

На правах рукописи



МАМОНТОВА НАТАЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**ВЛИЯНИЕ ОБРАТИМОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ВОДОРОДОМ НА
СТРУКТУРУ И ПАРАМЕТРЫ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ23**

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

– **Полькин Владислав Игоревич**, кандидат технических наук, ООО «НПО Титан», генеральный директор

Ведущее предприятие: – ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»

Защита диссертации состоится 28 июня 2018 года в 11³⁰ 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 skvorcovasv@mai.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=90536.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Водородные технологии титановых сплавов являются современными, динамично развивающимися способами получения материалов с уникальным сочетанием технологических и физико-механических свойств.

К настоящему времени работами в основном российских ученых накоплен большой опыт по использованию обратимого легирования водородом для эффективного управления структурой и свойствами титановых сплавов разных классов. Разработаны научные основы технологий термоводородной обработки, водородного пластифицирования и др., эффективность этих технологий доказана их успешным внедрением в производство.

Однако, несмотря на многочисленные фундаментальные и прикладные разработки в этом направлении, потенциальные возможности этих технологий далеко не исчерпаны. В настоящее время существует потребность в уточнении закономерностей фазовых и структурных превращений в системах сплав-водород, необходимом для обоснованного проектирования технологических процессов и надежного прогнозирования комплекса технологических и эксплуатационных свойств полуфабрикатов и изделий из титановых сплавов. Одним из перспективных направлений развития водородных технологий является создание комплексных процессов получения и обработки полуфабрикатов из высокопрочных титановых сплавов с регламентированной структурой, технологическими и механическими свойствами.

Так, сочетание термоводородной обработки (ТВО) с пластической деформацией при производстве листовых полуфабрикатов из высокопрочных титановых сплавов с содержанием алюминия на уровне предельной растворимости обеспечит возможность получения в них регламентированной структуры и высокого уровня свойств. Листовые полуфабрикаты характеризуются сильной анизотропией физико-механических свойств. Однако влияние водорода на формирование структуры и текстуры в высокопрочных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавах в процессе пластической деформации и ТВО изучено недостаточно. Это не позволяет в полной мере использовать потенциальные возможности, например, сплава ВТ23 и водородных технологий для получения из листовых полуфабрикатов этого сплава высокопрочных изделий методами сверхпластической деформации. Так, в настоящее время для сверхпластической формовки используются листовые

полуфабрикаты из сплава VT23, в которых содержание алюминия не превышает 5,5 масс.%. Это существенно ограничивает потенциальный ресурс прочности материала в изделиях. Поэтому разработка водородной технологии получения листовых полуфабрикатов из плиты сплава VT23, содержащей до 6,5 масс. % алюминия, обладающих повышенными показателями сверхпластической деформации и прочностными характеристиками за счет создания субмикроструктурной структуры, является актуальной научной и практической задачей.

Цель настоящей работы состояла в установлении закономерностей формирования фазового состава, структуры, кристаллографической текстуры и механических свойств в титановом сплаве VT23, содержащем 6-6,5 % алюминия, при термоводородной обработке и пластической деформации и разработке на этой основе технологии получения и обработки листовых полуфабрикатов с регламентированной структурой для последующей сверхпластической деформации.

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

1. Установить закономерности формирования фазового состава и структуры в титановом сплаве VT23 при легировании водородом.
2. Установить влияние режимов вакуумного отжига на формирование структуры и комплекс механических свойств при нормальной температуре в титановом сплаве VT23, легированном водородом.
3. Исследовать влияние изотермической выдержки при повышенных температурах на стабильность структуры после вакуумного отжига.
4. Изучить влияние температуры старения на структуру и свойства сплава VT23.
5. Исследовать влияние дополнительного легирования водородом на процессы текстурообразования в титановом сплаве VT23 при наводороживающем отжиге, пластической деформации и дегазации.
6. Установить влияние термоводородной обработки на структуру и показатели сверхпластической деформации листов из титанового сплава VT23.

Научная новизна:

1. Построена температурно-концентрационная диаграмма фазового состава системы сплав VT23 – водород. Установлено, что при введении в сплав более 0,4 масс.% водорода вследствие развития $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения происходит

перераспределение легирующих элементов, приводящее к образованию в частицах первичной α -фазы микрообъемов с повышенным содержанием алюминия и выделению в них упорядоченной α_2 -фазы на основе Ti_3Al . Определены температурно-временные параметры ее устойчивости: при температурах 450-550°C в течение не менее 100 часов, а при температурах 650-800 °C от 75 до 5 часов, соответственно.

2. Установлено, что наводороживающий отжиг горячекатаной плиты из сплава ВТ23 приводит к переходу компонентов текстуры деформации $\{100\}\langle 110\rangle$ и динамической рекристаллизации $\{110\}\langle 110\rangle$ β -фазы в компоненты кубической текстуры $\{100\}\langle 110\rangle$ вследствие развития $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения под действием водорода.

3. Показано, что при завершении наводороживающего отжига плиты из сплава ВТ23 до 0,6-0,8 % водорода в β - или $(\alpha(\alpha_2)+\beta)$ -области последующая горячая прокатка и низкотемпературный вакуумный отжиг формируют в полученном листовом полуфабрикате субмикроструктурную структуру. Если наводороживание плиты завершается в β -области, то размер α -частиц в полученном листе составляет 200-400 нм, если в двухфазной $(\alpha(\alpha_2)+\beta)$ – области - то 200-1000 нм.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Доказана возможность создания в листовых полуфабрикатах из сплава ВТ23, содержащих до 6,5% Al, субмикроструктурной структуры, состоящей из некогерентных частиц α_2 (Ti_3Al) и обедненных алюминием β - и α -фаз.

2. Разработана технология получения листового полуфабриката с субмикроструктурной структурой из горячекатаной плиты высокопрочного титанового сплава ВТ23, содержащего 6-6,5% Al, включающая наводороживающий отжиг до концентрации 0,6-0,8 масс. % водорода при температуре 800°C, соответствующей β -области, пластическую деформацию при 700°C с суммарной степенью обжатия не менее 80% и вакуумный отжиг при температуре 625°C. Технология обеспечивает наилучшие характеристики сверхпластичности (малые напряжения течения и наибольшее относительное удлинение).

3. Разработана схема сверхпластической формовки изделий из сплава ВТ23, включающая деформацию листовых полуфабрикатов в защитной атмосфере при температуре 750-800°C и последующую упрочняющую изотермическую обработку

в вакууме при температурах 450-550°C в течение 4-10 часов, которая позволяет увеличить прочность материала в изделии с 800-900 МПа до 1100-1300 МПа.

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 сжатие, измерение твердости.

Положения, выносимые на защиту

1. Закономерности формирования фазового состава и структуры в сплаве ВТ23 при дополнительном легировании водородом.

2. Закономерности влияния температуры вакуумного отжига и изотермической выдержки на структуру и комплекс механических свойств листовых полуфабрикатов сплава ВТ23.

3. Закономерности формирования структуры и текстуры в сплаве ВТ23 при наводороживающем отжиге, пластической деформации и вакуумном отжиге.

4. Закономерности влияния водорода и температуры наводороживающего отжига плиты, температуры ее деформации на показатели сверхпластической формовки листов сплава ВТ23.

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 15 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе: на Международных конференциях «Тi в СНГ» (Одесса, 2009 г., Львов, 2011 г., Донецк, 2013 г., Нижний Новгород, 2014 г., Каменск-Уральский, 2015 г.), 7-ом Международном аэрокосмическом конгрессе IAS-12 (Москва, 2012 г.), на XV Международной научно-технической уральской школе-

семинаре металлосведов-молосдых ученых (Екатеринбург, 2014 г.), на семи Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015 г.г.), на XXXIII Туполевских чтениях (школа молодых ученых): Международная молодежная научная конференция (Казань, 2017г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 12 работах, 3 из которых – в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Объем диссертации и её структура. Диссертация изложена на 173 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 13 таблиц. Работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов и списка литературы из 123 наименований.

Глава 1. Состояние вопроса

В главе приведена характеристика высокопрочного титанового сплава BT23. Рассмотрены особенности взаимодействия титана и титановых сплавов с водородом и возможность применения термоводородной обработки для управления их структурой и свойствами, а также водородного пластифицирования для облегчения процесса пластической деформации. Показано, что разработанные технологические схемы управления структурой и свойствами относятся в основном к α -, псевдо α - и малолегированным ($\alpha+\beta$)-титановым сплавам.

Проанализированы условия, необходимые для осуществления сверхпластической деформации титановых сплавов.

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

Глава 2. Объекты и методы исследования¹

Исследования проводили на плите из сплава BT23, полученной по промышленной технологии, химический состав представлен в таблице 1.

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

Таблица 1 - Химический состав плиты из сплава ВТ23 толщиной 12 мм

Сплав ВТ23	Легирующие элементы, масс. %						Примеси, масс. %					
	Ti	Al	V	Mo	Cr	Fe	C	Si	Zr	O	N	H
ОСТ 1 9001 3-81	основа	6,30	4,50	2,20	1,00	0,60	0,01	0,02	0,01	0,08	0,01	0,0008
	основа	4,0- 6,3	4,0- 5,0	1,5- 2,5	0,8- 1,4	0,4- 1,0	≤ 0,10	≤ 0,15	≤ 0,30	≤ 0,15	≤ 0,05	≤ 0,0015

Наводороживание образцов проводили в установке Сиверта в среде высокочистого газообразного водорода до концентраций 0,2; 0,4; 0,6; 0,8%² в интервале температур 600 – 900°C с последующим охлаждением до нормальной температуры. Количество введенного водорода определяли по привесу образцов с помощью точных электронных лабораторных весов A&D HR-150AG. Вакуумный отжиг проводили в печи модели «ВЕГА-3М» в интервале температур 625-850°C. Концентрация водорода после вакуумного отжига определялась спектральным методом на спектрографе ИСП-51 с электронной аналитической приставкой МОРС-1/2048/РС1 и не превышала 0,006%.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе AXIO Observer.A1m при увеличениях до 1000 крат.

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре модели ДРОН-4 в фильтрованном медном (CuK_{α}) излучении. По результатам рентгеновской съемки проводили качественный и количественный анализ фазового состава.

Механические свойства определяли в соответствии с ГОСТ 1497–84 при температуре 20°C.

Экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики.

Глава 3. Формирование фазового состава и структуры в сплаве ВТ23 при обратимом легировании водородом

В главе изучены закономерности формирования фазового состава и структуры в титановом сплаве ВТ23 в зависимости от температуры наводороживающего отжига и концентрации водорода. Установлено, что легирование водородом

² Здесь и далее по тексту содержание водорода и других элементов указано в масс. %.

повышает стабильность β -фазы и снижает первую критическую скорость охлаждения. Наводороживание сплава при температуре 900°C и выше приводит к завершению $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения и формированию однофазной β -структуры. Если в сплаве содержится более $0,4\%$ водорода, то последующее охлаждение со скоростью 1K/c препятствует протеканию диффузионных процессов, и при комнатной температуре структура представлена β -фазой и мартенситом, количество которого уменьшается с увеличением концентрации водорода (рис.1). При содержании водорода (C_{H}) в сплаве менее $0,4\%$ в процессе охлаждения со скоростью 1K/c протекает $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение, и формируется $(\alpha + \beta)$ -структура неравновесного состава.

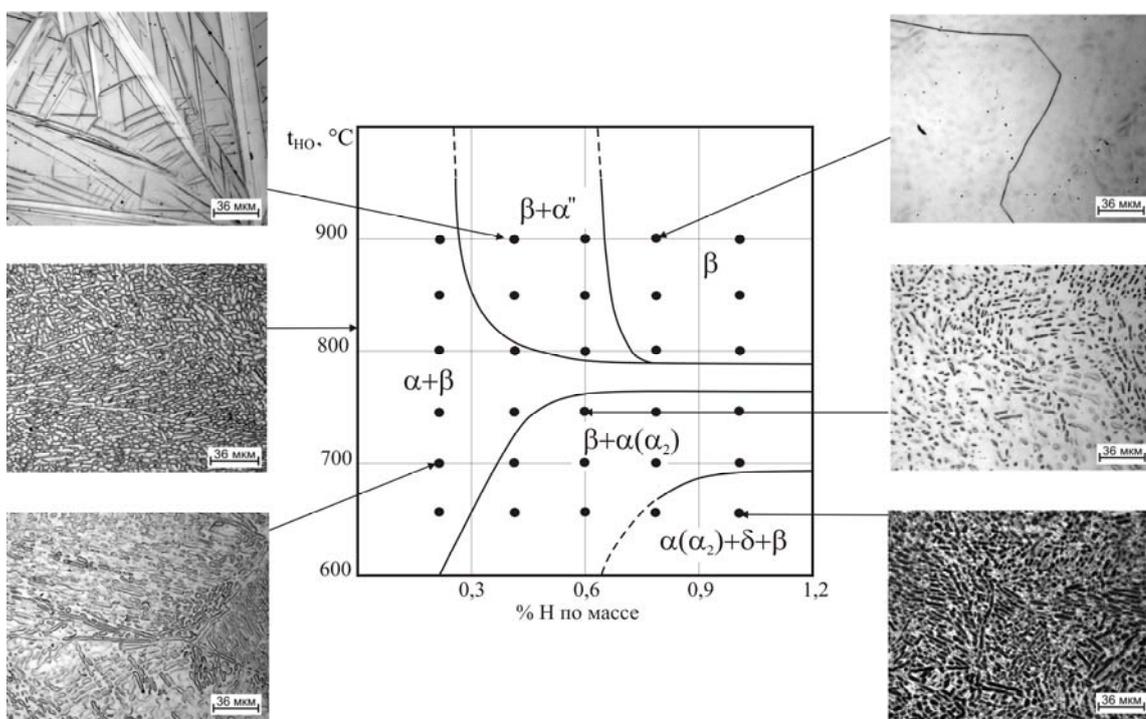


Рисунок 1 - Диаграмма «фазовый состав – концентрация водорода – температура наводороживающего отжига» для сплава VT23 и характерные микроструктуры для различных температурно-концентрационных условий наводороживания

Наводороживание при температурах ниже 800°C не приводит к завершению $\alpha \rightarrow \beta$ - превращения. При $C_{\text{H}} < 0,4\%$ формируется $(\alpha + \beta)$ - структура, а при $C_{\text{H}} \geq 0,4\%$ – $(\alpha(\alpha_2) + \beta)$ -структура. Установлено, что образование α_2 -фазы происходит в процессе наводороживающего отжига. В процессе протекания $\alpha \rightarrow \beta$ - превращения происходит уменьшение в структуре количества первичной α -фазы, перераспределение легирующих элементов между β - и α -фазами, обогащение последней алюминием и образование в ней микрообъемов с упорядоченной α_2

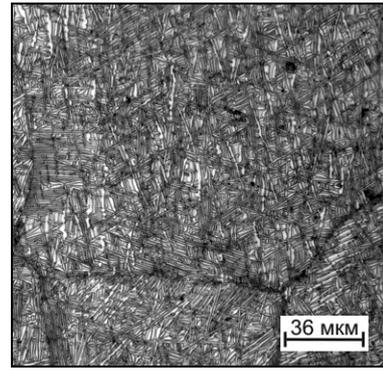
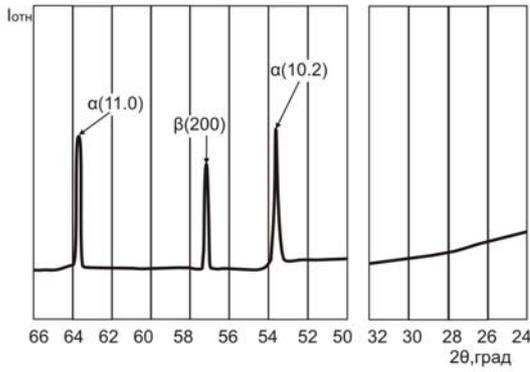
(Ti₃Al) - структурой. Наводороживающий отжиг при температуре 650°С приводит к формированию ($\alpha(\alpha_2)+\beta+\delta$)-структуры при содержании водорода в сплаве более 0,6%, (δ -фаза на основе гидрида TiH₂).

По результатам проведенных исследований построена диаграмма «фазовый состав – концентрация водорода – температура наводороживающего отжига», показывающая изменение фазового состава сплава ВТ23 при нормальной температуре после охлаждения со скоростью 1 К/с в зависимости от температуры наводороживающего отжига и содержания водорода (см.рис.1).

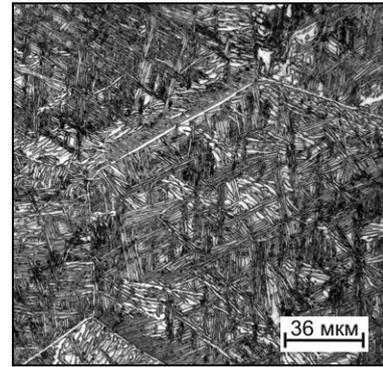
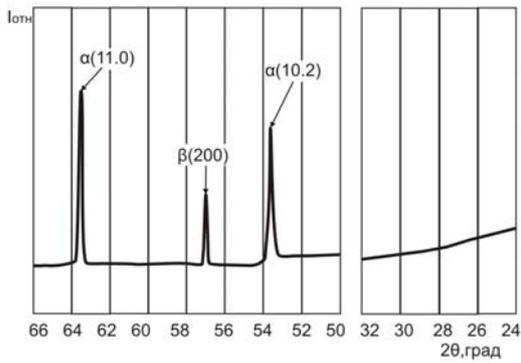
На основании проведенных исследований дано обоснование выбора концентрации водорода (0,7 масс.%) и температур наводороживающего отжига (700° и 800°С) для проведения дальнейших исследований.

На следующем этапе работы изучены закономерности формирования фазового состава и структуры в сплаве ВТ23, предварительно легированного водородом до 0,7 масс.% при температурах 700° и 800°С, в зависимости от температуры дегазации. Показано, что если после наводороживающего отжига формируется ($\alpha(\alpha_2)+\beta$)-структура, то в процессе вакуумного отжига при температурах до 800°С десорбция водорода идет быстрее, чем диффузия основных легирующих элементов, что позволяет сформировать структуру, состоящую из некогерентных частиц α_2 -фазы и обедненных алюминием β -фазы и α -фазы, образующейся из β в процессе дегазации (рис.2). Если в процессе наводороживающего отжига формируется ($\beta+\alpha''$)-структура, то во всем исследованном температурном интервале дегазации формируется ($\alpha+\beta$)-структура (рис.2). Показано, что температура вакуумного отжига оказывает существенное влияние на дисперсность вторичной α -фазы, выделяющейся в процессе дегазации: с повышением температуры ее размер увеличивается (рис.2).

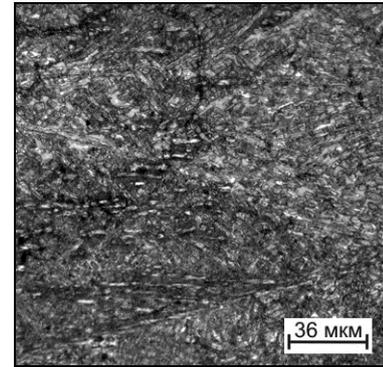
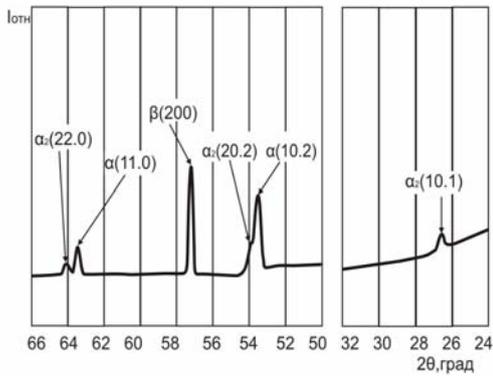
Определен температурно-временной интервал устойчивости ($\alpha_2+\alpha_{\text{дег}}+\beta$)-структуры после дегазации при 625°С в течение 8 часов. Показано, что при температурах 450-550°С она стабильна более 100 часов. С повышением температуры термическая стабильность структуры снижается вследствие повышения диффузионной подвижности атомов легирующих элементов. При температуре изотермической выдержки 650°С ($\alpha_2+\alpha+\beta$)-структура остается стабильной в течение 75 часов, при 800°С - только в течение 5 часов. На основании проведенных исследований построена диаграмма, показывающая стабильность ($\alpha_2+\alpha+\beta$)-структуры, сформированной в процессе термоводородной обработки, в зависимости от температуры нагрева и времени выдержки (рис.3)



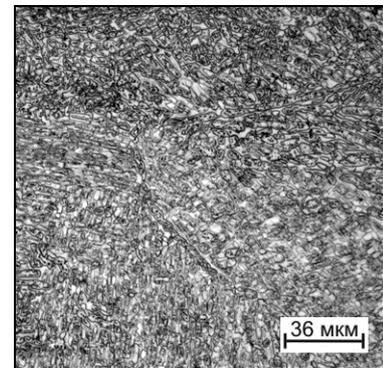
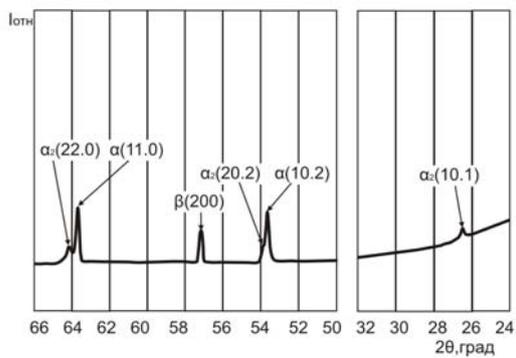
a)



б)



в)



з)

Рисунок 2 - Участки дифрактограмм образцов из сплава ВТ23, наводороженных при температуре 800°C (а, б) и 700°C (в, з) до концентрации 0,7 % Н и отожженных в вакууме при температурах 625°C(а, в) и 750°C(б, з)

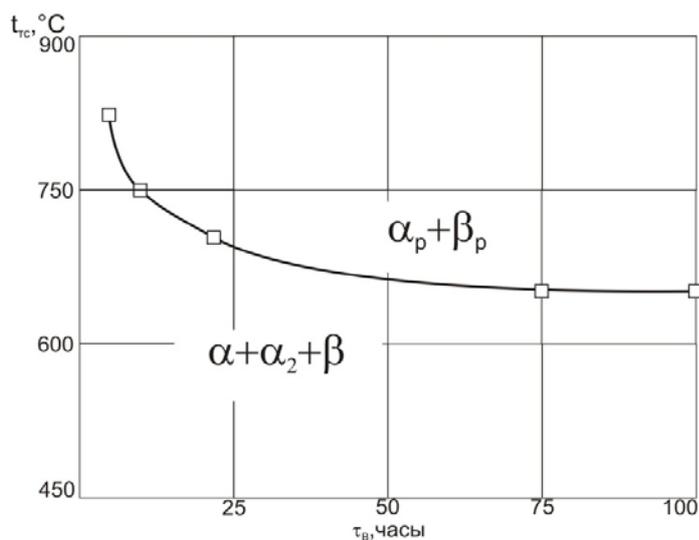


Рисунок 3 – Зависимость фазового состава сплава ВТ23 от времени выдержки при различных температурах, сформированного после наводороживающего отжига до 0,7 % при 700°С и вакуумного отжига при 625°С в течение 8 часов

Установлено, что формирование равновесной ($\alpha+\beta$)-структуры в процессе изотермической выдержки сопровождается снижением значений прочности и повышением пластичности (табл.2). Показано, что последующее старение в вакууме при температурах 450 и 550°С в течение 4-10 часов, соответственно, позволяет повысить прочность до 1100-1300 МПа (табл.2).

Таблица 2- Механические свойства образцов из сплава ВТ23 после различных видов обработки

Режим ТВО	Изотермическая обработка	Старение	Механические свойства		
			σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
НО: 700°С, $C_H=0,7\%$ + ВО: 625°С, 8 часов	-	-	1070	995	7
	700°С, 25 часов	-	1010	990	10
		450°С, 10 ч	1145	910	10,5
		550°С, 4 ч	1060	1005	12
	750°С, 15 часов	-	880	850	12
		450°С, 10 ч	1220	1070	7,0
		550°С, 4 ч	1100	1020	10
	800°С, 10 часов	-	795	750	16
		450°С, 10 ч	1310	1280	5,5
		550°С, 4 ч	1190	1110	8,5

Глава 4. Формирование фазового состава и структуры в сплаве ВТ23, дополнительно легированном водородом, при пластической деформации и последующем вакуумном отжиге

Глава посвящена изучению формирования фазового состава, структуры и текстуры на всех технологических стадиях получения опытного листового полуфабриката из сплава ВТ23. Введение в сплав 0,7 % водорода позволило снизить температуру прокатки плиты до 700°C и получить листовой полуфабрикат толщиной 2 мм. Установлено, что если наводороживающий отжиг плиты заканчивался в $(\alpha+\beta)$ - области, то в процессе пластической деформации не происходит изменения фазового состава, который представлен обогащенной алюминием $\alpha(\alpha_2)$ - фазой и водородсодержащей β - фазой. Если же после наводороживания структура представлена β -фазой и небольшим количеством мартенсита, то в процессе пластической деформации при 700°C происходит выделение α -фазы, ее обогащение алюминием и образование упорядоченной α_2 - фазы.

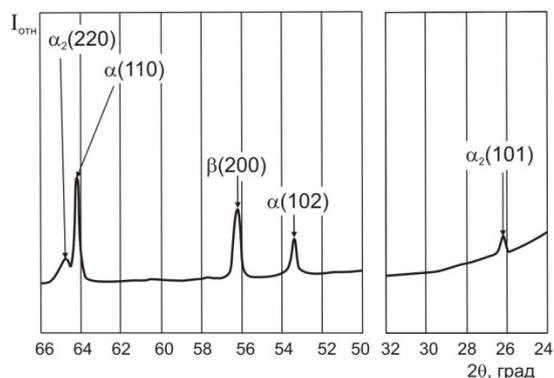
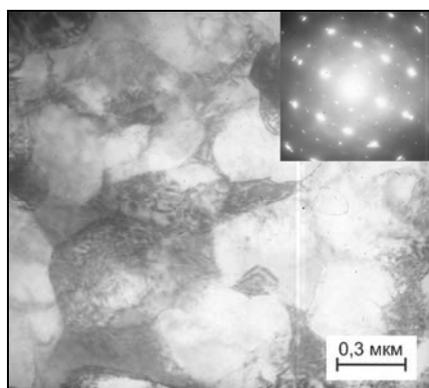
Последующий низкотемпературный отжиг приводит к формированию в листовых полуфабрикатах однотипной структуры, состоящей из некогерентных частиц α_2 -, α - и β -фаз, причем две последние обеднены алюминием (рис.4). Различие в температуре наводороживающего отжига приводит к формированию структуры с

разным размером структурных составляющих. Если наводороживание плиты до концентрации 0,7 % проходило при 800°C, т.е. завершалось в β -области, то в листе формируется структура с размером частиц α -фазы 200-400 нм. Если при 700°C (т.е. в процессе наводороживания формируется $(\alpha(\alpha_2)+\beta)$ -структура), то 200-1000 нм (рис.4).

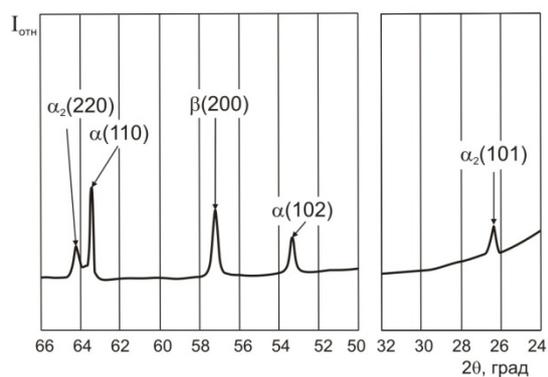
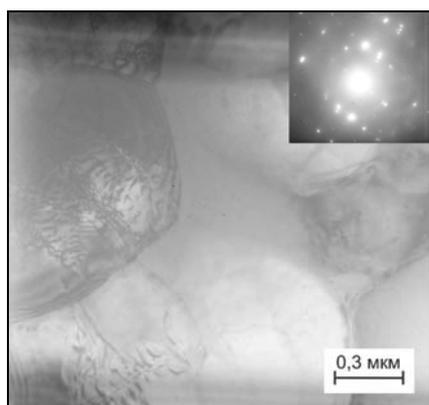
На основе анализа обратных полюсных фигур (ОПФ) изучено формирование текстуры в полуфабрикатах из сплава ВТ23 на всех технологических стадиях: в исходном горячекатаном состоянии, после наводороживающего отжига, прокатки и вакуумного отжига. В исходном горячекатаном состоянии плита из сплава ВТ23 имеет текстуру, характерную для двухфазных $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов. Текстура β -фазы содержит компоненты текстуры деформации $\{100\}\langle 110\rangle$ и динамической рекристаллизации $\{110\}\langle 110\rangle$. Для α -фазы также характерны компоненты текстуры превращения: когда в направлении прокатки (НП) преимущественно располагаются плоскости призмы $\{10\bar{1}0\}$, в поперечном направлении (ПН) - базисные плоскости (0001), а в нормальном направлении (НН) –

плоскости $\{11\bar{2}0\}$, и компоненты текстуры деформации, когда в НН также располагаются плоскости базиса (0001).

Введение в сплав 0,7 % водорода приводит к переходу компонентов текстуры деформации $\{100\}\langle 110\rangle$ и динамической рекристаллизации $\{110\}\langle 110\rangle$ β -фазы в



a)



б)

Рисунок 4 - Структура и участки дифрактограмм листовых заготовок из сплава ВТ23 после прокатки при 700°C и вакуумного отжига при 625°C, Наводороживание исходной плиты до 0,7% водорода проводилось при 800°C (a) и 700°C (б)

компоненты кубической текстуры $\{100\}\langle 100\rangle$, а в α -фазе в НП и ПН формируется базисная текстура (0001) вследствие развития $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения под действием водорода (рис.5). Последующая прокатка при температуре 700°C приводит к формированию «классической» текстуры β -фазы, содержащей компоненты деформации и динамической рекристаллизации, независимо от температуры

наводороживания. В α -фазе в направлениях НП и ПН еще больше увеличивается плотность базисных плоскостей.

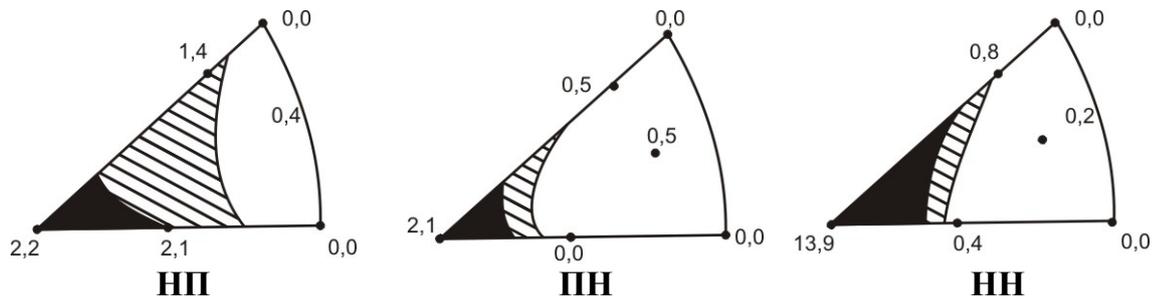
Последующий низкотемпературный вакуумный отжиг при 625°C не приводит к изменению текстуры β -фазы, но уменьшает полюсную плотность плоскостей (0001) α -фазы в НП и ПН и увеличивает полюсную плотность призматической составляющей вследствие развития $\beta \rightarrow \alpha$ -превращения (рис.6). Установлено, что если наводороживающий отжиг заканчивался в β -области, т.е. при 800°C , то наблюдается

более интенсивное снижение полюсной плотности базисных плоскостей как в направлении прокатки, так и в поперечном направлении.

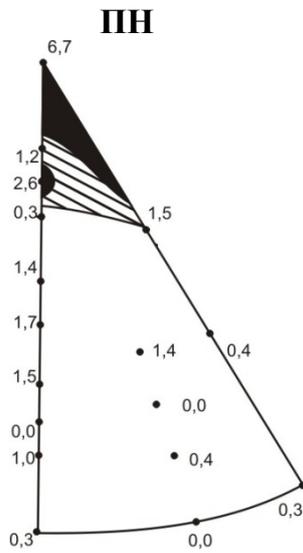
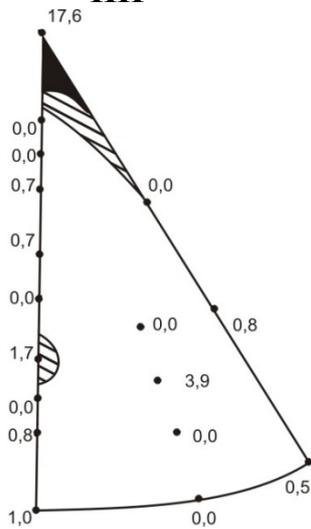
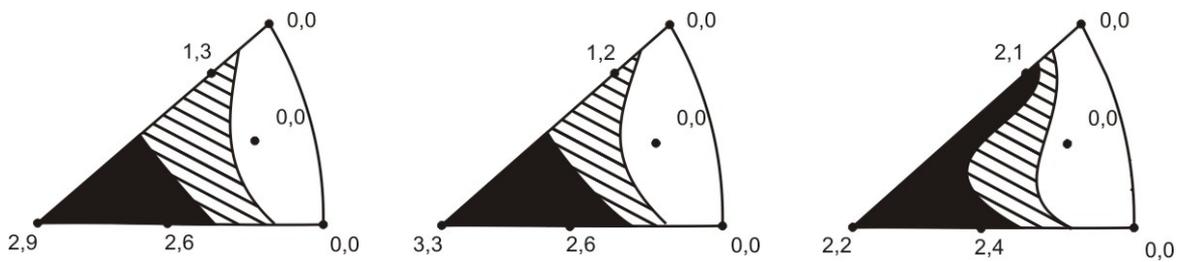
Проведенные механические испытания на разрыв образцов, вырезанных из листов, полученных по опытной и промышленной технологиям, в двух взаимноперпендикулярных направлениях, показали, что общий уровень прочности у промышленного листа ниже, чем у опытного, что обусловлено содержанием в нем меньшего количества алюминия (табл.2). Однако, несмотря на более высокие значения прочности, опытные листы имеют сопоставимые значения по относительному удлинению. Установлено, что минимальной анизотропией свойств во взаимно перпендикулярных направлениях обладает лист, полученный из плиты, наводороженной в β -области, что обусловлено формирующейся кристаллографической текстурой (табл.3).

Таблица 3 - Механические свойства листов толщиной 2 мм из сплава ВТ23, полученных по промышленной и опытной технологиям

Технология	Температуры наводороживающего отжига, $^{\circ}\text{C}$	Направление вырезки образцов	Механические свойства			$\sigma_{\text{В}}^{\text{ПН}} - \sigma_{\text{В}}^{\text{НП}}$, МПа
			$\sigma_{\text{В}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\delta, \%$	
Промышленная	-	НП	975	930	13	125
		ПН	1100	1000	10,5	
Опытная	800	НП	1190	1110	10,1	5
		ПН	1195	1070	9,9	
	700	НП	1135	1060	13,9	95



a)



б)

Рисунок 5- ОПФ плиты из сплава ВТ23 после наводороживающего отжига при 800 °C(a) и 700 °C(б)

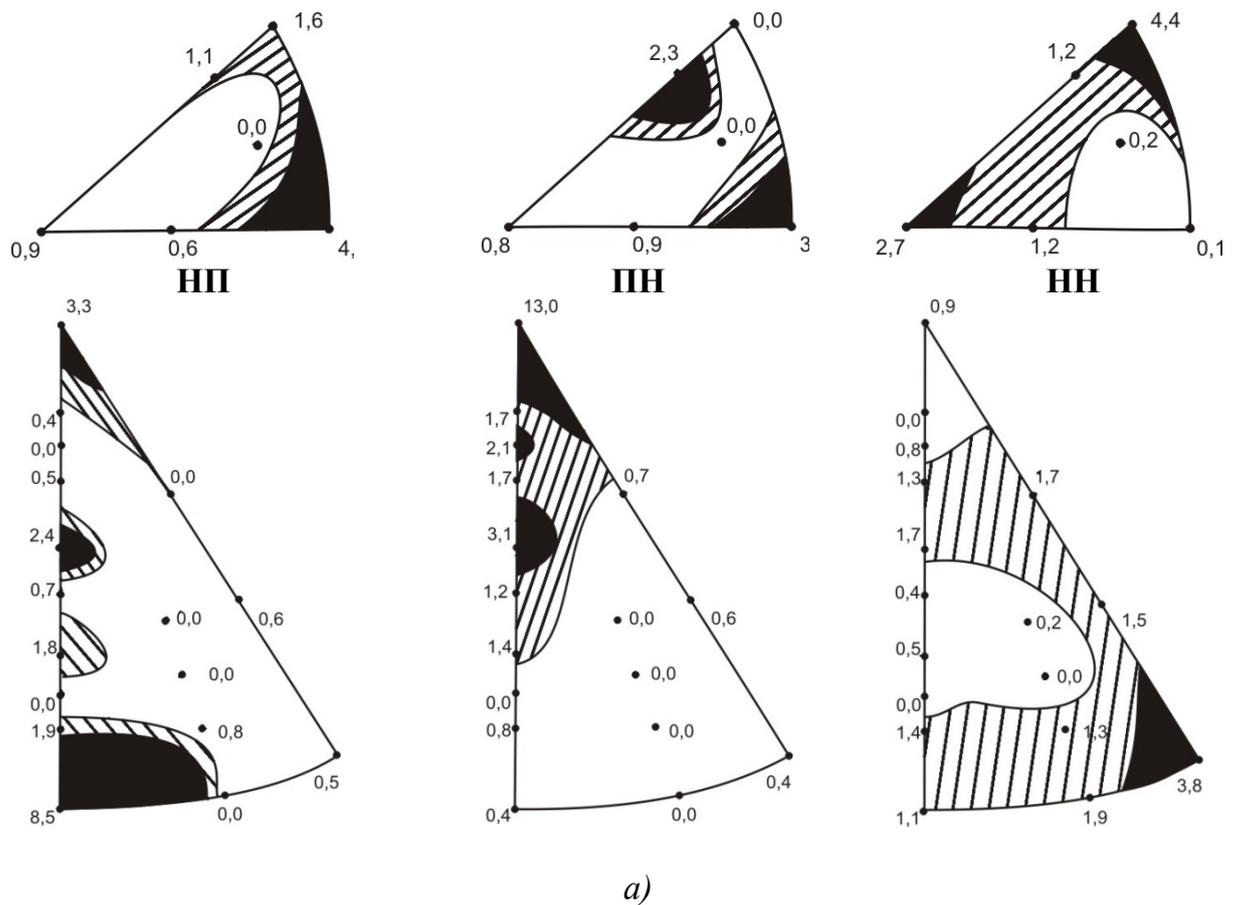


Рисунок 6 - ОПФ листов из сплава VT23 после прокатки при 700°C и вакуумного отжига при 625 °С (наводороживающий отжиг при 800°C)

Глава 5. Разработка технологии прокатки листовых полуфабрикатов из титанового сплава VT23 для сверхпластической формовки при пониженных температурах

Проведенные испытания на сверхпластичность листовых образцов из сплава VT23, полученных по опытной технологии, показали, что создание в сплаве гетерофазной структуры, содержащей некогерентные частицы α_2 - и α -фаз, позволяет снизить максимальное напряжение течения в 4-7 раз и в 3 раза повысить пластичность по сравнению с образцами, вырезанными из плиты, полученной по промышленной технологии. Установлено, что наименьшим напряжением течения (18 МПа) и наибольшим относительным удлинением (720%) обладает лист, полученный из плиты, наводороживающий отжиг которой завершается формированием однофазной β -структуры (табл.4), вследствие формирования более однородной субмикроструктурной структуры (рис.4).

Таблица 4- Значения максимального напряжения течения (σ^{\max}) и относительного удлинения (δ) образцов из сплава ВТ23 при испытаниях на сверхпластичность со скоростью $3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$

Температура наводороживающего отжига плиты, °С	Содержание водорода, %	Температура вакуумного отжига листа, °С	Температура испытаний, °С	σ^{\max} , МПа	δ , %
Испытания на образцах, вырезанных из плиты, полученной по промышленной технологии					
-	-	-	700	210	70
			750	180	120
			800	150	200
Испытания на образцах, вырезанных из листа, полученного по опытной технологии					
800	0,7	625	700	52	320
			750	32	500
			800	18	720
700	0,7	625	700	59	200
			750	39	260
			800	27	460

На основании проведенных исследований была разработана технологическая схема получения листовых полуфабрикатов из титанового сплава ВТ23 для сверхпластической формовки, состоящая из: наводороживающего отжига до концентрации 0,6-0,8% водорода при температуре 800°С, прокатки при температуре 700°С и вакуумного отжига при 625°С. Данная технология позволяет получить в листовых полуфабрикатах субмикроструктурную ($\alpha + \alpha_2 + \beta$) - структуру с размером структурных составляющих 200–400 нм, что обеспечивает наилучшие характеристики сверхпластичности (рис.7).

В процессе сверхпластической деформации происходит изменение фазового состава и структуры от метастабильной ($\alpha_2 + \alpha + \beta$) до равновесной ($\alpha + \beta$), что сопровождается снижением прочности до 800-900 МПа. Последующая обработка в вакууме или защитной атмосфере при температуре 450-550°С в течение 4-10 часов позволяет увеличить прочность до 1100-1300 МПа.

На основании проведенных исследований была разработана технологическая схема сверхпластической формовки листа из сплава ВТ23, содержащего 6-6,5% Al,

включающая деформацию в защитной атмосфере при температурах 750-800°C со скоростью $3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и последующую упрочняющую обработку в вакууме или защитной атмосфере при температурах 450-550°C в течение 4-10 часов, что позволило увеличить прочность с 800-900 МПа до 1100-1300 МПа (рис.7).

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Установлено влияние содержания водорода и температуры наводороживающего отжига на фазовый состав и структуру сплава ВТ23. Показано, что проведение наводороживающего отжига при температуре 900°C с последующим охлаждением со скоростью 1 К/с приводит к изменению структуры сплава от двухфазной ($\alpha+\beta$) до однофазной β при увеличении содержания водорода до 1,0%. Наводороживание при температурах 650 – 750 °С вызывает перераспределение легирующих элементов между β - и α - фазами, обогащение последней алюминием и образование в ней упорядоченных микрообъемов α_2 -фазы (Ti_3Al). Наводороживание сплава при 650 °С до концентраций более 0,6 % приводит к формированию трехфазной ($\alpha(\alpha_2)+\beta+\delta$)-структуры. Построена диаграмма «фазовый состав– концентрация водорода – температура наводороживающего отжига», показывающая изменение фазового состава сплава при комнатной температуре в зависимости от температуры наводороживающего отжига и содержания водорода.

2. Показано, что низкотемпературный (625 °С) вакуумный отжиг сплава ВТ23 с 0,6-0,8% водорода позволяет получить в нем гетерофазную структуру, содержащую некогерентные частицы α_2 -фазы, обедненные алюминием частицы вторичной α -фазы, образующиеся в процессе $\beta \rightarrow \alpha$ – превращения при дегазации, и β -фазу.

3. Определен температурно-временной интервал термической стабильности гетерофазной ($\alpha_2+\alpha+\beta$)-структуры сплава ВТ23, сформированной при термоводородной обработке. Установлено, что такая структура термически стабильна при температурах 450-550 °С в течение не менее 100 часов, а при температурах 650-800 °С – от 75 до 5 часов, соответственно. Показано, что формирование равновесной ($\alpha+\beta$)-структуры приводит к разупрочнению материала. Повысить его прочность возможно проведением упрочняющей термической обработки при температурах 450-550°C, которая может осуществляться в вакууме или защитной атмосфере.

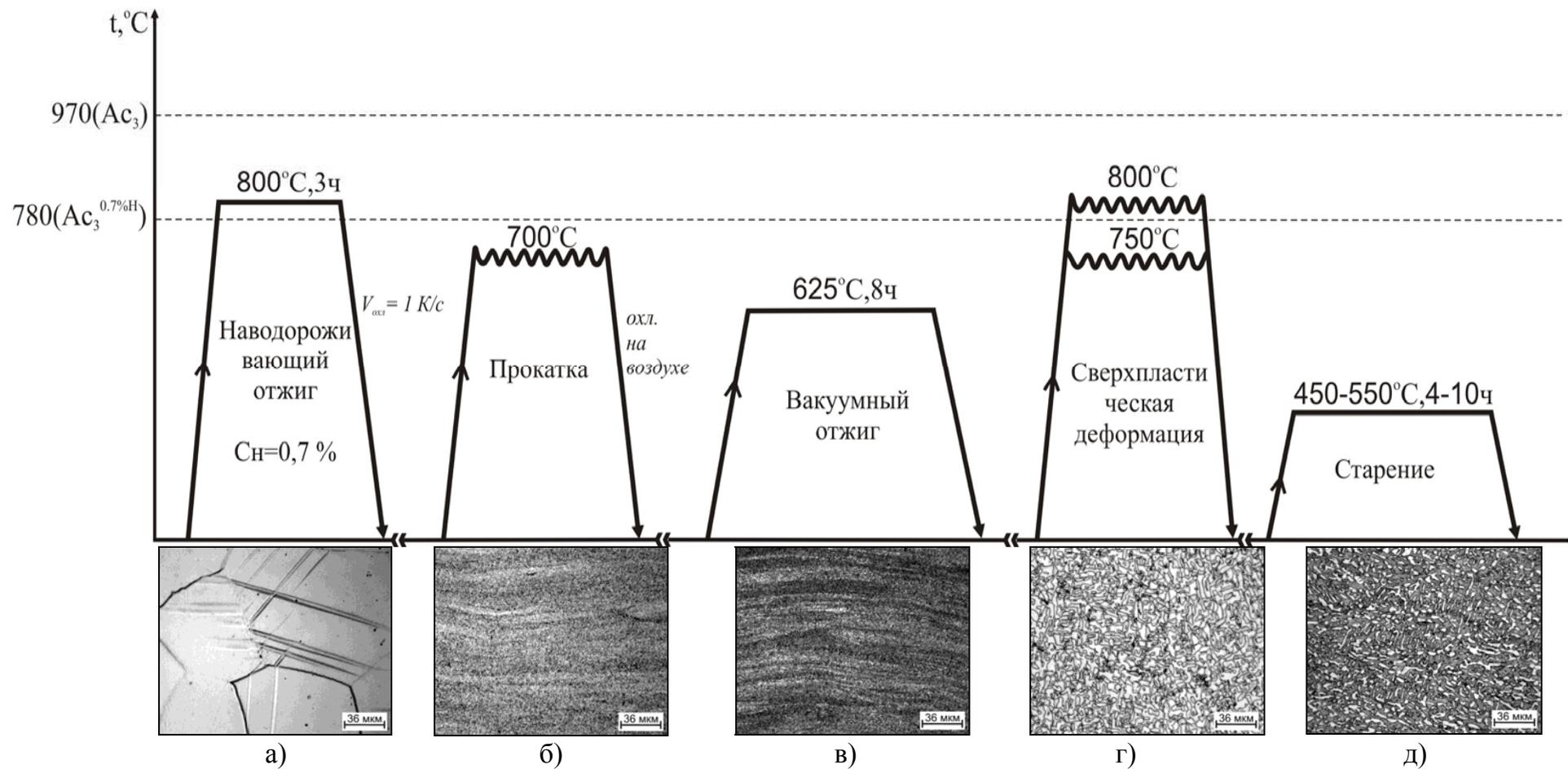


Рисунок 7 – Технологическая схема получения листового полуфабриката из плиты сплава ВТ23 и последующая сверхпластическая деформация

4. Показано, что дополнительное легирование плиты из сплава VT23 водородом до 0,6-0,8% позволяет получить из нее лист толщиной 2 мм прокаткой при температуре 700 °С. Установлено, что выделяющаяся в процессе деформации α -фаза обогащается алюминием с образованием в ней микрообъемов α_2 -фазы.

5. Изучено влияние водорода на процесс текстурообразования в сплаве VT23. Показано, что текстура β -фазы горячекатаной плиты из сплава VT23 состоит из двух основных компонентов: текстуры деформации $\{100\}\langle 100\rangle$ и текстуры динамической рекристаллизации $\{110\}\langle 100\rangle$. Установлено, что в процессе наводороживания развитие $\alpha \rightarrow \beta$ – превращения сопровождается преобразованием текстуры β -фазы в кубическую $\{100\}\langle 100\rangle$.

6. Установлено, что при завершении процесса наводороживания исходной плиты из сплава VT23 в β -области в полученном из нее листе после вакуумного отжига формируется структура с размером структурных составляющих 200-400 нм, при окончании процесса в двухфазной ($\alpha(\alpha_2)+\beta$)-области – 200-1000 нм.

7. Разработана технология получения листового полуфабриката с субмикроструктурной структурой из горячекатаной плиты высокопрочного титанового сплава VT23, содержащего 6-6,5% Al. Она включает наводороживающий отжиг до концентрации 0,6-0,8 масс. % водорода при температуре 800°С, соответствующей β -области, прокатку при 700°С с суммарной степенью обжатия не менее 80% и вакуумный отжиг при температуре 625°С. Технология обеспечивает наилучшее для сверхпластической формовки сочетание механических свойств: наименьшее напряжение течения (18 МПа) и наибольшее относительное удлинение (720 %).

8. Разработана технологическая схема сверхпластической формовки листа из сплава VT23, содержащего 6-6,5% Al, включающая деформацию в защитной атмосфере при температуре 750-800°С и последующую упрочняющую обработку при температурах 450-550°С в течение 4-10 часов. Технология позволяет увеличить прочность материала в изделии после формовки с 800-900 МПа до 1100-1300 МПа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Ильин, А.А. Создание градиентной структуры в титановом сплаве термоводородной обработкой/ Ильин А.А., Скворцова С.В., Спектор В.С., Куделина И.М., Мамонтова Н.А.// Технология легких сплавов.2011. – №2. С. 37-41.

2. Скворцова, С.В. Влияние химического состава и дополнительного легирования водородом на деформационное поведение титановых сплавов при повышенных температурах / Скворцова С.В., Дзунович Д.А., Овчинников А.В., Шалин А.В., Мамонтова Н.А. // Титан, 2012. – №2, С. 6-13

3. *Скворцова, С.В.* Исследование влияния водорода на фазовые и структурные превращения в титановом сплаве ВТ23/ *Скворцова С.В., Мамонтова Н.А., Засыпкин В.В., Шалин А.В., Ручина Н.В.* // Титан. 2014. – №4 (46). С. 18-22.

4. *Скворцова, С.В.* Закономерности фазовых и структурных превращений в титановом сплаве ВТ23 под действием водорода / *Скворцова С.В., Мамонтова Н.А., Шалин А.В., Герман М.А.*,// Международная конференция «Титан-2014 в СНГ»Россия, г. Н. Новгород, 2014г.,с. 166-168

5. *Куделина, И.М.* В Формирование фазового состава и структуры крупногабаритных полуфабрикатов из сплава ВТ23 при охлаждении в воде / *Куделина И.М., Зайнетдинова Г.Т., Мамонтова Н.А.* // XXXV Гагаринские чтения» М., МАТИ-РГТУ, 2009 г., Т.1,с.41-42

6. *Куделина, И.М.* В Исследование возможности формирования градиентной структуры в титановом сплаве с помощью термоводородной обработки / *Куделина И.М., Мамонтова Н.А., Рунова Ю.Э* // XXXVII Гагаринские чтения» М., МАТИ-РГТУ, 2011 г., с.64-67

7. *Грушин, И.А.* Термическая обработка сварных соединений крупногабаритных полуфабрикатов титанового сплава ВТ23, полученных электронно-лучевой сваркой / *Грушин И.А., Мамонтова Н.А., Курышев Е.А.* // XXXVIII Гагаринские чтения» М., МАТИ, 2012 г., с.26-28

8. *Куделина, И.М.* Создание градиентной структуры в титановом сплаве с помощью обратимого легирования водородом / *Куделина И.М., Мамонтова Н.А.* // Список статей в сборник «Научные труды (Вестник МАТИ)».Выпуск 20(92). М. МАТИ,2013г.с.16-21