

На правах рукописи



Руктуев Алексей Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СПЛАВА ВТ1-0
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ВНЕВАКУУМНОЙ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ
ПОРОШКОВ ТАНТАЛА И НИОБИЯ**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Батаев Иван Анатольевич

Официальные оппоненты: Пугачева Наталия Борисовна,
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории микромеханики материалов

Ковалевская Жанна Геннадьевна,
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет",
доцент кафедры «Материаловедение и технология металлов»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
г. Екатеринбург

Защита состоится «21» декабря 2016 г. в 12³⁰ 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=15821

Автореферат разослан «___» ноября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тюрин Андрей Геннадиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Совершенствование современного оборудования, предназначенного для высокотехнологических отраслей промышленности, невозможно без использования новых материалов, обладающих высоким комплексом эксплуатационных свойств. Одним из материалов, удовлетворяющих этому требованию, является титан. Благодаря комплексу свойств, таких как высокая удельная прочность, низкая плотность, высокая коррозионная стойкость, сплавы на основе титана находят все более широкое применение в современной промышленности. Следует отметить, что в ряде случаев, при изготовлении ответственного оборудования вопрос стоимости материала уходит на второй план. Основным требованием является обеспечение эксплуатационных свойств. Например, в таких отраслях промышленного производства, как химико-фармацевтическая, пищевая, медицинская, даже незначительное коррозионное повреждение оборудования может считаться недопустимым браком. Таким образом, задача, связанная с разработкой новых материалов с высоким уровнем коррозионной стойкости в различных типах сред, является весьма актуальной для современного материаловедения.

Литературные данные свидетельствуют о том, что повысить коррозионную стойкость титана возможно путем его легирования танталом и ниобием. Проблемы создания и изучения свойств сплавов на основе титана, легированных указанными элементами, входят в круг научных интересов многих коллективов отечественных и зарубежных специалистов. Несмотря на все преимущества, анализируемые сплавы не получили широкого промышленного применения, что связано с их высокой стоимостью и трудоемкостью производства.

Эффективным способом решения данной проблемы является формирование на поверхности изделий из титана или его сплавов слоев, легированных танталом и ниобием. В связи с тем, что титан, тантал и ниобий относятся к тугоплавким материалам, рациональным является применение методов нанесения покрытий, основанных на использовании высокоэнергетических источников нагрева. Одной из современных технологий, обеспечивающих высокую производительность и возможность создания покрытий значительной толщины практически из любых материалов, является вневакуумная электронно-лучевая наплавка. Исследования, проведенные в ИЯФ СО РАН, Новосибирском государственном техническом университете, Институте физики прочности и материаловедения СО РАН, показали, что данная технология может успешно применяться при создании различных типов наплавленных слоев, обладающих высоким комплексом свойств, а также для поверхностной термической обработки материалов.

При выполнении данной работы была поставлена задача повышения коррозионной стойкости титана за счет формирования на его поверхности наплавленных слоев, легированных танталом и ниобием, с применением технологии вневакуумной электронно-лучевой обработки. В настоящее время особенности указанного процесса исследованы в основном применительно к покрытиям триботехнического назначения. Процессы формирования коррозионностойких

материалов с использованием указанной технологии практически не изучены. Таким образом, представленная диссертационная работа направлена на решение актуальной научной проблемы, имеющей важное теоретическое и прикладное значение.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы»: «Разработка технологии изготовления особо коррозионно-стойких реакторов химических производств, работающих с использованием сильных кислот при повышенных температурах», соглашение № 14.604.21.0135 (уникальный идентификатор прикладных научных исследований *RFMEFI60414X0135*).

Степень разработанности темы исследования

Сплавы на основе титана получили широкое применение в промышленном производстве. Исследованию их структуры и свойств посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных специалистов. В то же время работ, посвящённых проблемам получения наплавленных слоев на поверхности заготовок из титана и его сплавов, существенно меньше. Значительная часть работ, связанных с формированием и исследованием свойств функциональных покрытий на титановых сплавах, затрагивает проблемы повышения износостойкости и упрочнения поверхности с применением технологий лазерной или плазменной наплавки.

Изучением особенностей технологии вневакуумной электронно-лучевой обработки занимаются научные коллективы из Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирского государственного технического университета, Института физики прочности и материаловедения СО РАН, а также Университета науки и технологии г. Поханг (Южная Корея). Большая часть работ, опубликованных сотрудниками этих организаций, направлена на повышение износостойкости сталей путем наплавки различных типов карбидо- или нитридообразующих материалов. Механизмы формирования коррозионно-стойких слоев методом вневакуумной электронно-лучевой обработки изучены крайне ограниченно.

Несмотря на уникальность метода и возможность его применения для поверхностной обработки металлических материалов, объем проведенных исследований в данной области явно недостаточен. Целесообразно проведение детальных исследований механизмов формирования наплавленных слоев, а также их структуры и комплекса эксплуатационных свойств.

Цель диссертационной работы заключалась в повышении коррозионной стойкости заготовок из титана VT1-0 методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей, содержащих тантал и ниобий.

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

1. Металлографические, электронно-микроскопические и рентгенофазовые исследования структуры материалов, полученных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей, содержащих тантал и ниобий, на поверхность образцов из титана VT1-0.

2. Изучение влияния тантала и ниобия на структуру и фазовый состав наплавленных слоев.

3. Определение комплекса механических свойств материалов, с наплавленными слоями, содержащими тантал и ниобий, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой обработки на поверхности образцов из титана VT1-0.

4. Исследование влияния состава наплавленных слоев на уровень их коррозионной стойкости в различных типах агрессивных сред электрохимическим и весовым методами. Выявление влияния тантала и ниобия на скорость и характер коррозионного разрушения.

Научная новизна

1. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено, что структура материалов, сформированных в процессе вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей тантала и ниобия на заготовки из сплава VT1-0, имеет пластинчатое строение, в которой пластинки α' (α'')-фазы сочетаются с прослойками β -титана. Рост концентрации легирующих элементов в наплавленных слоях, приводящий к повышению коэффициента β -стабилизации, сопровождается увеличением дисперсности структурных составляющих. При повышении содержания в сплавах тантала и ниобия и росте значения K_β от 0,45 до 0,89 происходит смена типа мартенсита с α' на α'' и снижение толщины пластин этих фаз от ~ 1000 до ~ 100 нм.

2. Первичная кристаллизация расплава, полученного при электронно-лучевой обработке порошковой смеси тантала и ниобия на заготовках из титана VT1-0, сопровождается формированием в β -фазе аксиальной текстуры типа $\langle 100 \rangle$. Плоскости семейств $\{01\bar{1}2\}$, $\{2\bar{1}10\}$ α -фазы титана преимущественно ориентированы перпендикулярно оси электронного пучка. Указанный тип текстуры сохраняется также после проведения дополнительной термической обработки сплавов при 950°C .

3. Используя подход, основанный на полнопрофильном анализе рентгенограмм по методу Ритвельда в сочетании с моделью Марча-Долласа, учитывающей характер формирующейся при наплавке текстуры, проведена оценка фазового состава поверхностно легированных материалов на основе титана. Расчеты показали, что в сплаве, содержащем 3,7 % *Ta* и 3,6 % *Nb*, полученном при наплавке порошковых смесей пучком электронов, выведенным в воздушную атмосферу, объемная доля α -фазы титана составляет 99 %, β -фазы – 1 %. Увеличение количества легирующих элементов до 9,5 % *Ta* и 4,5 % *Nb* сопровождается ростом объемной доли β -фазы до 11 %.

4. Используя метод весового контроля показано, что тантал является легирующим элементом, обеспечивающим более эффективное по сравнению с ниобием снижение скорости коррозии титановых сплавов, в то время как легирование ниобием существенно ограничивает развитие межкристаллитного разрушения по границам бывших зерен β -фазы в концентрированном растворе соляной кислоты.

5. Установлено, что эффект, обусловленный вневакуумной электронно-лучевой наплавкой тантала и ниобия на титановые заготовки, проявляется в

большой степени при эксплуатации защищаемых изделий в азотной кислоте. Наплавка тантал- и ниобий-содержащих порошковых смесей на изделия, эксплуатация которых связана с воздействием соляной кислоты, менее эффективна.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Экспериментально установлены рациональные технологические режимы наплавки порошков тантала и ниобия на заготовки из сплава ВТ1-0 пучком электронов, выпущенным в воздушную атмосферу, обеспечивающие формирование высококачественных поверхностных слоев повышенной толщины. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации режимов формирования коррозионностойких слоев другого химического состава на поверхности образцов из титана или его сплавов.

2. С использованием современных методов анализа зафиксированы особенности структурно-фазового состояния поверхностных слоев, полученных на поверхности заготовок из титана ВТ1-0 с применением метода вневакуумной электронно-лучевой обработки. Полученные результаты целесообразно использовать при обосновании составов порошковых смесей, предназначенных для наплавки на титановые заготовки, с учетом особенностей эксплуатации защищаемых изделий.

3. Материалы, разработанные при выполнении диссертационной работы, характеризуются особо высокой коррозионной стойкостью и могут быть использованы для изготовления изделий, длительное время эксплуатирующихся в агрессивных средах. Введение в титан 3,4 % тантала и 6,3 % ниобия снижает скорость коррозионного разрушения сплава в концентрированном растворе азотной кислоты при температуре 110 °С в 7,4 раза (от 0,104 мм/год до 0,014 мм/год). Скорость коррозионного разрушения наплавленного слоя, содержащего 15 % тантала и 11,3 % ниобия, в 26 раз ниже, чем у титана ВТ1-0. Высокая коррозионная стойкость полученных материалов была экспериментально подтверждена в ходе испытаний в ИЯФ СО РАН. Представленные в диссертационной работе материалы используются ООО «ИЯФ-ППТ» при разработке технологии изготовления особо коррозионностойких реакторов. Результаты исследований использованы для разработки коррозионностойкого экономнолегированного материала, который был опробован на базе ООО «ЭкспертНефтеГаз» при изготовлении узлов роторно-пластинчатых насосов для перекачки агрессивных сред.

4. Обеспечивая высокий уровень коррозионной стойкости, вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковых смесей, содержащих тантал и ниобий, сопровождается также ростом прочностных свойств материалов. Предел прочности наплавленных слоев достигает 800 МПа, что примерно в два раза выше по сравнению с образцами из титана ВТ1-0.

5. Результаты выполненной диссертационной работы используются в Новосибирском государственном техническом университете в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноинженерия».

Личный вклад автора состоял в формулировании задач, подготовке исходных материалов, проведении структурных исследований и испытаний по определению коррозионной стойкости, проведении механических испытаний материалов, обобщении экспериментальных данных и сопоставлении их с известными литературными данными, формулировании выводов по результатам исследований.

Методология и методы исследования

Наплавку тантал- и ниобий содержащих слоев выполняли в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН на уникальном технологическом оборудовании – ускорителе электронов ЭЛВ-6, оснащенный системой выпуска сфокусированного пучка в воздушную атмосферу. Исследования полученных материалов проведены на аналитическом оборудовании, уровень которого соответствует оснащению современных отечественных и зарубежных материаловедческих лабораторий. Содержание газов в сплавах оценивали на приборе *LECO TC-600*. Структурные исследования проводились с применением металлографического микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer Z1m*, растрового электронного микроскопа *Carl Zeiss EVO 50 XVP*, оснащенного детектором для микрорентгеноспектрального анализа *INCA X-ACT (Oxford Instruments)*, а также приставкой для анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов *HKL CHANNEL 5 (Oxford Instruments)*. Исследования тонкого строения материалов проводились на просвечивающем электронном микроскопе *FEI Tecnai G20 TWIN*, оснащенный приставкой для микрорентгеноспектрального анализа *EDAX*. Фазовый состав наплавленных слоев изучали с использованием рентгеновского дифрактометра *ARL X'TRA*. Первоначальная идентификация фаз выполнялась с использованием базы данных *ICDD PDF-4+*. Микротвердость полученных материалов измеряли на приборе *Wolpert Group 402 MVD*. Испытания на растяжение были проведены на универсальном электромеханическом комплексе *Instron 3369*, испытания на ударную вязкость - на копре *Metrocom*. Коррозионную стойкость материалов изучали с применением потенциостата-гальваностата Элинс *P-30S*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошков тантала и ниобия на поверхность образцов из титана ВТ1-0 позволяет сформировать легированные слои, характеризующиеся многообразием структурных составляющих. Причины возникновения многофазной структуры обусловлены высокими скоростями плавления и кристаллизации, реализующимися в процессе вневакуумной электронно-лучевой обработки.

2. Выделение кристаллов β -фазы титана в ванне расплава происходит с формированием аксиальной текстуры типа $\langle 100 \rangle$. Последующее полиморфное превращение ОЦК \rightarrow ГПУ приводит к преимущественной ориентации плоскостей семейств $\{01\bar{1}2\}$, $\{2110\}$ α -титана параллельно плоскости обработки. Возникшая при наплавке текстура последующей термической обработкой не устраняется.

3. Формирование на поверхности заготовок из титана ВТ1-0 наплавленных слоев, содержащих тантал и ниобий, приводит к повышению прочности и

твердости материала. Повышение прочностных характеристик происходит за счет реализации механизма твердорастворного упрочнения и образования мелкодисперсных мартенситных фаз.

4. Для эффективного снижения скорости коррозионного разрушения наплавленных слоев в концентрированном растворе соляной кислоты необходимо легирование танталом и ниобием. Тантал эффективно снижает линейную скорость коррозионного разрушения, а добавки ниобия позволяют подавить межкристаллитную коррозию по границам бывших β -зерен.

5. Легирование поверхностных слоев образцов из титана VT1-0 танталом и ниобием с использованием метода электронно-лучевой обработки пучком электронов, выпущенным в воздушную атмосферу, многократно снижает скорость коррозионного разрушения в концентрированной азотной кислоте при температуре 110 °С.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов экспериментальных исследований обеспечивается применением современного испытательного и аналитического оборудования. Представленные в работе численные значения результатов экспериментов получены с использованием статистических методов оценки погрешности измерения. Структуру и фазовый состав материалов изучали с использованием взаимодополняющих методов. Полученные в диссертационной работе результаты хорошо согласуются с данными, представленными в отечественной и зарубежной литературе.

Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на XII - XVI Международной научно-технической Уральской школе-семинаре металловедов - молодых ученых, г. Екатеринбург 2011 – 2015 г.; на 10-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе», г. Новосибирск, 2012 г.; на V Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине», г. Новосибирск, 2013 г.; на IV Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении», г. Новосибирск, 2013 г.; на I Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении», г. Новосибирск, 2014 г.; на 5 Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», г. Юрга, 2014 г.; на I Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение», г. Новосибирск, 2014 г.; на китайско-российской Международной конференции передовых материалов и технологий обработки в рамках форума молодых научных сотрудников, г. Циндао (Китай), 2014 г.

По результатам исследований опубликована 31 печатная научная работа, из них: 8 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, в том числе 2 статьи в зарубежных журналах, входящих в базу данных *Scopus*; 2 – статьи в зарубежных журналах; 21 – в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения и приложений. Работа изложена на 196 страницах основного текста, включая 61 рисунок, 13 таблиц и список литературы из 179 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность диссертационной работы и дана оценка степени разработанности темы исследования.

В первом разделе «Анализ методов повышения коррозионной стойкости металлических материалов» представлен аналитический обзор литературы по теме исследования. Описаны виды коррозии и общие закономерности, характеризующие скорость и другие детали коррозионного разрушения материалов. Представлен анализ областей применения коррозионностойких материалов. Подробно рассмотрены методы нанесения защитных покрытий, проведен их сравнительный анализ.

Во втором разделе «Материалы и методы исследования» приведена характеристика используемых в работе исходных материалов. Описано оборудование и технологические режимы формирования наплавленных слоев. Представлены методики, применяемые для изучения структуры, фазового состава, механических свойств и коррозионной стойкости исследуемых материалов.

Наплавку защитных слоев осуществляли на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6 в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. В качестве материала основы использовался титан марки ВТ1-0. В состав наплавленных смесей входили порошки титана, тантала и ниобия, а также порошки CaF_2 и LiF , используемые в качестве флюсов. Режим наплавки материалов отражен в таблице 1.

Таблица 1 – Технологический режим формирования покрытий системы «титан – тантал – ниобий» методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки

Ток пучка, мА	Скорость перемещения заготовки, мм/с	Энергия электронов пучка, МэВ	Размах развертки, мм	Частота сканирования, Гц	Мощность пучка, кВт
24	10	1,4	50	50	33,6

Исследования структуры материалов проводили с применением методов металлографического анализа (микроскоп *Carl Zeiss AxioObserver Z1m*), а также растровой и просвечивающей электронной микроскопии (микроскопы *Carl Zeiss EVO 50 XVP* и *FEI Tecnai G20 Twin*). Фазовый состав и особенности текстуры наплавленных слоев оценивали методами рентгенофазового анализа (дифрактометр *ARL X'TRA*) и анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (*EBSD* – анализ) на детекторе *Oxford Instruments HKL CHANNEL 5*. Концентрацию легирующих элементов и газов в наплавленных слоях определяли с применением энергодисперсионного детектора *INCA X-ACT* и прибора *LECO TC-600* соответственно.

ДюрOMETрические испытания исследуемых материалов проводили на микротвердомере *Wolpert Group 402 MVD*. Прочностные характеристики оце-

нивали с использованием электро-механической системы *Instron 3369*. Испытания по определению уровня ударной вязкости проводили на маятниковом копре *Metrocom*. Коррозионную стойкость наплавленных слоев оценивали электрохимическим и весовым методами в концентрированных растворах соляной и азотной кислот.

Третий раздел «Структура поверхностных слоев, легированных танталом и ниобием» посвящен детальному анализу структуры и фазового состава наплавленных слоев.

Для определения оптимального состава наплавленных слоёв были подготовлены образцы с различным содержанием легирующих элементов. Среднее по сечению содержание тантала и ниобия, зафиксированное методом микрорентгеноспектрального анализа, находилось в пределах от 2,6 % до 21 % и от 2,9 % до 33 % соответственно. Концентрация кислорода и азота в наплавленных слоях составляла 0,192 % и 0,022 %. Рентгенофазовый анализ показал, что структура наплавленных слоев представляет собой смесь различных фаз титана (рисунок 1). При величине коэффициента бета-стабилизации K_β менее 0,33 структура представляет собой смесь α' - и β -фаз. Введение в сплав большего количества легирующих элементов приводит к замещению α' -фазы α'' -фазой.

Анализ рентгенограмм свидетельствует о том, что материал наплавленного слоя характеризуется сильной текстурой. Методами рентгеноструктурного анализа и *EBSD*-анализа показано, что быстрая кристаллизация ванны расплава сопровождается формированием в β -фазе титана аксиальной текстуры типа $\langle 100 \rangle$. Последующее $\beta \rightarrow \alpha$ превращение приводит к тому, что значительная доля плоскостей $\{01\bar{1}2\}$, $\{\bar{2}110\}$ ориентируется параллельно поверхности обработки (рисунок 2). Используя модель Марча-Долласа, а также полученные методом *EBSD* данные о типе формирующейся текстуры, в программном обеспечении *MAUD* расчётным путём были воспроизведены профили экспериментальных рентгенограмм. Такой подход позволил получить количественную оценку фа-

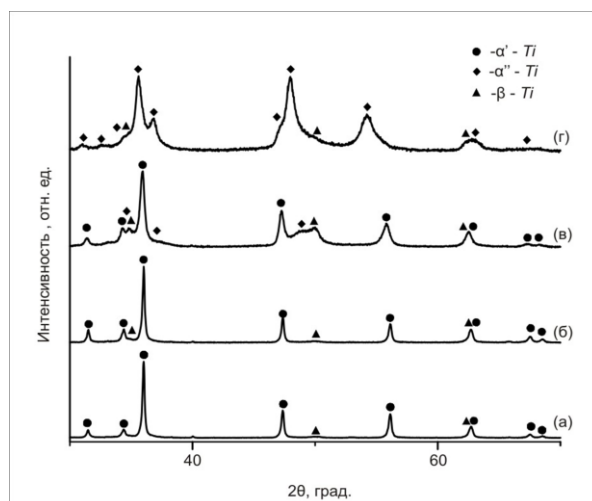


Рисунок 1 – Рентгенограммы слоев, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей тантала и ниобия на поверхность образца из титана BT1-0: а – слой с 3,7 % Ta + 3,6 % Nb; б – слой с 9,5 % Ta + 4,5 % Nb; в – слой с 8 % Ta + 16 % Nb; г – слой с 17,9 % Ta + 17,3 % Nb

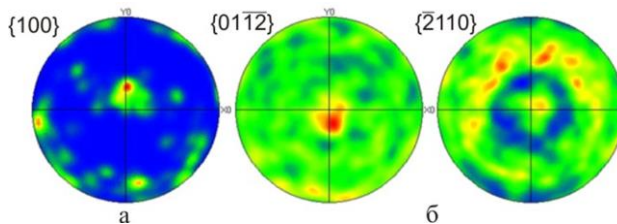


Рисунок 2 – а – полюсная фигура $\{100\}$, демонстрирующая наличие текстуры куба для β -Ti в образце Ti - 15 % Ta - 5 % Nb, б – полюсные фигуры, свидетельствующие о том, что значительная доля плоскостей $\{01\bar{1}2\}$, $\{\bar{2}110\}$ α -Ti параллельна поверхности основного металла

зового состава наплавленных слоев на основании данных рентгеновской дифракции.

Поперечное сечение наплавленного образца, зафиксированное методом световой микроскопии, приведено на рисунке 3. В полученных материалах отчетливо выявляются 3 зоны: наплавленный слой, зона термического влияния и исходный материал основы. Зона термического влияния имеет явно выраженное градиентное строение. Размер зерен в ней изменяется от ~ 400 мкм на границе с наплавленным слоем до ~ 40 мкм вблизи основного металла. Детальные исследования морфологии позволили установить, что структура наплавленных слоев имеет пластинчатый характер (рисунок 4). Повышение концентрации легирующих элементов приводит к росту степени дисперсности отдельных структурных составляющих. Тонкое строение наплавленных слоев, легированных танталом и ниобием, изучали методом просвечивающей электронной микроскопии. Типичные снимки структуры и соответствующие им картины микродифракции приведены на рисунке 5. Анализ полученных изображений свидетельствует о том, что структура представляет собой совокупность чередующихся пластин мартенситной α' (α'')-фазы и β -фазы. В отдельных локальных объемах наплавленного слоя, легированного 15 % *Ta* и 21 % *Nb*, зафиксировано выделение ω -фазы (рисунок 5 в, е).

В четвертом разделе работы «Механические свойства поверхностных слоев, легированных танталом и ниобием» отражены результаты исследований механических свойств полученных материалов.

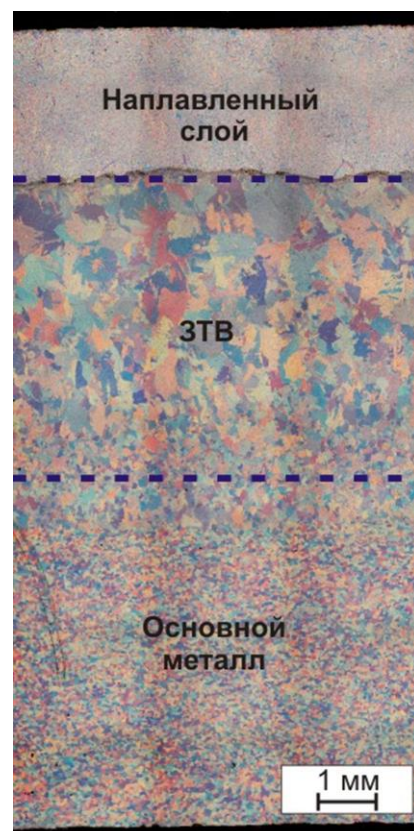
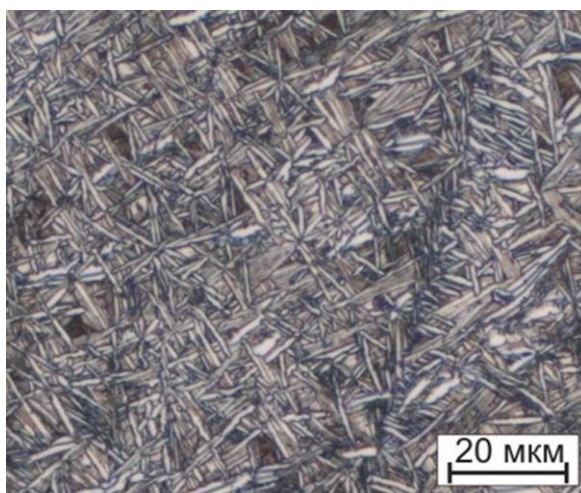
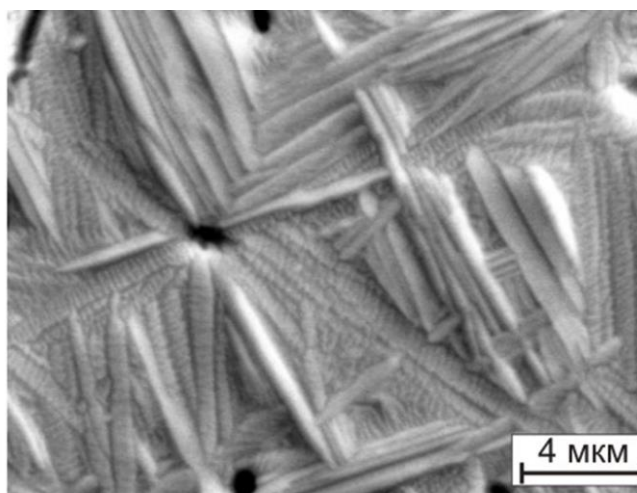


Рисунок 3 – Поперечное сечение образца с наплавленным слоем, содержащим 3,8 % *Ta* и 3,6 % *Nb*



а



б

Рисунок 4 – Структура наплавленных слоев, легированных 9,3 % *Ta* + 4,5 % *Nb*

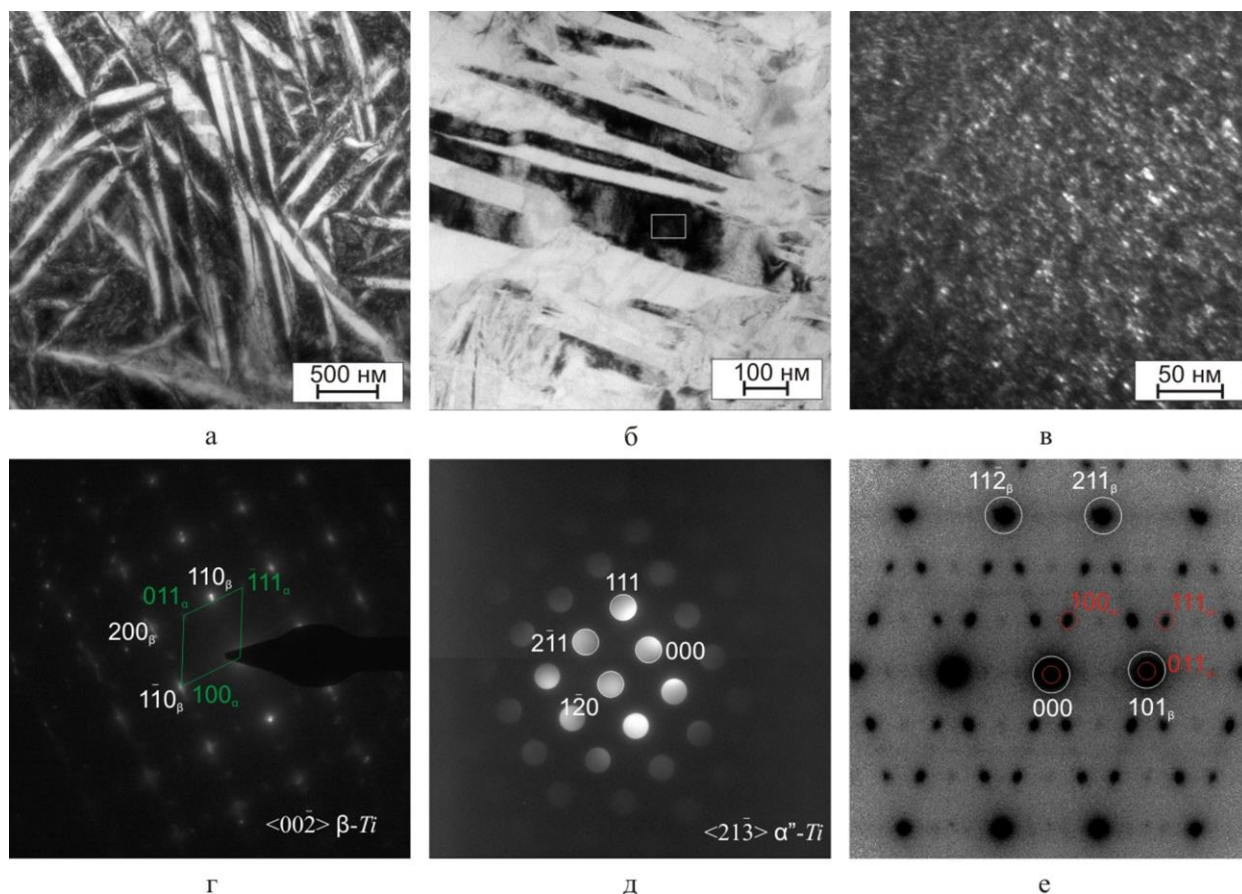
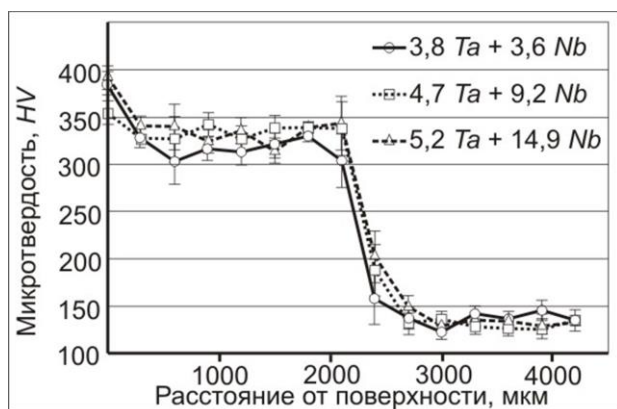


Рисунок 5 – Типичные снимки структуры наплавленных слоев (а, б, в) и соответствующие им картины микродифракции (г, д, е); а, г – наплавленный слой, содержащий $Ti - 13 \% Ta + 13 \% Nb$; б, в, д, е – наплавленный слой, содержащий $Ti - 15 \% Ta + 21 \% Nb$

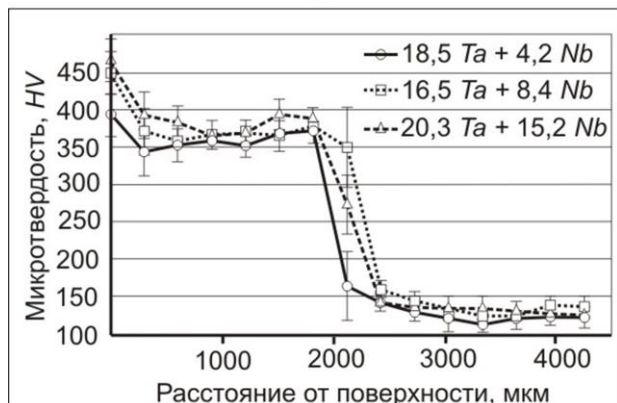
Графики распределения значений микротвердости в поперечных сечениях образцов различного состава приведены на рисунке 6. Микротвердость наплавленных слоев слабо зависит от концентрации легирующих элементов и составляет $HV 300 - 380$. При переходе в материал основы уровень микротвердости снижается до $\sim HV 140$. Значительное повышение микротвердости наплавленных слоев по сравнению с основным материалом может быть объяснено реализацией механизмов твердорастворного упрочнения и формированием мелкодисперсных мартенситных $\alpha'(\alpha'')$ -фаз. Испытания на статическое растяжение показали, что условный предел текучести наплавленных слоев находится на уровне 300 МПа, в то время как значения предела прочности находятся в диапазоне 650...800 МПа.

Динамические испытания свидетельствуют о снижении уровня ударной вязкости образцов с наплавленными слоями в среднем на 30 % по сравнению с материалом основы (от 330 Дж/см² для титана VT1-0 до ~ 210 Дж/см² для наплавленных образцов). Как в случае статического, так и динамического нагружения, не выявлено корреляции между уровнем механических свойств и содержанием легирующих элементов в наплавленных слоях.

Фрактографические исследования динамически разрушенных образцов показали, что наплавленные слои разрушаются хрупко с формированием сложного рельефа (рисунок 7 а). Отдельные участки разрушаются по границам бывших зерен β -фазы, в то время как другие участки можно охарактеризовать,



а



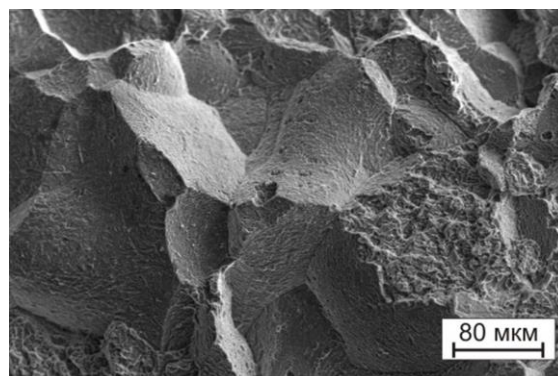
б

Рисунок 6 – Уровень микротвердости наплавленных слоев с различным содержанием тантала и ниобия

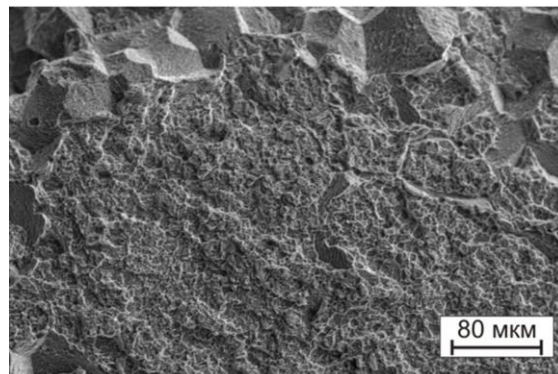
как места отрыва материала по телу бывших β -зерен (рисунок 7 б). На границах «наплавленный слой – металл основы» не наблюдается трещин и отслоений, что косвенно свидетельствует о высокой адгезионной прочности наплавленных слоев (рисунок 7 в).

В пятом разделе «Коррозионная стойкость поверхностных слоев, легированных танталом и ниобием» отражены особенности развития коррозионного разрушения, а также приведены данные о скорости коррозии наплавленных материалов в азотной и соляной кислотах.

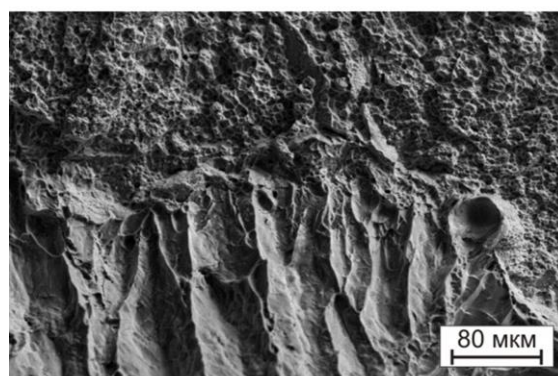
Электрохимические исследования наплавленных слоев в концентрированной соляной кислоте показали, что независимо от содержания тантала и ниобия, в образцах равновесный потенциал стабилизируется на уровне $-320 \dots -294$ мВ (здесь и далее значения потенциала приводятся относительно водородного электрода). Равновесный потенциал титана составил -385 мВ. Более высокие значения равновесного потенциала наплавленных слоев свидетельствуют о снижении скорости анодной реакции растворения металла. Равновесные потенциалы тантала и ниобия лежат в положительной области в диапазоне значений $700 \dots 750$ мВ, что соответствует пассивному состоянию материалов. По данным



а



б



в

Рисунок 7 – Фрактограммы поверхностей разрушения: а, б - поверхностный слой $Ti - 15\% Ta - 20\% Nb$; в - переходная зона «наплавленный слой - основной материал»

потенциодинамических исследований потенциал пассивации титана составил -96 мВ, в то время как для наплавленных образцов этот параметр находился в диапазоне -137...-96 мВ. Значения плотности тока начала пассивации приведены в таблице 2. Тантал и ниобий во всем исследуемом диапазоне потенциалов находятся в пассивном состоянии. Плотность тока в пассивном состоянии составила 9 мкА/см² и 17 мкА/см² для тантала и ниобия соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о более высокой коррозионной стойкости и термодинамической стабильности сформированных материалов по сравнению с титаном ВТ1-0.

Результаты электрохимических исследований слоев, легированных танталом и ниобием, в концентрированной азотной кислоте при температуре ~ 110 °С свидетельствуют о том, что материалы находятся в пассивном состоянии. Значения равновесного потенциала, как для наплавленных материалов, так и для образцов сравнения, изготовленных из титана ВТ1-0, тантала и ниобия, составляют в среднем ~ 1075 мВ. Потенциодинамические испытания существенную разницу в значениях плотности тока не выявили. В пассивном состоянии плотность тока для наплавленных материалов, а также для образцов из тантала и ниобия находится в диапазоне $5 \cdot 10^{-6} \dots 8 \cdot 10^{-6}$ А/см².

Результаты измерения скорости коррозии весовым методом отражены в таблицах 3 и 4. Фотографии поверхностей образцов после испытаний в концентрированной соляной кислоте приведены на рисунке 8.

В шестом разделе «Апробация результатов экспериментальных исследований» приведены рекомендации по практическому применению материалов со слоями, легированными танталом и ниобием. Разработанные материалы опробованы в ООО «ЭкспертНефтеГаз» при изготовлении узлов роторно-пластинчатых насосов для перекачки агрессивных сред, а также используются ООО «ИЯФ-ППТ» при разработке технологии изготовления особо коррозионностойких реакторов химических производств.

Таблица 2 Плотность тока начала пассивации образцов в концентрированном растворе соляной кислоты

<i>Ti</i> , %	<i>Ta</i> , %	<i>Nb</i> , %	Плотность тока, А/см ²
94,4	2,9	2,6	0,022
90,6	2,9	6,3	0,017
87,1	3,3	9,4	0,014
80,6	15,5	3,7	0,006
77,7	14,7	7,4	0,007
100	-	-	0,044

Таблица 3 Элементный состав образцов и скорость их коррозии в концентрированной соляной кислоте при температуре 25 °С

<i>Ti</i> , %	<i>Ta</i> , %	<i>Nb</i> , %	Скорость коррозии, мм/год
94,4	2,9	2,6	18,7
90,6	2,9	6,3	17,5
87,1	3,3	9,4	17,6
80,6	15,5	3,7	11,1
77,7	14,7	7,4	12,9
100	-	-	19,1
-	-	100	0,026
	100	-	0

Таблица 4 Элементный состав образцов и скорость их коррозии в концентрированной азотной кислоте при температуре 110 °С

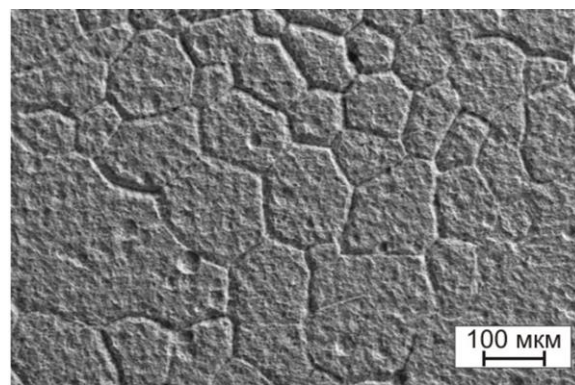
<i>Ti</i> , %	<i>Ta</i> , %	<i>Nb</i> , %	Скорость коррозии, мм/год
90,3	3,4	6,3	0,014
85	4	11	0,012
79,7	13,5	6,8	0,007
73,7	15	11,3	0,004
100	-	-	0,104
-	-	100	0,004
	100	-	0,001

Заключение

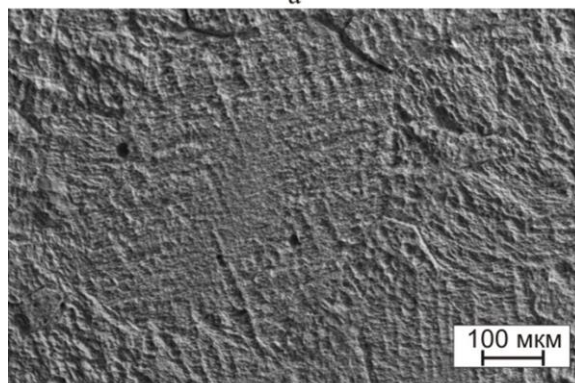
1. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка является эффективным технологическим процессом, позволяющим с высокой производительностью формировать коррозионно-стойкие тантал- и ниобийсодержащие сплавы на титановых заготовках. С применением данного процесса на образцах титана ВТ1-0 наплавлены коррозионно-стойкие слои повышенной толщины (1,7...2,2 мм), содержащие до 21 % ниобия и 33 % тантала. Расчётный коэффициент β -стабилизации поверхностно легированных слоев находится в диапазоне от 0,18 до 0,97. При электронно-лучевой наплавке тантала функцию смачивающей компоненты, обеспечивающей защиту ванны расплава от окисления и формирование однородного по составу наплавленного слоя, эффективно выполняет порошок титана. Наплавка ниобия на титан возможна без введения дополнительной смачивающей компоненты. Установлено, что для формирования на основе титана поверхностно-легированных материалов высокого качества отношение суммарного объема порошков титана и ниобия к объему порошка тантала должно быть не менее единицы.

2. Лучшими качествами для наплавки на титановые заготовки тантала и ниобия обладает флюс в виде смеси порошков CaF_2 и LiF в соотношении 3:1 по массе. Во избежание признаков окисления поверхностных слоев объем флюсов должен составлять 1,2...1,5 от объема металлических порошков. Концентрация кислорода и азота в наплавленных слоях составила 0,192 % и 0,022 %, что соответствует значениям, допустимым для промышленных титановых сплавов. Максимальное содержание растворенных газов зафиксировано в слоях глубиной до 40 мкм. Присутствие в данных слоях кислорода, являющегося сильным α -стабилизатором и входящего в состав твердого раствора внедрения, является причиной существенного повышения твердости и прочностных характеристик материала.

3. Структура наплавленных слоев, содержащих до 9,5 % тантала и 4,5 % ниобия, представлена α' - и β -фазами. Повышение концентрации легирующих элементов (до 17,9 % тантала и 17,3 % ниобия) сопровождается замещением α' -фазы α'' -фазой. Рефлексы β -фазы титана зафиксированы на всех полученных в работе сплавах. Рентгенограммы, полученные при исследовании всех разработанных материалов, характеризуются значительным уширением пиков, которое



а



б

Рисунок 8 – Поверхности наплавленных слоев после выдержки в течение 15 часов в концентрированной соляной кислоте: а - $Ti - 15,57\%$ $Ta - 3,75\%$ Nb ; в, г - $Ti - 14,77\%$ $Ta - 7,48\%$ Nb

обусловлено высоким уровнем микронапряжений и малым размером областей когерентного рассеяния.

4. Методами рентгеноструктурного анализа и анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (*EBSD*) установлено, что первичная кристаллизация ванны расплава сопровождается формированием в β -фазе аксиальной текстуры типа $\langle 100 \rangle$. В соответствии с ориентационным соотношением Бюргера параллельно плоскости обработки ориентированы семейства плоскостей $\{01\bar{1}2\}$, $\{\bar{2}110\}$ α -фазы титана. Указанный тип текстуры сохраняется также после проведения дополнительной термической обработки сплавов при 950°C .

5. Полнопрофильный анализ рентгенограмм, выполненный по методу Ритвельда в сочетании с моделью Марча-Долласа, учитывающей характер формирующейся при наплавке текстуры, показал, что в сплаве, содержащем 3,7 % *Ta* и 3,6 % *Nb*, объемная доля α -фазы титана составляет 99 %, β -фазы – 1 %. Увеличение количества легирующих элементов до 9,5 % *Ta* и 4,5 % *Nb* сопровождается ростом объемной доли β -фазы до 11 %.

6. Структура поверхностно легированных слоев на сплаве ВТ1-0 имеет пластинчатый характер. Слоистая структура исследуемых материалов представляет собой пластинки α' (α'')-фазы в сочетании с прослойками β -титана между ними. Рост концентрации легирующих элементов в наплавленных слоях, приводящий к повышению коэффициента β -стабилизации, сопровождается увеличением дисперсности структурных составляющих. В сплаве с $K_\beta = 0,45$ α' -фаза представлена пакетами из 5...10 параллельных пластин толщиной до 1000 нм, разделенных прослойками β -титана толщиной ~ 50 нм. Увеличение концентрации легирующих элементов, приводящее к возрастанию K_β до 0,62, сопровождается уменьшением толщины пластин α' -фазы до ~ 500 нм. Легирование титановых заготовок танталом и ниобием в объеме, соответствующем $K_\beta = 0,89$, приводит к смене типа формирующегося мартенсита с α' на α'' и снижению толщины отдельных структурных составляющих до ~ 100 нм.

7. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковых смесей, содержащих тантал и ниобий, приводит к формированию на поверхности образцов из титана ВТ1-0 высокопрочных слоев с микротвердостью 3000...3800 МПа, что в 2,5 раза выше по сравнению с основным материалом. Максимальное значение микротвердости (4500 МПа), зафиксированное в тонком поверхностном слое глубиной до 40 мкм, обусловлено насыщением материала газами атмосферы в процессе кристаллизации расплава. Поверхностное легирование титана ВТ1-0 танталом и ниобием сопровождается значительным ростом прочностных свойств сплавов. Предел прочности наплавленных слоев находится на уровне 650...800 МПа, что примерно в два раза выше по сравнению с образцами из титана ВТ1-0.

8. Поверхностное легирование образцов титана ВТ1-0 танталом и ниобием благоприятно отражается на коррозионной стойкости сплавов в агрессивных средах различного типа. Введение в титан 3,4 % тантала и 6,3 % ниобия снижает скорость коррозионного разрушения сплава в концентрированном растворе азотной кислоты при температуре 110°C в 7,4 раза (от 0,104 мм/год до 0,014 мм/год). Скорость коррозионного разрушения наплавленного слоя, содержащего 15 % тантала и 11,3 % ниобия, в 26 раз ниже, чем у титана ВТ1-0.

9. При введении 14,77 % тантала и 7,48 % ниобия равновесный потенциал титана в концентрированном растворе соляной кислоты возрастает от -385 мВ до -300 мВ. Наплавленный слой, содержащий 15,57 % тантала и 3,75 % ниобия, корродирует со скоростью 11,1 мм/год, что в 1,7 раза ниже по сравнению с титаном VT1-0. Установлено, что тантал является легирующим элементом, обеспечивающим эффективное снижение скорости коррозии титановых сплавов, в то время как легирование ниобием позволяет предотвратить развитие межкристаллитного разрушения по границам бывших зерен β -фазы в концентрированном растворе соляной кислоты при температуре 25 °С.

10. Результаты выполненной диссертационной работы используются в Новосибирском государственном техническом университете в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям «Материаловедение и технологии материалов» и «Наноинженерия» (в лекционных курсах, а также при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Прогрессивные материалы и технологии» и «Материаловедение»).

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошков системы титан-тантал-ниобий на титан VT1-0 [Текст] / И. А. Батаев, А. П. Алхимов, О. А. Бутыленкова, Т. В. Журавина, О. Г. Ленивцева, А. А. Руктуев // Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты. - 2012. - № 1(54). - С. 90-95.

2. Структурные исследования покрытий системы "титан-тантал", полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки [Текст] / И. А. Батаев, Т. В. Журавина, О. Г. Ленивцева, Ю. Н. Ромашова, А. А. Руктуев // Обработка металлов №3(56).- 2012.- с. 56 – 59.

3. Коррозионная стойкость слоев *Ti-Ta*, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковой смеси на пластины из технически чистого титана [Текст] / И. А. Батаев, М. Г. Голковский, Т. В. Журавина, А. А. Руктуев, В. В. Самойленко // Ползуновский вестник. - 2012. - № 3/1. - С. 80-84.

4. Рентгеноструктурные исследования поверхностных слоев титана, легированного танталом / И. А. Батаев, А. А. Батаев, С. В. Веселов, М. Г. Голковский, Т. В. Журавина, А. А. Руктуев // Ползуновский вестник. - 2012. - № 3/1. - С. 85-89.

5. *Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum* [Text] / M.G. Golkovski, I.A. Bataev, A.A. Bataev, A.A. Ruktuev, T.V. Zhuravina, N.K. Kuksanov, R.A. Salimov, V.A. Bataev // *Materials Science and Engineering A*. - 2013. – Vol. 578. – P. 310-317.

6. Многослойная электронно-лучевая наплавка танталсодержащих порошковых смесей на заготовки из титана VT1-0 [Текст] / А. А. Руктуев, М. Г. Голковский, В. В. Самойленко, А. И. Попелюх, Н. В. Плотникова, Н. С. Белосова // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. - 2013. - № 4. - С. 43-48.

7. *Ruktuev, A. A. Structure and corrosion resistance of Ti-Ta-Nb coatings obtained by electron beam cladding in the air-atmosphere* [Text] / A. A. Ruktuev, V. V. Samoylenko, M. G. Golkovski // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 682. – P. 100 – 103.

8. 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. Ленивецца, В. С. Ложкин // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. - 2015. - № 2. - С. 55-63.

В прочих изданиях

9. Журавина, Т. В. Исследование покрытий, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой обработки [Текст]/ Т. В. Журавина, А. А. Руктуев, В. В. Самойленко // XII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых, Екатеринбург, 14–18 нояб., 2011 г. : сборник научных трудов – Екатеринбург : УрФУ, 2011. – С. 138-140.

10. Журавина, Т. В. Структура и коррозионные свойства поверхностнолегированного титана VT1-0 [Текст] / Т. В. Журавина, А. А. Руктуев, В. В. Самойленко // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, 2–4 дек. 2011 г. : в 6 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – Ч. 3. – С. 8-10.

11. Журавина, Т. В. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошков титана, тантала и ниобия на технический титан VT1-0 [Текст] / Т. В. Журавина, А. А. Руктуев, В. В. Самойленко // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе. Материалы 8-й Всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск, 2012. - С. 177-179.

12. Руктуев, А. А. Структура, механические свойства и коррозионная стойкость покрытий системы *Ti-Ta* на пластинах из сплава VT1-0 [Текст] / А. А. Руктуев, Т. В. Журавина, В. В. Самойленко // XIII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых, Екатеринбург, 12–16 нояб., 2012 г. : сборник научных трудов. – Екатеринбург : УрФУ, 2012. – С. 334-336.

13. Руктуев А.А. Коррозионностойкие покрытия системы *Ti-Ta*, полученные методом вневакуумной электронно-лучевой обработки [Текст] / А. А. Руктуев // IX Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов "Физико-химия и технология неорганических материалов", 23-26 октября, 2012 г. – Москва : ИМЕТ РАН, 2012. – С. 525 – 526.

14. Батаев, И. А. Поверхностное легирование титана танталом с использованием электронного пучка, выведенного в атмосферу [Текст] / И. А. Батаев, А. А. Руктуев // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине : доклады 5 Всероссийской конференции, Новосибирск, 26–29 марта 2013 г. – Новосибирск : Параллель, 2013. – С. 24-26.

15. *Atmospheric electron beam surface alloying of titanium with tantalum and niobium* [Text]/ А. А. Руктуев, В. В. Самойленко, И. А. Батаев, А. А. Батаев, В. А. Батаев, М. Г. Голковский, И. К. Чакин // *Proceedings of a Conference Processing and fabrication of advanced materials XXII, Singapore, 18–20 December 2013.* – P. 341–355.

16. Самойленко, В. В. Металлографические исследования покрытий, полученных на поверхности титана VT1-0 методом вневакуумной электронно-лучевой обработки [Текст] / В. В. Самойленко, А. А. Руктуев // Труды 14 Все-

российской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 100-летию со дня рождения А. И. Покрышкина (24–26 апр. 2013 г.). – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 564-566.

17. Руктуев, А. А. Структура и коррозионная стойкость покрытий системы "Ti-Ta-Nb", сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки [Текст] / А. А. Руктуев, П. Н. Комаров // 14 Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов – молодых ученых, Екатеринбург, 11–15 нояб. 2013 г. : сборник научных трудов. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – С. 347-348.

18. 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 : труды 4 международной научно-практической конференции, Новосибирск, 2–4 окт. 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 319-322.

19. Руктуев, А. А. Формирование покрытий системы Ti-Ta-Nb на поверхности титана ВТ1-0 [Текст] / А. А. Руктуев, М. Р. Юркевич // Студент и научно-технический прогресс. Новые материалы и технологии : материалы 51 международной научной студенческой конференции, Новосибирск, 12–18 апр. 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГУ, 2013. – С. 61.

20. *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. – 120.*

21. 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 : труды 24 международной конференции, Севастополь, 7–12 июля 2014 г. – Москва, 2014. – С. 345-351.

22. Комаров, П.Н. Исследование коррозионной стойкости и структуры покрытий трехкомпонентной системы Ti-Ta-Nb сформированных на поверхности титана ВТ1-0 вневакуумной электронно-лучевой обработкой [Текст] / П. Н. Комаров, А. А. Руктуев // Актуальные проблемы в машиностроении : материалы 1 международной научно-практической конференции, Новосибирск, 26 марта 2014 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 532-535.

23. 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 : сборник трудов 5 международной научно-практической конференции, Юрга, 22–23 мая 2014 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2014. – Т. 1. – С. 347-349.

24. Руктуев, А. А. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошков тантала и ниобия на титан марки ВТ1-0 [Текст] / А. А. Руктуев, И. А. Батаев, П. Н. Комаров // Электротехника. Энергетика. Машиностроение (ЭЭМ–2014): сборник научных трудов 1 международной научной конференции молодых

ученых, Новосибирск, 2–6 дек. 2014 г. В 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Ч. 3. Секция «Машиностроение». – С. 240-243.

25. Руктуев, А. А. Получение коррозионно-стойких покрытий системы «Ti-Ta-Nb» методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки [Текст] / А. А. Руктуев, И. С. Лаптев, А. А. Косолапов // 15 Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов – молодых ученых, Екатеринбург, 8–12 дек. 2014 г. : сборник научных трудов – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – С. 389-391.

26. Ruktuev, A. A. Structure and properties of welded joints of titanium substrates with Ti-Ta corrosion resistant coating [Text] / A. Ruktuev, P. Komarov, M. Golkovski // Applied Mechanics and Materials. - 2015. – Vol. 698 : Electrical Engineering, Energy, Mechanical Engineering, EEM 2014. – P. 316-320.

27. Structure, properties and texturing of Ti-Ta-Mo alloys produced by non-vacuum electron beam surface alloying of Ti [Text] / A. Ruktuev, I. Bataev, M. Golkovsky, A. Bataev, I. Laptev, A. M. Jorge // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - Vol. 788 : Actual Problems and Decisions in Machine Building. - P. 230-236.

28. Комаров, П. Н. Исследование сварных соединений коррозионно-стойких материалов [Текст] / П. Н. Комаров, А. А. Руктуев, В. С. Самохвалов // Наука. Технологии. Инновации : сборник научных трудов : в 9 ч., Новосибирск, 1–5 дек. 2015 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 3. – С. 113-115.

29. Комаров, П. Н. Сварные соединения биметаллических коррозионно-стойких материалов на основе титана VT1-0 [Текст] / П. Н. Комаров, А. А. Руктуев // Уральская школа молодых металлургов: сборник материалов и докладов 16 международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых, Екатеринбург, 7–11 дек. 2015 г. В 2 ч.– Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2015. – Ч. 2. – С. 311-314.

30. Структура и коррозионная стойкость покрытий системы "титан-ниобий", сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки на поверхность титана VT1-0 [Текст] / И. А. Поляков, В. В. Самойленко, О. Г. Ленивцева, А. А. Руктуев, М. Г. Голковский, И. С. Иванчик, И. Ю. Жильцов // Наука. Промышленность. Оборона : труды 16 Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 70-летию Победы Великой Отечественной войне (Новосибирск, 22–24 апр. 2015 г.). – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – С. 866-870.

31. 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 : тезисы докладов международной конференции, Томск, 21–25 сент. 2015 г. – Томск : Изд-во ИФПМ СО РАН, 2015. – С. 486-488.

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 № 1459 подписано в печать 19.10.2016 г.