

ОТЗЫВ

Официального оппонента, доктора технических наук, профессора, заведующего научно-исследовательской лабораторией «Физико-химические технологии и функциональные материалы» Батаева Ивана Анатольевича на диссертационную работу Коренева Александра Андреевича «Влияние легирования и термомеханической обработки на структурно-фазовое состояние и свойства биосовместимых β -сплавов титана на базе системы Ti-Nb-Zr», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность темы диссертации. Биосовместимые материалы, в том числе сплавы на основе титана, являются одним из наиболее актуальных и востребованных направлений современного материаловедения и металлостроения. Это обусловлено несколькими факторами, среди которых стоит отметить быстрое развитие медицины, а также быстрое старение населения в большинстве развитых и развивающихся стран мира. В связи с этим диссертационная работа А.А. Коренева, посвященная разработке новых составов биосовместимых титановых сплавов, а также исследованию их структуры и свойств, является актуальной.

Структура и основное содержание работы. Диссертационная работа изложена на 136 страницах машинописного текста. Состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 128 источников, а также приложения.

Во введении даётся обоснование актуальности темы исследования, формулируются цели и задачи, новизна полученных результатов, положения, выносимые на защиту. Коротко отмечается степень разработанности темы, обосновывается теоретическая и практическая значимость работы, описывается методология диссертационного исследования, апробация результатов, а также указан личный вклад автора.

Первая глава посвящена обзору литературы в области биосовместимых титановых сплавов. Автор раскрывает основные термины в области биосовместимых материалов, перечисляет предъявляемые к ним требования. Особое внимание уделяется биосовместимым сплавам на основе системы Ti-Nb. А.А. Коренев приводит имеющиеся в литературе сведения о структуре и свойствах данных сплавов, в том числе отмечает изменение их свойств в процессе различных видов термического и деформационного воздействий. В завершении главы автор обосновывает цель и задачи исследования.

Во второй главе А.А. Коренев описывает составы сплавов, используемые для исследования, перечисляет методы их термической и термомеханической обработки. В главе также представлено описание экспериментальных и расчётных методов исследования, а также методов определения механических свойств. Особое внимание автор уделяет описанию использованного в работе подхода к оценке упругих свойств, основанного на комбинации расчётных методов и инструментального индентирования.

В третьей главе представлены результаты исследований ряда титановых сплавов, подвергнутых закалке в воду. В частности, описывается структура, фазовый состав, твёрдость и модуль упругости анализируемых материалов. А.А. Коренев показывает, что в исходном (горячекатаном) состоянии заготовки представлены метастабильной β -фазой, характеризующейся аксиальной текстурой $\langle 110 \rangle$ вдоль направления прокатки. После закалки степень текстурированности значительно снижается. Закалка приводит к незначительному снижению твёрдости, при этом, согласно таблице 3.3, существенных изменений модуля упругости после закалки не наблюдается. Автор отмечает отсутствие значительной анизотропии упругих свойств у полученных материалов. В данной главе также подробно описываются результаты применения принятой автором методики оценки упругих свойств с основанной на расчётной оценке коэффициента Пуассона и последующем инструментальном интонировании. Показано хорошее согласие полученных результатов.

В четвертой главе А.А. Коренев анализирует интересный подход, позволяющий повысить прочность материала при этом дополнительно снизив его жёсткость. Подход заключается в холодной прокатке, которая позволяет сформировать благоприятную текстуру с точки зрения упругих свойств титановых сплавов. Используя результаты рентгеноструктурного анализа, а также рассчитанные значения модулей упругости вдоль различных кристаллографических направлений автор даёт оценку упругих характеристик полученных образцов. Полученные им расчётные и экспериментальные значения упругих свойств хорошо коррелируют. Автор показывает, что для холоднокатанного сплава TN3Z возможно получить модуль упругости на уровне $51 \pm 1,5$ ГПа, а для сплава TNZS он составляет $52 \pm 1,5$ ГПа. Полученные результаты были использованы автором для обоснования рекомендаций по выбору составов сплавов.

В пятой главе рассматривается структурно-фазовое состояние и свойства сплавов, которые после закалки и холодной прокатки были подвергнуты старению при температуре 400 °С. А.А. Коренев показывает, что процесс старения приводит к частичному распаду β -твёрдого раствора, сопровождающе-

муся выделением мелкокристаллических включений α_n -фазы. Кроме того, отмечается отсутствие выделений ω -фазы, что имеет принципиальное значение с точки зрения характеристик упругости сплавов, предназначенных для производства имплантатов.

Автор отмечает, что старение сопровождается значительным ростом прочностных характеристик и твёрдости сплавов, при этом модуль упругости возрастает не столь значительно. Разработанные материалы обладают высоким комплексом свойств, а их использование в медицине является более целесообразным по сравнению со сплавом Ti-6Al-4V. Так, например предел текучести сплавов TN3Z и TNZS после старения в течение 4...16 часов достигает 1080...1100 МПа, что существенно превышает предел текучести сплава Ti-6Al-4V (~980 МПа). При этом рост модуля упругости этих сплавов достигает ~30 % относительно несостаренного состояния. В заключении главы А.А. Корнев рекомендует для дальнейшего применения сплав TNZS, подвергнутый низкотемпературной термомеханической обработке – закалке при 700 °С, холодной прокатке со степенью обжатия 85 %, а также последующему старению при 400 °С в течение 16 часов. Данный подход обеспечивает низкий модуль упругости сплава (58 ± 1 ГПа) и высокий предел текучести (1090 ± 10 МПа).

В заключении приведены основные выводы по диссертационной работе, включая обоснованные рекомендации по составу и режиму НТМО сплава TNZS, который обладает наибольшим потенциалом для дальнейшего применения в медицине.

В приложении представлены акт внедрения полученных результатов в ООО «Предприятие «Сенсор» и акт использования результатов работы в АО «ЦИТО».

Научная новизна результатов диссертационной работы.

Автором работы предложены составы биосовместимых сплавов систем Ti-Nb-Zr-Sn и Ti-Nb-Zr-Sn-Ta, обладающие высоким комплексом механических свойств. При старении сплавов Ti-39Nb-(5...9)Zr и Ti-39Nb-5Zr-(2Sn)-(2Ta) зафиксировано образование наноразмерных выделений α_n -фазы. Кроме того, А.А. Корнев доказывает сходимость предложенного им метода определения модуля упругости с результатами расчётных методик.

Практическая значимость полученных результатов.

Даны рекомендации по выбору составов и режимов НТМО титановых сплавов для применения в медицине. Предложен подход к оценке упругих свойств материалов, основанный на сочетании расчётных методов и инструментального индентирования. Полученные результаты были переданы в ООО «Предприятие «Сенсор» и АО «ЦИТО». Их **достоверность** подтверждается

использованием взаимодополняющих методик, а также хорошим согласием с результатами других работ в области биосовместимых титановых сплавов.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В работе отмечается, что заготовки исследуемых сплавов были получены от ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». Каким образом были выплавлены данные заготовки? Была ли возможность у автора работы самостоятельно назначать состав сплавов?
2. Для оценки размеров ОКР, плотности дислокаций и других характеристик микроструктуры было бы рационально использовать более современные модели профильного анализа, такие как модифицированный метод Вильямсона-Холла и модифицированный метод Уоррена-Авербаха.
3. Автор прогнозирует, что исследуемые материалы должны обладать высокой износостойкостью, однако данные заключения даны на основании расчётных методов. Износостойкость является чрезвычайно сложной для прогнозирования характеристикой материалов. По этой причине для обоснования сделанных заключений автору следовало бы провести оценку триботехнических свойств экспериментальными методами.
4. В большинстве практических случаев модуль упругости и другие свойства сплавов требуется подтверждать испытаниями на растяжение. Является ли предложенный автором подход к оценке упругих характеристик, основанный на сочетании расчётных методик и инструментального индентирования, перспективным для дальнейшего использования?

Вышеуказанные вопросы и замечания не снижают общий уровень диссертационной работы. Диссертация представляет собой завершённую работу, в рамках которой проведено большое количество всесторонних экспериментальных исследований и дана научно-обоснованная их интерпретация.

Тема диссертации соответствует заявленной специальности. Содержание автореферата А.А. Коренева соответствует содержанию диссертации. Качество оформления, язык и стиль диссертации и автореферата соответствуют требованиям.

Основные результаты работы опубликованы в 10 работах, включая 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Считаю, что диссертационная работа «Влияние легирования и термомеханической обработки на структурно-фазовое состояние и свойства биосовместимых β -сплавов титана на базе системы Ti-Nb-Zr» соответствует специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов и требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ,

предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Корнев Александр Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией
«Физико-химические технологии и
функциональные материалы»
ФБОУ ВО Новосибирский государственный
технический университет,
д.т.н., профессор



Иван Анатольевич Батаев

Дата подписания отзыва «3» мая 2024 года.

Подпись Батаева И.А. Заведующий
Начальник отдела кадров НИИ



Пустовалова Ольга Константиновна



630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса 20, ФБОУ ВО Новосибирский
государственный технический университет, Тел. +7(383)3460612, email:
i.bataev@corp.nstu.ru.