

На правах рукописи



Самойленко Виталий Вячеславович

**СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И
КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ
СЛОЕВ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫХ
ТАНТАЛ-ЦИРКОНИЕВЫХ СМЕСЕЙ НА ТИТАНОВЫЕ
СПЛАВЫ**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

- Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Голковский Михаил Гедалиевич
- Официальные оппоненты: Будовских Евгений Александрович,
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Сибирский государственный индустриальный университет, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора
В.М. Финкеля
- Коржова Виктория Викторовна,
кандидат технических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук, научный сотрудник
лаборатории физики наноструктурных функциональных материалов
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

Защита состоится «13» декабря 2018 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.13 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Новосибирского государственного технического университета,
http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=17041

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тюрин Андрей Геннадиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современное развитие химической и ядерной промышленности выдвигает повышенные требования к материалам, работающим в условиях постоянного воздействия агрессивных сред. Материалы подобного типа должны обладать высокими механическими характеристиками, коррозионной стойкостью и технологичностью. К материалам, удовлетворяющим данному комплексу свойств можно отнести нержавеющие стали и титановые сплавы. Использование нержавеющих сталей оправдано в слабых и разбавленных растворах коррозионных сред или в тех случаях, когда условия эксплуатации не подразумевают значительный нагрев агрессивного раствора. Однако их применение значительно ограничивается в более концентрированных растворах и при повышенных температурах. Для обеспечения необходимого уровня коррозионной стойкости в подобных условиях рациональным является использование титановых сплавов. Титановые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью в большинстве агрессивных сред и промышленных растворов. Кроме того, благоприятное соотношение таких свойств, как высокая пластичность и удельная прочность является одним из важных критериев при проектировании оборудования с высокой степенью надежности.

Существенным недостатком титановых сплавов является низкая коррозионная стойкость в особо агрессивных средах. Титан и его сплавы подвержены значительному коррозионному разрушению в кипящих растворах сильных кислот, что ограничивает их применение в данных условиях. Поэтому повышение кислотостойкости титановых сплавов является актуальной научной задачей, имеющей как теоретическое, так и прикладное значение.

Одним из путей решения данной проблемы является легирование титановых сплавов элементами более стойкими к агрессивным средам, такими как тантал и цирконий. Это позволяет значительно снизить скорость коррозии сплава в агрессивных средах за счет формирования более стойких и плотных пленок на поверхности материала в процессе пассивации. Недостатком такого легирования является высокая стоимость компонентов, значительное увеличение плотности сплава за счет присутствия тантала, а также достаточно трудоемкая технология получения больших слитков.

Рациональным решением в данном случае является нанесение защитных слоев, содержащих тантал и цирконий, на поверхность титановых заготовок. Это позволяет защитить поверхность от агрессивного воздействия среды, а также сохранить высокий комплекс механических характеристик титановой основы. Эффективным методом создания слоев и покрытий является вневакуумная электронно-лучевая наплавка. Реализуется данная технология с использованием промышленных ускорителей электронов ЭЛВ-6 разработанных в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. Ускорители данной серии оборудованы специальным выпускным устройством, обеспечивающим вывод высокоэнергетического пучка электронов непосредственно в воздушную атмосферу.

До настоящего времени повышение коррозионной стойкости титановых заготовок достигалось электронно-лучевой наплавкой поверхностных сплавов системы $Ti-Ta$ и $Ti-Ta-Nb$. В обоих случаях наносимая порошковая смесь поми-

мо легирующих элементов и флюса содержала смачивающий компонент – титан. В данной работе предлагается полностью заменить порошок титана на цирконий, который обладает близкими свойствами, однако характеризуется более высокой стойкостью к коррозии. Кроме того, в литературе практически отсутствуют данные количественной оценки коррозионной стойкости сплавов *Ti-Ta-Zr* в кипящих растворах сильных кислот различной концентрации, получение которых должно позволить устранить существующие пробелы, а также установить область наиболее благоприятной эксплуатации. В связи с этим, представленная диссертация имеет важное теоретическое и прикладное значение, а сама работа направлена на решение актуальной научной проблемы.

Диссертационная работа выполнена при поддержке ФЦП «Разработка технологии изготовления особо коррозионностойких реакторов химических производств, работающих с использованием сильных кислот при повышенных температурах», соглашение с Минобрнауки № 14.604.21.0135 (уникальный идентификатор проекта *RFMEFI60414X0135*), «Разработка и создание линейки промышленного роботизированного оборудования на основе мультитрусовой электронно-лучевой технологии для высокопроизводительного аддитивного производства крупноразмерных металлических и полиметаллических деталей, узлов и конструкций для ключевых отраслей РФ», соглашение № 14.610.21.0013 (уникальный идентификатор проекта *RFMEFI61017X0013*), а также проекта РФФИ «Фундаментальные основы создания кислотостойких сплавов системы *Ti-Ta-Zr* с использованием высококонцентрированного пучка электронов, выведенного в воздушную атмосферу» номер 16-33-00900 мол_а.

Степень разработанности темы исследования

Титановые сплавы, в последнее время, широко используются в качестве основного конструкционного материала при изготовлении деталей и узлов ответственного назначения. Этот металл привлекает внимание отечественных и зарубежных ученых из различных областей науки. Показателем повышенного интереса к данному направлению является большое число работ, опубликованных по структуре и свойствам титановых сплавов. Тем не менее, работ, направленных на повышение коррозионной стойкости поверхности титановых изделий значительно меньше, большая часть их посвящена проблемам нанесения покрытий и слоев с использованием лазера или плазмы. Эти источники энергии обладают малой проникающей способностью в материалы, в силу чего, практически, являются поверхностными источниками тепла. При этом создание антикоррозионных слоев с применением релятивистского пучка электронов практически не рассматривается. Единичные работы, выполненные в Новосибирском государственном техническом университете совместно с Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН показали высокую эффективность метода вневакуумной электронно-лучевой наплавки коррозионностойких слоев системы *Ti-Ta* и *Ti-Ta-Nb* на поверхность титановых пластин. По этой причине, целесообразным является проведение дополнительных исследований с использованием других наносимых составов содержащих элементы с высоким сопротивлением к коррозии. Это позволит получить новые данные о структуре, механических и коррозионных свойствах титановых сплавов, и в результате расширить область их применения.

Цель диссертационной работы заключается в повышении коррозионной стойкости технически чистого титана марки VT1-0 и титанового сплава VT14 путём поверхностного легирования заготовок танталом и цирконием с использованием электронного луча, выведенного в воздушную атмосферу.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Определение влияния режимов электронно-лучевой обработки, а также состава порошковых смесей на макроструктуру формируемых слоев.

2. Исследование особенностей формирования микроструктуры поверхностных слоев, содержащих тантал и цирконий, методами оптической, электронной микроскопии и рентгенофазового анализа.

3. Определение механических свойств сплавов системы *Ti-Ta-Zr*, сформированных методом электронно-лучевого легирования, в условиях статического и динамического нагружения.

4. Оценка коррозионной стойкости полученных слоев в кипящих растворах сильных кислот. Определение влияния концентрации тантала и циркония в наплавленном слое на скорость коррозии и ее характер.

Научная новизна

1. Показано, что цирконий может служить смачивающим компонентом при электронно-лучевой наплавке порошка тантала на поверхность титановых заготовок. Это позволяет повысить суммарную степень легирования коррозионностойкими элементами вплоть до 48 % *Ta* и 20 % *Zr* при двукратной наплавке. Высокая степень легирования обеспечивает многократное увеличение коррозионной стойкости поверхностного слоя в кипящих растворах азотной, соляной и серной кислот. В частности, в кипящей серной кислоте стойкость наплавленного слоя сопоставима со стойкостью технически чистого тантала.

2. Установлено, что поведение сплавов с различным соотношением тантала и циркония, в кипящем концентрированном растворе азотной кислоты существенно отличается. Слои с высоким содержанием циркония (20...35 %) и относительно низким содержанием тантала (до 17 %) в начальный период интенсивно растворяются под действием агрессивной среды. Дальнейшая выдержка в агрессивной среде приводит к падению скорости коррозии в несколько раз, т.е. наблюдается пассивация поверхностного слоя. В то же время, для слоев с концентрацией тантала 31 % и более скорость коррозии остается низкой с самого начала испытаний и практически не изменяется со временем.

3. В кипящих растворах соляной и серной кислот для сплавов, полученных однократной наплавкой, наблюдаются следующие закономерности. Увеличение содержания тантала в слое приводит к повышению коррозионной стойкости только в разбавленных растворах кислот с концентрацией до 10 %. При концентрации кислот, превышающей 10 %, состав сплава не влияет на коррозионную стойкость. С повышением концентрации соляной кислоты при сохранении степени легирования поверхностного слоя наблюдается снижение как абсолютной, так и относительной коррозионной стойкости всех полученных слоев. В кипящей серной кислоте коррозионная стойкость наплаваемых материалов по отношению к титану практически не зависит от концентрации кислоты.

4. Поверхностное легирование электронным лучом титановых заготовок танталом и цирконием приводит к формированию слоя, обладающего высокой твердостью, прочностью и износостойкостью. Численные значения приведенных характеристик возрастают более чем в 2 раза по сравнению с аналогичными характеристиками для технически чистого титана.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. В процессе выполнения работы были установлены режимы вневакуумной электронно-лучевой наплавки тантал-цирконий содержащих порошковых смесей, обеспечивающие формирование на титановых образцах бездефектных поверхностных слоев большой толщины. Подобранные режимы могут быть использованы при создании защитных антикоррозионных слоев на крупногабаритных листовых заготовках.

2. Цирконий может наплавляться на титан без использования смачивающей компоненты (титана) в исходной порошковой насыпке. Кроме того, цирконий сам может служить смачивающей компонентой для тантала. Исключение титана из наплавочной смеси при наплавке *Ta* совместно с *Zr* позволяет достичь более высокой степени легирования в наплавленных слоях, чем при легировании *Ta* и/или *Nb*, требующем использования титана в качестве смачивающей компоненты. Указанное повышение степени легирования обеспечивает увеличение коррозионной стойкости наносимого слоя.

3. Для промышленного применения в растворах кипящих кислот можно рекомендовать слой, содержащий 48 % *Ta* и 20 % *Zr*, полученный за два прохода электронного луча. Сплав позволяет на несколько порядков снизить скорость коррозии поверхности титана в кипящих растворах 5...40 % серной кислоты (до 0,1 мм/год) и 5...20 % соляной кислоты (до 0,2 мм/год). За год эксплуатации в кипящем растворе концентрированной азотной кислоты такой материал теряет слой толщиной всего 6 мкм, то есть растворяется в 30 раз менее интенсивно, чем титан.

4. Электронно-лучевой метод поверхностного легирования позволяет наносить защитные антикоррозионные слои не только на технически чистый титан, но и на конструкционные титановые сплавы, такие как ВТ14. В проведенных с участием автора экспериментах была подтверждена их высокая коррозионная стойкость при испытаниях материалов в ИЯФ СО РАН. На основании полученных данных в ООО «ИЯФ-ППТ» была разработана технология изготовления коррозионностойкого реактора. ИЯФ СО РАН при участии автора был получен патент на способ изготовления реактора, проведены успешные испытания его макета.

5. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноинженерия», а также при проведении исследований на Уникальной установке ИЯФ СО РАН «Экспериментальный стенд на базе промышленного ускорителя электронов ЭЛВ-6 по обработке материалов концентрированным электронным пучком, выпущенным в атмосферу (Стенд ЭЛВ-6)».

Личный вклад автора состоял в постановке задач, подготовке материалов и проведении экспериментов по наплавке, подготовке образцов для всех видов исследований и испытаний, анализе строения материалов, определении уровня механических и коррозионных свойств с последующим обобщением и сопоставлением полученных результатов.

Методология и методы исследования

Эксперименты по созданию тантал-цирконий содержащих слоев проводили на Уникальной установке «Экспериментальный стенд на базе промышленного ускорителя электронов ЭЛВ-6 по обработке материалов концентрированным электронным пучком, выпущенным в атмосферу (Стенд ЭЛВ-6)» в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук. Ускорители данной серии оборудованы специальным выпускным устройством позволяющим выводить пучок электронов непосредственно в воздушную атмосферу. Полученные материалы анализировались с использованием аналитического и испытательного оборудования, полностью соответствующего уровню современных научно-исследовательских лабораторий в области материаловедения. Изучение структурных особенностей поверхностно легированных заготовок проводилось с использованием оптического микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer Z1m*, растрового электронного микроскопа *Carl Zeiss EVO50 XVP*, оборудованного энергодисперсионным анализатором *X-ACT (Oxford Instruments)* и просвечивающего электронного микроскопа *FEI Tecnai G2 20 TWIN*. Анализ фазового состава наплавленных слоев проводили с использованием рентгеновского дифрактометра *ARL X'TRA*. Микротвердость полученных материалов оценивалась на приборе *Wolpert Group 402 MVD*. Прочность наплавленных слоев определялась на универсальном испытательном комплексе *Instron 3369*. Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре *Metrocom*. Для определения уровня коррозионной стойкости был специально собран испытательный стенд. Контроль потери массы образцов в ходе эксперимента осуществлялся на аналитических весах *AND GR-300*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка тантал-циркониевых порошковых смесей на поверхность пластин из титана ВТ1-0 и титанового сплава ВТ14 позволяет сформировать бездефектные слои большой толщины со сложным строением, обладающие высокими эксплуатационными характеристиками.

2. Создание слоев, содержащих тантал и цирконий, на титановых заготовках приводит к повышению уровня твердости, прочности и износостойкости защищаемой поверхности. Упрочнение сформированного сплава обусловлено образованием закаленных фаз и искажением кристаллической решетки, главным образом, за счет введения циркония.

3. Однослойная наплавка порошков тантала и циркония на титановые пластины обеспечивает повышение коррозионной стойкости сформированных слоев в кипящих растворах серной и соляной кислот. Относительное возрастание коррозионной стойкости может составлять от нескольких раз до двух по-

рядков величины. В концентрированной кипящей азотной кислоте наплавка тантала совместно с цирконием не дает положительно эффекта.

4. Для многократного повышения коррозионной стойкости поверхности титановых пластин в кипящих растворах азотной, серной и соляной кислот процесс электронно-лучевой наплавки порошков тантала и циркония необходимо реализовать за два прохода.

Степень достоверности и апробация результатов

Диссертационная работа выполнялась с использованием современного испытательного и аналитического оборудования. Анализ структуры разработанных материалов проводился на различных масштабных уровнях с применением взаимодополняющих методов исследования, что гарантирует достоверность полученных результатов. Проведенные исследования позволили получить новые данные о структуре, механических и коррозионных свойствах титановых сплавов, легированных танталом и цирконием.

Результаты работы неоднократно докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: XIV Международной научно-технической Уральской школе-семинаре металловедов – молодых ученых, г. Екатеринбург 2013 г.; на 4-ой Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении», г. Новосибирск 2013; на всероссийской (2013) и международной (2014) конференции «Наука. Технология. инновации», г. Новосибирск; на XXII Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», г. Орск 2014г.; на XX Юбилейной международной конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск 2014 г.; XXIV Международной конференции «Радиационная физика твердого тела», г. Севастополь 2014 г.; на Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», г. Томск 2015 г.; на X Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург 2016 г.; на международной конференции «Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении», г. Томск 2016 г, на Международной научной конференция «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах», г. Ялта 2016 г.; на 12-ой Международной конференция по электронно-лучевым технологиям, г. Варна (Болгария) 2016 г.; на 2-ой Международной конференция по прикладной науке о поверхности, г. Далянь (Китай) 2017 г.

По результатам диссертационной работы было опубликовано 13 статей входящих в перечень изданий, рекомендованных в ВАК РФ (2 статьи) и иностранную базу цитирования – *Scopus* (11 статей). В сборниках трудов международных и всероссийских конференций было представлено 15 работ. Общее число опубликованных материалов в период выполнения диссертации составило 28. Кроме того был получен 1 патент Российской Федерации на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертационная работа включает в себя введение, шесть разделов, заключение, список литературы и три приложения. Общий объем работы составляет 235 страниц, включая 70 рисунков, 23 таблицы и список литературы из 184 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы и отражены основные направления исследований.

В первом разделе «Повышение коррозионной стойкости титановых сплавов» проведен аналитический обзор отечественной и зарубежной литературы по теме исследования. Дано краткое описание характеристик и свойств титана, а также классификация сплавов на его основе. Описана коррозионная стойкость титановых сплавов в различных средах, включая скорость растворения в подогретых и кипящих кислотах. Подробно рассмотрены методы снижения коррозионного взаимодействия металла в агрессивных средах. Основное внимание уделено кислотостойким титановым сплавам комплексно легированным танталом и цирконием. Проведена сравнительная оценка методов нанесения защитных слоев на металлические заготовки.

Во втором разделе «Материалы и методы исследования» представлено описание используемых в работе материалов. Подробно рассмотрена технология получения поверхностно легированных заготовок электронным лучом, приведены оптимальные режимы и составы порошковых насыпок. Описаны методики подготовки и исследования строения материалов, определения уровня механически свойств и коррозионной стойкости.

Эксперименты по созданию поверхностных слоев проводились в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН на базе промышленного ускорителя электронов ЭЛВ-6. Материалом основы выступали плоские заготовки, изготовленные из технически чистого титана ВТ1-0 и конструкционного титанового сплава ВТ14. Наплавочным материалом служила смесь металлических порошков тантала и циркония в различном соотношении, а также флюса (CaF_2 и LiF). Поверхностное легирование заготовок осуществлялось на оптимальных режимах: энергия электронов – 1,4 МэВ; ток пучка – 23 мА, скорость перемещения обрабатываемой пластины – 10 мм/с. С целью увеличения производительности метода выпускное отверстие ускорителя было дополнительно оборудовано электромагнитным сканером частотой 50 Гц, развертывающим электронный луч с размахом 50 мм. Перед обработкой на поверхность заготовки наносилась порошковая смесь в количестве 0,45 г на 1 см². Сформированная заготовка устанавливалась на расстоянии 90 мм от выпускного отверстия. С целью повышению концентрации легирующих элементов в слое процесс наплавки порошковой смеси повторялся.

Анализ структурных особенностей поверхностных слоев проводился методами оптической (*Carl Zeiss Axio Observer Z1m*), растровой (*Carl Zeiss EVO 50 XVP*) и просвечивающей электронной микроскопии (*FEI Tecnai G20 Twin*). Химический и фазовый состав полученных сплавов оценивались с использованием микрорентгеноспектрального анализатора *INCA X-ACT (Oxford Instruments)* и рентгеновского дифрактометра *ARL X'TRA*.

Измерение микротвердости осуществлялось на микротвердомере *Wolpert Group 402 MVD*. Прочностные испытания были проведены с использованием универсального измерительного комплекса *Instron 3369*. Испытания на ударный изгиб были реализованы на маятниковом копре *Metrocom*. Износостойкость

материалов определялась в условиях нежестко закрепленных абразивных частиц. Коррозионную стойкость нанесенных слоев оценивали в кипящих растворах азотной (65 %), соляной (5...30 %) и серной (5...40 %) кислот.

В третьем разделе «Строение слоев, полученных электронно-лучевой наплавкой порошков тантала и циркония на поверхность технически чистого титана ВТ1-0» рассмотрены структурные особенности наплавленных слоев на различных масштабных уровнях. Исследован фазовый и химический состав наплавленных сплавов.

Для получения новых данных о структуре и свойствах сплавов системы *Ti-Ta-Zr* была подготовлена серия образцов с различным соотношением тантала и циркония в слое. Концентрация одного из компонентов уменьшалась, при увеличении содержания другого, при этом суммарный атомный процент легирования сохранялся (далее приведены весовые проценты). Состав сплавов в случае однократной наплавки изменялся в диапазоне 4...31 % *Ta* при 28...12 % *Zr*. Кроме того, был сформирован слой с предельной концентрацией циркония 35 % *Zr*, полученный полным исключением тантала из порошковой насыпки. С целью увеличения концентрации легирующих элементов в поверхностном слое, была реализована двукратная наплавка. Содержание тантала и циркония в таком слое достигало 48 и 20 % соответственно (сокращенное обозначение – 48*Ta*-20*Zr*).

Для всех поверхностно легированных слоев характерно наличие дендритной ликвации по сечению сформированных материалов. Дендритные оси и ветви обогащены танталом. Междендритное пространство представлено большим содержанием титана и циркония. Ликвация между приведенными зонами увеличивается с увеличением содержания тантала и достигает 6...7 % на слое с 31 % *Ta* и 12 % *Zr*. Значительная химическая неоднородность фиксируется на составе 48 % *Ta*, 20 % *Zr* которая составляет ~ 16 %. Определение содержания газов в наплавленных слоях свидетельствует о том, что в процессе наплавки происходит небольшое насыщение поверхности переплавляемого металла газами атмосферы и в частности кислорода (0,328 %). Содержание азота ниже, чем в основном металле и составляет 0,0122 %.

Методом рентгенофазового анализа установлено, что основной фазой формирующейся в наплавленных слоях является α' -*Ti* (рисунок 1). Изменение соотношения легирующих элементов в исходной насыпке в сторону больших концентраций тантала приводит к появ-

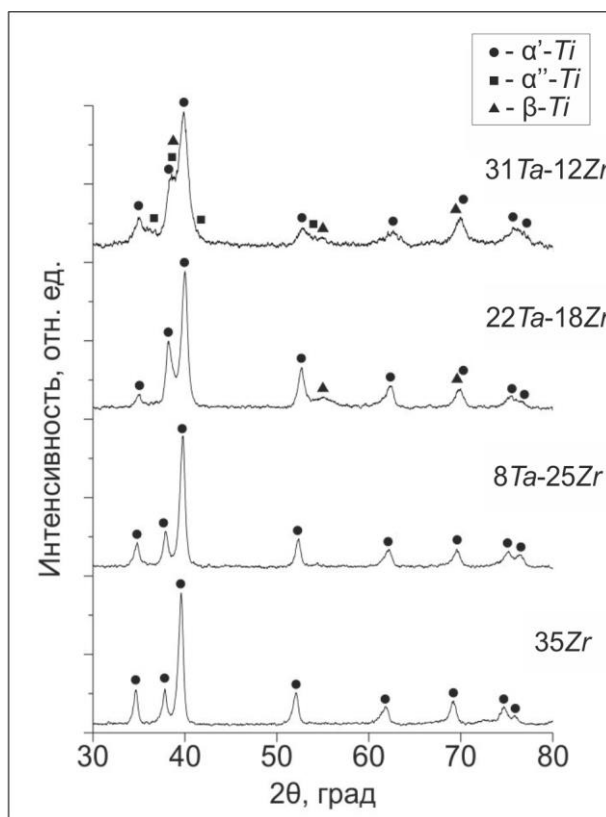


Рисунок 1 – Рентгенограммы слоев, полученных за один проход электронного луча, с различным содержанием тантала и циркония в поверхностном сплаве

лению на рентгенограммах пиков α'' и β -фазы титана. Формирование только β -фазы в сплаве возможно при повторной наплавке тантала и циркония на уже сформированный слой.

Электронно-лучевая наплавка тантала и циркония на поверхность титановых заготовок способствует формированию слоев толщиной 1,9...2,4 мм. Поперечное сечение сформированного композита представлено 3 зонами: наплавленный слой, зона термического влияния и основной металл. Общий вид наплавленных слоев и их строение представлены на рисунке 2.

Металлографические исследования наплавленных слоев свидетельствуют о том, что структура сплава характеризуется преимущественно пластинчатым строением (рисунок 2 г). Увеличение содержания тантала в сплаве приводит к увеличению дисперсности пластин. Просвечивающая электронная микроскопия подтверждает данные структурных исследований (рисунок 2 б, в, д, е).

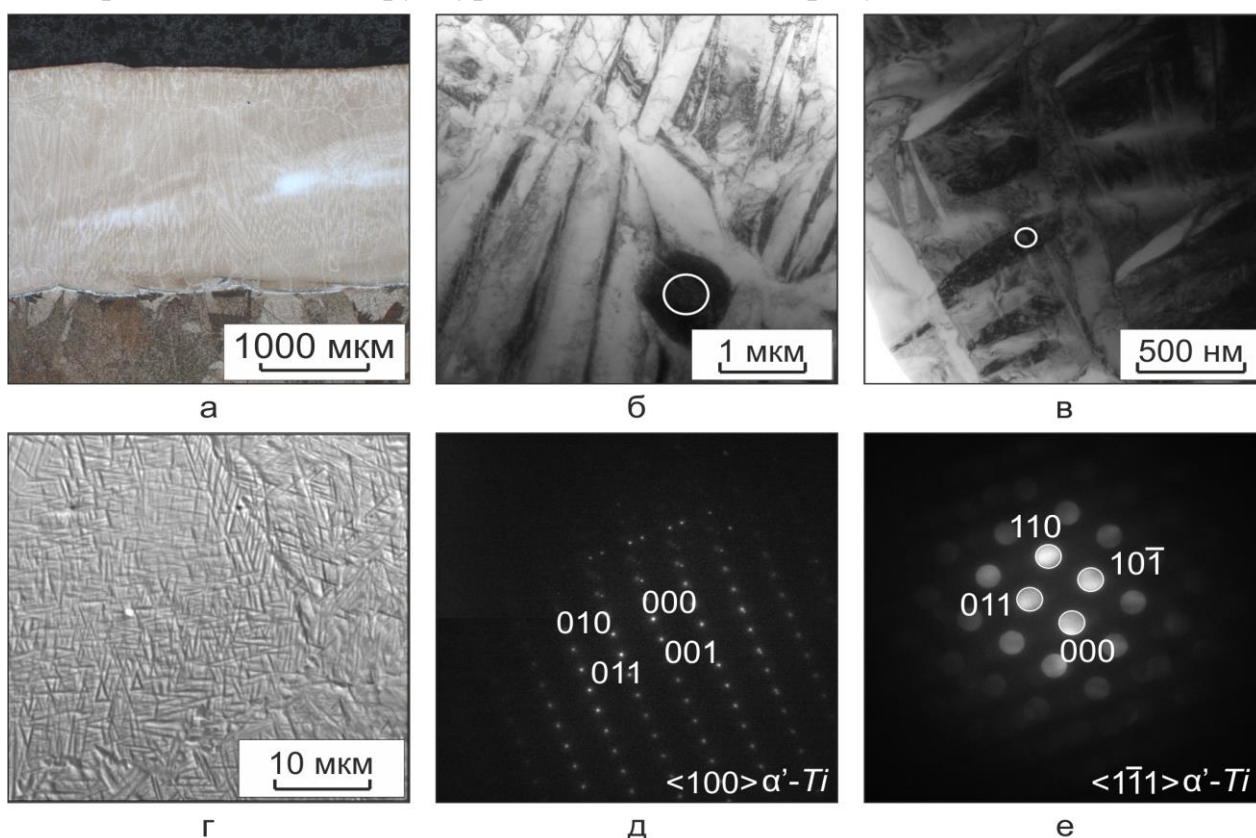


Рисунок 2 – Общий вид слоя (а); пластинчатое строение слоев (б-г) и соответствующие им картины микродифракции (д, е); а – 4Ta-28Zr; б, д – 35Zr; в, г, е – 31Ta-12Zr

Четвертый раздел «Механические свойства поверхностно легированных танталом и цирконием слоев» посвящен определению уровня механических характеристик слоев в условиях статического и динамического нагружения, а также оценке износостойкости наплавленных материалов.

Типичное распределение микротвердости по сечению наплавленного слоя представлено на рисунке 3. При любых соотношениях тантала к цирконию уровень микротвердости не изменяется по сечению слоя и падает при переходе в титановую основу. Установлено, что введение в поверхностный сплав тантала и выведение циркония приводит к снижению микротвердости с 5000 до 4500 МПа. Основными механизмами упрочнения слоя является искажение кри-

сталлической решетки за счет циркония имеющего существенно больший атомный радиус, а также наличие растворенных газов в объеме материала. Прочность слоев немонотонно увеличивается с 410 до 650 МПа с увеличением содержания тантала. Для титана VT1-0 предел прочности составил 300 МПа. Для двукратно наплавленного слоя напряжение разрушения было 700 МПа. Положительное влияние более прочного поверхностного слоя сказывается на износостойкости. В условия нежестко закрепленных абразивных частиц сопротивление износу переплавленной электронным лучом поверхности возрастает в 2,1...3,3 раза по сравнению с необработанной титановой основой.

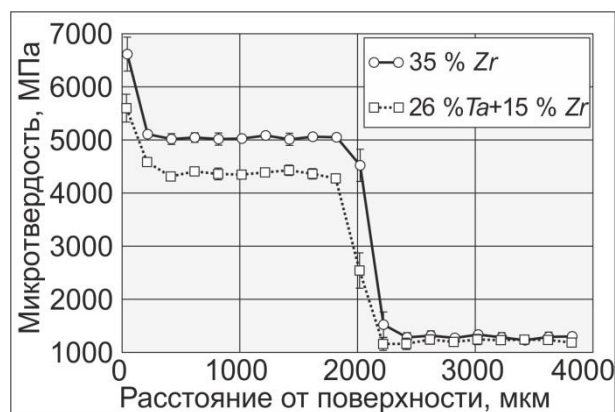


Рисунок 3 – Распределение микротвердости по поперечному сечению поверхностно легированных образцов

Испытания поверхностно легированных титановых пластин на ударный изгиб показали падение уровня ударной вязкости (KCV) в 1,5...1,7 раза (155...178 Дж/см²) по сравнению с титаном в состоянии поставки – 266 Дж/см². Состав и количество слоев практически не влияют на значение KCV .

Поверхность разрушения слоев после динамических и статических нагрузок представлена двумя типами изломов – квазихрупким и межкристаллитным (рисунок 4). Доля последнего увеличивается с увеличением концентрации тантала в сплаве (рисунок 4 а, б). Двукратно наплавленный слой при динамическом нагружении разрушается хрупко. После испытаний в зоне сплавления слоя с титановой основой не наблюдается отслоений и трещин, что свидетельствует о высокой адгезии нанесенного материала (рисунок 4 в). Это подтверждается результатами адгезионных испытаний.

В пятом разделе «Коррозионная стойкость поверхностно легированных слоев, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки тантала и циркония» приведены данные о скорости коррозии слоев в кипящих растворах азотной, соляной и серной кислот. Исследована морфология поверхности после коррозионных испытаний и характер растворения материалов.

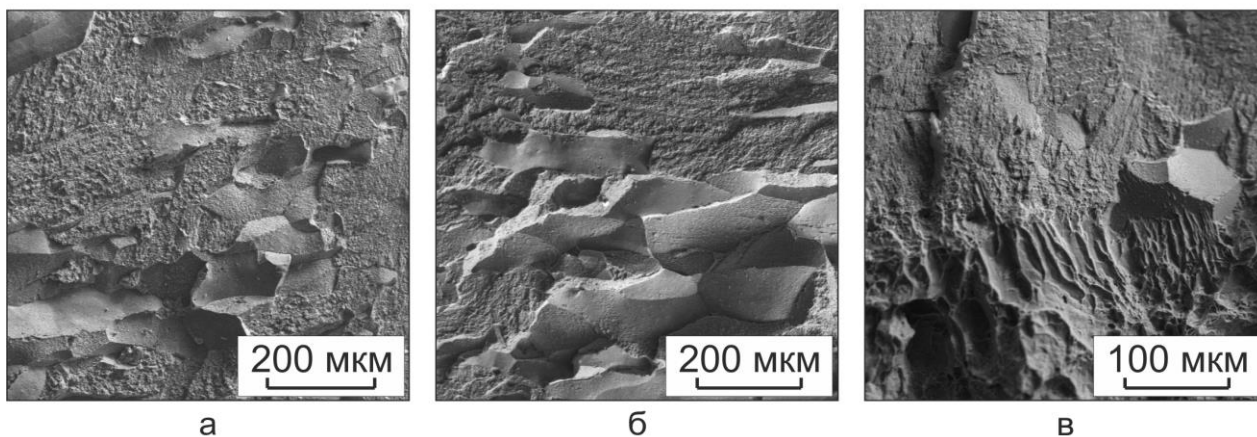


Рисунок 4 – Поверхность изломов образцов после статических и динамических испытаний: а – 22Ta-18Zr; б – 31Ta-12Zr; в – зона сплавления слоя 17Ta-20Zr с титановой основой

Совместная наплавка тантала и циркония не способствует значительному увеличению коррозионной стойкости титановых заготовок в кипящем концентрированном (65 %) растворе азотной кислоты. Положительное влияние наблюдается при 4...12 % *Ta* и 28...23 % *Zr*, а также на слое с 31 % *Ta*, 12 % *Zr*. Скорость коррозии таких слоев составляет 0,143...0,178 мм/год, при скорости коррозии титана 0,191 мм/год. Значительное увеличение коррозионной стойкости достигается при повторной наплавке, которая обеспечивает содержание тантала 48 % и циркония 20 %. Скорость коррозии материала снижается до 0,006 мм/год, что в 32 раза ниже по отношению к основе, на которой сформирован поверхностно легированный слой.

Для слоев с различным соотношением тантала к цирконию растворение сплава в кипящей азотной кислоте носит различный характер. Слои с небольшой концентрацией тантала и высоким содержанием циркония интенсивно теряют массу в первые 24 часа (рисунок 5 а). Затем скорость коррозии материала падает в несколько раз, что связано с пассивацией сплава. Для слоев с высоким содержанием тантала наблюдается, как правило, линейный характер растворения (рисунок 5 б).

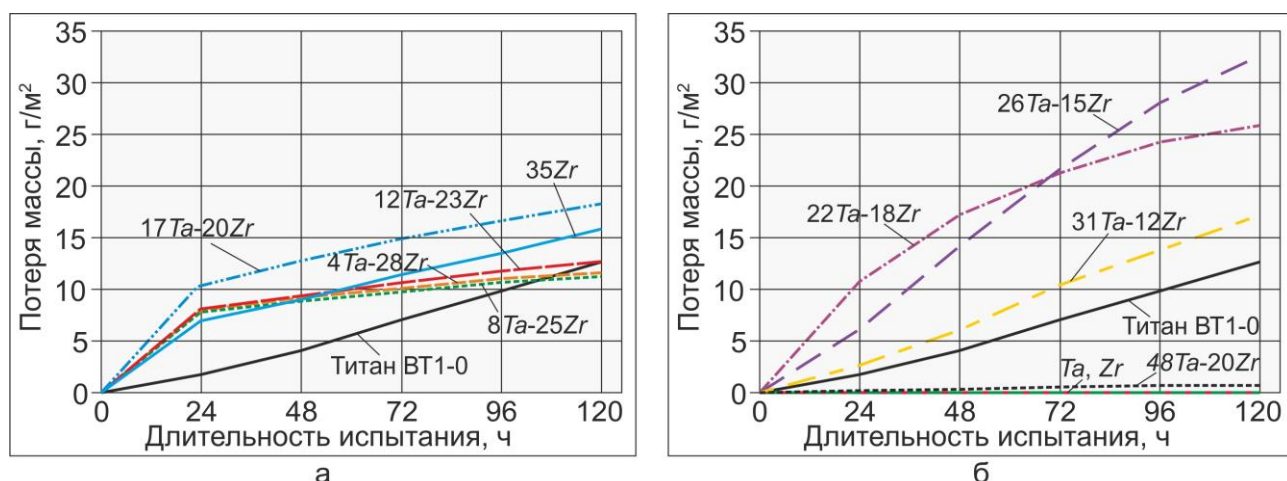


Рисунок 5 – Зависимость потери массы испытуемых материалов от времени погружения в кипящий концентрированный раствор азотной кислоты: а – пассивирующиеся образцы в сопоставлении с титаном, б – не пассивирующиеся образцы

В кипящих растворах 5...30 % соляной и 5...40 % серной кислот наплавка составов с различным соотношением тантала к цирконию способствует увеличению уровня коррозионной стойкости титана. В разбавленных 5 и 10 % растворах скорость коррозии снижается при увеличении содержания тантала и снижении циркония. Для более концентрированных растворов соотношение порошков легирующих элементов в исходной насыпке практически не влияет на показатели коррозии. Промышленное применение слоев, сформированных за один проход электронного луча возможно в разбавленных 5 % растворах серной или соляной кислоты (0,1...1 мм/год). Значительно улучшить антикоррозионные свойства титана в более концентрированных растворах возможно при повторной наплавке слоя с 48 % *Ta* и 20 % *Zr*. Скорость коррозии по отношению к защищаемому материалу снижается на 2...4 порядка и, как правило, ниже 0,1 мм/год для 5...40 % H_2SO_4 и менее 0,2 мм/год в 5...20 % HCl . Наибольший эф-

фekt наблюдается в 40 % H_2SO_4 . Коррозионная стойкость возрастает более чем в 20000 раз по сравнению с титаном и становится сопоставима с танталом.

Взаимодействие поверхностных сплавов с 5 и 10 % растворами серной или соляной кислоты сопровождается вытравливанием структуры материала (рисунок 6 а). Интенсивность травления снижается при увеличении содержания тантала и снижении циркония. В более концентрированных растворах слои с 25...35 % Zr подвержены общей коррозии (рисунок 6 б). Увеличение содержания тантала приводит к появлению рыхлой пленки (рисунок 6 в), которая впоследствии сменяется более плотной для слоев с 26...31 % Ta .

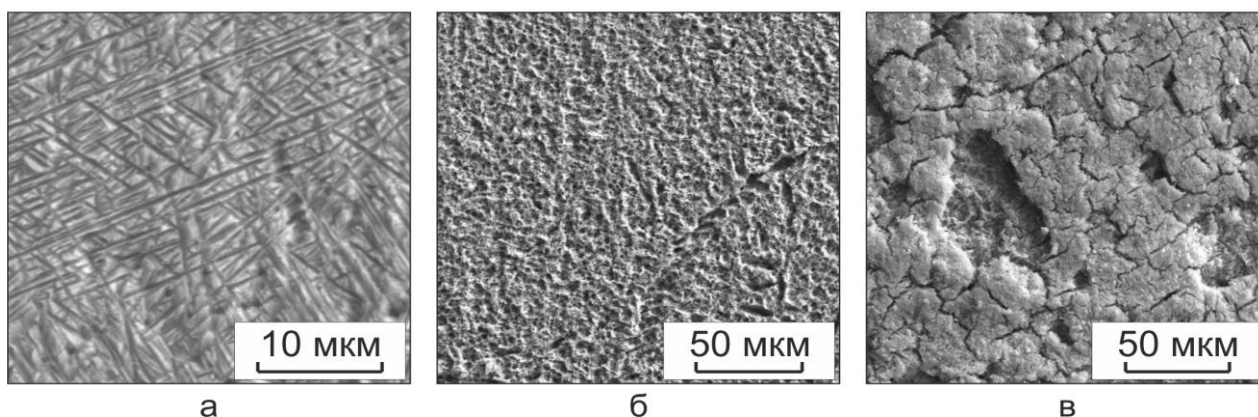


Рисунок 6 – Поверхность образцов после коррозии в кипящих растворах серной кислоты: а – 35Zr, 5 % H_2SO_4 ; б — 4Ta-28Zr, 30 % H_2SO_4 ; в – 17Ta-20Zr, 30 % H_2SO_4 ;

Разработанный метод электронно-лучевого легирования позволяет повысить коррозионную стойкость не только технически чистого титана ВТ1-0, но и конструкционного сплава ВТ14. Стойкость слоев, наплавленных на пластины из ВТ14 ниже, чем у слоев на ВТ1-0, что объясняется присутствием понижающих коррозионную стойкость легирующих элементов в конструкционном сплаве, которые в процессе наплавки частично разбавляют наносимый материал.

В шестом разделе «Апробация результатов экспериментальных исследований» приведены рекомендации по наплавке тантала и циркония на поверхность титановых заготовок. Представлены рекомендации по испытанию титана и его сплавов в кипящих растворах азотной, серной и соляной кислот. Технология поверхностного легирования танталом и цирконием используется ООО «ИЯФ-ППТ» при получении особо коррозионностойких реакторов химических производств.

Заключение

В ходе выполнения диссертационной работы были исследованы структурные особенности поверхностных слоев, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых тантал-циркониевых смесей на поверхность заготовок из титановых сплавов. Проведен комплекс механических испытаний, направленных на определение свойств материала в условиях статических и динамических нагрузок, а также проведена оценка уровня износостойкости в условиях незакрепленных абразивных частиц.

Важной частью работы являлось исследование коррозионной стойкости сформированных слоев в кипящих растворах наиболее распространенных сильных кислот в зависимости от состава поверхностных сплавов.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

1. Электронно-лучевая наплавка в воздушной атмосфере является эффективным методом получения с высокой производительностью слоев большой толщины (1,9...2,4 мм) с различным соотношением тантала к цирконию на поверхности титановых заготовок. Наплавленные слои характеризуются бездефектным строением, как по сечению нанесенного материала, так и по зоне его сплавления с металлической основой. Концентрация легирующих элементов изменяется в диапазоне 4...31 % тантала при 28...12 % циркония. Нанесение только порошков циркония способствует формированию слоя с 35 % Zr. Реализация метода за два прохода электронного луча позволяет значительно повысить степень легирования поверхности титановых заготовок до 68 % (48 % Ta и 20 % Zr). Цирконий, входящий в состав исходных порошковых насыпок может выступать одновременно в роли легирующего элемента и смачивающего компонента.

2. Для всех поверхностно легированных слоев характерно наличие дендритной ликвации по сечению наплавленного материала. Оси и ветви дендритов обогащены танталом, междендритное пространство содержит больше титана и циркония. Увеличение концентрации тантала в поверхностном сплаве способствует увеличению ликвации, достигающей 6-7 % при однократной и 16 % при двукратной наплавке.

3. Строение наплавленных слоев представлено преимущественно структурой пластинчатого типа. С увеличением содержания тантала в слоях дисперсность пластин увеличивается. Согласно совместному анализу рентгенограмм и дифракционных картин в поверхностных сплавах преимущественно образуется закаленная α' -фаза титана. Изменение соотношения легирующих элементов в исходной порошковой насыпке в сторону больших концентраций тантала приводит к появлению на рентгенограммах слоев пиков β -фазы, которые фиксируются при 22 % Ta и 18 % Zr. При содержании тантала 31 % и циркония 12 % наряду с α' - и β -фазой образуется α'' -фаза титана. Повторная электронно-лучевая наплавка позволяет сформировать слой на поверхности титановой заготовки представленный только высокотемпературной β -модификацией титана (48 % Ta и 20 % Zr).

4. Электронно-лучевое оплавление порошковых тантал-циркониевых смесей в воздушной атмосфере способствует формированию более прочных, чем основной металл слоев. Микротвердость полученных сплавов составляет 4500...5000 МПа что в 3,6 раза выше по сравнению с титаном ВТ1-0. Значение микротвердости растет с увеличением содержания циркония в слое при одновременном выведении тантала из него. Одним из основных механизмов упрочнения поверхностных сплавов является искажение кристаллической решетки за счет присутствия циркония, имеющего существенно больший атомный радиус по сравнению с титаном. Другой механизм связан с наличием некоторого количества газов, растворенных в объеме наплавленного материала. Упрочнение материала положительно сказывается на износостойкости полученных сплавов, которая в 2,1...3,3, раза превышает износостойкость титановой основы.

5. Совместное поверхностное легирование титановых образцов танталом и цирконием приводит к формированию слоев, обладающих повышенным уровнем прочности. Предел прочности слоев немонотонно растет от значений 410 до 650 МПа (для титана 300 МПа) при изменении соотношения легирую-

щих элементов в исходной порошковой насыпке в сторону больших концентраций тантала. Наличие более прочного слоя сказывается на показателях ударной вязкости сформированного металлического композита, которая снижается по сравнению с технически чистым титаном в состоянии поставки до 155...178 Дж/см². Несмотря на это уровень ударной вязкости поверхностно легированных заготовок из ВТ1-0 выше, чем у большинства конструктивных титановых сплавов.

6. Создание тантал-цирконий содержащих слоев не приводит к значительному повышению уровня коррозионной стойкости в кипящей концентрированной азотной кислоте. Наибольший положительный эффект при однослойной наплавке фиксируется на составе 31 % *Ta* и 12 % *Zr*. Сплав корродирует в азотнокислом растворе со скоростью 0,143 мм/год, при скорости коррозии титана 0,191 мм/год. Многократное повышение коррозионной стойкости на системе *Ti-Ta-Zr* возможно при увеличении содержания легирующих элементов до 48 % *Ta* и 12 % *Zr*, что достигается в результате повторной наплавки. Сформированный таким способом слой снижает интенсивность растворения поверхности титана в 32 раза до 0,006 мм/год.

7. Кипящие растворы соляной кислоты являются агрессивной средой по отношению к титану и поверхностным сплавам. Наплавка тантала и циркония способствует снижению скорости коррозии титановой основы в 5...30 % растворах кислоты. С точки зрения промышленного применения из всех исследуемых материалов высокую стойкость имеет слой с 31 % *Ta* и 12 % *Zr* в разбавленном 5 % растворе соляной кислоты (0,1 мм/год). В более концентрированных растворах защитить титан возможно путем нанесения второго слоя с 48 % *Ta* и 20 % *Zr*. Скорость коррозии сформированного сплава менее 0,2 мм/год (до 20 % *HCl*), что в отдельных случаях на три порядка ниже, чем для титана ВТ1-0 испытанного в аналогичных условиях.

8. Наиболее сильное воздействие на титановую основу оказывают кипящие растворы серной кислоты. Создание слоев с различным соотношением тантала к цирконию в исходной насыпке за один проход электронного луча позволяют повысить коррозионную стойкость в 5...40 % растворах не менее чем в 5 раз. Для промышленного применения в кипящей серной кислоте до 40 % может быть рекомендован слой с 48 % *Ta* и 20 % *Zr*, полученный повторной наплавкой. Скорость коррозии сплава составляет менее 0,1 мм/год, а максимальный антикоррозионный эффект от нанесения такого состава по сравнению с титаном ВТ1-0 превышает 20000 раз.

9. Поверхностное легирование позволяет повысить коррозионную стойкость не только технически чистого титана ВТ1-0, но конструктивного титанового сплава ВТ14. Скорость коррозии *Ti-Ta-Zr* слоев, сформированных на пластинах из ВТ14, выше по сравнению со слоями, наплавленными на заготовки ВТ1-0, что связано с присутствием легирующих элементов в конструктивном сплаве, которые в процессе наплавки частично разбавляют наносимый материал.

10. Результаты исследований, проведенных в диссертационной работе, используются в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся на

Механико-технологическом факультете по направлению «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноинженерия».

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Исследования, проведенные в диссертационной работе, позволили получить новые данные по структуре, механическим свойствам и коррозионной стойкости сплавов системы *Ti-Ta-Zr*, сформированных методом электронно-лучевой наплавки на заготовки из титановых сплавов. Установлено, что строение слоев нанесенных за один проход электронного луча на микроуровне представлено преимущественно структурой пластинчатого типа. С точки зрения коррозионной стойкости подобное строение не является благоприятным, поскольку в процессе пассивации материала образующаяся пленка будет разрушаться в местах чередования пластин вследствие нарушения когерентности. Более стойкой в агрессивных средах является структура с однофазным строением. В этом случае формирующаяся пленка будет иметь однородное строение и покрывать большие участки. Описанное влияние структуры на коррозионную стойкость может быть использовано для дальнейшего улучшения эксплуатационных характеристик материала для чего можно рекомендовать следующее:

- Провести дополнительную термическую обработку поверхностно легированных пластин обеспечивающую формирование однофазного строения (на слоях с концентрацией тантала более 26 %);
- Добавить в исходную порошковую насыпку сильные β -стабилизаторы в количестве, не оказывающем негативное влияние на коррозионные свойства сплава, но влияющие на полиморфное превращение $\alpha \leftrightarrow \beta$.

Для повышения коррозионной стойкости слоев, наплавленных на плоские заготовки из сплава ВТ14, рекомендуется повысить концентрацию тантала и циркония в слое, что обеспечит сопоставимый уровень коррозионной стойкости со слоями нанесенными на титан ВТ1-0.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, и журналах, входящих в список ВАК

1. Многослойная электронно-лучевая наплавка танталсодержащих порошковых смесей на заготовки из титана ВТ1-0 [Текст] / М. Г. Голковский, В. В. Самойленко, А. И. Попелюх, А. А. Руктуев, Н. В. Плотникова, Н. С. Белоусова // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. – 2013. – № 4. – С. 43-48.

2. Влияние прокатки и термической обработки на структуру и свойства слоев, сформированных на титановых заготовках методом электронно-лучевой наплавки [Текст] / В. В. Самойленко, Д. В. Лазуренко, И. А. Поляков, А. А. Руктуев, О. Г. Ленивцева, В. С. Ложкин // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. – 2015. – № 2. – С. 55-63.

3. *Structure and mechanical properties of a two-layered material produced by the E-beam surfacing of Ta and Nb on the titanium base after multiple rolling [Text] / V. A. Bataev, M. G. Golkovski, V. V. Samoylenko, A. A. Ruktuev, I. A. Polyakov, N. S. Kuksanov // Applied Surface Science*. – 2018. – Vol. 437. – P. 181-189.

4. *Influence of chemical composition of initial powders on structure and properties of «Ti-Ta-Zr» coatings fabricated on cp-titanium substrates by electron beam*

cladding [Text] / V. V. Samoylenko, D. V. Lazurenko, O. G. Lenivtseva, I. A. Polyakov // IOP Conf. Series. – 2014. – Vol. 66. – Art. 012026.

5. *Corrosion Resistance of Multilayer Ti-Ta Coatings Obtained by Electron Beam Cladding in the Atmosphere [Text] / A. Ruktuev, M. Golkovski, V. Samoylenko, P. Komarov, I. Bataev, A. Bataev // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 759-763.*

6. *Fabrication of Multi-Layered Ti-Ta-Zr Coatings by Non-Vacuum Electron Beam Cladding [Text] / V. V. Samoylenko, D. V. Lazurenko, O. G. Lenivtseva, V. S. Lozhkin // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 424-429.*

7. *Structure and mechanical properties of coatings fabricated by nonvacuum electron beam cladding of Ti-Ta-Zr powder mixtures [Text] / V. V. Samoylenko, O. G. Lenivtseva, I. A. Polyakov, I. S. Laptev // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683. – Art. 020198.*

8. *The study of the modes of Ta-Zr powder mixture non-vacuum electron-beam cladding on the surface of the cp-titanium plates [Text] / V. V. Samoylenko, E. A. Lozhkina, I. A. Polyakov, O. G. Lenivtseva, I. S. Ivanchik, O. E. Matts // IOP Conf. Series. – 2016. – Vol. 156. – Art. 012024.*

9. *Structure and properties of surface-alloyed layers formed by non-vacuum electron beam cladding of Ta and Zr powders on commercially pure titanium plates [Text] / V. V. Samoylenko, T. S. Ogneva, I. A. Polyakov, I. S. Ivanchik, O. G. Lenivtseva, O. E. Matts // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1785. – Art. 040057.*

10. *Corrosion resistance of Ti-Ta-Zr coatings in the Boiling Acid Solutions [Text] / I. A. Polyakov, O. G. Lenivtseva, V. V. Samoylenko, M. G. Golkovski, I. S. Ivanchik // IOP Conf. Series. – 2016. – Vol. 156. – Art. 012023.*

11. *The influence of non-vacuum electron-beam facing on the structure of Ti-Ta layers formed on the surface of VT1-0 alloy [Text] / V. V. Samoylenko, O. G. Lenivtseva, I. A. Polyakov, I. S. Laptev, N V. Martyushev // IOP Conf. Series. – 2016. – Vol. 124. – Art. 012117.*

12. *Study of the effect of heat treatment on the structure of surface alloys formed on cp-titanium plates by electron beam cladding in the air atmosphere [Text] / V. V. Samoylenko, I. A. Lozhkina, I. A. Polyakov, M. G. Golkovski, V. S. Lozhkin, V. A. Bataev, O. G. Lenivtseva, O. E. Matts // IOP Conf. Series. – 2017. – Vol. 286. – Art. 012027.*

13. *Welding of a corrosion-resistant composite material based on VT14 titanium alloy obtained using an electron beam emitted into the atmosphere [Text] / M. G. Golkovski, V. V. Samoylenko, I. A. Polyakov, O. G. Lenivtseva, I. K. Chakin, P. N. Komarov, A. A. Ruktuev // IOP Conf. Series. – 2017. – Vol. 168. – Art. 012076.*

В прочих изданиях

14. Самойленко В. В. Структура и механические характеристики покрытий системы титан-тантал-цирконий, сформированных на пластинах технически чистого титана VT1-0 [Текст] / В. В. Самойленко, П. Н. Комаров, К. А. Фомина // 14 Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых, Екатеринбург, 11–15 нояб. 2013 г. : сб. науч. тр. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – С. 275-277.

15. Самойленко В. В. Структурные исследования покрытий системы титан-цирконий и титан-тантал-цирконий, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой обработки [Текст] / В. В. Самойленко, И. Ю. Жильцов,

И. А. Поляков // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 21–24 нояб. 2013 г. : в 10 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – Ч. 4. – С. 88-91.

16. Структурные особенности многослойных покрытий системы *Ti-Ta* сформированных вневакуумной электронно-лучевой обработкой [Текст] / А. А. Руктуев, В. В. Самойленко, Д. С. Кривеженко, Т. А. Калашникова // Инновации в машиностроении : тр. 4 междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 2–4 окт. 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 319-322.

17. Самойленко В. В. Особенности структуры и механические свойства покрытий, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков тантала и циркония на титановую основу [Текст] / В. В. Самойленко, О. Г. Ленивцева, И. А. Поляков // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов : материалы 22 Урал. шк. металловедов-термистов, Оренбург, 2–6 февр. 2014 г. – Оренбург, 2014. – С. 160-162.

18. Структурные исследования покрытий системы "*Ti-Ta-Zr*", сформированных электронно-лучевой наплавкой на поверхности чистого титана [Текст] / В. В. Самойленко, И. А. Поляков, А. А. Чевакинская, Е. А. Никитенко // Материалы 52 международной научной студенческой конференции (МНСК–2014). Новые конструкционные материалы, Новосибирск, 11–18 апр. 2014 г. – Новосибирск : Изд-во НГУ, 2014. – С. 16.

19. Самойленко В. В. Влияние химического состава на структуру и свойства покрытий системы "*Ti-Ta-Zr*", сформированных на поверхности сплава ВТ1-0 методом электронно-лучевой наплавки [Текст] / В. В. Самойленко, О. Г. Ленивцева, И. А. Поляков // Современные техника и технологии : сб. докл. 20 междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14-18 апр. 2014 г. В 3 т. – Томск : ТПУ, 2014. – Т. 2. – С. 89-90.

20. Структурные исследования многослойных покрытий системы "*Ti-Ta-Zr*" [Текст] / В. В. Самойленко, О. Г. Ленивцева, И. А. Поляков, И. Ю. Жильцов // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 15 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 23–25 апр. 2014 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 545-548.

21. Самойленко В. В. Применение технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки для создания коррозионностойких покрытий [Текст] / В. В. Самойленко, А. А. Руктуев, И. А. Поляков // Инновационные технологии и экономика в машиностроении : сб. тр. 5 междунар. науч.-практ. конф., Юрга, 22–23 мая 2014 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2014. – Т. 1. – С. 347-349.

22. *Non-vacuum electron beam multilayer cladding of Ta on Ti plates* [Text] / I. A. Bataev, M. G. Golkovskii, V. V. Samoilenko, A. A. Ruktuev, A. A. Polyakov, A. A. Bataev // *Interfinish-Seria 2014 : book abstr., intern. conf. on surface engineering for research and industrial applications, Novosibirsk, 30 June – 4 July 2014.* – Novosibirsk : NSTU Publ., 2014. – P. 32.

23. Поверхностное легирование титана танталом и цирконием методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых материалов [Текст] / В. В. Самойленко, И. А. Поляков, М. Г. Голковский, И. А. Батаев, А. А. Руктуев // Радиационная физика твердого тела : тр. 24 междунар. конф., Севастополь, 7–12 июля 2014 г. – Москва, 2014. – С. 345-351.

24. Самойленко В. В. Технология получения многослойных *Ti-Ta-Zr* покрытий на поверхности титана ВТ1-0 [Текст] / В. В. Самойленко, О. Г. Ленив-

цева, И. А. Поляков // Электротехника. Энергетика. Машиностроение : сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 2–6 дек. 2014 г. В 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 3. Секция «Машиностроение». – С. 243-246.

25. Структура и свойства слоев, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки титан-тантал-циркониевых порошковых смесей [Текст] / В. В. Самойленко, И. А. Поляков, А. А. Руктуев, О. Г. Ленивцева // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций : тез. докл. междунар. конф., Томск, 21–25 сент. 2015 г. – Томск : Изд-во ИФПМ СО РАН, 2015. – С. 486-488.

26. Самойленко В. В. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка *Ti-Ta-Zr* слоев на поверхность титана VT1-0 [Текст] / В. В. Самойленко, И. А. Поляков, О. Э. Матц // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : сб. материалов, Екатеринбург, 16–20 мая 2016 г. – Екатеринбург : Изд-во УМЦ УПИ, 2016. – С. 87.

27. *Corrosion resistance of Ti-Ta-Nb and Ti-Ta-Zr coatings fabricated on VT14 Titanium alloy substrates using electron beam injected into the atmosphere [Text] / V. Samoilenko, I. Polyakov, M. Golkovski, N. Kuksanov, O. Lenivtseva, I. Ivanchik // Electrotechnica & Electronica ("E+E") : 12 International conference on electron beam technologies, Bulgaria, Varna, 13–18 June 2016 – № 5-6. – P. 195-198.*

28. Термическая обработка титан-тантал-циркониевых поверхностных сплавов, полученных с применением релятивистского электронного пучка, выведенного в воздушную атмосферу / В. В. Самойленко, И. А. Поляков, М. Г. Голковский, О. Э. Матц // Современные технологии и материалы новых поколений : сб. тр. междунар. конф. с элементами науч. шк. для молодежи, Томск, 9–13 окт. 2017 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2017. – С. 236-238.

Патент

1. Пат. № 2621745 Российская Федерация, МПК С23С24/10, В23К28/02. Способ изготовления корпуса аппарата для химических производств, стойкого к воздействию концентрированных кислот, из титановых листов с внутренним антикоррозионным покрытием / Голковский М.Г., Куksанов Н.К., Руктуев А.А., Поляков И.А., Дробяз Е.А., Батаев В.А. Самойленко В.В.; заявитель и патенто-обладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН (ИЯФ СО РАН). – № 2015135398; заявл. 20.08.2015, опубл. 07.06.2017, Бюл. № 16. – 19 с.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс: (383)346-08-57
формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.
заказ № 1361 подписано в печать 10.10.2018 г.