. Вследствие этого распад  $\beta$ -фазы при удалении водорода и  $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение в поверхностном слое протекает в  $\alpha + \beta$ -области при сохранении (или небольшом росте) первичной  $\alpha$ -фазы, присутствующей в исходных водородосодержащих образцах. В то же время при нагреве и выдержке при температуре  $950^\circ\text{C}$  сплав с водородом в средней части образцов переходит в однофазное  $\beta$ -состояние, а при последующем охлаждении с печью формируется  $(\alpha + \beta)$ -структура с пластинчатой  $\alpha$ -фазой.

#### **Глава IV Влияние водородных технологий на технологические свойства сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo**

В главе приведены результаты компьютерного моделирования изотермической штамповки заготовок рашпилей из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo, легированного 0,6 масс. % водорода, при тех же температурных и силовых параметрах процесса и с использованием того же оборудования и оснастки, что при штамповке ножек эндопротеза тазобедренного сустава из сплава ВТ6. Модель процесса штамповки включала заготовку и две половины штампов. Моделировался процесс деформации на гидравлическом прессе усилием 10 МН со скоростью рабочего хода 10 мм/с. Для сравнения результатов аналогичные расчеты были проведены для заготовок сплава ВТ6. Температура нагрева заготовок составляла  $850^\circ\text{C}$ , что соответствует  $(\alpha + \beta)$ -области для обоих сплавов и обеспечивает их наиболее высокую технологическую пластичность. В качестве материала штампа использовали сплав ЖС6У.

В качестве исходных заготовок после предварительного анализа были выбраны изогнутые на угол  $45^\circ$  прутки диаметром 22 мм и длиной 162 мм (массой около 270 г). Это позволило точно центрировать заготовку в штампе и обеспечило удовлетворительные значения коэффициента использования металла 0,54. Число конечных элементов в модели составило около 600 тысяч (350 тысяч для заготовки и 250 тысяч для двух половин штампа).

Установлено, что максимальные усилия штамповки ножки эндопротеза из

сплава ВТ6 и заготовки рашпиля из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo-0,6H составляют 7,5 и 7,7 МН, соответственно (рис. 5). Следовательно, оба технологических процесса осуществимы на гидравлическом прессе усилием 10 МН. При этом обеспечивается выполнение рекомендаций и требований по суммарной накопленной деформации и температурному интервалу при обеспечении условий штамповки, близких к изотермическим. Накопленные относительные пластические деформации в основной доле объема поковки (90 %) из сплава ВТ6 составляют от 0,4 до 2,3. Такие же значения (от 0,3 до 2,2) характерны для штамповки заготовок из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo-0,6H. Основная доля объема поковки (90 %) из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo-0,6H имеет температуру от 790 до 890°C (рис. 6), причем наиболее высокие температуры (близкие к температуре конца  $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения) наблюдаются в зонах обля. Таким образом в поковках после удаления обля будет сформирована глобулярная ( $\alpha + \beta$ )-структура.

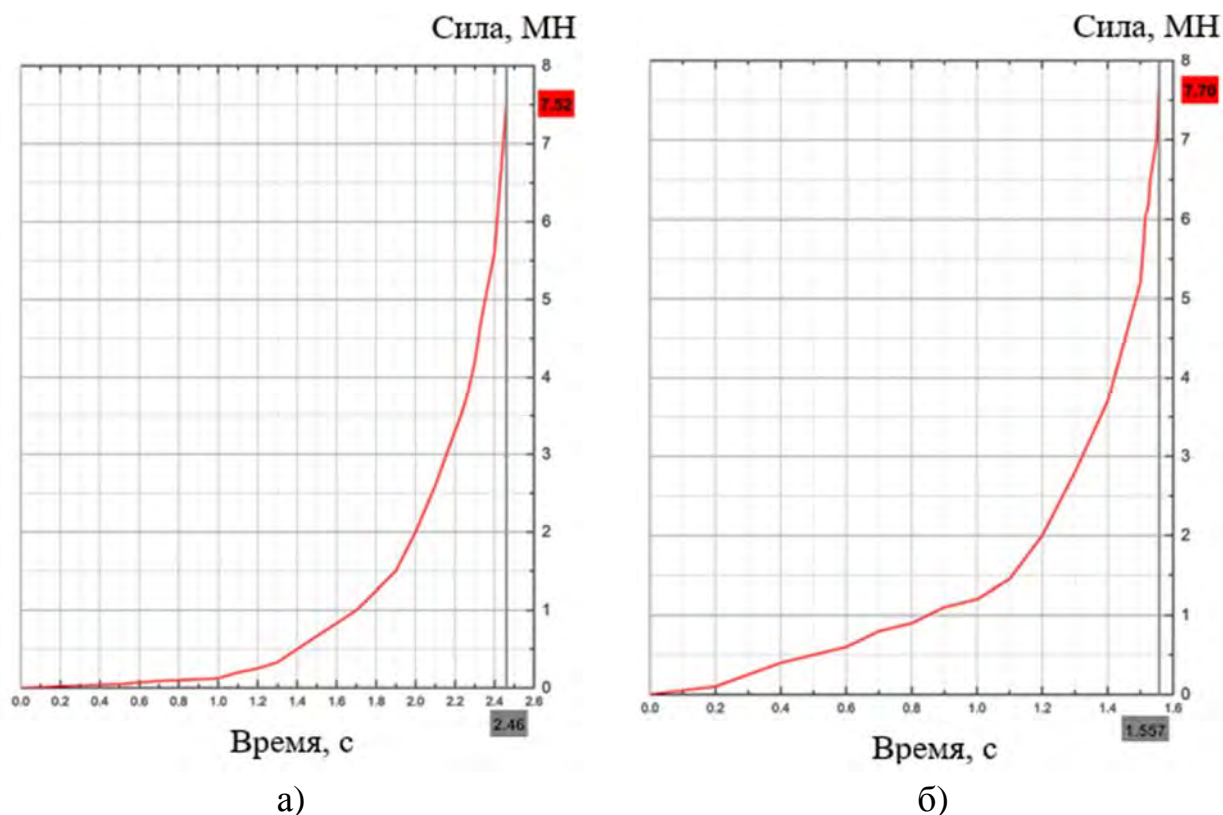
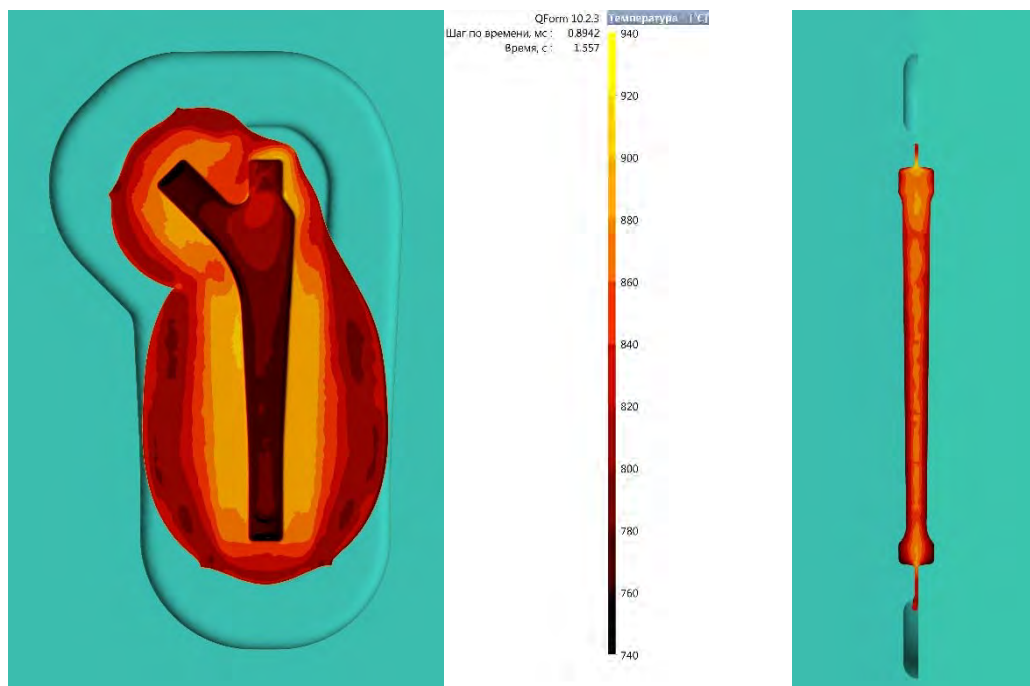
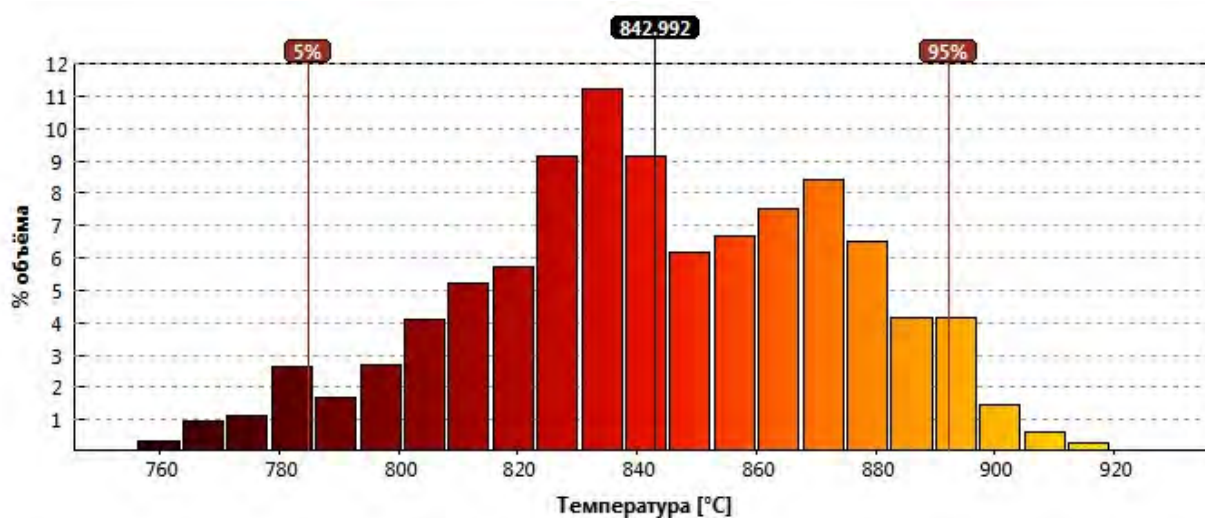


Рисунок 5 – Временные зависимости усилий штамповки заготовок ножки эндопротеза из сплава ВТ6 (а) и рашпиля из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo-0,6H (б)



а)



б)

Рисунок 6 – Температуры в конце штамповки заготовки из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo-0,6H (а) и распределение температур по объему поковки (б)

Так же в главе приведены результаты испытаний на обрабатываемость резанием сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo после наводороживающего и последующего вакуумного отжига. Испытания проводили путем измерения силы резания и температуры в зоне резания в процессе фрезерования цилиндрических образцов на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ «DANLİN MCV1020A». В качестве режущего инструмента использовали концевые твердосплавные фрезы диаметром 12 мм с пятью зубьями. Фрезерование проводили с использованием



СОЖ. Схема фрезерования приведена на рисунке 7. Скорость резания и подача соответствовали применяемым для обработки титановых сплавов, глубина резания – аналогична этому параметру при нарезании зубьев рашпиля. Всего на

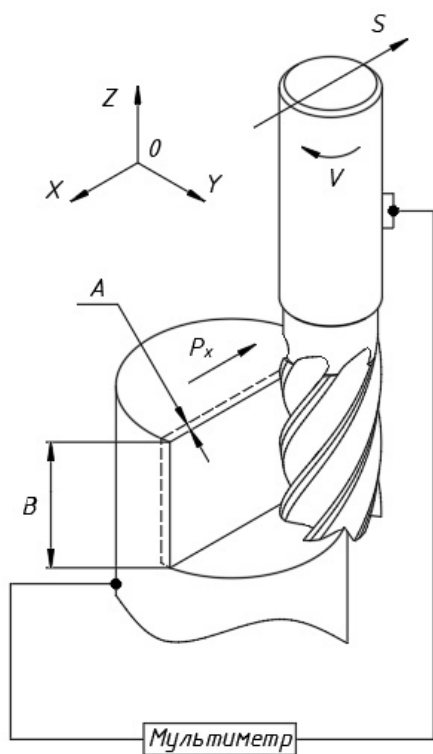


Рисунок 7 – Схема фрезерования

каждом образце было выполнено по 14 проходов, что соответствовало времени работы фрезы около 1 минуты. Силу резания  $P_x$  измеряли по направлению подачи. Режимы обработок и результаты испытаний приведены в таблице 3.

Установлено, что повышение содержания алюминия в  $\alpha$ -фазе и формирование в ней упорядоченных микрообъемов  $\alpha_2$ -фазы с когерентной границей при росте концентрации водорода от исходной до 0,4 масс. % приводит к увеличению силы резания. Кроме того, увеличение искажений кристаллической

решетки  $\alpha$ -фазы, возрастание упругих напряжений, в том числе на  $\alpha/\alpha_2$ -границах, приводят к снижению как электронной, так и фононной составляющих теплопроводности сплава и, соответственно, к возрастанию температуры в зоне резания. Наличие в структуре сплава с 0,6 масс. % водорода гидридной фазы  $\delta$ -фазы ( $TiH_x$ ) с более низкой, чем у титана, теплопроводностью еще сильнее повышает температуру в зоне резания. Резкое снижение силы резания в сплаве с 0,6 масс. % водорода так же связано с появлением хрупкой гидридной  $\delta$ -фазы и обедненной алюминием  $\alpha_3$ -фазы эвтектоидного происхождения.

Структура глобулярного типа, сформировавшаяся в результате обработки по режиму 4 (см. табл. 3 и рис. 3а), обеспечила наименьшую силу резания из всех образцов, подвергнутых вакуумному отжигу. Обработка по режиму 5 формирует структуру с крупнопластинчатой  $\alpha$ -фазой, типичную для отжига сплава в  $\beta$ -области. Такая структура привела к максимальной для всех исследованных

образцов силе резания. Образование мелкодисперсной структуры (см. рис. 3б), содержащей  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\alpha^{\text{II}}$ - и  $\alpha_2$ -фазы, обеспечивает среднюю по величине силу резания (режим б).

Таблица 3 – Результаты испытаний на обрабатываемость резанием при фрезеровании образцов сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo, обработанных по различным режимам

№ обработки	Режим обработки, состояние образца	Сила резания, Н	Температура в зоне резания, °С
-	Исходное	530	236
1	НО: t=850°C, C <sub>H</sub> =0,2 масс. %	548	310
2	НО: t=850°C, C <sub>H</sub> =0,4 масс. %	554	401
3	НО: t=850°C, C <sub>H</sub> =0,6 масс. %	280	468
4	НО: t=850°C, C <sub>H</sub> =0,2 масс. % ВО*: 900°C, 1 час + 800°C, 1 час	311	328
5	НО: t=850°C, C <sub>H</sub> =0,4 масс. % ВО: 700°C, 2,5 часа + 1100°C, 0,5 часа	608	292
6	НО: t=850°C, C <sub>H</sub> =0,6 масс. % ВО: 650°C, 5 часов	483	450

\* Конечная концентрация водорода после вакуумного отжига по всем режимам не превышает 0,006 масс. %.

Наименьшие температуры резания характерны для исходных образцов и для образцов, обработанных по режиму 5. Эти образцы имели близкую к равновесной структуру с минимальными искажениями кристаллической решетки  $\alpha$ -фазы.

### **Глава V Влияние термоводородной и вакуумной ионно-плазменной обработок на механические свойства сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo**

В главе приведены результаты испытаний на ударную вязкость сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo после термоводородной (ТВО) и вакуумной ионно-плазменной (ВИПА) обработок. Показано, что для соответствия экспериментов реальным условиям эксплуатации хирургических рашпилей в качестве образцов для испытаний целесообразно применять стандартные образцы с V-образным

надрезом. Режимы обработки и результаты испытаний приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Режимы обработки и средние значения результатов испытаний на ударную вязкость по 5 образцам сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo с V-образным надрезом

Состояние образцов, обработка	Режимы обработки	KCV, МДж/м <sup>2</sup>
Исходное	–	0,18
ТВО1	НО: t=850°C, C <sub>H</sub> =0,4 масс.%; ВО: t <sub>1</sub> =750°C, 2,5 часа; t <sub>2</sub> =1100°C, 0,5 часа	0,41
ТВО2	НО: t=850°C, C <sub>H</sub> =0,4 масс.%; ВО: t=950°C, 1,5 часа	0,32
ТВО3	НО: t=850°C, C <sub>H</sub> =0,6 масс.%; ВО: t=650°C, 5 часов	0,05
Исходное+ВИПА	ВИПА: 600°C, 1 час	0,12
ТВО1+ВИПА	ТВО1+ВИПА: 600°C, 1 час	0,15
ТВО2+ВИПА	ТВО2+ВИПА: 600°C, 1 час	0,15
ТВО3+ВИПА	ТВО3+ВИПА: 600°C, 1 час	0,06

Наибольшие значения ударной вязкости обеспечиваются структурой пластинчатого типа, сформировавшейся в результате ТВО1. Ударная вязкость образцов с градиентной структурой (см. рис. 4), сформировавшейся после ТВО2, несколько ниже по сравнению с образцами с однородной пластинчатой структурой, но выше чем у исходных образцов. Вакуумное ионно-плазменное азотирование исходных образцов и образцов после ТВО1 и ТВО2 снижает ударную вязкость сплава в 1,5–2,5 раза. Высокая дисперсность структуры (см. рис. 3б) и разнообразие фазового состава сплава (режим 3 в табл. 2) приводят к минимальным значениям ударной вязкости образцов после ТВО3. Азотирование этих образцов практически не изменяет ударную вязкость сплава.

Фрактографический анализ изломов образцов показал, что во всех случаях разрушение имеет вязкий характер. На изломах выявляется «чашечный» микрорельеф с ямками различных размеров и морфологии. Хрупкая составляющая представлена небольшим количеством фасеток квазискола. Все фасетки имеют следы микропластической деформации – ямки. При сравнительном анализе изломов неазотированных образцов и образцов после

вакуумной ионно-плазменной обработки различия в фрактограммах не выявлены.

По результатам испытаний предложены рекомендации по конструкции хирургических рашпилей, в частности по геометрии зубьев. Показано, что радиусы галтелей у основания зубьев целесообразно скорректировать от 0,1–0,3 до 0,25–0,4 мм.

По результатам работы предложена схема комплексной технологии получения и обработки заготовок хирургических рашпилей из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo для ортопедических операций эндопротезирования, включающая:

1. Наводороживающий отжиг заготовок из прутков разных диаметров по режимам:  $t=850^{\circ}\text{C}$ ;  $C_{\text{H}}=0,6$  масс. %;

2. Изотермическую штамповку заготовок по температурным ( $850^{\circ}\text{C}$ ), силовым и скоростным режимам, принятым для штамповки ножек эндопротеза тазобедренного сустава из сплава ВТ6;

3. Обработку резанием;

4. Вакуумный отжиг по режиму:  $t=650^{\circ}\text{C}$ , 5 часов;

5. Чистовую механическую обработку и нарезание зубьев;

6. Вакуумное ионно-плазменное азотирование по режиму:  $t=600^{\circ}\text{C}$ , 1 час.

## **ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. Установлено влияние термобарических и концентрационных параметров наводороживающего отжига при термоводородной обработке на фазовый состав и структуру сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo. Показано, что повышение исходного давления водорода над сплавом от 100 до 130 кПа при наводороживающем отжиге до концентраций 0,2–0,6 масс. % при температуре  $850^{\circ}\text{C}$  приводит к более интенсивной экзотермической реакции на поверхности цилиндрических образцов и, как следствие, к формированию неоднородной по сечению структуры с образованием крупнопластинчатой  $\alpha$ -фазы в поверхностном слое.

2. Установлено влияние режимов вакуумного отжига при термоводородной обработке на фазовый состав и структуру сплава

Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo. Показано, что при температуре вакуумного отжига 950°C предварительно наводороженных до концентрации 0,4 масс. % образцов формируется градиентная ( $\alpha+\beta$ )-структура с глобулярной  $\alpha$ -фазой размером 6–9 мкм в поверхностном слое и крупнопластинчатой  $\alpha$ -фазой в сердцевине цилиндрических образцов вследствие эндотермического характера десорбции водорода на поверхности образцов.

3. Методом компьютерного моделирования установлена возможность изотермической штамповки заготовок рашпилей из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo, легированного 0,6 масс. % водорода, при тех же температурных и силовых параметрах процесса и с использованием того же оборудования и оснастки, что при штамповке ножек эндопротеза тазобедренного сустава из сплава ВТ6.

4. Установлено влияние легирования водородом и последующего вакуумного отжига на термосиловые параметры резания при фрезеровании образцов сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo. Показано, что изменение силы резания с ростом содержания водорода от исходного до 0,6 масс. % связано с увеличением содержания алюминия в  $\alpha$ -фазе, выделением вторичной  $\alpha''$ -фазы, упорядоченной  $\alpha_2$ -фазы и гидрида. Показано, что наименьшие силы резания характерны для образцов с 0,6 масс. % водорода и образцов с глобулярной ( $\alpha+\beta$ )-структурой, сформировавшейся в результате вакуумного отжига при 900–800°C в процессе термоводородной обработки.

5. Установлено, что увеличение концентрации водорода в сплаве от исходного до 0,6 масс. % приводит к почти линейному росту температуры в зоне резания. Это связано с увеличением содержания алюминия в  $\alpha$ -фазе и формированием в ней упорядоченных микрообъемов  $\alpha_2$ -фазы с когерентной границей при росте концентрации водорода в сплаве и уменьшении объемной доли  $\alpha$ -фазы. Увеличение искажений кристаллической решетки  $\alpha$ -фазы, возрастание упругих напряжений, в том числе на  $\alpha/\alpha_2$ -границах, должны приводить к снижению как электронной, так и фононной составляющих теплопроводности сплава и, соответственно, к возрастанию температуры в зоне резания. Наличие в структуре сплава с 0,6 масс. % водорода гидридной фазы TiH<sub>x</sub> с более низкой, чем у титана, теплопроводностью еще сильнее повышает температуру в зоне резания.

6. Установлено влияние термоводородной и вакуумной ионно-плазменной обработок на ударную вязкость образцов из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo с V-образным надрезом. Показано, что высокая дисперсность структуры и наличие вторичной  $\alpha''$ -фазы в сплаве после низкотемпературного (650°C) вакуумного отжига при термоводородной обработке приводят к минимальным значениям ударной вязкости.

7. Установлено, что неравномерное распределение азота в  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазах и нитрида Ti<sub>2</sub>N вблизи острой вершины V-образного надреза азотированных образцов из сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo приводит к снижению ударной вязкости в 1,5–2,5 раза.

8. Предложена схема комплексной технологии получения и обработки заготовок рашпелей из высокомодульного сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2Mo для ортопедических операций эндопротезирования, включающая наводороживание цилиндрических заготовок до концентрации 0,6 масс. %, изотермическую штамповку по режимам, принятым для штамповки ножек эндопротезов, обработку резанием в наводороженном состоянии, вакуумный отжиг, чистовую механическую обработку и вакуумное ионно-плазменное азотирование. Показано, что такая технология формирует в материале удовлетворительный уровень механических и эксплуатационных свойств изделия.

#### **Список основных публикаций по теме работы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и Scopus**

1. А.М. Мамонов, Закономерности влияния водорода на структуру, сопротивление горячей пластической деформации и кристаллографическую текстуру титанового сплава с высоким содержанием алюминия / А.М. Мамонов, Е.О. Агаркова, А.П. Нейман [и др.] // Деформация и разрушение материалов – 2020. – №7. – С. 2–9.

A.M. Mamonov, Effect of hydrogen on the structure, the hot plastic deformation resistance, and the crystallographic texture of a titanium alloy with a high aluminum content / A.M. Mamonov, E.O. Agarkova, A.P. Neiman, S.S. Slezov, A.A. Lidzhiev // Russian Metallurgy (Metally). 2021. Т. 2021. № 4. С. 392–399.

2. S.V. Skvortsova, Influence of various production and processing methods on the structure and properties of porous titanium coatings / S.V. Skvortsova, A.E. Ivanov,

A.A. Lidzhiev, N.V. Ruchina // Key Engineering Materials. 2022. Т. 910 КЕМ. С. 947–952.

3. А.М. Мамонов, Влияние термической, термоводородной и ионно-плазменной обработок на структуру, твердость и износостойкость титанового сплава в металл-полимерной паре трения эндопротеза коленного сустава / А.М. Мамонов, А.В. Нейман, Е.О. Агаркова, А.А. Лиджиев, А.П. Нейман // Деформация и разрушение материалов. 2022. № 7. С. 12–19.

A.M. Mamonov, Effect of thermal, hydrothermal, and ion-plasma treatment on the structure, hardness, and wear resistance of a titanium alloy in the metal-polymer friction pair of a condylar prosthesis / A.M. Mamonov, A.V. Neiman, E.O. Agarkova, A.A. Lidzhiev, A.P. Neiman // Russian Metallurgy (Metally). 2022. Т. 2022. № 10. С. 1246–1252.

4. А.А. Лиджиев, Влияние термобарических, концентрационных и кинетических параметров наводороживающего отжига при термоводородной обработке на фазовый состав и структуру титанового сплава с повышенным содержанием алюминия / А.А. Лиджиев, А.В. Овчинников, Е.О. Агаркова [и др.] // Титан – 2023. – №3 (79). – С. 22–28.

5. А.А. Лиджиев, Влияние режимов вакуумного отжига на формирование однородных и градиентных структур в титановом сплаве с повышенным содержанием алюминия при термоводородной обработке / А.А. Лиджиев, А.М. Мамонов, А.В. Нейман [и др.] // Титан – 2023. – №4 (80). – С. 43–48.

6. А.А. Лиджиев, Влияние легирования водородом и термоводородной обработки на обрабатываемость резанием сплава Ti-8,7Al-2Mo-1,5Zr / А.А. Лиджиев, А.М. Мамонов, А.В. Овчинников [и др.] // Титан – 2024. – №1 (81). – С. 9–14.

7. А.М. Мамонов, Компьютерное моделирование изотермической штамповки заготовок медицинских изделий из высококомодульного титанового сплава, легированного водородом / А.М. Мамонов, А.А. Лиджиев, Е.В. Преображенский [и др.] // Титан – 2024. – №1 (81). – С. 51–56.

