

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Нейман Алёны 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» (технические науки)

### Актуальность темы диссертации

В последние годы фокус проблемы повышения работоспособности и надежности медицинских имплантируемых конструкций смещается из области конструирования в направлении материаловедения и технологий. Это касается как разработки новых материалов, например, резорбируемых керамик, низко модульных титановых сплавов, так и новых методов их обработки. В диссертационной работе Нейман А.В. предпринята попытка применения технологий поверхностной термической обработки с использованием индукционного нагрева, термоводородной обработки (ТВО) и вакуумного ионно-плазменного азотирования (ВИПА) для повышения износостойкости элементов коленного сустава из титанового сплава ВТ6. Решение этой задачи позволит заменить в конструкции эндопротеза коленного сустава несовместимые с тканями организма сплавы на основе кобальта, на биологически инертные сплавы на основе титана. Для титановых сплавов износостойкость, низкие величины которой являются основной причиной ограничения их более широкого применения в медицине, удалось повысить применительно к головкам эндопротезов тазобедренного сустава, но для эндопротезов коленного сустава вопрос остается открытым из-за больших габаритов и сложности формы элементов пары трения.

Поэтому тема диссертационной работы Нейман А.В. обладает несомненной научной актуальностью и имеет важное практическое и социальное значение.

#### Общая характеристика работы

В диссертационной работе исследуется возможность создания градиентной структуры в достаточно массивных модельных заготовках из сплава ВТ6 методами ТВО и поверхностной закалки с использованием индукционного нагрева. В обоих случаях автору удалось обеспечить условия для формирования в поверхностных слоях мелкодисперсных частиц вторичной  $\alpha$ -фазы и достаточно значительное увеличение твердости по сравнению с сердцевиной заготовок. Это можно рассматривать как этап получения благоприятного структурного состояния, способствующего повышению полируемости и износостойкости материала.

Представляет научный интерес схема ТВО, включающая предварительный кратковременный нагрев заготовок при наводороживании, дегазирующий вакуумный отжиг, способствующий растворению оксидной пленки, препятствующей поглощению и удалению водорода, с последующей низкотемпературной ступенью, на которой протекает  $\beta \rightarrow \alpha$  превращение, сопровождающееся значительным межфазным наклепом. Это обеспечивает как дисперсионное, так и деформационное упрочнение сплава соответственно за счет выделения второй фазы и высокой концентрации дефектов кристаллического строения.

На следующем этапе работы проведены теоретические и экспериментальные исследования условий трения и износа в паре трения сплав ВТ6 – сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Определены контактные напряжения между компонентами эндопротеза. Полученные данные позволили уточнить параметры испытаний на износ и сделать заключение о надежности конструкции с точки зрения усталостных характеристик материала.

Определение триботехнических характеристик пары трения «сплав ВТ6 в разном состоянии после различных видов обработки – сверхвысокомолекулярный полиэтилен» позволило сделать выводы о наиболее перспективных технологических схемах и режимах обработки, обеспечивающей минимизацию износа и длительную работоспособность пары трения.

Представляет интерес исследование влияния сочетания различных диаметров трущихся элементов на триботехнические характеристики с целью прогнозирования различных условий эксплуатации изделий и разработки конструкций со сложной геометрией взаимодействующих элементов.

Предложенные в диссертационной работе технологические схемы и режимы обработок использованы АО «Имплант МТ» для разработки технологии изготовления эндопротезов коленного сустава из титанового сплава.

Научная новизна диссертационной работы Нейман А.В. может быть сформулирована следующим образом:

1. Установлено, что термоводородная обработка, включающая наводороживание с кратковременной выдержкой при  $800^{\circ}\text{C}$  и низкотемпературную ступень при  $650^{\circ}\text{C}$  с последующим вакуумным отжигом и двухступенчатым удалением водорода при  $720^{\circ}\text{C}$  (5 мин) и  $550-500^{\circ}\text{C}$  (2 и 3 часа, соответственно) позволяет сформировать градиентную структуру в заготовке из сплава ВТ6 с дисперсной  $\alpha$ -фазой в поверхностном слое на глубине до 5 мм.

2. Показано, что сочетание поверхностной закалки с индукционного нагрева и старения при  $550^{\circ}\text{C}$  в течение 5 часов формирует в заготовках сплава ВТ6 градиентную структуру, обеспечивающую изменение твердости от поверхности к сердцевине с 39 до 34 ед. HRC.

3. Экспериментально определены моменты и коэффициенты трения пары «сплав ВТ6 после различных видов обработки – сверхвысокомолекулярный полиэтилен». Показано, что применение

вакуумного ионно-плазменного азотирования после термоводородной обработки или упрочняющей термической обработки обеспечивает отсутствие износа компонентов.

Рекомендации по практическому использованию результатов  
диссертационной работы

Установленные закономерности влияния режимов комплексной технологии, включающей термоводородную или локальную упрочняющую термическую обработку в сочетании с вакуумным ионно-плазменным азотированием, на момент и коэффициент трения пары «сплав ВТ6 – сверхвысокомолекулярный полиэтилен» позволяют разрабатывать новые износостойкие виды эндопротезов для медицины, а также трущихся конструкций для других отраслей промышленности.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием поверенного оборудования, лицензионным программным обеспечением и проведением испытаний в соответствии с ГОСТ.

Замечания и вопросы

1. В тексте работы не представлено убедительных доказательств присутствия в структуре  $\alpha'$ -мартенсита после I-го этапа ТВО, отмеченное на стр. 69 и 71. В данном случае фиксация мартенсита в структуре после рассматриваемой обработки вызывает сомнение, так как скорее всего он должен был претерпеть распад на последней стадии ТВО, включающей 7-часовую выдержку при 625°C.
2. Возможен ли в предложенной в работе компьютерной модели биотехнической системы с эндопротезом коленного сустава учет развития процесса резорбции костной ткани в месте соединения с имплантатом из-за наличия существенной разницы в модуле упругости соединяемых компонентов?
3. По представленной в тексте диссертации на рис. 5.4. дифрактограмме 1 сложно делать заключение об асимметрии линий  $\alpha$ -фазы на больших углах –

на что указывает автор на стр. 116, так как визуально наблюдаемая асимметрия может быть связана и с наличием  $K\alpha$ -дублета. Более наглядным доказательством могла служить компьютерная обработка профиля линий с выделением линий  $\alpha$ -фазы разного химического состава.

4. Почему при проведении триботехнических испытаний пары «ВТ6/сверхвысокомолекулярный полиэтилен» для состояний с ВИПА и без ВИПА (таблица 5.2) используются различные геометрические параметры образцов? Логичнее при оценке влияния ВИПА на триботехнические свойства было использовать образцы с аналогичными геометрическими параметрами.

5. По данным таблицы 5.2. в диссертации после ВИПА все рассматриваемые состояния сплава ВТ6, включая исходное горячекатаное состояние, имеют сопоставимые триботехнические характеристики. Почему, исходя из этого, автор не рекомендует сплав ВТ6 в горячекатаном состоянии для его использования при производстве компонентов эндопротезов коленного сустава?

Сделанные замечания не снижают высокий научный уровень диссертационной работы и ее практическую значимость.

Диссертационная работа Нейман Алёны Владимировны представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой представлены научно-обоснованные технические и технологические решения по комплексной технологии обработки сплава ВТ6, обеспечивающие повышение износостойкости компонентов коленного эндопротеза за счет формирования необходимой структуры в поверхности и сердцевине заготовок.

Результаты диссертационной работы прошли апробацию на 5 научно-технических конференциях и семинарах, опубликованы в 17 научных работах, в том числе в 10 статьях в изданиях, входящих в перечень ВАК, из которых 3 статьи включены в международную систему цитирования.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-16 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор Нейман Алёна Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Термообработка и физика металлов»  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»

 Илларионов Анатолий Геннадьевич

28.11.2024

Подпись удостоверяю ;

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
УРФУ  
МОРОЗОВА В.А.



Ул. Мира, 19, Екатеринбург, Свердловская обл., 620002  
Тел. 8-908-909-2889  
e-mail: a.g.illarionov@urfu.ru