

На правах рукописи



ПОЖОГА ОКСАНА ЗИЯРОВНА

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА И
СТРУКТУРЫ В ЖАРОПРОЧНОМ СПЛАВЕ НА ОСНОВЕ
ИНТЕРМЕТАЛЛИДА ТИТАНА ВТИ-4 ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ И
ТЕРМОВОДОРОДНОЙ ОБРАБОТКАХ**

Специальность

05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2017

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: – **Попов Артемий Александрович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», заведующий кафедрой

– **Давыденко Людмила Васильевна**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», доцент

Ведущее предприятие: – ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Защита диссертации состоится 21 декабря 2017 года в 11⁰⁰ 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 С.В. 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=84562.

Автореферат разослан «___» _____ 2017г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Развитие авиационно-космической техники требует постоянного совершенствования старых или создания новых материалов, обладающих повышенным уровнем свойств.

По удельной прочности в интервале температур 250-600°C титановые сплавы не имеют себе равных; при температуре ниже 250°C сплавы титана уступают алюминиевым сплавам, а выше 600°C – сплавам на основе железа и никеля.

Рабочие температуры современных серийных жаропрочных титановых сплавов не превышают 500-550°C (BT8-1, BT9, BT25Y, BT18Y). Опытный сплав BT28 является наиболее жаропрочным из существующих титановых сплавов при температурах 550-600°C.

В последнее время особый интерес представляют сплавы на основе алюминидов титана, так как данный класс материалов обладает более высокими значениями прочности, жаропрочности и жаростойкости по сравнению с промышленными жаропрочными титановыми сплавами, а также меньшим удельным весом, что позволяет снизить общий вес конструкции и повысить тяговесовые характеристики двигателя при замене ими деталей из жаропрочных сталей.

Сплавы на основе интерметаллида титана Ti_2AlNb (орто-сплавы) являются перспективными материалами для изготовления деталей газотурбинных двигателей и силовых установок, работающих при температурах до 650°. По сравнению с другими алюминидами титана Ti_3Al и $TiAl$ орто-сплавы обладают лучшей технологической пластичностью. Несмотря на более высокую плотность, отдельные механические свойства орторомбических алюминидов титана превосходят свойства конкурирующих сплавов на основе титана.

На конечные механические и технологические свойства полуфабрикатов из орто-сплавов большое влияние оказывают фазовый состав и структура, которые можно регулировать с помощью применения определенных режимов термомеханической и термической обработок. В настоящее время идет освоение опытно-промышленного производства различных видов полуфабрикатов из орто-сплавов разного химического состава. Очевидно, что достижение требуемого уровня свойств зависит не только от системы и степени легирования, но и от способов и

режимов выплавки, термомеханической и термической обработок. Высокая по сравнению с другими алюминиды титана плотность, а также наличие большого количества тугоплавких легирующих элементов в составе орто-сплавов определяют специфику режимов выплавки слитков и термомеханической обработки полуфабрикатов из этих сплавов. Достижение необходимого уровня прочностных и пластических характеристик жаропрочных сплавов на основе орто-фазы возможно за счет создания регламентированной структуры. Для этого необходимо дальнейшее изучение взаимосвязи их фазового состава, структуры и свойств при термическом воздействии и разработка на этой основе технологий получения из них полуфабрикатов и деталей, что, несомненно, является актуальной задачей.

Существующие на сегодняшний день методы производства изделий из сплавов на основе алюминидов титана являются достаточно энергоемкими, так как требуют применения высокомоощного оборудования. Но возможности повышения пластических свойств сплавов на основе алюминидов титана не ограничиваются традиционными методами обработки. Эффективным способом снижения трудоемкости изготовления полуфабрикатов за счет снижения усилий и/или температуры деформации является использование технологий, основанных на эффекте обратимого легирования водородом: водородное пластифицирование (ВП) и термоводородная обработка (ТВО). Высокая диффузионная подвижность атомов водорода, его сильное влияние на кинетику и температурные интервалы фазовых превращений, стабильность фаз, процессы упорядочения могут эффективно использоваться для управления структурным состоянием орто-сплавов.

Поэтому установление закономерностей формирования фазового состава, структуры и свойств жаропрочного титанового сплава на основе интерметаллида Ti_2AlNb при термоводородной обработке, исследование фазовых равновесий в системе сплав-водород, а также изменений фазового состава и структуры в водородсодержащем сплаве при различных видах термического, в том числе вакуумного, и деформационного воздействия является актуальной задачей.

Цель настоящей работы состояла в установлении закономерностей формирования фазового состава и структуры жаропрочного интерметаллидного титанового сплава ВТИ-4 на основе орто-фазы Ti_2AlNb при термическом воздействии и обратимом легировании водородом и разработке на этой основе

технологии его обработки, обеспечивающей получение регламентированной структуры и требуемого комплекса механических свойств.

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

1. Установить влияние различных режимов термической обработки на формирование фазового состава, структуры и механические свойства сплава ВТИ-4.
2. Установить закономерности формирования фазового состава и структуры в сплаве ВТИ-4 при дополнительном легировании водородом.
3. Определить влияние содержания водорода на сопротивление деформации при сжатии сплава ВТИ-4.
4. Установить влияние термического воздействия на формирование фазового состава и структуры сплава ВТИ-4, дополнительно легированного водородом.
5. Установить влияние вакуумного отжига на формирование структуры и комплекс механических свойств при нормальной температуре сплава ВТИ-4.

Научная новизна:

1. Установлено, что дополнительное легирование водородом сплава ВТИ-4 приводит к снижению термодинамической устойчивости В2-фазы, ее разупорядочению, инициирует $\beta \rightarrow \alpha_2$ -превращение и способствует повышению стабильности О-фазы. Показано, что наводороживающий отжиг до 0,3-0,4 масс.% сплава ВТИ-4 приводит к стабилизации при комнатной температуре однофазного О-состояния. Построен участок температурно-концентрационной диаграммы системы сплав ВТИ-4 – водород в интервале концентраций водорода от 0,006 до 0,4 масс.% и температур 800-1200°C, определяющий границы фазовых областей в этой системе.

2. Показано, что предпочтительные места выделения интерметаллидных фаз зависят от содержания водорода в сплаве ВТИ-4: при 0,2 масс.% водорода образование частиц О- и α_2 -фаз происходит преимущественно по границам исходных β -зерен, а при 0,3 и 0,4 масс.% водорода – преимущественно по телу β -зерна.

3. Установлено, что при содержании в сплаве ВТИ-4 0,4 масс.% водорода $\beta \rightarrow \text{O}$ превращение протекает с большим объемным эффектом (от 2 до 6%), что способствует накоплению дефектов кристаллического строения. При температурах

выше 1050°C в частицах О-фазы протекают процессы полигонизации и сфероидизации, и образуется структура, близкая к глобулярной.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Доказана возможность использования временного легирования водородом для повышения технологической пластичности сплава ВТИ-4. Показано, что введение в сплав водорода на 30-35% уменьшает максимальное усилие деформации при осадке.

2. Разработан режим двухступенчатого отжига интерметаллидного титанового сплава ВТИ-4, включающий нагрев до температуры 980°C, медленное охлаждение до 850°C, изотермическую выдержку при этой температуре в течение 6 часов и последующее охлаждение на воздухе до комнатной температуры, позволивший создать регламентированную структуру, обеспечивающую значения прочности на уровне 1000 МПа и пластичности 10%.

3. Разработан режим упрочняющей термической обработки интерметаллидного титанового сплава ВТИ-4, включающий нагрев до температуры 980°C, охлаждение на воздухе до комнатной температуры, последующий нагрев до 800°C с изотермической выдержкой при этой температуре в течение 6 часов, позволивший создать мелкодисперсную структуру, обеспечивающую значения прочности на уровне 1170 МПа и пластичности 3%.

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 и микрорентгеноспектральный анализы, испытания на растяжение и сжатие, измерение твердости.

Положения, выносимые на защиту

1. Закономерности формирования фазового состава и структуры в сплаве ВТИ-4 при термическом воздействии.

2. Влияние структуры, полученной при различных видах термической обработки, на комплекс механических свойств.

3. Закономерности формирования фазового состава и структуры в сплаве ВТИ-4, дополнительно легированного водородом, при термическом воздействии и вакуумном отжиге.

4. Влияние содержания водорода на предельную степень сжатия при осадке при повышенной температуре.

5. Влияние структуры, полученной при темоводородной обработке, на механическое поведение сплава ВТИ-4.

Степень достоверности результатов

Все результаты получены на 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 12 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе: на III Международной научной школе молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов» (Екатеринбург, 2014), на Международных конференциях «Ti в СНГ» (Усть-Каменогорск, 2015 г.; Санкт-Петербург, 2016 г.), на конференции «Проблемы производства слитков и полуфабрикатов из сложнолегированных и интерметаллидных титановых сплавов» (Москва, ВИАМ, 2015), на XVI и XVII Международной научно-технической Уральской школе-семинаре металлургов – молодых ученых (Екатеринбург, 2015, 2016), на 8-ом Всероссийском молодежном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, МАИ, 2016), на Научно-техническом семинаре «Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов» (Москва, НИТУ «МИСиС», 2016 г.), на XL, XLI, XLII и XLIII Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, МАТИ, 2014, 2015; МАИ, 2016, 2017 гг.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 24 работах, 13 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 179 страницах машинописного текста, содержит 66 рисунков и 29 таблиц. Работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов и списка литературы из 139 наименований.

Глава I. Состояние вопроса

В главе приведен анализ структуры и свойств алюминидов титана, проведено сопоставление сплавов на их основе по механическим характеристикам и жаропрочности. Показано, что сплавы на основе интерметаллида Ti_2AlNb , имеющего упорядоченную орторомбическую решетку, обладают более высокой технологической пластичностью по сравнению со сплавами на основе других алюминидов титана (Ti_3Al и $TiAl$). Рассмотрены принципы легирования сплавов на основе интерметаллида Ti_2AlNb , а также фазовый состав и свойства орто-сплавов при термическом и термомеханическом воздействии. Показано, что в зависимости от выбранного режима обработки в орто-сплавах можно получить пластинчатые, глобулярные и бимодальные структуры. Выявлено, что бимодальная структура обладает наилучшим сочетанием прочностных и пластических свойств как при комнатной, так и при повышенной температурах.

Отмечено, что возможность повышения пластических свойств полуфабрикатов из орто-сплавов традиционными методами термической обработки ограничена. Анализ литературных данных показывает, что применение обратимого легирования водородом позволяет повысить технологические свойства полуфабрикатов титановых сплавов разных классов, в том числе и труднодеформируемых сплавов на основе α_2 -фазы. Отмечено, что введение оптимального количества водорода снижает усилия деформации и температуру обработки, повышает стойкость, долговечность и работоспособность оборудования при проведении операций формоизменения. Описаны условия водородного пластифицирования титановых сплавов разных классов и приведены механические свойства сплавов после термоводородной обработки.

На основе анализа литературных источников поставлена цель работы и сформулированы конкретные задачи исследований.

Глава II. Объекты и методы исследования¹

Исходным материалом для проведения исследований служил сплав на основе орторомбического интерметаллида титана Ti_2AlNb марки ВТИ-4.

Металлографические и рентгеноструктурные исследования проводили на образцах $\varnothing 15 \times 15$ мм. Образцы для кратковременных испытаний на растяжение изготавливали согласно ГОСТ 1497–84.

Термическую обработку в воздушной атмосфере проводили в электропечи СНОЛ - 2.2,5.1,8/10-ИЗ (до $1000^\circ C$) и высокотемпературной электропечи СНОЛ - 2.2,5.2/12,5-И1 (до $1250^\circ C$). Вакуумный отжиг проводили в печи модели «ВЕГА-3М».

Наводороживание образцов проводили в установке Сивертса в среде молекулярного водорода до концентраций от 0,1 до 0,4%² при температурах $900^\circ - 950^\circ C$ с последующим охлаждением со скоростью 1 К/с до нормальной температуры. Количество введенного водорода определяли по изменению давления в системе с известным объемом и контролировали по привесу образцов с помощью точных электронных лабораторных весов A&D HR-150AG. Остаточный водород после вакуумного отжига контролировали спектральным методом на спектрографе ИСП-51 с электронной аналитической приставкой МОРС-1/2048/РС1.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе АХЮ Observer.A1m при увеличениях до 1000 крат. Микрорентгеноспектральный анализ проводили с помощью растрового электронного микроскопа JSM6490 с электродисперсионным анализатором состава.

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре модели ДРОН-4 в фильтрованном медном (CuK_α) излучении. По результатам рентгеновской съемки производили качественный анализ фазового состава.

Измерение твердости по методу Роквелла проводили согласно ГОСТ 9013-59 на приборе BUEHLER Macromet 5100T по шкале HRC с нагрузкой 1500 Н.

Испытания на осадку проводили согласно ГОСТ 8817-82 в горячем состоянии при статической нагрузке на универсальной испытательной машине FP-100 с усилием 100 кН при начальной скорости деформации $5 \cdot 10^{-3} c^{-1}$.

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

² Здесь и далее масс. %.

Кратковременные механические испытания на растяжение проводили согласно ГОСТ 1497-84 при нормальной температуре на универсальной машине TIRA-test 2300.

Экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики.

Глава III. Влияние термической обработки на формирование фазового состава, структуры и механические свойства жаропрочного интерметаллидного сплава ВТИ-4

Первая часть главы посвящена исследованию технологий выплавки слитков и получения деформированных полуфабрикатов из интерметаллидного орто-сплава ВТИ-4.

Исследовано влияние технологии выплавки на распределение легирующих элементов по сечению слитков жаропрочного сплава ВТИ-4, полученным по двум схемам: 1) тройной вакуумно-дуговой переплав (схема ВДП-ВДП-ВДП) с использованием вакуумной дуговой печи; и 2) тройной вакуумно-дуговой переплав, когда второй переплав проводится в вакуумно-дуговой гарнисажной печи (схема ВДП-ВДГП-ВДП). Показано, что проведение тройного переплава с использованием вакуумно-дуговой гарнисажной печи позволяет получить однородное распределение легирующих элементов, в первую очередь ниобия, по сечению слитка с разбросом содержания легирующих элементов не более 0,5 масс.% (табл. 1). Технология выплавки не оказывает влияния на микроструктуру слитка, которая представлена крупными исходными β -зернами и хаотично расположенными внутри них пластинами О-фазы.

Методом пробных закалок определены температурные интервалы фазовых областей в сплаве ВТИ-4. Установлено, что в зависимости от температуры нагрева существуют следующие фазовые области: при температурах выше 1050°C – В2-область, в температурном интервале 800°–1045°C – двухфазная (β +О)-область. Показано, что α_2 -фазы во всем исследованном температурном интервале обнаружено не было, образование О-фазы происходит при В2→О-превращении, которое сопровождается изменением химического состава фаз и разупорядочением β -твердого раствора.

Таблица 1 – Химический состав слитков из сплава ВТИ-4 после третьего вакуумно-дугового переплава (в числителе – схема ВДП-ВДП-ВДП, в знаменателе – схема ВДП-ВДГП-ВДП)

Место отбора пробы	Легирующие элементы, % по массе					
	Al	Mo	Nb	Si	V	Zr
Верхний торец	10,45	0,74	42,82	0,11	0,65	1,21
	11,48	0,87	41,22	0,13	0,83	1,19
Нижний торец	11,10	0,86	42,64	0,13	0,77	1,41
	11,67	0,90	41,38	0,12	0,83	1,26
Средний пояс	11,88	0,86	40,91	0,14	0,80	1,52
	11,94	0,89	41,51	0,13	0,84	1,25

Проведенные испытания на осадку образцов из сплава ВТИ-4 показали, что деформация слитка в В2-области может проводиться со степенями деформации более 70%, а деформация в (β +O)-области – менее 50%.

Разработана опытно-промышленная технология, и получен пруток диаметром 60 мм из сплава ВТИ-4. Структура прутка в исходном горячекатаном состоянии представлена мелкодисперсной O-фазой в объеме исходной β -фазы (рис. 1 а).

Во второй части главы на основании предварительных исследований по влиянию различных режимов термической обработки на структуру и твердость сплава разработан двухступенчатый режим термической обработки, заключающийся в проведении двухступенчатого отжига с различной скоростью охлаждения между высокотемпературной и низкотемпературной ступенями обработки – от 0,01 до 10К/с. Температура нагрева на первой ступени составляет 980°C, на второй – варьируется в интервале 800°-850°C. Указанные температуры соответствуют двухфазной (β +O)-области, но различаются количественным соотношением фаз.

Установлено, что на механические свойства полуфабриката из сплава ВТИ-4 оказывает влияние скорость охлаждения с высокотемпературной ступени обработки – увеличение скорости охлаждения до 10 К/с приводит к увеличению прочности до 1090 МПа при сохранении удовлетворительного уровня пластичности 4-6% (табл. 2) за счет формирования мелкодисперсной структуры (рис. 1 б).

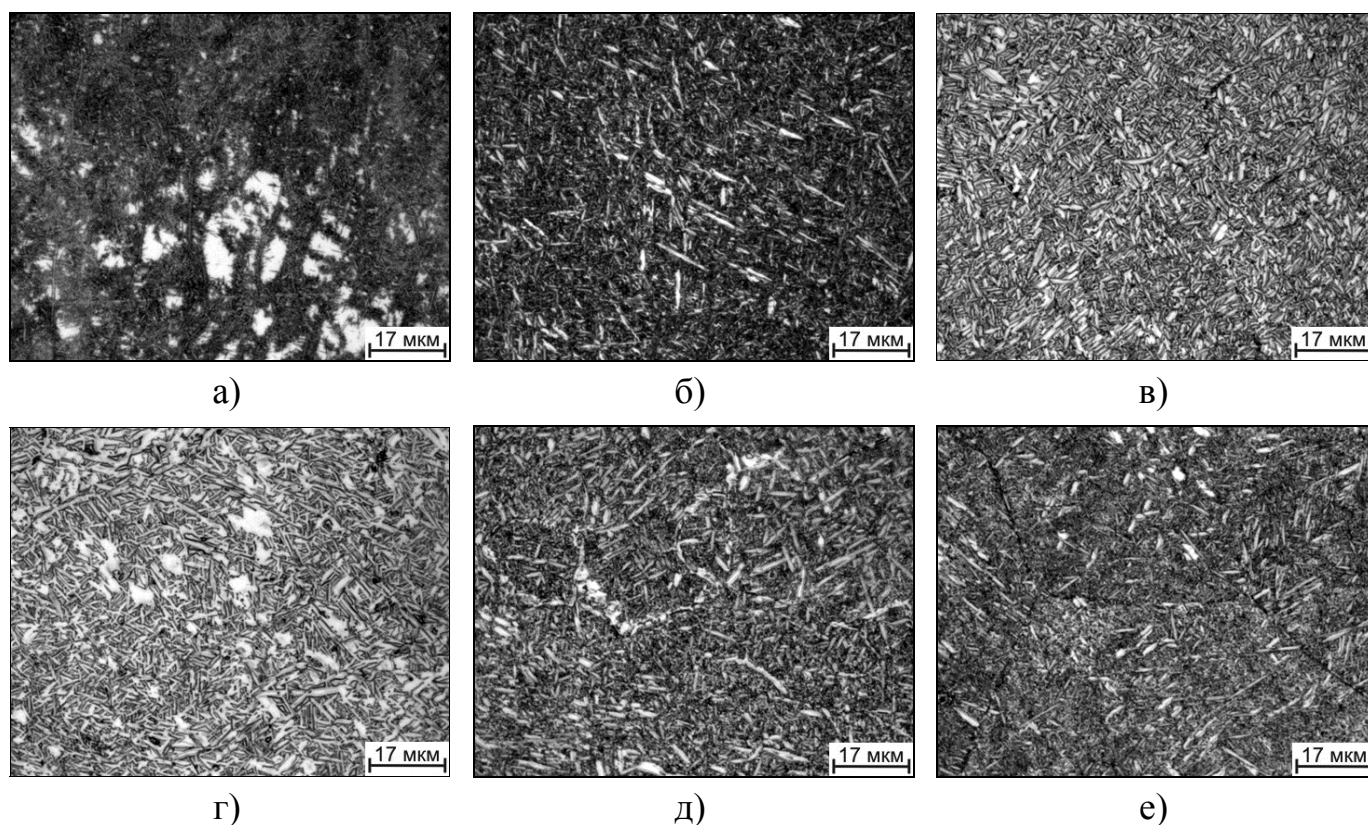


Рисунок 1 – Микроструктура прутка из сплава ВТИ-4 в исходном горячекатаном состоянии (а) и после двухступенчатой термической обработки: нагрев до 980°С, выдержка 1 час, охлаждение со скоростью 10 (б, д, е), 0,1 (в) и 0,01 К/с (г) до второй ступени при 850°С (б, в, г), 825°С (д) и 800°С (е), изотермическая выдержка в течение 6 часов с последующим охлаждением на воздухе

Таблица 2 – Механические свойства образцов прутка из сплава ВТИ-4 после двухступенчатых режимов термической обработки

Режим термической обработки	Механические свойства			
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
980°С, 1 час, $V_{охл.}=10$ К/с (воздух)*	1090	960	5,0	7,0
980°С, 1 час, $V_{охл.}=0,1$ К/с (воздух)*	1010	830	8,0	10,0
980°С, 1 час, $V_{охл.}=10$ К/с (воздух)*	990	790	10,0	9,0
825°С, 6 ч., $V_{охл.}=10$ К/с (воздух)**	1120	1010	4,0	4,0
800°С, 6 ч., $V_{охл.}=10$ К/с (воздух)**	1170	1080	3,0	4,0

* После охлаждения с первой ступени образцы подвергались выдержке в течение 6 часов при температуре 850°С с последующим охлаждением на воздухе;

** Предварительно образцы охлаждались на воздухе после выдержки в течении 1 часа при температуре 980°С.

При медленном промежуточном охлаждении (0,01 К/с) пластичность возрастает до 10%, а прочность снижается на 100 МПа (табл. 2), что обусловлено укрупнением структурных составляющих в процессе медленного охлаждения (рис. 1 г).

Показано, что при снижении температуры изотермической выдержки на низкотемпературной ступени с 850° до 800°С предел прочности увеличивается на 80 МПа (до 1170 МПа), однако при этом происходит снижение пластичности до 3% (табл. 2) за счет еще большей диспергации структуры (рис. 1 д, е).

Разработанные режимы термической обработки сплава ВТИ-4 на примере пруткового полуфабриката позволили сформировать в сплаве структуру с различным размером структурных составляющих. Полученные результаты позволяют прогнозировать изменение прочностных и пластических свойств и для других видов полуфабрикатов сплава ВТИ-4 в зависимости от требуемого уровня механических свойств и необходимости проведения дальнейших операций формоизменения.

Глава IV. Влияние дополнительного легирования водородом на формирование фазового состава, структуры и деформируемость жаропрочного интерметаллидного сплава ВТИ-4

Первая часть главы посвящена изучению структуры и фазового состава, формирующихся в сплаве ВТИ-4 после наводороживающего отжига до различных концентраций. Показано, что легирование сплава небольшим количеством водорода 0,1-0,2% приводит к получению при комнатной температуре двухфазной (β +O)-структуры с преобладанием объемной доли O-фазы (рис. 2 а, б). Установлено, что водород преимущественно растворяется в β -фазе, о чем свидетельствует значительное увеличение ее атомного объема. С увеличением содержания водорода в сплаве объемный эффект $\beta \rightarrow O$ превращения возрастает до 7%, что способствует формированию частиц O-фазы с пластинчатой морфологией (рис. 2). Показано, что при содержании водорода 0,3-0,4% структура сплава при комнатной температуре представлена только O-фазой (рис. 2 в, г).

Во второй части главы исследовано влияние температуры нагрева под закалку на изменение фазового состава и структуры сплава ВТИ-4 дополнительно легированного водородом.

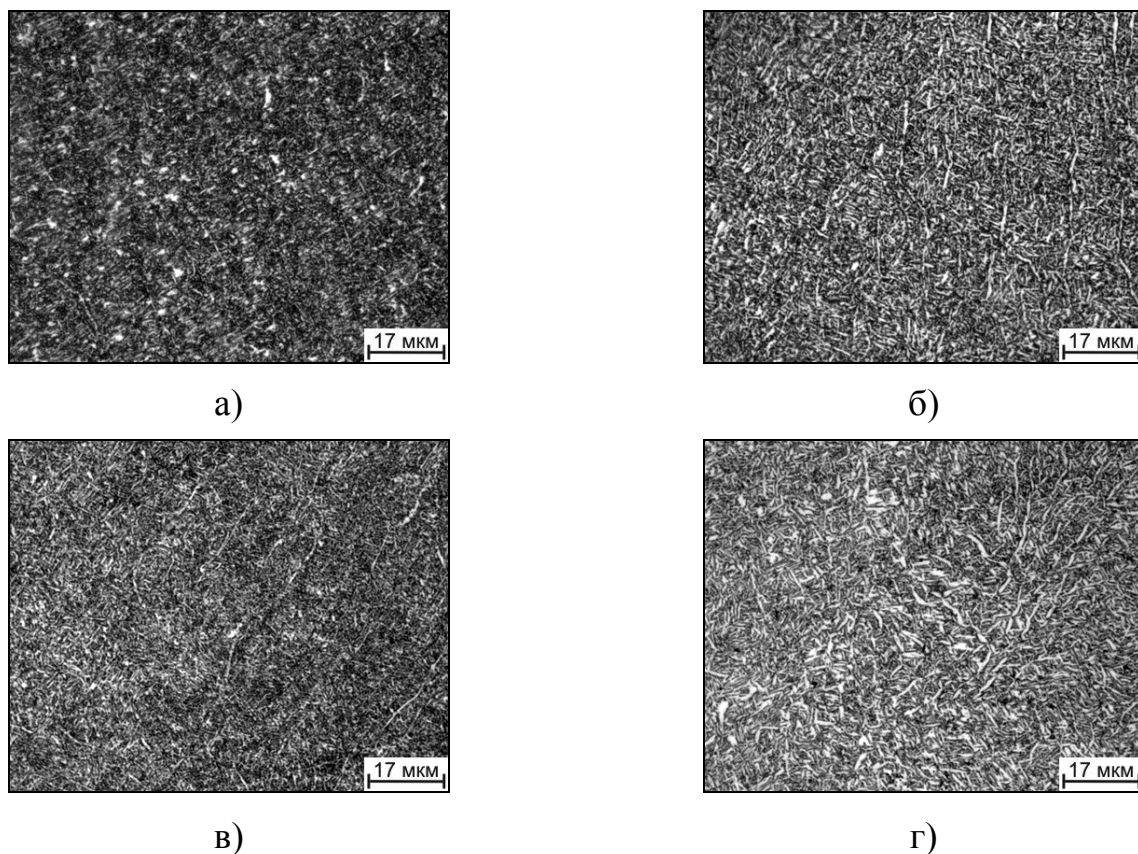


Рисунок 2 – Микроструктура образцов из сплава ВТИ-4 после наводороживающего отжига до концентраций 0,1%Н (а); 0,2%Н (б); 0,3%Н (в); 0,4%Н (г)

Установлено, что с увеличением содержания водорода в сплаве от 0,1 до 0,4% температура полиморфного превращения увеличивается с 990° до 1165°C , соответственно. Выше температуры полиморфного превращения структура сплава представлена упорядоченной В2-фазой, с понижением температуры нагрева до двухфазной области происходит ее разупорядочение. Установлено, что водород инициирует $\beta \rightarrow \alpha_2$ превращение и способствует повышению термодинамической устойчивости О-фазы (табл. 3), а после закалки сплава с 0,4%Н с температуры 800°C структура сплава становится двухфазной (О+ α_2) (табл. 3).

Определено изменение параметров кристаллических решеток и атомных объемов фаз в сплаве ВТИ-4 с различным содержанием водорода в зависимости от температуры нагрева под закалку. Установлено, что при снижении температуры нагрева параметры решеток и атомные объемы фаз увеличиваются, причем для β -фазы данные показатели меняются в большей степени вследствие растворения в ее решетке большего количества водорода с учетом уменьшения ее объемной доли.

Таблица 3 – Фазовый состав сплава ВТИ-4 с различным содержанием водорода в зависимости от температуры нагрева под закалку

Т, °С	Содержание водорода, масс. %				
	0,006	0,1	0,2	0,3	0,4
1200	B2	B2	B2	B2	B2
					$\beta+(\alpha_2)^*$
1150	B2	B2	B2	B2	$\beta+(O+\alpha_2)^*$
1100	B2	B2	B2	$\beta+(\alpha_2)^*$	$\beta+(O+\alpha_2)^*$
			$\beta+(\alpha_2)^*$	$\beta+(O+\alpha_2)^*$	
1050	B2	B2	$\beta+(O+\alpha_2)^*$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$
1000	$\beta+O$	B2	$\beta+(O+\alpha_2)^*$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$
950	$\beta+O$	$\beta+O$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$
900	$\beta+O$	$\beta+O$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$
850	$\beta+O$	$\beta+O$	$\beta+O$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$
800	$\beta+O$	$\beta+O$	$\beta+O$	$\beta+O+(\alpha_2)^*$	$O+\alpha_2$

* В скобках указаны фазы, представленные в сплаве в небольшом количестве

Показано, что в сплаве с 0,2% водорода образование частиц O- и α_2 -фаз происходит преимущественно по границам исходных β -зерен (рис. 3 а), а при 0,3 и 0,4 масс.% водорода – преимущественно по телу β -зерна (рис. 3 б, в).

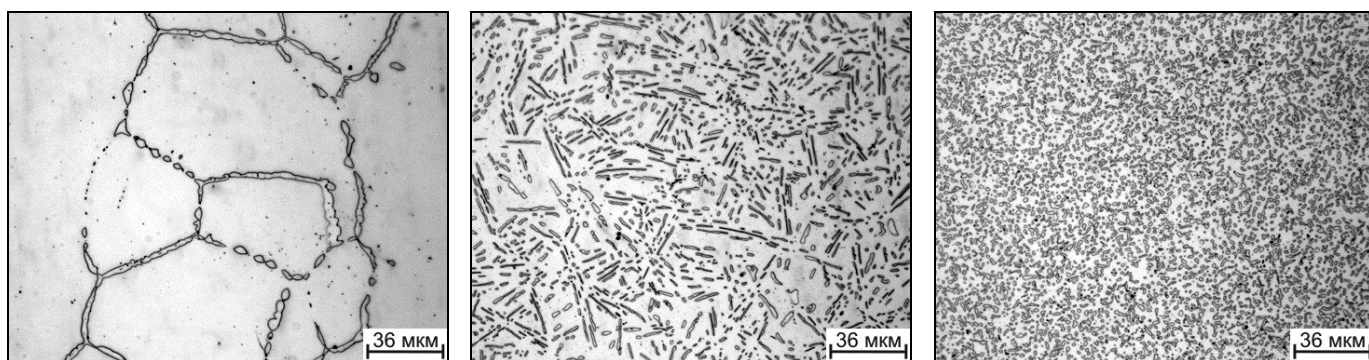


Рисунок 3 – Микроструктура образцов из сплава ВТИ-4, легированных 0,2% (а), 0,3% (б) и 0,4%Н (в), после закалки с температуры 1050°С

Показано, что объемный эффект фазовых превращений увеличивается с понижением температуры и увеличением содержания водорода в сплаве, что приводит к формированию частиц O - и α_2 -фаз с пластинчатой морфологией в исследованном температурно-концентрационном интервале. Установлено, что при содержании в сплаве ВТИ-4 0,4% водорода $\beta \rightarrow O$ превращение протекает с большим объемным эффектом (от 2 до 6%), что способствует накоплению дефектов кристаллического строения. При температурах выше 1050°C в частицах O -фазы протекают процессы полигонизации и сфероидизации, и образуется структура, близкая к глобулярной (рис. 3 в).

Установлено, что водород снижает диффузионную подвижность атомов основных легирующих элементов. Показано, что для достижения равновесного состояния при температурах выше 1000°C необходима выдержка в течение 10 часов.

Построен участок диаграммы состояния системы сплав ВТИ-4 – водород с концентрацией от 0,006 до 0,4% водорода в температурном интервале от 800° до 1200°C, определяющий температурно-концентрационные интервалы фазовых областей (рис. 4).

Построенная диаграмма имеет важное практическое значение, так как позволяет осуществлять рациональный выбор температурно-концентрационных параметров для проведения деформационной и термоводородной обработок и получения в интерметаллидном титановом сплаве ВТИ-4 заданного структурно-фазового состояния.

В третьей части главы приведены результаты испытания на осадку образцов сплава ВТИ-4 с различным содержанием водорода при температуре 950°C. Показано, что легирование водородом положительно сказывается на сопротивлении деформации, снижая усилие деформации на 30-35%.

Установлено, что во избежание охрупчивания сплава с одновременным достижением наименьших значений деформирующих усилий целесообразно вводить в сплав около 0,2%Н.

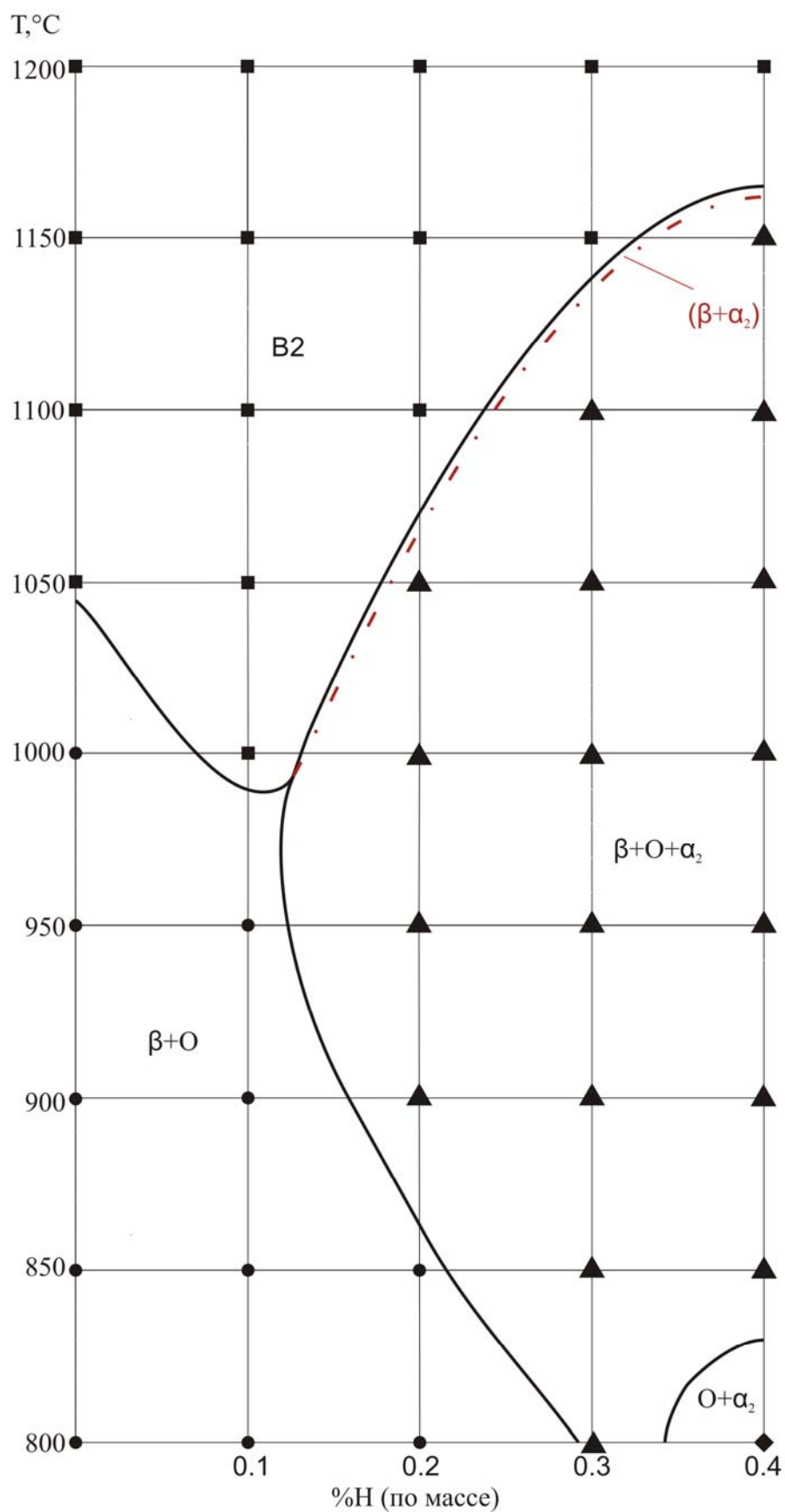


Рисунок 4 – Участок диаграммы сплав ВТИ-4–Н, отвечающий неравновесному состоянию (время выдержки при температуре нагрева не более 90 минут)

Глава V. Формирование фазового состава и структуры в сплаве ВТИ-4 при вакуумном отжиге и их влияние на комплекс механических свойств

Глава посвящена определению влияния различных режимов вакуумного отжига на структуру, твердость и комплекс механических свойств сплава ВТИ-4.

Показано, что твердость и механические свойства образцов из сплава ВТИ-4 определяются количественным соотношением β - и O-фаз и степенью дисперсности структурных составляющих.

После ТВО, включающей наводороживающий отжиг до концентрации 0,2% при температурах ($\beta+O+\alpha_2$)-области и вакуумный отжиг при температурах, соответствующих двухфазной ($\beta+O$)-области, фазовый состав сплава представлен β - и O-фазами с преобладанием объемной доли O-фазы. Показано, что температура вакуумного отжига влияет на размер частиц вторичной O-фазы, образующейся в процессе дегазации. Так, вакуумный отжиг по одноступенчатому режиму с выдержкой при температуре 700°C приводит к формированию мелкодисперсной структуры, что обусловлено замедленным прохождением диффузионных процессов при этой температуре, и рост частиц O-фазы, образующихся в процессе $\beta \rightarrow O$ превращения, затруднен. Повышение температуры вакуумного отжига до 750°, 800° и 850°C приводит к укрупнению структурных составляющих.

Различная степень дисперсности структуры сплава сказывается на его твердости: после одноступенчатого вакуумного отжига при 700°C твердость сплава составила 38,0 ед. HRC, а укрупнение структурных составляющих после вакуумного отжига при 750° и 850°C приводит к снижению твердости, соответственно, до 36,6 и 36,0 ед. HRC.

Также были опробованы ступенчатые режимы вакуумного отжига с выдержкой при температуре 625°C на первой ступени и последующей выдержкой при температурах 750°–850°C. Показано, что ступенчатый отжиг позволяет сформировать более дисперсную структуру и несколько повысить твердость сплава (до 37,5 ед. HRC) по сравнению со структурой, полученной после одноступенчатых режимов. Это обусловлено тем, что в процессе дегазации при температуре 625°C, когда диффузионные процессы затруднены, преимущественно происходит образование, а не рост частиц O-фазы, а выдержка на следующей ступени вакуумного отжига (750°, 800° и 850°C) приводит к росту ранее сформировавшихся

частиц О-фазы, но вследствие их большого количества и дисперсности процесс их роста затруднен.

Проведенные механические испытания на разрыв образцов после различных режимов термоводородной обработки показали, что уровень прочностных и пластических характеристик сравним со свойствами, полученным традиционным методом обработки: $\sigma_{\text{в}} > 1100 \text{ МПа}$ и $\delta \sim 3-7\%$ (табл. 4). Показано, что структура, полученная после трехступенчатого режима, обеспечивает оптимальный комплекс прочностных и пластических характеристик (табл. 4).

Таблица 4 – Механические свойства прутка из сплава ВТИ-4, легированного 0,2% водорода, после различных режимов вакуумного отжига

Режим вакуумного отжига	Механические свойства при комнатной температуре			
	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
700°C, 8 часов	1190	1120	2,8	4,0
800°C, 6 часов	1140	1060	3,4	7,0
850°C, 4 часа	1100	1020	5,0	8,0
625°C, 4 часа + 800°C, 4 часа	1150	1080	3,2	6,0
625°C, 4 часа + 800°C, 4 часа + 850°C, 2 часа	1120	1020	7,2	9,4

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основе изучения влияния температуры нагрева и скорости охлаждения на структуру, твердость и механические свойства образцов из сплава ВТИ-4 разработан двухступенчатый режим термической обработки горячекатаного полуфабриката, позволяющий получить в нем регламентированную структуру с заданным комплексом механических свойств. Показано, что на свойства сплава ВТИ-4 существенное влияние оказывает скорость охлаждения с высокотемпературной (980°C) ступени обработки. Охлаждение со скоростью 10 К/с обеспечивает уровень прочности 1090 МПа при сохранении удовлетворительной пластичности 4-6% за счет формирования мелкодисперсной структуры. При

уменьшении скорости промежуточного охлаждения до 0,01 К/с пластичность возрастает до 10%, а прочность снижается на 100 МПа, что обусловлено укрупнением структурных составляющих. Показано, что при снижении температуры изотермической выдержки на низкотемпературной ступени с 850° до 800°С предел прочности увеличивается до 1170 МПа, однако относительное удлинение снижается до 3%.

2. Установлено, что дополнительное легирование водородом сплава ВТИ-4 способствует появлению α_2 -фазы и повышению стабильности О-фазы вследствие снижения термодинамической устойчивости В2-фазы, приводя к ее разупорядочению в процессе фазовых превращений при снижении температуры нагрева. Показано, что наводороживающий отжиг до 0,3-0,4 масс.% сплава ВТИ-4 приводит к формированию при комнатной температуре однофазной О-структуры.

3. Показано, что в сплаве с 0,2 масс.% водорода образование частиц О- и α_2 -фаз происходит преимущественно по границам исходных β -зерен, а при 0,3 и 0,4 масс.% водорода – преимущественно по телу β -зерна.

4. Установлено, что при содержании в сплаве ВТИ-4 0,4 масс.% водорода при температурах выше 1050°С в частицах О-фазы протекают процессы полигонизации и сфероидизации, так как вследствие большого объемного эффекта $\beta \rightarrow \text{O}$ превращения происходит накопление дефектов кристаллического строения, что способствует снижению энергии активации процесса глобуляризации. В результате указанных процессов образуется структура, близкая к глобулярной.

5. Построен участок температурно-концентрационной диаграммы системы сплав ВТИ-4 – водород в интервале концентраций водорода от 0,006 до 0,4 масс.% и температур 800-1200°С, определяющий границы фазовых областей в этой системе в зависимости от времени выдержки при температурах нагрева.

6. Показано, что временное легирование водородом может быть использовано для повышения технологической пластичности сплава ВТИ-4. Установлено, что введение в сплав водорода снижает максимальное усилие деформации при осадке на 30-35%.

7. Показано, что ТВО с наводороживающим отжигом до концентрации 0,2 масс.% водорода и последующим ступенчатым вакуумным отжигом приводит к формированию мелкодисперсной структуры, обеспечивающей оптимальный

комплекс механических свойств, сравнимый с механическими характеристиками, полученными после традиционной термической обработки: $\sigma_b=1100-1150$ МПа и $\delta\sim 3-7\%$.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

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

1. *Мамонов, А.М.* Физико-химические и технологические основы формирования термостабильных структур бимодального типа в жаропрочных титановых сплавах и сплавах на основе алюминиды титана при обратимом легировании водородом / *Мамонов А.М., Скворцова С.В., Агаркова Е.О., Умарова (Пожога) О.З.* // Титан. 2013. – №3. С. 9-16.

2. *Скворцова, С.В.* Управление структурой и свойствами полуфабрикатов из алюминиды титана методами термоводородной обработки / *Скворцова С.В., Ильин А.А., Мамонов А.М., Пожога В.А., Умарова (Пожога) О.З.* // Технология легких сплавов, 2013. – №3, С. 28-33.

3. *Ночовная, Н.А.* Отработка технологии опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ti_2AlNb / *Ночовная Н.А., Скворцова С.В., Анищук Д.С., Алексеев Е.Б., Панин П.В., Умарова (Пожога) О.З.* // Титан. 2013. – №4. С. 24-29.

4. *Мамонов, А.М.* Влияние вакуумного ионно-плазменного азотирования на структуру и свойства поверхности сплава на основе алюминиды титана / *Мамонов А.М., Сарычев С.М., Умарова (Пожога) О.З., Козуютов А.В., Лобода И.С.* // Титан. 2014. – №2. С. 4-10.

5. *Алексеев, Е.Б.* Определение технологических параметров деформации опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ti_2AlNb / *Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Скворцова С.В., Панин П.В., Умарова (Пожога) О.З.* // Титан. 2014. – №2. С. 36-41.

6. *Скворцова, С.В.* Структурные и технологические аспекты получения качественных полуфабрикатов из жаропрочного интерметаллидного сплава на основе Ti_2AlNb с высоким комплексом свойств / *Скворцова С.В., Ильин А.А., Штуца М.Г., Александров А.В., Андреев А.В., Умарова (Пожога) О.З.* // Металлофизика.

Новейшие технологии / Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – Киев: «Академперіодика», 2015. – Т. 37. № 10. С. 1313-1324.

7. *Скворцова, С.В.* Влияние температуры на фазовый состав и структуру интерметаллидного сплава ВТИ-4 / *Скворцова С.В., Умарова (Пожога) О.З., Грушин И.А., Анищук Д.С.* // Титан. 2015. – №2. С. 11–15.

8. *Скворцова, С.В.* Формирование структуры, фазового состава и механических свойств сплава на основе интерметаллида титана Ti_2AlNb при термической обработке / *Скворцова С.В., Анищук Д.С., Смирнов В.Г., Умарова (Пожога) О.З.* // Титан. 2015. – №3. С. 14-18.

9. *Скворцова, С.В.* Влияние термической обработки на структуру и механические свойства плиты из интерметаллидного сплава ВТИ-4 / *Скворцова С.В., Умарова (Пожога) О.З., Агаркова Е.О., Чернышова А.А.* // Титан. 2015. – №4. С. 17-21.

10. *Skvortsova, S.V.* Structure and Properties of Semifinished Sheet Products Made of an Intermetallic Refractory Alloy Based on Ti_2AlNb / *Skvortsova S.V., Il'in A.A., Matonov A.M., Nochovnaya N.A., Umarova (Pozhoga) O.Z.* // Materials Science. 2016. – Volume 51, Issue 6. PP. 821-826.

11. *Умарова (Пожога), О.З.* Формирование структуры и механические свойства жаропрочного сплава на основе алюминида титана при термической обработке / *Умарова (Пожога) О.З., Пожога В.А., Бурашина Р.Р.* // Вестник Московского Авиационного института. 2017. – Т. 24. №1. С. 160-169.

12. *Сенкевич, К.С.* Получение интерметаллидного титанового сплава на основе Ti_2AlNb способом быстрой закалки расплава / *Сенкевич К.С., Серов М.М., Умарова (Пожога) О.З.* // Металловедение и термическая обработка металлов. 2017. – №7 (745). С.66-69.

13. *Senkevich, K.S.* Obtainment of fibers and porous materials from Ti_2AlNb -based alloy / *Senkevich K.S., Serov M.M., Umarova (Pozhoga) O.Z.* // Materials Letters. 2017. - Volume 203. PP. 85-88.

