

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Нейман Алены Владимировны «Влияние термоводородной и термической обработок на объемную и поверхностную структуру и функциональные свойства титанового сплава ВТ6 для имплантируемых медицинских изделий», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

**Актуальность темы.** Диссертация Нейман А. В. посвящена решению важного вопроса современного материаловедения – выбору режимов обработки крупногабаритных компонентов эндопротезов из титанового сплава ВТ6 на примере эндопротеза коленного сустава человека. К этим изделиям предъявляется широкий спектр требований, включающий такие характеристики как биосовместимость материалов, высокие триботехнические характеристики, обеспечивающие требуемый ресурс работы и так далее. Одним из способов достижения указанных требований является получение структуры, обеспечивающей градиент твердости с максимумом на поверхности изделия. Существующие на данный момент технологические решения, основанные на проведении термоводородной обработки (ТВО) с последующим низкотемпературным вакуумным азотированием (ВИПА), не являются эффективными при изготовлении протеза сустава, обладающего сложной геометрией и массивными сечениями.

Решение указанной проблемы повышения эффективности технологий изготовления может быть использовано вместе с ТВО поверхностной закалки методом индукционного нагрева для формирования мелкодисперсной структуры глубиной до нескольких миллиметров. Поэтому работа Нейман А. В., направленная на изучение влияния указанных методов обработки на структуру и свойства изделий из сплавов медицинского назначения, является актуальной и перспективной.

**Общая характеристика работы.** Диссертация Нейма А. В. представляет собой компактную работу объемом 144 страницы со 146 цитируемыми источниками и посвящена проблеме выбора технологий обработки изделий из сплава ВТ6, позволяющих сформировать на поверхности градиентную структуру с мелкодисперсной ( $\alpha+\beta$ )-структурой, обеспечивающей высокий уровень эксплуатационных свойств на примере компонент эндопротезов коленного сустава. Автор предлагает решить

поставленную проблему путем использования ТВО и индукционного нагрева с последующей закалкой и старением для получения заданной структуры слоя толщиной до нескольких миллиметров. В работе рассмотрены закономерности фазовых и структурных превращений в образцах из сплава ВТ6 при ТВО и упрочняющей термической обработке. Рассмотрены вопросы формирования поверхностной мелкодисперсной структуры, обеспечивающей существенный градиент твердости по сечению заготовки. Показана возможность формирования в образцах сплава ВТ6 заданной структуры методом индукционного нагрева с последующей закалкой и старением.

Проведено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния и механического поведения биотехнической системы с эндопротезом коленного сустава, выполненного из сплава ВТ6. На основе анализа конечно-элементной модели показана высокая степень подобия системы с протезом и здоровой бедренной кости.

Исследовано влияние различных видов термической и химико-термической обработок на триботехнические характеристики и износостойкость образцов, выполненных из сплава ВТ6 в металл-полимерной паре трения применительной к условиям работы эндопротезного сустава. Определены величины среднего и максимального момента трения, а также изменение массы детали из СВМПЭ, проанализирован внешний вид поверхности трения после испытаний.

**Научная новизна** сформулирован автором достаточно полно. В частности, было установлено влияние режимов ТВО на изменение фазового состава и структуры поверхностного слоя. Показано, что градиентное состояние структуры достигается распределением водорода по сечению заготовки, что приводит к различной полноте протекания фазовых превращений в объеме сплава.

Было показано, что применение индукционного нагрева с последующей закалкой и старением позволяет получить мелкодисперсную структуру в поверхностном слое глубиной до нескольких миллиметров путем регулирования энергетических и временных параметров нагрева.

Было проведено математическое моделирование с применением специализированного программного обеспечения. На его основе определены и рассчитаны характеристики работоспособности эндопротеза и надежность всех его компонентов при функциональной нагрузке 3300 Н.

Показано, что применение упрочняющей термической обработки обеспечивает минимальный коэффициент трения в паре деталь из сплава ВТ6 и СВМПЭ.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Разработаны схемы и режимы ТВО и термической обработки с использованием индукционного нагрева модели заготовки бедренного компонента эндопротеза коленного сустава, выполненного из сплава ВТ6, позволяющие сформировать градиентную структуру с мелкодисперсной  $\alpha$ -фазой в поверхностном слое глубиной до 5 мм и твердостью до 39 HRC.

Разработана конечно-элементная модель биотехнической системы с эндопротезом коленного сустава из сплава ВТ6 для онкологической артропластики. Проведенные методом конечных элементов расчеты показали работоспособность и надежность конструкции эндопротеза.

Триботехнические испытания образцов, обработанных по предложенным технологиям с последующим ВИПА, показали эффективное обеспечение износостойкости пар трения деталь из ВТ6 – СВМПЭ. Предложенные технологические схемы и режимы обработок использованы АО «Имплант МТ» для разработки технологии производства эндопротезов коленного сустава.

**Достоверность полученных результатов** диссертационной работы основана на использовании современного прецизионного оборудования, аттестованных методик исследования, взаимодополняющих методов анализа и статистической обработки результатов, согласия полученных результатов с современными представлениями научного материаловедения.

#### **Замечания:**

- 1) На странице 12 используются слова «кнутри» и «кнаружи». Так же отмечается некоторая небрежность в оформлении текста, связанная с большим количеством пустого места на страницах работы.
- 2) В ряде случаев приведено избыточное описание рассматриваемых при анализе технологий, например, поверхностного нагрева с использованием ТВЧ
- 3) На рисунке 3.5 приведены дифрактограммы, но по ним можно только качественно судить об изменении соотношения  $\alpha$  и  $\beta$  фаз сплава. Кроме того, согласно рисунку 3.7 твердость упрочненного с использованием ТВО слоя начинает снижаться только после 4 мм, при этом информационная толщина рентгена составляет несколько десятков микрон.
- 4) В тексте достаточно часто автор работы ссылается на описание микроструктур сплава, но сами микроструктуры приведены маленькими по

сравнению с другими рисунками. Это и отсутствие указания на них каким-либо образом фаз затрудняет анализ и понимание полученных результатов.

5) На графиках зависимости распределения твердости по сечению образца отсутствует указание на точность или погрешность. Кроме того, на рис 3.7 распределение твердости практически симметрично относительно середины образца, а на рис 3.8 после II этапа ТВО эта симметрия значительно искажается. В тексте работы этот момент не рассматривается, и автор не приводит объяснения причины такого изменения. Возможно, что измерения находятся в пределах погрешности и некоторое расхождение твердости слева и справа не носит критический характер.

6) При анализе влияния разных видов обработки сплава ВТ6 указывается на смещение пиков титана в сторону больших значений межплоскостных расстояний, но из самих дифрактограмм это не очевидно, а в тексте не приводятся численные значения межплоскостных расстояний для анализа их изменений.

7) В третьей главе рассматривается влияние ТВО и индукционной закалки на изменение фазового состава, микроструктуры и распределения твердости по сечению образца, а в 5 главе приводятся результаты трибологических испытаний не только этих режимов, но и ВИПА. В выводах по работе также указывается, что было установлено положительное влияние, в том числе и ВИПА, на структуру и прочее, однако в тексте работы этот вопрос получил очень скудное освещение: режимы упомянуты в главе 2, а данные фазового анализа ограничены лишь фрагментом дифрактограммы на рис 5.4, но не было найдено в тексте ни одной микроструктуры.

Следует отметить, что сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации.

Представленная диссертационная работа Нейман Алены Владимировны выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно-обоснованные технические и технологические решения по влиянию ТВО и термической обработки на структуру и свойства титанового сплава ВТ6, используемого в качестве материала для изготовления имплантируемых медицинских изделий.

По материалам, представленным на защиту, опубликовано 17 печатных работ, в том числе 10 в рецензируемых журналах и изданиях перечня, рекомендованного ВАК РФ, 3 из которых переведены в журналах, включенных в международные системы цитирования Scopus и Web of Science.

рекомендованного ВАК РФ, 3 из которых переведены в журналах, включенных в международные системы цитирования Scopus и Web of Science.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Нейман Алена Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. «Металловедение» (технические науки)

Официальный оппонент:

профессор кафедры общей и теоретической физики,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
Костромской государственной университет (КГУ)  
доктор технических наук (специальность 2.6.1.  
Металловедением и термическая обработка  
металлов и сплавов), доцент  
Дьяков Илья Геннадьевич

Адрес организации: 156005, Костромская область,  
городской округ город Кострома, город Кострома,  
улица Дзержинского, дом 17/11

E-mail: [igdyakov@mail.ru](mailto:igdyakov@mail.ru)

Тел.: +7(961) 007-73-72

Подпись руки \_\_\_\_\_  
заверяю \_\_\_\_\_  
Начальник канцелярии  
Н.В. Кузнецова \_\_\_\_\_

*Дьякова И.Г.*



06.12.2024