СБИТНЕВ Артем Геннадьевич

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Специальность 05.16.01 — «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет» (Московский Политех)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Овчинников Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: Егорова Юлия Борисовна

доктор технических наук, профессор,

Ступинский филиал ФГБОУ ВО «Московский

авиационный институт» (МАИ) (национального исследовательского университета), профессор кафедры

«Моделирование систем и информационные

технологии», г. Ступино

Пикалов Сергей Владимирович

кандидат технических наук, доцент,

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», доцент кафедры «Технологии

материалов и транспорта», г. Курск

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский государственный

технический университет гражданской

авиации», г. Москва

Защита состоится «26» декабря 2020 г. в 10 час 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.105.13, созданного на базе ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д.94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д.94 и на сайте http://www.swsu.ru.

Автореферат разослан «_____» ноября 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета к.т.н., доцент

А.Ю. Алтухов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современная судостроительная и авиационная отрасли промышленности предъявляют высокие требования к надежности как эксплуатируемых конструкций и оборудования, так и к применяемым материалам, эксплуатирующимся в коррозионно-агрессивных средах, при повышенных температурах и на изнашивание. При этом ресурс эксплуатации деталей в условиях трения обеспечивают финишные методы обработки, формирующие состояние поверхностного слоя деталей.

Лидирующее положение титана и его сплавов как коррозионностойких материалов в настоящее время неоспоримо. Однако, несмотря на высокие механические свойства в сочетании с небольшой плотностью и хорошей коррозионной стойкостью, широкому применению титана и его сплавов в качестве конструкционных материалов для подвижных деталей машин и механизмов препятствует высокая склонность к схватыванию и образованию задиров при работе на трение скольжения. Даже в условиях подачи обильной смазки это положение не изменяется.

Это обуславливается в первую очередь сравнительно высоким коэффициентом трения по титану (0,5). При скольжении титана по поверхности других, более твердых материалов, коэффициент трения первоначально является низким, но затем быстро повышается и достигает 0,9 вследствие того, что титан налипает на поверхность этих металлов.

Поэтому актуальным является модифицирование структуры поверхностного слоя титановых сплавов.

Анализ литературных источников, свидетельствуют о том, что перспективными методами изменения структуры поверхностного слоя высоконагруженных шарнирных соединений являются вакуумные ионноплазменные технологии высоких энергий. Обработка поверхности металлов и сплавов ионными пучками позволяет модифицировать структуру поверхностного слоя и изменить его свойства.

Имплантация поверхности титана и его сплавов ионами различных металлов позволяет управлять химическим и фазовым составом приповерхностных слоев различных изделий, т.е. проводить легирование различными элементами в необходимых количествах, что не всегда достижимо традиционными методами.

В подавляющем большинстве случаев используется имплантация ионами газов — азота, аргона, водорода. Имплантация ионами металлов и происходящие структурные и фазовые изменения в поверхностном слое титановых сплавов изучены в меньшей степени.

В этой связи, весьма актуальным является исследование влияния полиионной имплантации ионов металлов на структуру и свойства поверхностного слоя титанового сплава BT20, а также разработка соответствующей технологии для повышения эксплуатационных свойств нагруженных шарнирных соединений в конструкции летательных аппаратов нового поколения.

К наиболее передовым технологиям создания на поверхности деталей из конструкционных сталей слоев и покрытий с заданными свойствами относятся комбинированные технологии обработки поверхности, включающие последовательное или одновременное модифицирование структуры поверхностного слоя различными методами.

Достичь эффективного модифицирования структуры позволяет поверхностная пластическая деформация с использованием акустической энергии ультразвуковых колебаний. Самым выигрышным является метод обработки поверхности инструментом с наложением на статическую нагрузку ультразвуковых колебаний частотой 22 кГц.

При использовании ультразвукового воздействия на инструмент обеспечивается существенное уменьшение трения в контакте «инструмент-поверхность», и интенсифицируется процесс пластической деформации поверхностного слоя детали, что обуславливает сглаживание исходной шероховатости, упрочнение поверхностного слоя, создание благоприятных сжимающих напряжений.

Механизм модифицирования структуры титановых сплавов ультразвуковой обработкой (УЗО) заключается в сложных структурных и фазовых превращениях, обуславливающих увеличение дефектов кристаллического строения в поверхностном слое, в том числе плотности дислокаций и неравновесных вакансий, формирование субструктуры и мелкодисперсных выделений вторых фаз. Это дает основание рассматривать УО не только как самостоятельную операцию упрочнения поверхности сталей, конструкционных но и как одну из возможных операций комбинированной обработки поверхности, включающей ионную имплантацию (ИИ). Исследование механизмов воздействия такого рода комбинированной обработки на структуру и свойства поверхностных слоев титановых сплавов и возможности ее практического применения определяет актуальность данной работы.

Базовую основу составляют исследования, выполненные автором в Государственного контракта на выполнение работ рамках государственных ДЖУН Российской Федерации 11.3560.2017/ПЧ «Исследование закономерностей формирования микроструктуры и фазового состава поверхностного слоя конструкционных металлических материалов при облучении полиэнергетическим пучком ионов и разработка научных основ комбинированных технологий повышения эксплуатационных свойств изделий».

Степень разработанности темы. Большой вклад в решение проблемы повышения износостойкости титановых сплавов за счет обработки поверхностного слоя внесли ученые Шаркеев Ю.П., Смыслов А.М., Щипачев А.М., Крит Б.Л., Борисов А.П., Ковалевская Ж.Г., Тетельбаум Д.И., Molinari A., Straffelini T.B., Rack H.J. и др.

Цель диссертационной работы. Целью диссертационной работы является разработка технологии повышения износостойкости деталей из

титановых сплавов на основе комбинированного применения полиионной имплантации и ультразвукового воздействия.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1. Обосновать выбор сортового состава материала катода имплантера.
- 2. Установить влияние параметров режима полиионной имплантации на изменение микроструктуры поверхностного слоя.
- 3. Определить зависимость износостойкости образцов титанового сплава BT20 от исходного размера зерна в структуре.
- 4. Установить особенности формирования топографии поверхности титанового сплава BT20 в процессе упрочняющей ультразвуковой обработки и ионной имплантации.
- 5. Оценить влияние синхронной ультразвуковой обработки на структуру и свойства модифицированных слоев, полученных на разных режимах ионной имплантации.
- 6. Определить влияние вакуумного отжига после имплантации на структуру и износостойкость сплава BT20. Оценить температурную границу стабильности имплантированного слоя.

Научная новизна работы заключается:

- основе результатов выполненных экспериментальных исследований показано, что имплантация титанового сплава ВТ20 ионами меди и железа приводит к образованию в модифицированном поверхностном слое интерметаллидных частиц на основе соединений титана с медью и железом. которое сопровождается повышением скалярной дислокаций области, расположенной непосредственно модифицированным слоем.
- 2. Установлено, что нагрев титановой мишени в пределах от 300 до 500 °C при имплантации не оказывает влияния на толщину ионно-легированного слоя при имплантации. Заметное увеличение глубины проникания атомов меди и железа вглубь титановой мишени отмечается в диапазоне температур нагрева с 700–850 °C. Начиная с температуры нагрева мишени 900–920 °C толщина ионно-легированного слоя вновь начинает снижаться.
- 3. Ионная имплантация с синхронным ультразвуковым воздействием обеспечивает интенсификацию процесса проникания имплантируемых ионов в мишень на глубину до 960–1100 нм от поверхности мишени с достаточно равномерным распределением ионов меди и железа с концентрацией 35–44 ат. %.
- 4. Показано, что совместная имплантация сплава BT20 ионами меди и железа (катод имплантера из сплава 50%Cu–50%Fe) уменьшает интенсивность изнашивания почти в 3,8–4,2 раза, инициирует изменение механизма изнашивания с абразивного (для неимплантированного сплава BT20) на нормальный окислительный (для имплантированного сплава BT20).
- 5. Установлено, что фазовый состав модифицированного слоя титанового сплава BT20 после имплантации представляет собой α-Тi; β-Тi;

фазы Cu_3Ti и Fe_2Ti . После отжига при температуре 550 °C все изменения связаны с фазой Cu_3Ti . Данная температура является температурных порогом, превышение которого сопровождается снижением износостойкости имплантированного сплава BT20.

Практическая значимость работы:

Полученные результаты послужили основой для разработки комбинированной технологии обработки деталей шарнирных соединений из титанового сплава BT20 в конструкции летательного аппарата, основанной на полиионной имплантации с синхронным ультразвуковым воздействием при использовании в качестве материала имплантера сплава 50%Cu-50%Fe.

Результаты исследований включены в учебный процесс при преподавании дисциплины «Методы целенаправленного изменения свойств поверхности металлических материалов» в ФГБОУ ВО «Московский Политех», а также при руководстве научной работой бакалавров и магистрантов.

Разработаны технологические рекомендации по обработке деталей шарнирных соединений летательных аппаратов из титанового сплава BT20, которые прошли опробование на опытной партии.

Методология и методы исследования.

В работе использовались современные экспериментальные методы исследования строения и физико-механических свойств материалов со статистической обработкой полученных экспериментальных результатов. Оценка топографии проводилась на профилометрах 296, Micro Measure 3D Рентгеноструктурный анализ (PCA) осуществлялся дифрактометрах ДРОН-3,0 в CoKα-излучении и Shimadzu XRD 6000 в CuKαизлучении. Микроструктурный анализ выполнялся на оптических микроскопах "Neofot-32", Carl Zeiss Axio Observer, растровом электронном микроскопе SEM 515 «Philips» и просвечивающем электронном микроскопе ЭМ-125. На поверхности и в поперечном сечении образцов определялась твердость и микротвердость материала на приборах Виккерса, ПМТ-3, "Nano NHT-S-AX-000X. Tester" Триботехнические исследования проводились на комплексе PC-Controlled High азотированных слоев TH-S-HX000. **Temperature** Tribometer Для определения глубины проникновения имплантируемых ионов в мишень применялась установка вторичной ионной масс-спектрометрии "Physical Electronics" PHI-6600 SIMS System и Оже-спектрометр РНІ 700 фирмы "ULVAC-PHI Inc." (Япония).

На защиту выносятся следующие научные положения:

- 1. Ультразвуковая обработка поверхности титанового сплава BT20 до имплантации снижает глубину проникания имплантируемых ионов в облучаемый титановый сплав.
- 2. Ультразвуковая обработка имплантированного сплава BT20 повышает глубину проникания ионов в мишень до 850–1020 нм. При этом наблюдается уменьшение пиков концентраций ионов меди и железа с

концентрации 55 и 39 ат. % непосредственно после имплантации до 23 и 11 ат. % после ультразвуковой обработки.

3. Синхронная ультразвуковая обработка сплава BT20 в процессе имплантации способствует увеличению глубины проникания имплантируемых ионов в мишень до 2850–3200 нм при концентрации ионов меди и железа на уровне 48 и 30 ат. % соответственно.

На защиту также выносятся:

- 4. Экспериментально обоснованные режимы и материал катода имплантера, применение которых обеспечивает целенаправленной изменение структуры поверхностного слоя и повышение износостойкости деталей шарнирных соединений из титанового сплава BT20 в 3,8–4,2 раза.
- 5. Комбинированная технология ионной имплантации с синхронной ультразвуковой обработкой, позволяющая обеспечить формирование поверхностного слоя сплава BT20, у которого наблюдается сохранение стабильного значения коэффициента трения в диапазоне температур 20–350 °C.

Достоверность основных положений И научных обеспечивается большим экспериментальным материалом, полученным с использованием современной аппаратуры, надежных и независимых методов исследования, включающих электронную и оптическую микроскопию, рентгеноструктурный анализ, математической обработкой экспериментов, воспроизводимостью И согласованием результатов данными других исследований, полученными при сопоставимых условиях.

Личный вклад автора в работу. Все изложенные в диссертации результаты исследований получены при непосредственном участии автора. Автору принадлежат идеи в определении цели, анализа и интерпретации результатов, формулировке основных положений и выводов. Большинство экспериментальных исследований выполнено лично автором, под его руководством при непосредственном участии.

Реализация результатов работы: результаты диссертационной работы внедрены в опытный технологический процессупрочнения осей шарнирных соединений механизации крыла из сплава ВТ20 самолетов военного назначения. Результаты диссертационной работы использованы при выполнении исследований по Государственному контракту на выполнение работ для государственных нужд Российской Федерации 11.3560.2017/ПЧ «Исследование закономерностей формирования микроструктуры и фазового состава поверхностного слоя конструкционных металлических материалов при облучении полиэнергетическим пучком ионов и разработка научных основ комбинированных технологий повышения эксплуатационных свойств изделий».

Апробация работы. Результаты работы доложены и обсуждены на трех научно-практических конференциях, в том числе:16-я Международная научно-практическая конференция «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» в секции «Технологии упрочнения и

восстановления физико-механических свойств поверхности» (Санкт-Петербург, 17–20 апреля 2016 г.);Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в машиностроении: проблемы, задачи, решения» (Орск, 15-17 января 2012 г.); 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Современная техника и технологии: Проблемы, состояние, перспективы» (Рубцовск, 2015 г.); XXV Международная научно-практическая конференция "UROPEAN RESEARCH" (Москва, 2020 г.); Международная научно-техническая конференция "Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов", посвященная 150-летию со дня рождения академика А.А. Байкова (Курск, 2020 г.).

Публикации: основное содержание диссертации отражено в 10 научных работах, в том числе в 3 статьях в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и 1 статье в рецензируемом научном издании, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus. Получены 2 патента РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы (120 наименований), приложения и содержит 167 страниц машинописного текста, в том числе 71 рисунок и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определены направления исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов и положения, выносимые на защиту, представлены апробация работы, публикации и личный вклад соискателя, описаны структура и объем диссертации.

В главе 1 приведен анализ условий эксплуатации деталей шарнирных соединений, работающих в условиях сухого трения с приложением нагрузки к зоне контакта. Лидирующее положение титана и его сплавов как коррозионностойкого материала неоспоримо. Однако широкому применению титана и его сплавов в качестве конструкционного материала для нагруженных шарнирных соединений его высокая склонность к схватыванию и задиранию при работе на трение скольжения даже в условиях подачи обильной смазки. Это обуславливается в первую очередь сравнительно высоким коэффициентом трения по титану (0,5).

В силу сказанного финишные методы обработки, формирующие физико-химическое состояние поверхностного слоя деталей из титановых сплавов, работающих в условиях сухого трения играют в большинстве случаев решающую роль.

Представлен обзор отечественных и зарубежных работ о состоянии и перспективах развития процессов упрочнения поверхности титановых сплавов. Комбинированные технологии обработки поверхности,

включающие предварительное или одновременное модифицирование структуры поверхностного слоя, являются современными и передовыми методами создания на поверхности деталей из конструкционных сталей слоев и покрытий с заданными свойствами.

Самым выигрышным является метод обработки поверхности инструментом с наложением на статическую нагрузку ультразвуковых колебаний частотой 22 кГц. При использовании ультразвукового воздействия на инструмент обеспечивается существенное уменьшение трения в контакте «инструмент-поверхность», и интенсифицируется процесс пластической деформации поверхностного слоя детали, что обуславливает сглаживание исходной шероховатости, упрочнение поверхностного слоя, создание благоприятных сжимающих напряжений.

Механизм модифицирования титана ультразвуковой обработкой (УЗО) заключается в сложных структурных и фазовых превращениях, обуславливающих увеличение дефектов кристаллического строения в поверхностном слое, в том числе плотности дислокаций и неравновесных вакансий, формирование субструктуры и мелкодисперсных выделений вторых фаз.

Это дает основание рассматривать УФО не только как самостоятельную операцию упрочнения поверхности конструкционных сталей, но и как одну из операций комбинированной обработки поверхности, включающей ионную имплантацию (ИИ).

Имплантация поверхности титана и его сплавов ионами различных металлов позволяет управлять химическим и фазовым составом приповерхностных слоев различных изделий, т.е. проводить легирование различными элементами в различных количествах, что не всегда достижимо традиционными методами.

Целенаправленный выбор сорта ионов и режимов ионного облучения позволяет создать на поверхности титановых сплавов слои с низким коэффициентом трения и интенсивностью износа.

В этой связи, весьма актуальным является исследование влияния ионной имплантации одновременно двух сортов ионов на свойства поверхностного слоя титанового сплава BT20, разработка технологии для повышения эксплуатационных свойств нагруженных шарнирных соединений.

Кроме того, при разработке комбинированной технологии обработки поверхности титановых сплавов на основе ультразвуковой финишной обработки и ионной имплантации, следует учитывать структурное состояние модифицируемого сплава.

На основании выполненного анализа существующих технологий и процессов повышения эксплуатационных свойств деталей нагруженных пар трения из титановых сплавов, были сформулированы цель и задачи исследований.

В главе 2 приведено описание оборудования и методик исследований, применяемых в исследованиях.

УЗО образцов проводили с использованием ультразвукового комплекта, состоящего из генератора УЗГ 02/22 и магнитострикционного преобразователя—инструмента ПМС-063 с закрепленным в нем твердосплавным индентором с радиусом закругления 5 мм. Режимы УО: мощность генератора 200 Вт, амплитуда колебания индентора 10 мкм, усилие прижима индентора 75 Н. Окружная скорость вращения детали и подача инструмента при УЗО задавались с помощью применяемого станка.

Имплантация образцов из титанового сплава ВТ6 т его сварных соединений проводилась с помощью вакуумно-дугового импульсного ионного источника ИГМИ-50 при ускоряющем напряжении 30 кВ. Амплитуда тока ионного пучка составляла — 0,1...1 А, частота импульсов — 50 Гц при длительности 300 мкс. Остаточное давление в вакуумной камере составляло 8×10^{-4} Па. Температура нагрева образцов в процессе имплантации не превышала 80 °C. При имплантации формировался полиэнергетический пучок ионов.

В качестве материалов катода использовались сплавы системы несмешивающихся компонентов Cu–Fe с содержанием меди 50%. Катод представляет собой диск диаметром 45 мм толщиной 6 мм.

Ионная имплантация с одновременной ультразвуковой обработкой проводилось на модернизированной установке ДИАНА, дополненной комплектом оборудования, включающим ультразвуковой генератор УЗГ-10-22 с магнитострикционным преобразователем ПМС-15А-18 и волноводом-концентратором.

Для определения триботехнических характеристик (линейный и весовой износ, коэффициент трения) применялась машина трения, Tribometer, CSM Instruments, Швейцария, испытания проводились в соответствии с международными стандартами ASTM G99–959, DIN50324 и ISO 20808.

Металлографический и фрактографический анализ изломов образцов после усталостных испытаний проводился с помощью оптического микроскопа «Carl Zeiss» при увеличении от х100 до х1000 раз и электронного сканирующего микроскопа «Carl Zeiss» EVO 50 с увеличением от 30 до 20000 крат (разрешающая способность 1 нм). С помощью электронного сканирующего микроскопа «Carl Zeiss» EVO 50 был выполнен количественный анализ состава материалов катодов имплантера, определены концентрации элементов.

Концентрационные профили элементов исследовались в центре коллективного пользования «Металловедение и металлургия» НИТУ МИСиС на установке «Physical Electronics» PHI-6600 SIMS System.

Исследование нанотвердости H и модуля упругости E проводили с помощью нанотвердомера Nano-HardnessTester NHT, CSM.

Структуру и фазовый состав исследовали методом просвечивающей электронной микроскопии на приборе Tecnai G2 20, фирмы FEI, US при 200 кВ с катодом из гексаборида лантана, имеющем разрешение 0,19 нм. Изготовление фольг осуществлялось при помощи фокусированного ионного пучка (FIB, Focused Electron Beam) на оборудовании FEI Quanta 3D FEG.

Рентгеноструктурные исследования осуществлялись с помощью дифрактометра ARL XTRA (Швейцария), представляющего собой полноразмерный порошковый дифрактометр θ - θ геометрии с радиусом гониометра 260 мм и источником – узкофокусной трубкой мощностью 2200 Вт с медным анодом ($\lambda_{K\alpha} = 1,5418$ A).

Концентрационные профили элементов исследовались в центре коллективного пользования «Металловедение и металлургия» НИТУ МИСиС на установке «Physical Electronics» PHI-6600 SIMS System.

В главе 3 приведены результаты исследования влияния ионной имплантации на структуру и свойства поверхностного слоя на титанового сплава BT20. Флюенс имплантации задавали на трех уровнях: 1•10¹⁷; 5•10¹⁷; 1•10¹⁸ см⁻². После облучения полиионным пучком образцы исследовались на Оже-спектрометре и методом ВИМС.

Установлено, что при имплантации с флюенсом $5 \cdot 10^{17}$ см⁻² глубина проникновения ионов меди и железа примерно одинакова и находится на уровне 320–400 нм. Пик концентрации внедряемых ионов расположен на глубине 28–35 нм (рисунок 1). По мере увеличения флюенса расположение максимума концентрации внедряемых ионов сдвигается в сторону глубинных слоев мишени при общем увеличении толщины ионномодифицированного слоя (таблица 1).

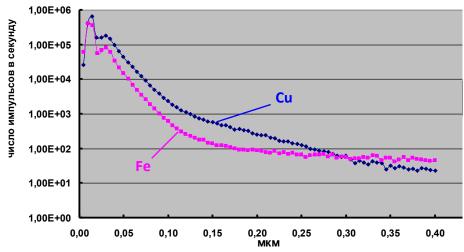


Рисунок 1 — Распределение ионов железа и меди в титановом сплаве BT20 при имплантации с флюенсом 5•10¹⁷ ион/см²

Ионная имплантация привела к повышению значений микротвердости модифицированного слоя с 3700 до 4920 ГПа.

Под действием ионной имплантации на сплаве BT20 отмечено формирование поверхностного слоя, который состоит из собственно ионно-

модифицированного слоя и подслоя мишени, с увеличенной скалярной плотностью дислокаций. В исходном состоянии до имплантации плотность дислокаций составляла $4,8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. По мере увеличения значения флюенса плотность дислокаций в подслое возрастает и достигает своего максимума при флюенсе $1 \cdot 10^{18}$ ион/см² $-1,2 \cdot 10^{10}$ см⁻².

Исследования по имплантации меди и железа в титановый сплав ВТ20 проводилось при нагреве мишени в диапазоне температур 300–900 °С. Экспериментально установлено, что при температурах облучения в пределах от 300 до 500 °С практически отсутствует диффузия меди в глубинные слои мишени и превалирует осаждение примесных атомов меди и железа в виде поверхностного подслоя на мишени.

Заметное увеличение глубины проникания атомов меди и железа вглубь титановой матрицы начинается при температуре нагрева мишени начиная с 700 °C.

Таблица 1 — Толщина ионно-модифицированного слоя сплава BT20 при имплантации с различной величиной флюенса

Значение	Глубина с ма	Общая толщина		
флюенса при	концентрацией вн	ионно-		
имплантации, см-	H	модифицированного		
2	Fe	Cu	слоя, нм	
1•10 ¹⁷	18–20	22–25	180–220	
5•10 ¹⁷	28–30	32–35	320–400	
1•10 ¹⁸	28–30	42–45	550–600	

На рисунке 2 приведены зависимости потери массы образцов от пути трения. Данные зависимости, как для имплантированных образцов, так и для контрольных имеют характер близкий к линейному.

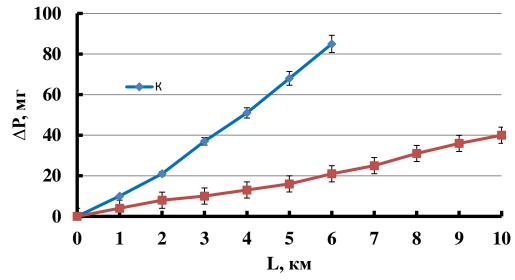


Рисунок 2 — Зависимости потери веса образцов титанового сплава BT20 от пути трения: К — не имплантированный образец; ИИ — имплантированный образец, доза имплантации 5•10¹⁷ см⁻²

В случае испытаний контрольных (неимплантированных) образцов сплава BT20 на поверхности трения формируются островковые структуры, имеющие плоскую поверхность. Высокая износостойкость сплава BT20 сохраняется и после изнашивания тонкого имплантированного слоя.

Для исследования влияния ионной имплантации на остаточные напряжения в поверхностном слое титанового сплава ВТ20 использовались плоские листовые образцы толщиной 1 мм и шириной 10 мм. Образцы перед имплантацией подвергались отжигу при 750 °С в вакуумной печи для снятия напряжений, которые возникали в процессе прокатки листов. После указанной обработки остаточные напряжения в поверхностном слое составили 85–90 МПа.

На рисунке 3 представлена зависимость остаточных напряжений от дозы имплантации. Анализируя представленные графические зависимости изменения остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое можно сделать вывод, что при увеличении флюенса имплантации величина остаточных напряжений возрастает, а при значении флюенса имплантации $5 \cdot 10^{18}$ см $^{-2}$ существенно снижаются. Эффект снижения остаточных напряжений при флюенсе $5 \cdot 10^{18}$ см $^{-2}$ можно связать с образованием новых фаз в имплантированном слое.

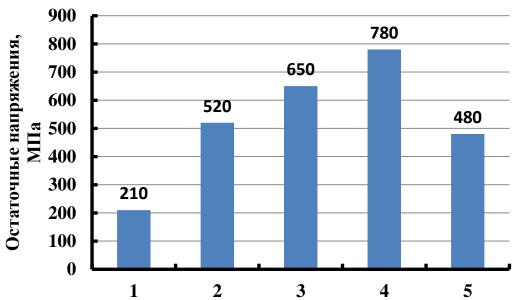


Рисунок 3 — Зависимость изменения остаточных сжимающих макронапряжений о'ост (МПа) поверхностного слоя титанового сплава ВТ20 от флюенса имплантации (катод сплав Cu–Fe):

$$1 - 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$$
; $2 - 10^{17} \text{ cm}^{-2}$; $3 - 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$; $4 - 10^{18} \text{ cm}^{-2}$; $5 - 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$

Помимо параметров режима имплантации износостойкость облученных образцов сплава BT20 существенно зависит от исходного размера зерна в сплаве. В таблице 2 приведены значения потери веса

неимплантированных образцов сплава ВТ20 от пути трения в зависимости от исходного размера зерна.

Таблица 2 — Зависимости потери веса образцов сплава BT20 с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой от пути трения

					1 2	<u> </u>			
Размер	Потеря веса образца (мг) от пути трения (км)								
зерна,	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
МКМ									
385	5,3	10,1	12,4	23,5	29,9	37,4	42,3	52,2	61,7
26,4	0,88	1,3	4,8	11,1	17,3	23,4	30,1	33,6	41,2
0,52	8,9	17,8	27,8	33,6	40,1	51,1	60,3	70,7	83,2

Полученные результаты показывают, что для повышения износостойкости следует до имплантации создавать в сплаве BT20 структуру с размером зерна на уровне 25–28 мкм. Ультрамелкозернистая структура (с размером зерна менее 1 мкм) по износостойкости существенно уступает как крупнозернистому материала, так и материалу с мелкозернистой структурой.

В главе 4 результаты исследований комбинированной технологии, включающей ультразвуковое воздействие И ионную имплантацию. Ультразвуковое воздействие на поверхность титановой мишени осуществляли трех вариантах: перед имплантацией, процессе имплантации (синхронная обработка) и после имплантации.

Результаты трибологических испытаний образцов сплава BT20, подвергнутых комбинированной обработке, в зависимости от ее варианта показывают различия в величине износа при базовом значении пути трения, равном 6 км. Полученные данные представлены на рисунке 4.

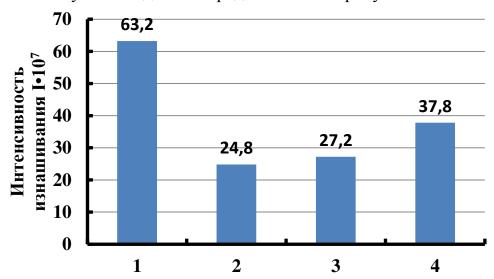


Рисунок 4 — Интенсивность изнашивания титанового сплава ВТ20 в зависимости от варианта комбинированной обработки: 1 — ионная имплантация; 2 — ультразвуковая обработка перед имплантацией; 3 — синхронная ультразвуковая обработка с имплантацией; 4 —ультразвуковая обработка после имплантации

Отмечается наименьшая интенсивность изнашивания для вариантов комбинированной обработки УЗО + ИИ, а также синхронная УЗО с ИИ. Результаты исследования структуры и распределения внедренных элементов в зависимости от варианта комбинированной обработки приведены таблице 3.

Таблица 3 – Параметры поверхностного слоя титанового сплава BT20 в

зависимости от варианта комбинированной обработки

Вариант	Максим	иальная	h, нм	Н, мкм	Į.		В	
обработки	концентрация, ат.%		·		THOCT, cM^{-2}	bie Goct,	трения	.ное е ости,
	Cu	Fe			Скалярная плотность дислокаций, см ⁻²	Остаточные напряжения о _с МПа	Коэффициент f	Максимальное значение микротвердости,
ИИ	35	22	350	6,7	6,4•10 ¹¹	650	0,24	4920
УЗО+ИИ	55	68	180	38,7	$3,5 \cdot 10^{12}$	890	0,13	5980
УЗО в	44	35	950	66,3	4,9•10 ¹²	840	0,16	5610
процессе ИИ								
ИИ+УЗО	26	18	540	36,2	$2,7 \cdot 10^{12}$	770	0,19	5330

Наиболее благоприятное сочетание параметров поверхностного слоя при комбинированной обработке достигается при двух вариантах ее осуществления — при синхронной УЗО, а также при ультразвуковой обработке после имплантации. Вариант УЗО+ИИ может быть эффективным для получения ионно-модифицированных слоев, способствующих повышению коррозионной стойкости сплава.

морфологии По структуру дуплексной онжом отнести К (бимодальной), поскольку α-фаза структурными представлена ДВУМЯ составляющими глобулярными частицами И пластинами. установлено, что глубина наклёпа изменяется под действием УЗО и составляет 140...160 мкм.

В процессе изучения электронно-микроскопических снимков приповерхностного слоя титанового сплава BT20, полученных путём просвечивания пучком электронов утонённых фольг толщиной 100 нм в масштабе 500...50 нм, можно прийти к выводу, что УЗО позволяет получить измельчённую наноструктуру на поверхности металла (рис.6).

При исходной плотности дислокаций $\rho_{D\,\text{ucx}} \approx 4.8 \times 10^9 \; (\text{cm}^{-2})$ в результате пластического деформирования плотность дислокации увеличилась на порядок.

На основании результатов исследований можно сделать вывод о том, что в результате ультразвуковое воздействие в указанном диапазоне режимов обработки титанового сплава BT20 микроструктура его поверхностного слоя

значительно упрочняется за счет измельчения зерен и повышения плотности дислокаций. Комбинированная обработка не меняет фазового состава в пределах модифицированного слоя титанового сплава ВТ20. Наблюдается изменение соотношения фаз и размеров зерен сплава.

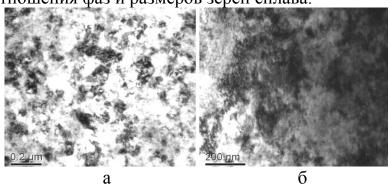


Рисунок 6 — Наноструктура приповерхностного слоя (толщина 100 нм) титанового сплава BT20 после (а) и до (б) ультразвуковой обработки

По данным ПЭМ, в процессе обработки диффузия меди проходит в кристаллической решетке α-фазы и в ее зернах образуются выделения мелкодисперсных частиц интерметаллидов типа Ti₂Cu, TiCu, Ti₂Cu₄ и других. За счет возникновения внутренних микронапряжений в кристаллической решетке основной фазы и выделений дисперсных частиц интерметаллидов микротвердость поверхности возрастает.

В главе 5 представлены результаты исследования влияния вакуумного отжига и повышенной температуры испытаний на трибологические характеристики титанового сплава BT20, подвергнутого комплексной обработке.

Установлено, что при комнатной температуре величина износа образца, обработанного по режиму ИИ+УЗО ниже, чем у неимплантированного образца (рис. 7). Увеличение температуры нагрева образцов в ходе трибологических испытаний приводит к увеличению величины износа неимплантированного титана в 2,0–2,4 раза, в то время как величина износа имплантированного образца титана практически не изменяется.

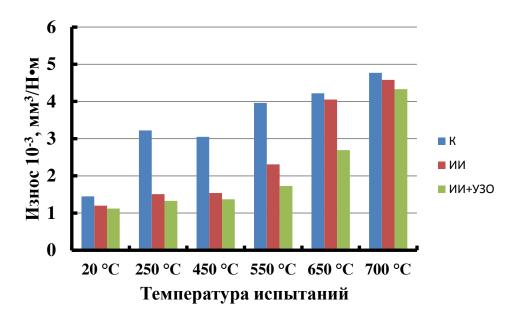


Рисунок 8 — Зависимость величины износа от температуры испытаний ионнолегированных и исходного образцов титанового сплава BT20

Начиная с температуры нагрева 550 °C отмечается рост величины износа как обработанных, так и неимплантированных образцов, и при температуре 650 °C значения износа практически сравниваются. При этом образцы подвергнутые комплексной обработке по варианту ИИ+УЗО демонстрируют более высокую износостойкость.

Изучение структурно-фазового состояния ионно-легированных слоев показало, что при всех вариантах комбинированной обработки в его поверхностных слоях формируются интерметаллидные фазы состава Ti_2Cu , Ti_2Cu_3 и $TiFe_2$, средний размер частиц которых составляют 20-70 нм. Наряду с интерметаллидными фазами происходит формирование твердого раствора меди в титане. В поверхностных слоях сплава BT20 при ионной имплантации кроме соединений системы образуются также оксиды титана.

Проведение вакуумного отжига образцов титанового сплава BT20, подвергнутых комплексной обработке, в диапазоне температур 350-550 °C приводит к изменениям в структуре ионно-модифицированного слоя. Указанные изменения связаны с фазой Ti_2Cu , а также проявляется обособленный пик Ti_2Cu_3 . После термического отжига при температуре 550 °C (2 ч) в вакууме, концентрация кислорода в ионно-имплантированном слое уменьшается. а его пик смещается в глубину поверхностного слоя.

Вакуумный отжиг способствует объединению частиц формируемых интерметаллидных фаз в конгломераты в ионно-легированном слое и образованию на его поверхности пленки, содержащей медь, кислород и углерод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1. Показано, что полиионная высокодозная имплантация титанового сплава BT20 с использованием катода из сплава 50%Cu-50%Fe приводит к модифицированию структуры поверхностного слоя, приводящих к уменьшению скорости изнашивания практически в 3,8-4,2 раза.
- 2. Установлено, что в результате ионной имплантации в диапазоне изменения флюенса облучения (10^{17} – 10^{18} см⁻²) титанового сплава ВТ20 его поверхностный слой упрочняется благодаря уменьшению размера интерметаллидных частиц, формирования интерметаллидных соединений титана с медью и железом, повышению плотности дислокаций. Слой с модифицированной структурой включает собственно имплантированный слой и слой с измененной дислокационной структурой, толщиной порядка 5–10 мкм со средним размером наночастиц вблизи поверхности 50–100 нм.
- 3. Показано, что проведенная до имплантации ультразвуковая обработка поверхности титанового сплава BT20 способствует образованию приповерхностной зоны интенсивной пластической деформации глубиной до 140 мкм. По мере удаления от этой зоны вглубь металла эффект упрочнения обусловлен присутствием полей упругих напряжений.
- 4. Комбинированная обработки, включающая технология предварительную УЗО перед ионной имплантацией, способствует повышению концентрации внедряемых ионов меди и железа до 55 и 68 ат.% соответственно. В поверхностном слое наводятся сжимающие напряжения на уровне 890 МПа и повышается микротвердость титанового сплава ВТ20. В итоге обеспечивается снижение коэффициента трения до уровня 0,14-0,16 и величины весового износа.
- 5. Показано, что в случае УЗО после ионной имплантации наблюдается увеличение глубины проникания ионов меди и железа в мишень до 520–550 нм. Отмечается снижение концентрации ионов меди и железа в мишени по толщине ионно-имплантированного слоя. Уровень остаточных напряжений снижается в этом случае до 770 МПа, а коэффициент трения составляет 0,19–0,21.
- 6. Комбинированная технология обработки, основанная на ионной имплантации с синхронной ультразвуковой обработкой, обеспечивает интенсификацию процесса проникновения имплантируемых ионов в мишень. Комбинированная обработка по такому варианту приводит к образованию субмикрокристаллической структуры с высокой плотностью дислокаций 4,9•10¹² см⁻², а также высокой плотности дефектов кристаллического строения. Отмечается формирование упрочненных слоев большой толщиной с проникновением имплантируемых ионов на глубину до 960–1100 нм от поверхности мишени с достаточно равномерным распределением ионов меди и железа с концентрацией 35–44 ат. %.

- 7. Показано, что комбинированная технология, включающая УЗО и ионную имплантацию, обеспечивает низкий износ титанового сплава ВТ20 при трибологических испытаниях в условиях сухого трения при температурах 20–550 °C. Повышение механических свойств титана обусловлено формированием наноразмерных частиц интерметаллидных фаз.
- 8. Разработаны технологические рекомендации по упрочнению деталей нагруженных шарнирных соединений, работающих в условиях сухого трения, из титанового сплава BT20, комбинированной технологией обработки на основе ионной имплантации с синхронным ультразвуковым воздействием, которые прошли апробацию на опытной серии деталей и могут быть рекомендованы к применению в перспективных изделиях.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих публикациях

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

- 1. Овчинников В.В., Учеваткина Н.В., Жданович О.А., **Сбитнев А.Г.** Остаточные напряжения в поверхностном слое сплава ВТ6 после полиионной имплантации. // Наноинженерия. 2015. №7. С.18-23.
- 2. Овчинников В.В., Учеваткина Н.В., Жданович О.А., **Сбитнев А.Г.** Остаточные напряжения в поверхностном слое титанового сплава ВТ6 после ионной имплантации с большой дозой. // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. №6. С.27-33.
- 3. Овчинников В.В., Учеваткина Н.В., Жданович О.А., **Сбитнев А.Г.** Комбинированная технология повышения износостойкости деталей из титанового сплава ВТ6 на основе ионной имплантации. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. N = 6. C.15 = 22.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

4. Ovchinnikov V.V., Uchevatkina N.V., Borovin Yu.M., Zhdanovich O.A., **Sbitnev A.G.** Stressed State of the Surface Layer of VT6 Titanium Alloy after Copper and Lead Ion Implantation. // Indian Journal of Science and Technology, 2015, December, vol. 8 (36), p. 1-6.

Публикации в других изданиях

- 5. Ярных А.А., Овчинников В.В., **Сбитнев А.Г.** Зарядовое и сортовое распределение ионов в пучке при использовании комбинированных катодов Си–Рb для имплантации. "Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика". Часть 2. Материалы международной научнопрактической конференции. 15-18 апреля 2014 г. С.241-246.
- 6. Учеваткина Н.В., Овчинников В.В., **Сбитнев А.Г.**, Жданович О.А. Ионная имплантация титанового сплава ОТ4 и его сварных соединений. Материалы 19-й Международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика». Часть 2 Санкт-Петербург, 16–19 апреля 2017 г. С.293–299.

7. **Сбитнев А.Г.** Влияние предварительной ультразвуковой обработки поверхности титанового сплава BT20 на структуру и толщину имплантированного слоя. // Сборник статей XXV Международной научнопрактической конференции, в 2-х частях; том. 1. UROPEAN RESEARCH, ID 42375432, ISBN 978-5-00159-275-4, — C.53-57.

Результаты интеллектуальной деятельности

- 8. Патент РФ на полезную модель №159410. Устройство для ионной имплантации конструкционных материалов в напряженном состоянии / В.В. Овчинников, Н.В. Учеваткина, Ю.М. Боровин, О.А. Жданович, А.Г. Сбитнев; Приоритет 29.09.2015; Зарегистрировано 15.01.2016 г. № 2015140933; Патентовладелец МАМИ
- 9. Патент РФ на полезную модель №172049. Катод для ионной имплантации поверхности деталей из конструкционных материалов. / В.В. Овчинников, Н.В. Учеваткина, О.А. Жданович, **А.Г. Сбитнев**; Приоритет 24.06.2016; Зарегистрировано 27.06.2017 №2016125195; Патентовладелец ФГБОУ ВО "Московский политех"