

ОТЗЫВ

официального оппонента Давыдова Дениса Игоревича на диссертационную работу Коренев А.А. «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.

Диссертационная работа Коренева Александра Андреевича посвящена изучению влияния химического состава сплава, прокатки и режимов термической обработки на формирование структуры и механических свойств биосовместимых β -титановых сплавов для применения в качестве материалов для металлических имплантатов. Изучение новых систем легирования титановых сплавов, а также способов получения оптимальных свойств таким образом, является важной материаловедческой задачей в связи с широким использованием таких сплавов в медицине при изготовлении металлических имплантатов. В связи с этим задачи экспериментального исследования, сформулированные в диссертации, являются **актуальными**.

Структура и основное содержание работы. Диссертация состоит из введения, трех основных разделов, общих выводов, списка цитируемой литературы из 128 наименований. Общий объем диссертационной работы составляет 134 страниц. Диссертационная работа содержит 54 рисунков, 29 формул и 26 таблиц.

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, представлены научная новизна и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности, апробация полученных результатов и отражается личный вклад автора.

В **первой главе** приведен анализ литературных источников. В главе перечислены основные особенности и требования к современным металлическим имплантатам, а также о перспективах использования β -титановых сплавов в ортопедии. Рассмотрены принципы легирования

титановых сплавов и влияние легирующих элементов на формирование фазового состава и механических свойств. Особое внимание уделено методам расчета и прогнозирования упругих характеристик. Также подробно рассмотрены режимы низкотемпературных механических обработок для достижения в β -титановых сплавах удовлетворительного комплекса упруго-механических свойств.

В целом данная глава дает широкое представление о накопленных данных и направлении предстоящего исследования. На основании проведенного анализа литературных данных сформулирована цель и основные задачи работы.

Во **второй главе** представлены материалы исследования, обработки и методики исследования и расчета упругих характеристик. Материалом исследования служили титановые сплавы на основе системы Ti-Nb-Zr экспериментальных составов.

В работе были использованы методы изучения структуры: оптическая металлография, растровая электронная микроскопия, рентгеноструктурный фазовый анализ, микроиндентирование по методу Оливера и Фарра. Проведены механические испытания. В главе уделено внимание методологическому описанию аналитических расчётов прогнозирования упругих характеристик сплавов.

В **третьей главе** исследовано влияние закалки на формирование структурно-фазового состояния, модуля упругости и твердости, исследуемых сплавов, на основании эксперимента и расчета. Предложен метод расчета упругих характеристик исследуемых сплавов с ОЦК решеткой β -твердого раствора. Показана необходимость использования при микроиндентировании рассчитанные значения коэффициента Пуассона, отличных от его значения для чистого α -титана

Далее был проведен расчет упругих характеристик исследуемых сплавов с использованием аналитического расчета упругих констант для кубических

решеток элементов, входящих в сплавы, и учетом параметров взаимодействия легирующих элементов с титаном в двойных и тройных системах.

Для исследуемых биосовместимых β -титановых сплавов показана линейная зависимость между их упругими характеристиками и химическим составом, выраженном через молибденовый эквивалент.

В четвертой главе рассмотрено влияние холодной прокатки на структуру, текстуру, упругие и прочностные характеристики биосовместимых β -титановых сплавов на базе системы Ti-Nb-Zr, произведен расчет модуля упругости и коэффициента Пуассона в различных направлениях β -фазы с ОЦК решеткой.

Установлено, что холодная прокатка закаленных β -титановых сплавов на базе системы Ti-Nb-Zr приводит формированию многокомпонентной текстуры прокатки с сильной компонентой $\{001\}\beta\langle 110\rangle\beta$ и более слабыми $\{111\}\beta\langle 110\rangle\beta, \{112\}\beta\langle 110\rangle\beta$. Увеличение степени деформации с 85 до 90 % способствует усилению текстурной компоненты $\{001\}\beta\langle 110\rangle\beta$ и, в основном, ослаблению других компонент.

Показано, что использование расчетных значений модуля упругости и коэффициента Пуассона в различных направлениях ОЦК решетки β -твердого раствора титана, полученных с применением аналитического расчета, а также данных, полученных методом РСФА, могут быть использованы при экспериментальном определении модуля упругости микроиндентированием исследуемых сплавов. Рассчитанные в работе значения E закаленных и холоднокатанных сплавов в НН и НП сопоставимы с экспериментальными значениями модуля упругости

В пятой главе исследовано влияние легирования и холодной прокатки с различной степенью деформации на эволюцию структурно-фазового состояния, физико-механических свойств и износостойкости холоднокатанных титановых сплавов на базе системы Ti-Nb-Zr, состаренных при температуре 400 °С. Показано, что проведение многопроходной холодной прокатки деформации 85 и 90% в исследованных сплавах способствует при температуре

старения 400°C подавлению развития $\beta \rightarrow \omega$ превращения и способствует к распаду β -твердого раствора с образованием промежуточной α_n -фазы. Установлено, образование дисперсных выделений α_n -фазы при старении холоднокатаных сплавов приводит к повышению микротвердости. При увеличении степени деформации с 85 до 90 % фиксируется небольшой относительный рост микротвердости.

В разделе «**Общие выводы**» представлены основные результаты в форме шести выводов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. В работе предложены системы легирования биосовместимых β -титановых сплавов с механически стабильным β -твердым раствором, которые обеспечивают лучшее сочетание низкого модуля упругости и высокой прочности для применения в качестве материалов для металлических имплантатов.

2. Исследовано влияния низкотемпературной механической обработки на формирование структурно-фазового состава и комплекс упругих и прочностных свойств у исследуемых сплавов. Показано, что использование аналитического метода расчета значений модуля упругости и коэффициента Пуассона дает близкую сходимость рассчитанных значений с экспериментально полученными данными.

3. Показано, что образование наночастиц промежуточной α_n -фазы при распаде β -твердого раствора в ходе старения обеспечивает минимальный прирост значений модуля упругости при максимальном упрочнении исследуемых сплавов.

Результаты работы соответствуют поставленным целям и задачам. **Достоверность** экспериментальных результатов, научных положений, выносимых на защиту, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием современных взаимодополняющих методов исследования и согласованностью работы с более ранними литературными данными.

Особую **практическую значимость** имеет, прежде всего, комплексный подход, предложенный в работе, направленный на получение упругих свойств в β -титановых сплавах. Сочетание режимов НТМО и предложенных вариантов легирования для сплавов на основе системы Ti-Nb-Zr позволяют получить оптимальные механические свойства изделий из титановых сплавов, требуемые в медицинских имплантатах. В работе предложен аналитический метод прогнозирования упругих характеристик β -титановых сплавов, с помощью которого можно оценить возможность применения сплава для изготовления медицинских имплантатов.

По теме диссертации опубликовано десять статей, из них три статьи - в международных журналах индексируемых в базах данных в Web of Science и Scopus. Предложенные в работе химический состав сплава и режимы обработки прошли успешное опытное опробование в производственных и клинических условиях, что подтверждается актом внедрения от ООО «Предприятие «Сенсор» и актом использования от филиала акционерного общества «ЦИТО» имени академика Г.А. Илизарова.

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации и опубликованным работам.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. При определении значения модуля упругости при наноиндентировании величина выбранной нагрузки может оказать влияние на измерения. Учитывалось ли влияние нагрузки на значения модуля упругости при наноиндентировании? С учетом каких факторов была выбрана нагрузка в 9 Н при наноиндентировании?

2. Коэффициент Пуассона в работе рассчитан для однофазных β -титановых сплавов. Каковы ограничения на применение предложенной методики наноиндентирования при определении модуля упругости в сплавах, в которых присутствуют другие фазы, например после старения?

3. Целью работы является выбор оптимального состава сплава для применения в качестве материала для металлических имплантатов, а также выбор режимов его обработки для формирования оптимальных упругих и механических свойств сплавов. В самой работе в основном обсуждаются упругие свойства материала, механическим свойствам уделено меньше внимания. Как будет влиять предложенные обработки (НТМО и старение) в рассматриваемых сплавах на другие механические свойства, например, пластичность и насколько другие механические свойства будут влиять на эксплуатационные характеристики?

4. Почему в качестве оценки износостойкости сплавов выбраны именно такие параметры соотношений H_{IT}/E_r и H_{IT}^3/E_r^2 ?

5. В чем причина отличия рассчитанных значений модуля упругости для НН и НП прутков для холоднокатанных сплавов на основе данных рентгеноструктурного анализа (таблица 4.1)? При этом те же самые значения модуля упругости для НН и НП, рассчитанные по методике наноиндентирования одинаковые.

Указанные замечания не затрагивают основных положений, вынесенных автором на защиту и не сказываются на общей положительной оценке диссертационной работы.

Заключение по работе

Диссертационная работа Коренева А.А. «Влияние легирования и термомеханической обработки на структурно-фазовое состояние и свойства биосовместимых β -сплавов титана на базе системы Ti-Nb-Zr» полностью удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ».

Представленная диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, связанную с изучением влияния химического состава и режимов термомеханической обработки на структуру, упругие и механические свойства биосовместимых

титановых сплавов, а ее автор, Коренев Александр Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Официальный оппонент:

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией прецизионных сплавов и интерметаллидов,
ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт физики металлов имени М. Н. Михеева»
Уральского отделения Российской академии наук.

Давыдов Денис Игоревич

Дата подписания отзыва: «14» мая 2024 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук

Почтовый адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

E-mail: davidov@imp.uran.ru

Телефон: 8(343) 378-37-11

