

На правах рукописи



ГРУШИН ИВАН АЛЕКСЕЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ НА СТРУКТУРУ И
СВОЙСТВА α - И ПСЕВДО α - ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение и технология обработки материалов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Скворцова Светлана Владимировна

Официальные оппоненты: – **Полькин Игорь Степанович**, доктор технических наук, профессор, ОАО «Всероссийский институт легких сплавов», начальник научно-информационного центра имени В.И. Добаткина

– **Ашмарин Артем Александрович**, кандидат технических наук, ФГБУН «Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук», старший научный сотрудник,

Ведущее предприятие: – ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

Защита диссертации состоится 28 июня 2018 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.125.15 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, 3. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvorgovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=90537.

Автореферат разослан «__» _____ 2018г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Развитие науки и техники связано с постоянным повышением требований к свойствам материалов. Одной из основных тенденций при создании новых летательных аппаратов остается снижение габаритно-весовых показателей для обеспечения заданных тактико-технических характеристик. Перспективным путем создания новых материалов на основе титана, обладающих повышенными удельными характеристиками, является их легирование элементами замещения с меньшими, чем у титана, атомными массами, и имеющими хотя бы небольшую растворимость в нем в твердом состоянии.

Другой путь – это модернизация существующих сплавов путем микролегирования, позволяющая повышать их физико-механические и эксплуатационные характеристики, в том числе жаропрочность, жаростойкость и сопротивление усталости, при небольшой коррекции существующих технологических процессов производства и обработки полуфабрикатов и изделий. Наиболее существенные результаты в этом направлении могут быть достигнуты при использовании для микролегирования редкоземельных металлов (РЗМ) с уникальным сочетанием физико-химических свойств. Особый интерес к использованию РЗМ связан с их способностью сильно воздействовать на структуру и свойства сплавов при микролегировании. Однако влияние микролегирования РЗМ на структурное состояние и комплекс свойств титановых сплавов, особенно жаропрочных, возможности управления их структурой и свойствами термической обработкой изучены недостаточно.

Таким образом, исследование влияния «легких» элементов и микролегирования РЗМ, в частности гадолинием, на структуру и комплекс свойств титановых сплавов с целью повышения их удельных эксплуатационных характеристик является актуальной научной и практической задачей.

Цель работы состояла в изучении влияния редкоземельных элементов на фазовый состав, структуру и свойства α - и псевдо α - сплавов на основе титана и

разработке на этой основе технологий их обработки, обеспечивающих повышение удельных физико-механических и эксплуатационных характеристик.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Изучить влияние элементов, имеющих плотность меньше $4,5 \text{ г/см}^3$, на структуру и физические свойства титана.
2. Изучить формирование фазового состава, структуры и физико-механических свойств сплавов системы Ti-6Al-Sc.
3. Определить влияние микродобавок гадолия на структуру жаропрочного сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si в литом и деформированном состояниях.
4. Исследовать влияние термической обработки на формирование структуры и свойства жаропрочного сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si с различным содержанием гадолия.
5. Оценить влияние гадолия на скорость окисления сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si при повышенных температурах.
6. Изучить влияние гадолия на кратковременную и циклическую прочность сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si при повышенных температурах.
7. Изучить влияние гадолия на структуру и свойства сварных соединений жаропрочного сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si при нормальной и повышенной температурах.

Научная новизна

1. Впервые построен политермический разрез тройной диаграммы состояния системы Ti-6Al-Sc при содержании скандия от 0 до 10 масс. % в интервале температур от 800 до 1100°C. Показано, что увеличение содержания скандия на каждые 2% приводит к снижению плотности сплава в среднем на $0,025 \text{ г/см}^3$.
2. Установлено различное влияние микролегирования гадолинием на структуру сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si в литом и деформированном состояниях. Показано, что в литом состоянии гадолий не оказывает влияния

на размер β -зерна, но приводит к измельчению внутрезеренной структуры α -фазы, преобразуя ее от пакетно-пластинчатой до видманштеттовой. В деформированном состоянии введение 0,2 масс. % Gd в 3,5 раза уменьшает размер β -зерна, практически не оказывая влияния на внутрезеренную структуру.

3. Установлено, что легирование сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si 0,2 масс. % Gd не оказывает влияния на предпочтительные места выделения силицидов, но в 1,5-2 раза уменьшает размер их частиц.
4. Установлено, что введение 0,05 и 0,2 масс. % Gd в сплав Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si не оказывает существенного влияния на размер β -зерна в сварном шве листовых полуфабрикатов, полученных сваркой нерасходуемым электродом. Использование расходуемого электрода из сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si с 0,05 и 0,2 масс. % Gd при аргонно-дуговой сварке листов из сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si позволяет в 4-5 раз уменьшить размер β -зерна в сварном шве.

Теоретическая и практическая значимость

1. Доказана возможность измельчения внутрезеренной литой структуры при легировании жаропрочного псевдо- α титанового сплава 0,2 масс.% гадолия.
2. Разработан режим термической обработки сварных соединений из опытного жаропрочного сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si с 0,2 масс. % Gd, заключающийся в нагреве до 900 °С, изотермической выдержке при этой температуре в течение 1 часа, охлаждении с печью до 730 °С, далее на воздухе до комнатной температуры. Режим позволяет повысить предел прочности сварного соединения на 30% и увеличить относительное удлинение на 8 %.
3. Разработаны технологические рекомендации по деформационной и термической обработке опытного сплава Ti-6Al-10Sc, позволившие получить кованный полуфабрикат с уровнем свойств, не уступающих свойствам плиты из промышленного сплава ВТ6, а по удельным характеристикам превосходящих его.

Методология и методы исследования

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых, государственные стандарты РФ.

При выполнении работы были использованы современные методы исследования: металлографический, рентгеноструктурный анализы и электронная микроскопия, испытания на растяжение и сопротивление усталости, измерение твердости.

Положения, выносимые на защиту

1. Закономерности изменения плотности сплавов на основе титана при легировании элементами, имеющими более низкий удельный вес.
2. Закономерности изменения структуры, фазового состава и плотности сплавов системы Ti-6Al-Sc с различным содержанием скандия.
3. Закономерности изменения структуры жаропрочного сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si с различным содержанием гадолиния в литом и деформированном состояниях.
4. Закономерности изменения структуры сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si с различным содержанием гадолиния при термическом воздействии.
5. Закономерности изменения свойств сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si в зависимости от содержания гадолиния при комнатной и повышенных температурах.

Степень достоверности результатов

Все результаты получены на сертифицированном и поверенном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Испытания и измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ, достоверность результатов подтверждается хорошим совпадением экспериментальных данных и теоретических расчетов, использованием методов математической статистики при обработке результатов.

Апробация результатов

Материалы работы доложены на 25 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе : на Международных конференциях «Ti в СНГ» (Екатеринбург 2010 г., Львов 2011 г., Казань 2012г., Донецк 2013 г., Нижний Новгород 2014 г., Каменск-Уральский 2015 г.), 7-ом Международном аэрокосмическом конгрессе IAC-12 (Москва, 2012 г.), на всероссийской научной конференции Материаловедение и металлофизика легких сплавов (Екатеринбург, 2010г., 2012г.), на Международной научно-технической уральской школе-семинаре металлургов–молодых ученых (Екатеринбург, 2014, 2015 г., 2016г.), на девяти Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, 2009–2017), на 12-й Всероссийской международной научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, 2013 г.), на международной конференции «Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2016», (Москва, 2016г.), на 16-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2017» (Москва, 2017г.), на XXXIII Туполевских чтениях (школа молодых ученых):Международная молодежная научная конференция (Казань,2017г.), на международной научной конференции 2017 International Conference on Mechanical, Material and Aerospace Engineering (2MAE 2017) (Китай, 2017)

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 17 работах, 6 из которых – в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК, и изданиях, включенных в базу данных Scopus. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Объем диссертации и её структура. Диссертация изложена на 166 страницах машинописного текста, содержит 72 рисунка и 23 таблицы. Работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов и списка литературы из 125 наименований.

Глава I. Состояние вопроса

В главе приведен анализ литературных данных, посвященных принципам создания сплавов на основе титана, обеспечивающим заданные характеристики.

Рассмотрены основные критерии, влияющие на плотность сплавов на основе титана, такие как: система легирования, тип химической связи и твердого раствора. Сформулированы основные принципы получения титановых сплавов с пониженной плотностью. Обоснован выбор легирующих элементов для создания сплавов на основе титана с пониженной плотностью. Рассмотрены принципы легирования жаропрочных титановых сплавов и влияние микролегирования РЗМ на структуру и характеристики жаропрочности. На основе анализа литературных данных поставлена цель работы и сформулированы конкретные задачи исследований.

Глава II. Объекты и методы исследования¹

Исследования проводили на образцах из опытных титановых сплавов, химический состав которых приведен в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

Химический состав опытных титановых сплавов с пониженной плотностью*

Сплав	Легирующие элементы, масс. %				Примеси, масс. %		
	Al	Si	B	Sc	C	N	O
Ti-20Sc	-	-	-	19,6	≤0,01	≤0,01	≤0,03
Ti-7Al-8Si	6,9	7,8	-	-	≤0,01	≤0,01	≤0,03
Ti-8Si-4B	-	7,9	4,2	-	≤0,01	≤0,01	≤0,03
Ti-6Al-2Sc	5,9	-	-	2,1	≤0,01	≤0,01	≤0,03
Ti-6Al-4Sc	5,8	-	-	3,9	≤0,01	≤0,01	≤0,03
Ti-6Al-6Sc	6,1	-	-	5,8	≤0,01	≤0,01	≤0,03
Ti-6Al-8Sc	5,8	-	-	8,1	≤0,01	≤0,01	≤0,03
Ti-6Al-10Sc	6,1	-	-	10,2	≤0,01	≤0,01	≤0,03

¹ Основные экспериментальные результаты получены на оборудовании ресурсного центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.

Таблица 2.

Химический состав образцов из опытных жаропрочных титановых сплавов*

Сплав	Легирующие элементы, масс. %**										
	Al	Mo	Zr	Sn	Si	Nb	Fe	Gd	C	N	O
Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si	6,49	0,67	3,99	2,39	0,19	0,95	0,046	-	≤0,01	≤0,01	≤0,025
Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si-0,05Gd	6,45	0,68	3,92	2,47	0,17	0,96	0,047	0,045	≤0,01	≤0,01	≤0,025
Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si-0,2Gd	6,71	0,70	3,89	2,50	0,17	0,99	0,048	0,195	≤0,01	≤0,01	≤0,025

* - основа титан

** - здесь и далее по тексту содержание легирующих элементов дано в % по массе

В работе использовались следующие методы исследования структуры: оптическая и электронная микроскопия (микроскопы AXIO Observer.A1m и JEM 200CX JEOL), рентгеноструктурный фазовый анализ (дифрактометр ДРОН-4). Сварку горячекатаных листов толщиной 2 мм проводили на автоматической аргонно-дуговой установке АДСВ-7 нерасходуемым вольфрамовым и расходуемым электродами в защитной атмосфере. Глубину альфированного слоя определяли измерением микротвердости на «косых» шлифах. Испытания на малоцикловую усталость, кратковременную прочность при нормальной и повышенных температурах, определение твердости и плотности проводили согласно соответствующим ГОСТ на поверенном испытательном оборудовании. Экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики.

Глава III. Фазовый состав, структура и физико-механические свойства сплавов системы Ti-6Al-Sc и сплавов Ti-20Sc и Ti-7Al-8Si

Глава посвящена изучению влияния добавок различных легирующих элементов на плотность титана. На основе изучения взаимодействия титана с элементами, имеющими плотность (ρ) меньше $4,5 \text{ г/см}^3$, и проведенных теоретических расчетов плотности опытных сплавов было выбрано несколько сплавов, имеющих значение ρ на 5% меньше, чем у сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) (табл. 3).

Методом тройного вакуумно-дугового переплава с нерасходуемым вольфрамовым электродом были получены опытные слитки и определена их плотность в литом состоянии. Показано, что требуемое значение плотности было достигнуто на экспериментальных сплавах Ti-20Sc и Ti-7Al-8Si (табл. 3). В сплаве Ti-8Si-4B плотность практически не отличается от плотности сплава Ti-6Al-4V, что обусловлено образованием большого числа боридов и силицидов.

Таблица 3.

Расчетная и экспериментальная плотность опытных сплавов

Сплав	Плотность, г/см^3	
	Расчетная	Экспериментальная
Ti-6Al-4V	4,45	4,44
Ti-7Al-8Si	4,21	4,26
Ti-8Si-4B	6,8	4,42
Ti-20Sc	4,20	4,12

В связи с высокой стоимостью скандия для дальнейших исследований были выплавлены слитки, содержащие 6% алюминия и от 2 до 10% скандия. Установлено, что увеличение содержания Sc в сплавах системы Ti-6Al-Sc до 10 масс.% приводит к постепенному уменьшению размера структурных составляющих в литом состоянии (рис. 1).

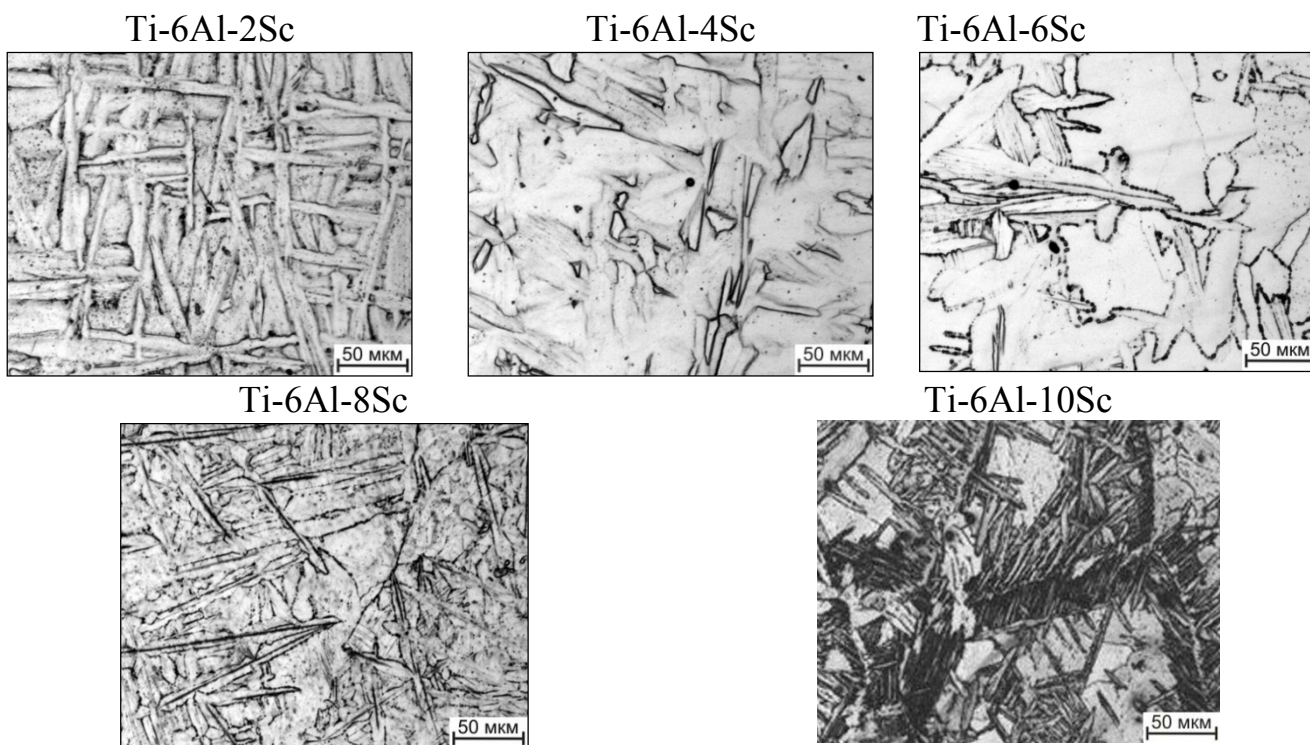


Рис. 1. Структура образцов сплавов системы Ti-6Al-Sc в литом состоянии.

Изучено влияние температуры нагрева под закалку на формирование фазового состава и структуры сплавов системы Ti-6Al-Sc. По полученным результатам построен политермический разрез тройной диаграммы Ti-6Al-Sc (рис. 2) в интервале концентраций скандия от 0 до 10 масс. % и температур от 800 до 1100 °С. Показано, что граница стабильности однофазной β -структуры снижается с увеличением концентрации скандия от 0 до 8 % с 1030 до 975 °С, а при 10 % скандия возрастает до 990°С. В сплаве с содержанием скандия до 8 % ниже β -области находится двухфазная область $\alpha_{Ti}+\beta$, которая при температурах ниже 975...960 °С сменяется однофазной структурой α_{Ti} . При содержании скандия более 4 % формируется двухфазная область $\alpha_{Ti}+\alpha_{Sc}$. Ее граница при увеличении содержания скандия резко смещается в сторону высоких температур и последовательно пересекает границы раздела областей: $\alpha_{Ti} / \alpha_{Ti}+\beta$ и $\alpha_{Ti}+\beta / \beta$. В результате в сплавах с содержанием скандия более 8 % при температурах выше 950°С образуется сначала трехфазная структура $\alpha_{Ti}+\alpha_{Sc}+\beta$, а затем (при температуре более 975°С) двухфазная – $\alpha_{Sc}+\beta$.

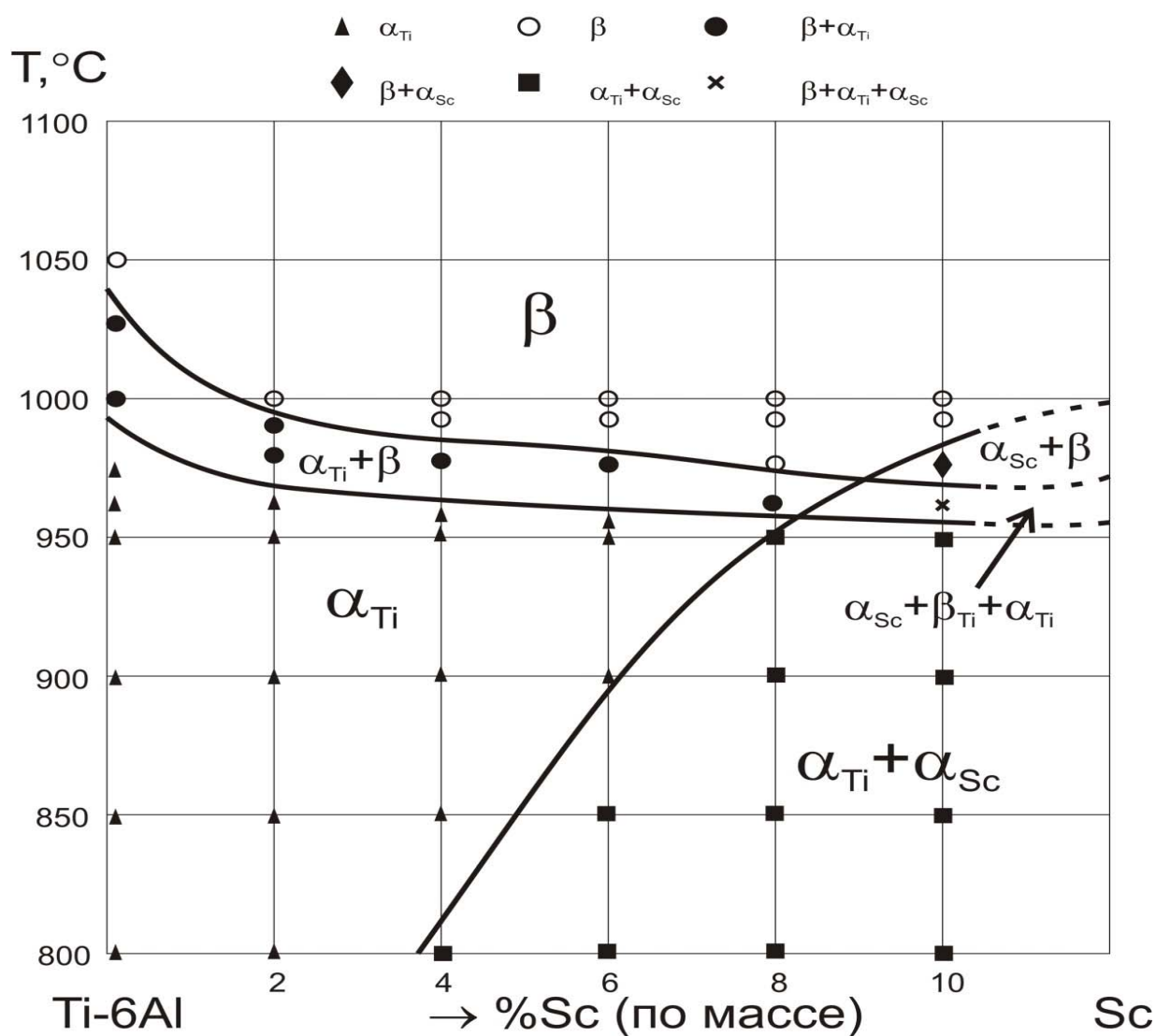


Рис. 2. Политермический разрез тройной диаграммы состояния Ti-6Al-Sc

Изучено влияние Sc на изменение плотности сплавов системы Ti-6Al-Sc. Установлено, что увеличение содержания скандия на каждые 2% приводит к снижению плотности сплава в среднем на 0,025 г/см³ (табл. 4).

Таблица 4.

Плотность сплавов системы Ti-6Al-Sc в литом состоянии.

Сплав	Плотность, г/см ³
Ti-6Al-2Sc	4,31
Ti-6Al-4Sc	4,28
Ti-6Al-6Sc	4,26
Ti-6Al-8Sc	4,24
Ti-6Al-10Sc	4,21

Изучено влияние термической обработки на формирование фазового состава, структуры и свойства опытного сплава Ti-6Al-10Sc. На основе проведенных исследований было опробовано три режима термической обработки, которые позволили получить различные соотношения прочности и пластичности сплава Ti-6Al-10Sc (табл. 5) и удельную прочность от 24,5 до 25,7 км, что на 14% выше удельной прочности сплава ВТ6.

Таблица 5.

Механические свойства образцов из сплава Ti-6Al-10Sc и ВТ6 после различных режимов термической обработки

Сплав	Режим обработки	ρ , г/см ³	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	$\frac{\sigma_b}{\rho}$, м ² /с ² *10 ³ , (км)
Ti-6Al-10Sc	800 °С, 40 мин, охл на в-хе	4,21	1060	1020	2,5	251,8 (25,7)
	800 °С, 40 мин, охл в печи	4,21	1035	980	3,5	245,8 (25,1)
	950 °С, 20 мин, охл на в-хе	4,21	1010	975	6,2	239,9 (24,5)
ВТ6	800 °С, 40 мин, охл на в-хе	4,45	980	-	10,8	220,2 (22,4)

Глава IV. Влияние микролегирования гадолинием на структуру и свойства опытного жаропрочного титанового сплава

Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si

Глава посвящена изучению влияния микролегирования гадолинием на структуру жаропрочного титанового сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si в литом и деформированном состояниях. Методом двойного вакуумно-дугового переплава были получены слитки массой по 20 кг с содержанием гадолиния 0, 0,05 и 0,2 масс.% (табл. 2). Методом пробных закалок была определена температура перехода ($T_{\text{пп}}$) в однофазную β -область. Установлено, что введение 0,05% Gd повышает $T_{\text{пп}}$ с 1000 до 1020°С, а 0,2% Gd – до 1040°С. Изучена микроструктура опытных сплавов в литом состоянии. Установлено, что микролегирование гадолинием до 0,2% не оказывает влияния на размер исходного β -зерна, который во

всех трех сплавах составил около 1700 мкм, но способствует изменению внутрезеренной структуры с пакетно-пластинчатой на видманштеттовую (рис. 3).

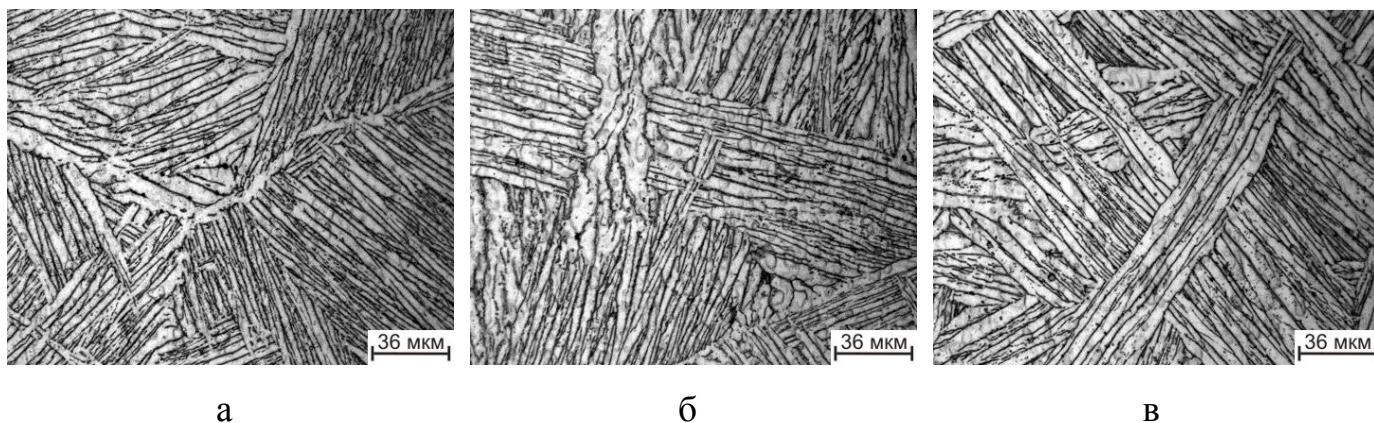


Рис. 3. – Микроструктура литых образцов из сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si с различным содержанием гадолиния: 0% Gd (а), 0,05% Gd (б) и 0,2% Gd (в)

Из сплавов были получены листовые полуфабрикаты толщиной 2 мм по технологической схеме, используемой для жаропрочных псевдо α -титановых сплавов. Ковкой в β -, а затем в $\alpha+\beta$ -области вначале были получены заготовки толщиной 12 мм, которые затем прокатывались при температуре ($\alpha+\beta$)-области (950°C) до толщины 2 мм.

Установлено, что легирование гадолинием приводит к уменьшению в структуре деформированного полуфабриката количества первичной α -фазы и небольшому увеличению размера ее частиц (рис. 4). Это обусловлено тем, что ковка всех заготовок проводилась при температуре 980°C, которая для сплава без гадолиния на 20°C ниже температуры $T_{пп}$, а для сплава с 0,2%Gd – на 60°C. Таким образом, в процессековки в сплавах присутствовало разное количество α -фазы: минимальное – с 0% Gd и максимальное с 0,2% Gd. Последующее охлаждение до комнатной температуры приводит к формированию структуры, содержащей разное количество вторичной α -фазы (рис. 4). Микролегирование сплава гадолинием приводит к увеличению предпочтительных мест зарождения α -фазы, поэтому в процессе охлаждения сплава без гадолиния преимущественно происходит рост существующих частиц первичной α -фазы (рис. 4), а в сплавах с 0,05 и 0,2% Gd – распад β -фазы с выделением вторичной дисперсной α -фазы (рис. 4 б, в).

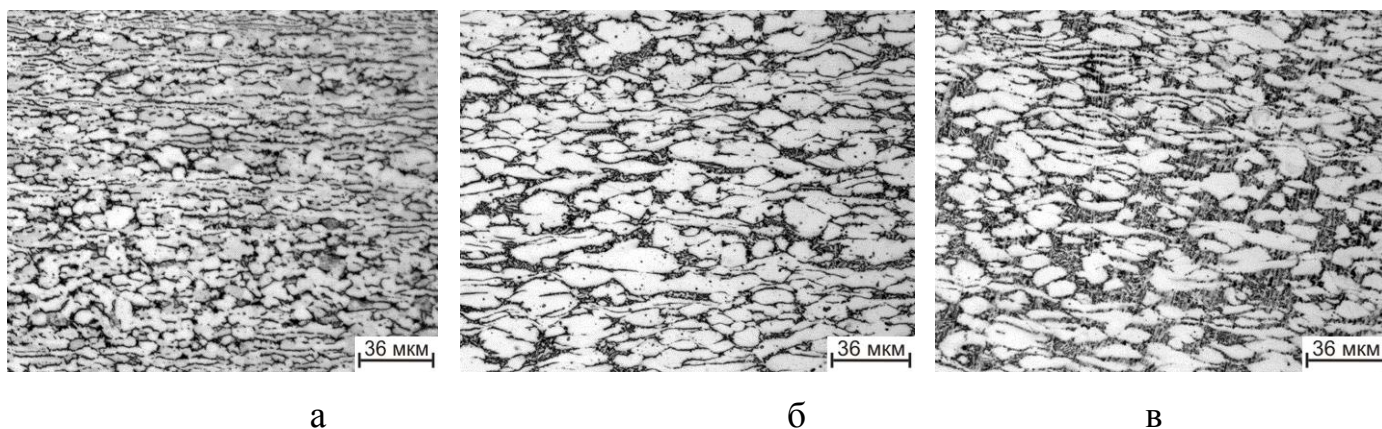


Рис. 4. - Микроструктура плит толщиной 12 мм из сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si с различным содержанием гадолиния послековки в $(\alpha+\beta)$ -области: 0% Gd (а), 0,05% Gd (б) и 0,2% Gd (в)

На следующем этапе работы было исследовано влияния гадолиния на размер β -зерна в деформированном полуфабрикате. Для этого образцы нагревали на 10°C выше температуры фазового перехода ($T_{\text{пп}}$) и после изотермической выдержки проводили закалку. Установлено, что с увеличением содержания гадолиния размер β -зерна уменьшается в 3, 5 раза – с 350 мкм (0% Gd) до 105 мкм (0,2% Gd).

Показано, что последующая прокатка в $(\alpha+\beta)$ -области до толщины 2 мм и отжиг при 950°C приводят к формированию однотипной структуры в опытных сплавах Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si с разным содержанием гадолиния (рис. 5).

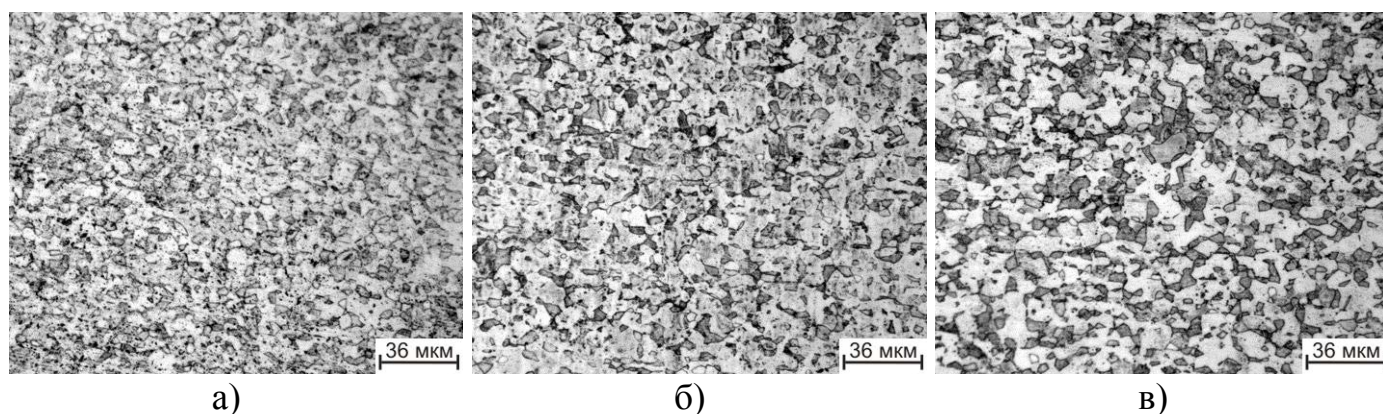


Рис. 5. – Микроструктура листовых (2 мм) образцов из сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,05Fe-0,2Si (а), с 0,05% Gd (б), с 0,2% Gd (в) после прокатки в $(\alpha+\beta)$ -области и отжига при 950°C в течении 1 часа и последующего охлаждения на воздухе

Исследовано влияние изотермической выдержки при температуре 700 °С в течение 100 часов структуру и скорость окисления листовых образцов из опытных сплавов в зависимости от содержания гадолиния. Установлено, что в процессе изотермической выдержки при 700 °С в частицах α -фазы происходят процессы упорядочения, и выделяются дисперсные когерентные частицы α_2 -фазы, причем области вблизи α -границ свободны от выделений. Помимо α_2 -фазы по границам происходит образование силицидов. Показано, что с увеличением содержания Gd в сплаве размер частиц Ti_3Si_5 уменьшается в 2 раза (рис. 6).

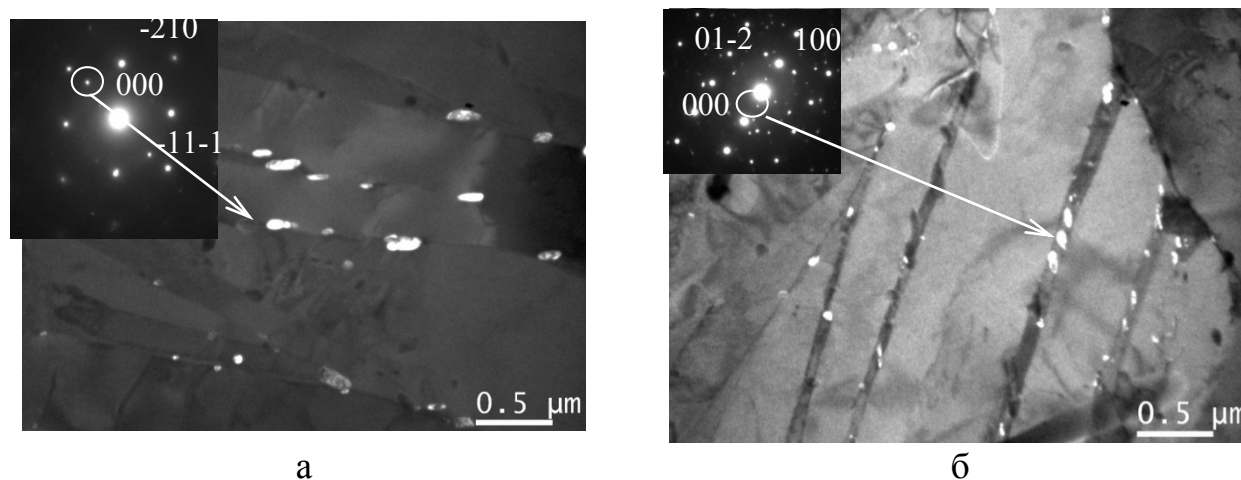


Рис. 6. – Темнопольные изображения в рефлексе Ti_5Si_3 структуры образцов из сплавов Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si с 0 (а) и 0,2%Gd (б) после отжига при 950°С в течение 1 часа (с последующим охлаждением на воздухе) и изотермической выдержки при температуре 700°С в течении 100 часов.

Установлено, что увеличение в сплаве содержания гадолиния до 0,2% приводит к снижению скорости окисления, уменьшая глубину альфированного слоя с 110 до 70 мкм.

Исследовано влияние гадолиния на кратковременную прочность при температуре 700°С отожженных образцов, а также на циклическую прочность при комнатной температуре после отжига при 950°С и изотермической выдержки в течение 100 часов при 700°С. Установлено, что в сплаве с 0,2% Gd кратковременная прочность и циклическая долговечность увеличиваются на 30% (табл. 6).

Таблица 6.

Механические свойства опытного титанового сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si с различным содержанием гадолиния

Темп-ра Испытаний Содержание Gd, масс. %	20°C	700°C
	Количество циклов до разрушения при $\sigma_{\max}^{\text{нетто}} = 207 \text{ МПа}$, $f = 49 \text{ Гц}$, $R_{\sigma} = 0,1$	σ_B , МПа
0	48100	310
0,05	56833	370
0,2	72236	400

Глава V. Влияние гадолиния на структуру и свойства сварных соединений из опытного сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si

Глава посвящена изучению влияния гадолиния на структуру и свойства сварных соединений из опытного сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si, полученных аргонно-дуговой сваркой нерасходуемым и расходуемым электродами. Установлено, что микролегирование опытного сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si 0,05 и 0,2 масс. % Gd практически не оказывает существенного влияния на размер β -зерна в сварном шве при незначительном измельчении внутрезеренной структуры. Исследовано влияние различных режимов термической обработки на формирование структур и твердость сварных соединений. Образцы нагревали до температуры 900°C, после изотермической выдержки в течение 1 часа их охлаждали на воздухе, с печью до комнатной температуры либо до 730°C, при которой выдерживали 1 час и затем охлаждали на воздухе.

На основании проведенных исследований для термической обработки сварных соединений был выбран двухступенчатый режим, включающий нагрев до 900°C, изотермическую выдержку при этой температуре в течение 1 часа, последующее медленное охлаждение до 730°C и далее на воздухе до комнатной температуры. Данный режим позволил максимально снизить твердость сварного шва и основного металла и стабилизировать структуру. Показано, что введение в сплав 0,2 % Gd позволяет повысить прочность сварного соединения на 30% и относительное удлинение на 8% (табл. 7).

Таблица 7.

Механические свойства сварных соединений из сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si с различным содержанием гадолиния при 700 °С*.

Сплав	Бв, МПа	δ, %
Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si	315	27,4
Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si-0,05Gd	370	29,4
Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si-0,2Gd	400	29,6

* Предварительно образцы были подвергнуты двухступенчатому отжигу по режиму: нагрев до 950 °С, выдержка 1 час, охлаждение с печью до 730 °С, выдержка 1 час, охлаждение на воздухе.

Исследовано влияние содержания гадолиния в составе расходного электрода на структуру и свойства листовых сварных соединений из опытного сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si.

Показано, что аргонно-дуговая сварка, выполненная расходным электродом с 0,05 и 0,2 масс. Gd, позволяет в 4-5 раз уменьшить размер β-зерна в сварном шве с 1400 мкм до 270 и 320 мкм, соответственно (рис. 7).

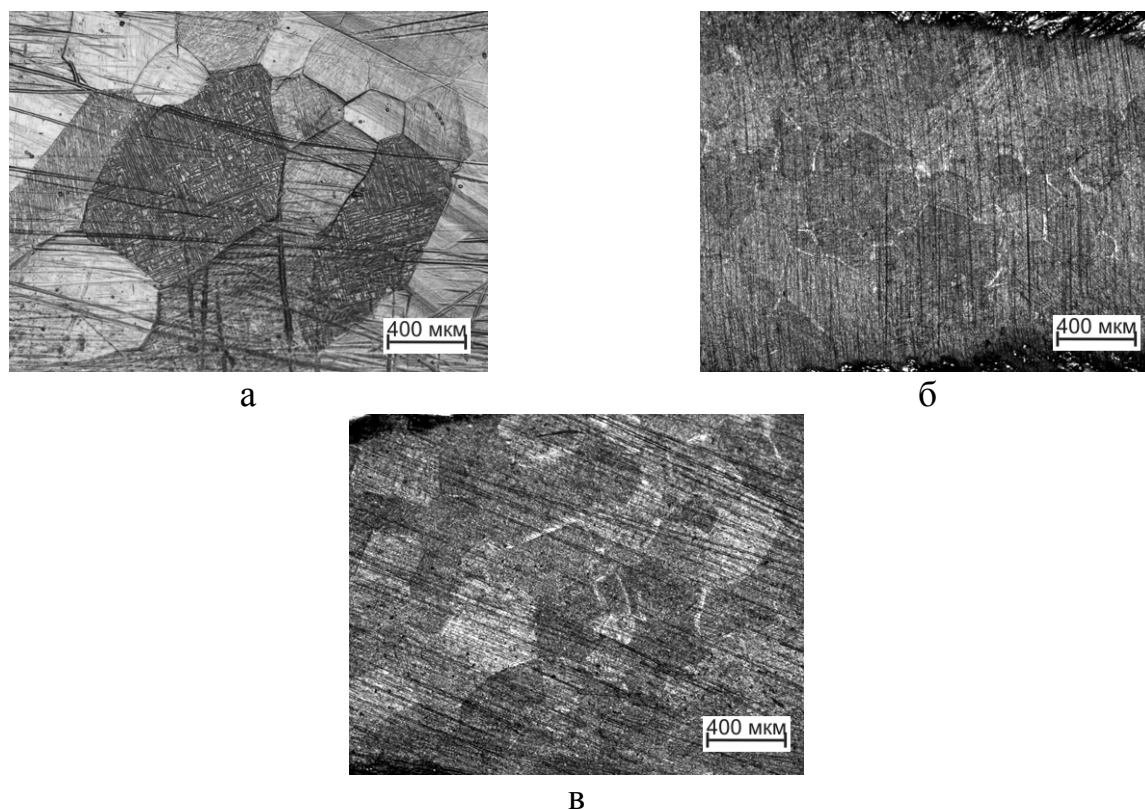


Рис. 7. – Макроструктура сварного шва образцов из сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si после сварки нерасходуемым электродом (а), электродом из сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si-0,05Gd (б) и электродом из сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si-0,2Gd (в).

Использование расходуемого электрода, содержащего гадолиний, по сравнению с нерасходуемым вольфрамовым электродом, для сварки листовых образцов из опытного сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si позволил увеличить прочность сварных соединений с 315 до 340 МПа, а относительное удлинение в 1,5 раза при температуре 700 °С (табл. 8).

Таблица 8.

Механические свойства сварных соединений* из сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si, полученных АДС с расходуемыми электродами с разным содержанием Gd.

Состав электрода	Механические свойства			
	Бв, МПа		δ, %	
	20 °С	700 °С	20 °С	700 °С
Вольфрамовый	-	315	-	27,4
Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si - 0,05Gd	1010	330	10	41,8
Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si - 0,2Gd	1030	340	11	35,4

* после ТО: нагрев до 900°С с выдержкой 1 час охлаждением с печью до 730 °С выдержкой 1 час и охлаждение на воздухе до комнатной температуры

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основе изучения взаимодействия титана с элементами, имеющими плотность меньше 4,5 г/см³, показано, что снижение плотности на 5 % по сравнению со сплавом ВТ6 (4,45 г/см³) может быть достигнуто на экспериментальных сплавах: Ti-20Sc (4,12 г/см³), Ti-7Al-8Si (4,21 г/см³), Ti-8Si-4В (4,42 г/см³). Установлено, что сплав Ti-20Sc, имеет максимальную пластичность (относительное удлинение) около 6% при максимальном среди рассмотренных сплавов пределе прочности 800 МПа.

2. Показано, что введение в сплав Ti-6Al до 8 масс. % скандия приводит к повышению стабильности β -фазы и снижению температуры $\alpha+\beta/\beta$ перехода, не оказывает влияния на пластинчатую морфологию частиц α -фазы, но приводит к уменьшению их размера, что сопровождается повышением твердости. Установлено, что увеличение содержания скандия на каждые 2% приводит к снижению плотности сплава в среднем на $0,025 \text{ г/см}^3$. Введение в сплав 10 масс.% Sc приводит к повышению температуры перехода в однофазную β -область и образованию двух твердых растворов α -фазы на основе скандия и титана, и понижению плотности до $4,21 \text{ г/см}^3$.
3. По разработанным технологическим рекомендациям получен кованный полуфабрикат из сплава Ti-6Al-10Sc. Изучено влияние режимов термической обработки на его структуру и механические свойства. Показано, что отжиг при 800°C с последующим охлаждением на воздухе обеспечивает предел прочности 1060 МПа при относительном удлинении $2,5\%$. Уменьшение скорости охлаждения приводит к снижению прочности до 1035 МПа и увеличению пластичности до $3,5\%$. Увеличение температуры отжига до 950°C с последующим медленным охлаждением способствует повышению пластичности до 6% при снижении прочности до 1010 МПа . Показано, что удельная прочность сплава Ti-6Al-10Sc на 14% выше, чем у сплава ВТ6, и в зависимости от режима термической обработки может изменяться в интервале $24,5\text{-}25,7 \text{ км}$.
4. Показано, что введение в слиток опытного сплава Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si до $0,2$ масс.% гадолиния приводит к преобразованию внутрезеренной структуры α -фазы от пакетно-пластинчатой до видманштеттовой и ее измельчению, не оказывая влияния на размер исходного β -зерна. В деформированном состоянии сплава гадолиний уменьшает средний размер β -зерна в $3\text{-}3,5$ раза и практически не влияет на морфологию и размер элементов внутризеренной структуры. Установлено, что микролегирование

гадолинием способствует уменьшению в 2 раза размера частиц силицида Ti_3Si_5 , не изменяя предпочтительных мест его выделения.

5. Установлено, что введение в сплав $Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si$ 0,2 масс.% Gd приводит к снижению скорости окисления и уменьшению толщины альфированного слоя на 35%, повышению жаростойкости, циклической и кратковременной прочности сплава при температуре 700°C на 30%.
6. Установлено, что аргонно-дуговая сварка листов из сплава $Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si$ нерасходуемым электродом приводит к формированию в структуре сварного соединения α -фазы пластинчатой морфологии. Показано, что микролегирование сплава гадолинием приводит к измельчению внутрезеренной структуры сварного шва, не изменяя морфологии α -фазы и размера зерна β -фазы.
7. Показано, что использование расходуемого электрода из сплава $Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si$, легированного 0,05 и 0,2 масс.% Gd, при аргонно-дуговой сварке листовых заготовок из опытного жаропрочного сплава позволяет в 3-4 раза уменьшить размер β -зерна в сварном шве и измельчить внутрезеренную структуру α -фазы, не изменяя ее морфологии.
8. Для сварных соединений листовых полуфабрикатов из опытного жаропрочного сплава, полученных аргонно-дуговой сваркой расходуемым электродом с 0,05 и 0,2 масс.% Gd, разработан двухступенчатый режим термической обработки, включающий: нагрев до 900°C с последующей выдержкой в течение 1 часа, охлаждением с печью до 730°C, выдержку в течение 1 часа и охлаждение на воздухе до комнатной температуры. Режим позволяет повысить предел прочности при комнатной температуре на 30% и увеличить относительное удлинение на 8%.
9. Установлено, что микролегирование сплава $Ti-6,5Al-4Zr-2,4Sn-0,95Nb-0,7Mo-0,2Si$ 0,05 и 0,2% гадолия позволяет повысить предел прочности при 700°C сварных соединений листовых полуфабрикатов, полученных аргонно-дуговой сваркой нерасходуемым электродом с 315 до 370 и 400 МПа, а относительное удлинение с 27 до 30%, соответственно. Использование в качестве расходуемого

электрода того же микролегированного 0,05 и 0,2% Gd сплава повышает предел прочности сварного соединения при 700°C до 330 и 340 МПа и относительное удлинение до 42 и 35%, соответственно.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Список основных публикаций в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК, и изданиях, включенных в базу данных Scopus:

1. Скворцова, С.В. Влияние термической обработки на структуру и свойства сварных соединений из титанового сплава ВТ23 / Скворцова С.В., Попова Ю.А., Панин П.В., Грушин И.А., Курьшев Е.А. // Титан. 2011. – №2. С.16-21.
2. Скворцова, С.В. Влияние водорода на фазовые и структурные превращения в титановом сплаве ВТ6 / Скворцова С.В., Панин П.В., Ночовная Н.А., Грушин И.А., Митропольская Н.Г. // Технология легких сплавов, 2011. – №4, С.35-40.
3. Скворцова, С.В. Фазовые и структурные превращения в сплавах системы Ti-6Al-Sc. / Скворцова С.В., Грушин И.А., Мамонтова Н.А., Сперанский К.А., Слезов С.С. // Титан. 2016. – №2 (52). С. 12-18.
4. Скворцова, С.В. Влияние дополнительного легирования гадолинием на структуру и свойства опытного жаропрочного титанового сплава в литом и деформированном состояниях / Скворцова С.В., Грушин И.А., Сперанский К.А., Демаков А.А. Мамонтова Н.А. // Титан. 2017. – №1 (55). С. 4-9.
5. Scvortsova, S.V. Effect of rare-earth element addition on structure of heat-resistant Ti-6.5Al-4Zr-2.5Sn-2.4V-1Nb-0.5Mo-0.2Si titanium alloy / Scvortsova S.V, Grushin I.A., Umarova O. Z., Speranskiy K.A. //2017 International Conference on Mechanical, Material and Aerospace Engineering (2MAE 2017) Time: May 12-14, 2017, PP. 1-7.
6. Скворцова, С.В. Влияние термической обработки на структуру и свойства листовых полуфабрикатов из жаропрочного сплава на основе титана, легированного РЗМ / Скворцова С.В., Грушин И.А., Сперанский К.А., Кавченко Е.В. // Известия ВУЗов. Цветная Металлургия. 2018. – №1. С. 22-29.