

На правах рукописи



ШАХОВ Сергей Викторович

**ВЛИЯНИЕ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ СЛОЁВ И ОКСИДНЫХ ПЛЁНОК,
ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПРИ ВОЗДУШНОМ ОТЖИГЕ, НА
СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ТОНКОЛИСТОВЫХ ТИТАНОВЫХ
ПОЛУФАБРИКАТОВ ДИНАМИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ**

Специальность 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и
сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре «Технологии сварочного производства и диагностики» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ).

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Коломенский Александр Борисович

Официальные оппоненты: – **Овчинников Виктор Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
АО «Российская самолетостроительная
корпорация «МИГ», начальник лаборатории
сварочных процессов
– **Дзунович Дмитрий Анатольевич**,
кандидат технических наук, ФБУ «Российская
научно-техническая промышленная библиотека»,
директор

Ведущее предприятие: – АО «Научно-исследовательский институт
автоматизированных средств производства и
контроля»

Защита диссертации состоится 12 декабря 2019 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.125.15 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская 3, ауд. 307Б. 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@mat.i.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте https://mai.ru/upload/iblock/856/Dissertatsiya_SHakhov-S.V.pdf

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Надежность и работоспособность тонколистовых титановых полуфабрикатов, применяемых в изделиях авиационной техники, в значительной мере зависят от выбора оптимальных параметров процессов их изготовления: в частности, от наличия газонасыщенных слоев и оксидных пленок на поверхности металла, формирующихся в процессе нагрева.

Наряду с преобладающими сведениями об отрицательном воздействии газонасыщенных слоёв, имеются данные об их положительном влиянии, которое связано с достижением в приповерхностных слоях оптимальных концентраций кислорода. При неполном удалении газонасыщенных слоев возможно улучшение механических характеристик, в частности, малоциклового усталости. Одновременно решается задача сокращения безвозвратных потерь дорогостоящего металла при травлении в производстве листовых титановых полуфабрикатов.

Однако, чтобы использовать листовые полуфабрикаты с регламентированными газонасыщенными слоями, необходимо исследовать ряд вопросов, связанных с технологией их производства.

В процессе изготовления тонкостенных конструкций титановые листы подвергаются различным операциям, в том числе отжигу и сварке, приводящим к формированию поверхностных оксидных плёнок и структурным изменениям. В литературе отсутствуют сведения о совместном влиянии на малоцикловую усталость, ударную вязкость и технологическую пластичность частично сохраняемых газонасыщенных слоёв и оксидных плёнок. Нет данных и о влиянии указанных факторов на работоспособность сварных соединений с β -превращенной крупнозернистой структурой в условиях усталостного и динамического нагружения.

Поэтому исследование влияния объемной и поверхностной структуры в листовых полуфабрикатах из титановых сплавов α - и $(\alpha+\beta)$ - классов полученной в процессе различных видов обработки, приводящих к окислению, на их технологические и механические свойства, является актуальной задачей.

Цель работы состояла в установлении закономерностей влияния глубины поверхностных газонасыщенных слоев и оксидных плёнок, сформировавшихся при различных видах обработки, на работоспособность тонколистовых титановых полуфабрикатов в условиях динамического нагружения.

Для реализации поставленной задачи необходимо было решить следующие задачи:

1. Изучить влияние частично сохраняемых газонасыщенных слоев на малоцикловую усталость и ударную вязкость листовых полуфабрикатов из титановых сплавов ВТ1-0, ПТ7м и ВТ6ч.

2. Установить закономерности совместного влияния частично сохраняемых газонасыщенных слоёв и оксидных плёнок, формирующихся в процессе различных режимов воздушного отжига, на малоцикловую усталость, ударную вязкость и технологическую пластичность листов из титановых сплавов.

3. Оценить влияние глубины газонасыщенного слоя на технологическую пластичность и работоспособность в условиях динамического нагружения сварных соединений, выполненных из листовых полуфабрикатов титановых сплавов ВТ1-0, ПТ7м и ВТ6ч.

4. Разработать технологические рекомендации по созданию на поверхности титановых листов газонасыщенных слоев заданной глубины, обеспечивающих повышенную эксплуатационную долговечность в условиях динамических нагрузок при одновременном сохранении технологической пластичности.

Научная новизна:

1. Выявлен эффект положительного воздействия оксидных пленок толщиной 35-45 нм, формирующихся при низкотемпературном воздушном отжиге в интервале температур 350-450 °С, на сопротивляемость листов из титановых сплавов ВТ1-0, ПТ7м малоциклового усталости и ударной вязкости. Значения малоциклового усталости технического титана ВТ1-0 возрастают на 5-10%, сплава ПТ7м на 15-40%, а ударной вязкости - на 15% и на 65% соответственно в сравнении с основным металлом.

2. Установлено, что поверхностные оксидные пленки в максимальной мере увеличивают сопротивляемость титановых листов динамическим нагрузкам без газонасыщенных слоев и с газонасыщенными слоями с перепадами микротвердости $\Delta HV \leq 20\%$. Для титана ВТ1-0 выявлен рост значений малоциклового усталости до 60%, а для сплава ПТ7м - до 40%, а для сплава ВТ6ч - до 10%.

3. Показано, что положительный эффект от оксидных пленок максимально проявляется для листов с мелкозернистой микроструктурой. Для крупнозернистой β -превращенной микроструктуры, формирующейся в зоне термического влияния сварных соединений исследуемых титановых сплавов ВТ1-0, ПТ7 м и ВТ6ч, эффект снижается в 2-3 раза.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Выявлены оптимальные параметры газонасыщенных слоев, повышающие на 10...60% малоцикловую усталость и ударную вязкость листов из титановых сплавов различных групп прочности, а именно, ВТ1-0, ПТ7м и ВТ6ч.

2. По результатам исследований влияния оксидных пленок на малоцикловую усталость, ударную вязкость, кратковременную прочность, а также технологическую пластичность обоснована целесообразность применения низкотемпературного воздушного отжига листовых титановых полуфабрикатов при $T_{отж.} = 350...450$ °С как при наличии газонасыщенных слоев, так и без слоя.

3. Установлено, что удаление оксидных пленок, формирующихся при низкотемпературном воздушном отжиге на поверхности сварных соединений листовых титановых сплавов, повышает их малоцикловую усталость на 20...40%.

4. Основные результаты работы использованы на ПАО «ВАСО» при корректировке технологических процессов изготовления тонколистовых титановых конструкций, позволяющие повысить эксплуатационную долговечность изделий из титановых сплавов при одновременном снижении прямых производственных затрат в процессе их изготовления, что подтверждено Актом использования, приведенном в Приложении к диссертации.

Методология и методы исследования

В качестве методологической основы исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых, государственные стандарты РФ.

При выполнении работы были использованы современные методы исследования: измерение микротвердости, испытания на повторно-статическую долговечность и ударную вязкость, испытания на кратковременный разрыв, угол загиба, испытания на пробу Эриксона. Топографический анализ окисленной поверхности образцов и фрактографию изломов образцов проводили с использованием методов электронной микроскопии. Результаты механических испытаний подвергали математической обработке с использованием специального программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследования влияния регламентированных газонасыщенных слоев на малоцикловую усталость и ударную вязкость тонколистовых титановых полуфабрикатов различных групп прочности.

2. Характер воздействия оксидных пленок, формирующихся в процессе воздушного отжига, на малоцикловую усталость и ударную вязкость тонколистовых титановых полуфабрикатов при наличии регламентированных газонасыщенных слоев и без слоя.

3. Характер совместного влияния на технологическую пластичность титановых листов оксидных пленок и газонасыщенных слоёв.

4. Особенности влияния газонасыщенных слоев и оксидных пленок на работоспособность металла зоны термического влияния сварных соединений в условиях усталостного и динамического нагружения.

Степень достоверности результатов

Результаты испытаний получены на поверенном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения, испытания и измерения проводились в соответствии с требованиями ГОСТ и ОСТ, достоверность результатов подтверждается хорошим совпадением экспериментальных данных, полученных различными методами, использованием методов математической статистики при обработке результатов.

Апробация результатов

Материалы работы докладывались и обсуждались на пяти научно-технических конференциях: на XXXIV Всероссийской конференции «Наука и технологии» посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева (Миасс, 2014); на 7-м Всероссийском молодежном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, МАИ, 2015); на Региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Инновационные разработки молодых ученых Воронежской области на службу региона» (Воронеж, 2016); на 9-м Всероссийском молодежном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, МАИ, 2017); на XVIII Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов «Авиакосмические технологии-2017» (Воронеж, 2017).

Публикации. Основное содержание работы изложено в 10 научных работах, в том числе в 4 в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка цитируемой литературы и приложений. Объем диссертации составляет 138 страниц, содержит 62 рисунка, 27 таблиц, список литературы из 120 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, определены цель и задачи исследований, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Глава 1. Состояние вопроса и постановка задач исследований

В главе рассмотрены вопросы особенностей технологии производства тонколистовых титановых полуфабрикатов, процессы окисления титановых сплавов при нагреве и образования поверхностных газонасыщенных слоев.

Приведены литературные данные по влиянию примесей внедрения, окисления и газонасыщения на механические свойства листов из титановых сплавов, титановых сварных соединений. Показано, что в некоторых случаях при достижении оптимальных параметров газонасыщенных слоев можно повысить механические свойства тонколистовых титановых полуфабрикатов и использовать кислород как самый дешевый легирующий элемент.

Рассмотрены вопросы, касающиеся термообработки титановых сплавов, влияния отжига на механические свойства основного металла, а также сварных соединений из титановых сплавов. Показано, что низкотемпературным отжигом можно повысить служебные характеристики тонколистовых сварных соединений из титановых сплавов.

Сформулированы недостаточно изученные вопросы по рассмотренному направлению.

На основе анализа литературных данных обоснована цель и сформулированы задачи исследований.

Глава 2. Объекты и методы исследований

Исходными материалами для проведения исследований служили листы из технического титана марки ВТ1-0 и сплавов ПТ7м и ВТ6ч толщиной от 0,8 до 1,2 мм. Химический состав используемых листов соответствовал требованиям ОСТ и приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав используемых материалов

Марка материала	Толщина листа, мм	Легирующие элементы, % по массе			Содержание примесей, % по массе, не более							
		Al	Mn	V	C	Fe	Si	Zr	O	N	H	
ВТ1-0	0,8	0,09	-	-	0,005	-	-	-	0,07	0,0001	0,002	
	1,0	0,06	-	-	0,010	-	-	-	0,13	0,0001	0,002	
ПТ7м	0,8	2,03	-	-	0,0095	-	-	2,60	0,08	0,0001	0,002	
	1,0	2,07	-	-	0,0065	-	-	2,80	0,10	0,0001	0,002	
	1,2	2,14	-	-	0,008	-	-	2,87	0,07	0,0001	0,002	
ВТ6ч	0,8	6,44	-	4,00	0,013	-	-	-	0,08	0,0001	0,002	

Для проведения исследований использовали листовые образцы, изготовленные согласно требованиям ГОСТов для каждого вида испытаний. Образцы изготавливали из листов одной партии для каждого вида испытаний. Заготовки для испытаний на малоцикловую усталость, ударную вязкость и испытаний на кратковременный разрыв в листах располагали так, чтобы ось главных напряжений была перпендикулярна направлению проката.

С целью формирования поверхностных газонасыщенных слоев образцы, вырезанные из листовых заготовок для каждого вида испытаний, подвергали высокотемпературному воздушному отжигу в лабораторной шахтной печи. Температура и продолжительность нагрева определялась с помощью прибора КСП-4, погрешность измерения температуры составляла ± 5 °С. Отжиг образцов из технического титана ВТ1-0 выполняли при температуре 800 °С в течении 2 ч., образцов из сплавов ПТ7м и Вт6ч при температуре 850 °С в течении 1 ч.

После высокотемпературного отжига поверхностную окалину удаляли пескоструйной обработкой при избыточном давлении не более 0,08-0,1 МПа. Травление образцов проводили в смеси кислот HNO_3 (600-750 мл/л, плотность 1,4 г/см³) и HF (180-220 мл/л, плотность 1,3 г/см³) в течение различного времени для получения различной глубины газонасыщенных слоев.

Содержание водорода определяли на образцах-свидетелях с использованием газового анализатора ОНН-2000 фирмы ELTRA.

Сварные соединения заготовок после травления имитировали сквозным проплавлением листовых заготовок на сварочном автомате АРК-2. Для местной защиты сварных швов использовали аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-75.

Микротвердость поверхности образцов после мерного травления определяли на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 0,51 Н по пяти значениям для каждой поверхности и на основе результатов единичных измерений вычисляли среднее значение микротвердости. Перепад микротвердости в зависимости от глубины травления ΔHV , % определяли по формуле:

$$\Delta HV = \frac{H_{\mu \text{ з.с.}} - H_{\mu \text{ б/с}}}{H_{\mu \text{ с.}}} \cdot 100\%,$$

где $H_{\mu \text{ з.с.}}$ - среднее значение микротвердости поверхности при определенной глубине травления;

$H_{\mu \text{ б/с}}$ - среднее значение микротвердости поверхности без газонасыщенного слоя.

Толщину оксидных пленок, формирующихся процессе воздушного в интервале температур 350-650 °С в течении 1 ч оценивали по цветам «побежалости» поверхности образцов и сравнивали с литературными данными.

Испытания на малоцикловую усталость проводились на установках УММ-10 и Р-10 при коэффициенте асимметрии $R=+0,1$ и частоте циклов $f=0,6-0,8$ Гц на плоских образцах с рабочей частью типа IV, выполненных по ГОСТ 25.502-79. Для образцов с концентратором в виде отверстия диаметром $\varnothing 2,5$ максимальные напряжения цикла составляли $\sigma_{\max} = 290, 450$ и 650 МПа для технического титана ВТ1-0, сплавов ПТ7М и ВТ6ч соответственно. Для сварных образцов без концентратора, выполненных из сплава ВТ6ч, максимальные напряжения цикла составляли $\sigma_{\max} = 820$ МПа.

Испытания на ударную вязкость (КСУ) выполняли на маятниковом копре со шкалой 5 кг·м согласно требованиям ГОСТ 9454-78.

Испытания на кратковременный разрыв для определения временного сопротивления разрыву (σ_B) и предела текучести ($\sigma_{0,2}$) выполняли на разрывной машине Inspekt-50 согласно ГОСТ 1497-84.

Угол загиба листовых образцов размером $100 \times 10 \times S$ мм (где S – толщина образца) определяли на установке «Amsler» мощностью 3 т.

Испытания на пробу Эриксона по ГОСТ 10510-80 с целью определения глубины вытяжки Н, мм до образования трещины выполняли на приборе МТГЛ-10-1 при диаметре шарика 20 мм и матрицы 27 мм.

Результаты механических испытаний аппроксимировали по методу наименьших квадратов к кривым типа:

$$y = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f.$$

Фрактографические исследования изломов и топографию поверхности образцов после окисления выполняли на сканирующем электронном микроскопе марки Jeol JSM-6510LV.

Глава 3. Влияние газонасыщенных слоев и оксидных пленок на работоспособность тонколистовых титановых полуфабрикатов в условиях усталостного и динамического нагружения

В данной главе исследовали влияние различных газонасыщенных слоев и оксидных плёнок на малоцикловую усталость и ударную вязкость тонколистовых титановых полуфабрикатов.

В качестве материалов для испытаний использовали образцы из листов сплава ВТ6ч толщиной 0,8 мм и из технического титана ВТ1-0 и сплава ПТ7М толщиной 1,0 и 1,2 мм соответственно.

Образцы, вырезанные из листовых полуфабрикатов, подвергали высокотемпературному воздушному отжигу в лабораторной печи для формирования газонасыщенных слоев. Образцы из технического титана ВТ1-0 отжигали по режиму 800 °С 2 ч, а сплавы ПТ7М и ВТ6ч - 850 °С 1 ч. Такой отжиг приводит к формированию альфированных слоев толщиной ~ 100 мкм.

Изменение микротвердости поверхности образцов в зависимости от глубины травления приведено на рис. 1. Перепад микротвердости в зависимости от глубины травления ΔHV определяли по формуле приведенной выше.

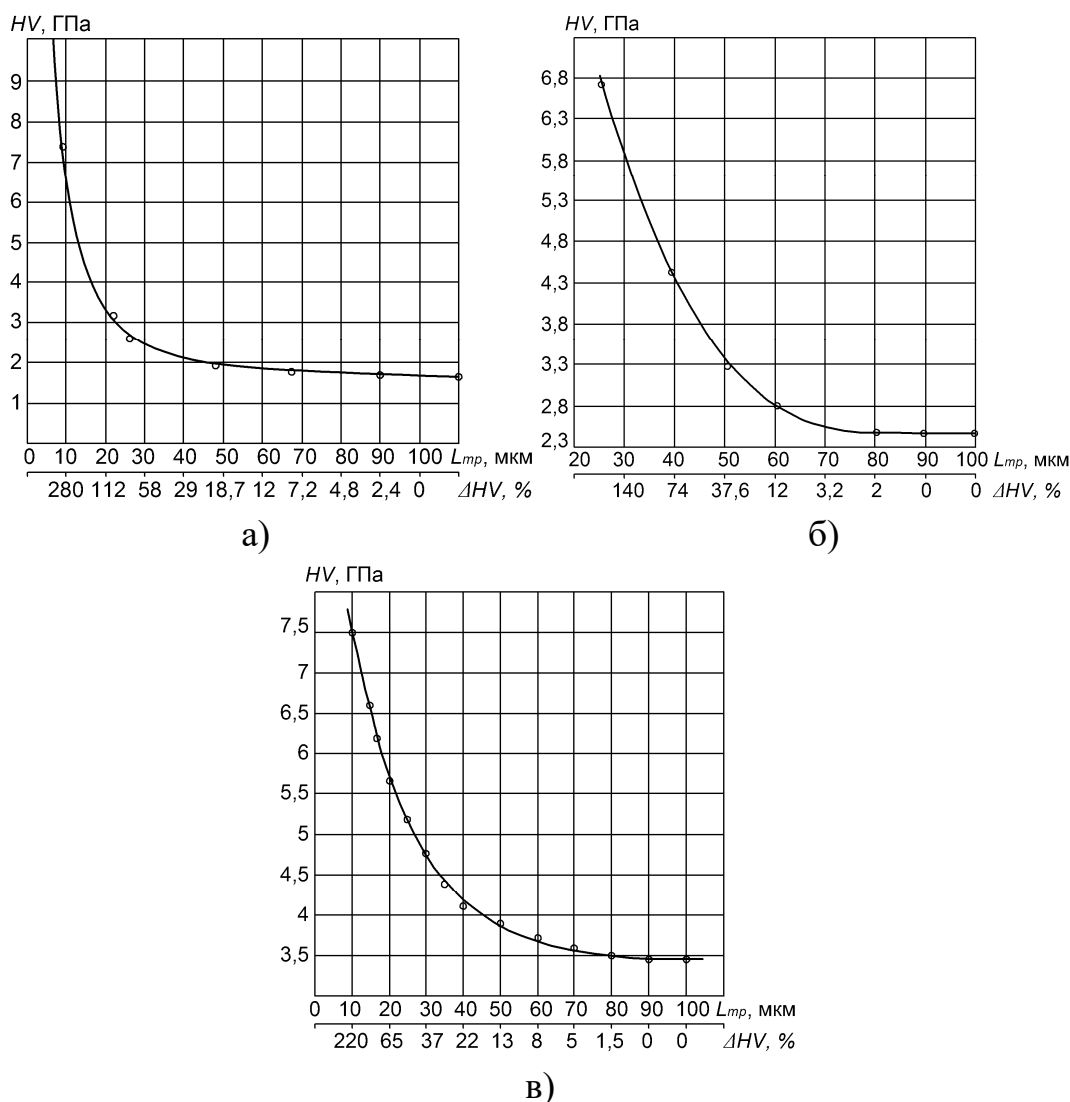


Рисунок 1 – Зависимость микротвердости поверхности (HV) образцов от глубины травления ($L_{тр}$): а – для технического титана ВТ1-0; б – для сплава ПТ7М; в – для сплава ВТ6ч

При анализе результатов испытаний на малоцикловую усталость выявляются следующие закономерности.

Установлено, что при частичном (от 30 до 70% от начальной толщины) травлении газонасыщенного слоя происходит возрастание малоциклового

усталости для технического титана ВТ1-0 и сплава ВТ6ч либо ее восстановление до уровня неокисленного металла без газонасыщенного слоя для сплава ПТ7м.

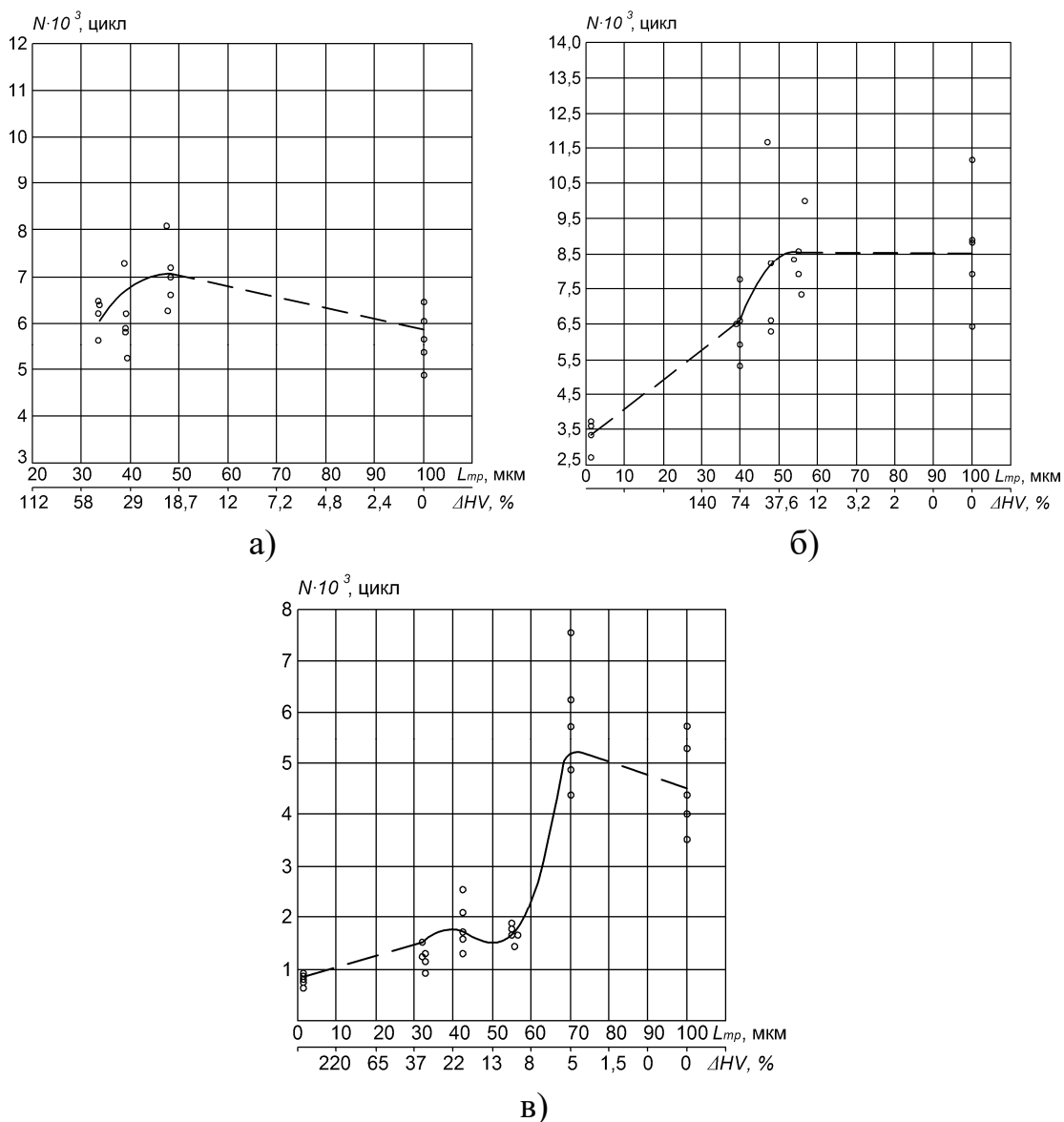


Рисунок 2 – Зависимость малоциклового усталости образцов ($N_{цикл.}$) от глубины травления ($l_{тр.}$): а – для технического титана ВТ1-0; б – для сплава ПТ7м; в – для сплава ВТ6ч

Оптимальные перепады микротвёрдости ΔHV составляют 19, 12 и 5% соответственно (см. рис.2). При этом малоцикловая усталость образцов из технического титана ВТ1-0 возрастает в 1,2 раза, а сплава ВТ6ч - примерно на 25% по сравнению с образцами с перепадами микротвердости $\Delta HV = 0\%$.

Для изучения влияния частично сохраняемых газонасыщенных слоёв на малоцикловую усталость при наличии поверхностных оксидных плёнок образцы дополнительно подвергали одночасовому низкотемпературному воздушному

отжигу $T_{отж.}$ при температурах 350, 450, 550 и 650 °С соответственно. На основании полученных результатов малоциклового усталости рассчитывали коэффициенты $K_c = N/N_{б.сл}$ и $K_T = N/N_{б/о}$ (см. табл. 2-5).

Таблица 2 -Значения $K_c = N/N_{б.сл}$ для технического титана BT1-0

$\Delta HV, \%$ ($l_{тр}, \text{мкм}$)	$T_{отж.}, \text{°C}$				
	б/о	350	450	550	650
39,4% (35 мкм)	1,16	1,12	1,2	1,2	1,02
28,5% (39 мкм)	1,03	1,09	1,29	1,3	1,27
19% (48 мкм)	1,2	1,38	1,49	1,29	1,12
0% (100 мкм)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 3 -Значения $K_c = N/N_{б.сл}$ для сплава BT6ч

$\Delta HV, \%$ ($l_{тр}, \text{мкм}$)	$T_{отж.}, \text{°C}$				
	б/о	350	450	550	650
40% (27 мкм)	0,27	0,37	0,46	0,42	1,0
20% (43 мкм)	0,38	0,45	0,5	0,45	1,85
10% (55 мкм)	0,38	0,65	1,0	0,73	2,59
5% (70 мкм)	1,17	1,12	1,39	1,12	3,37
0% (100 мкм)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 4 -Значения $K_T = N/N_{б/о}$ для технического титана BT1-0

$\Delta HV, \%$ ($l_{тр}, \text{мкм}$)	$T_{отж.}, \text{°C}$				
	б/о	350	450	550	650
39,4% (35 мкм)	1,0	1,0	1,13	0,93	0,72
28,5% (39 мкм)	1,0	1,1	1,37	1,14	1,0
19% (48 мкм)	1,0	1,19	1,35	0,97	0,76
0% (100 мкм)	1,0	1,04	1,09	0,9	0,81

Таблица 5 -Значения $K_T = N/N_{б/о}$ для сплава ПТ7М

$\Delta HV, \%$ ($l_{тр}, \text{мкм}$)	$T_{отж.}, \text{°C}$				
	б/о	350	450	550	650
74% (40 мкм)	1,0	1,07	1,27	1,05	1,29
22% (54 мкм)	1,0	1,21	1,35	0,9	1,18
0% (100 мкм)	1,0	1,15	1,38	1,22	1,14

На рис. 3 показана зависимость отношения $K_c = N/N_{б.сл.}$ от величины ΔHV для различных температур воздушного отжига и, соответственно, формирующихся при этом поверхностных оксидных плёнок. Здесь N – малоцикловая усталость металла

с частично сохранённым газонасыщенным слоем, а $N_{б.сл.}$ – малоцикловая усталость металла с полностью удалённым газонасыщенным слоем.

Установлено, что для высокопластичного технического титана ВТ1-0 (см. рис.3, а) частично сохраняемые газонасыщенные слои оказывают положительное воздействие на малоцикловую усталость во всём изученном диапазоне температур низкотемпературного воздушного отжига.

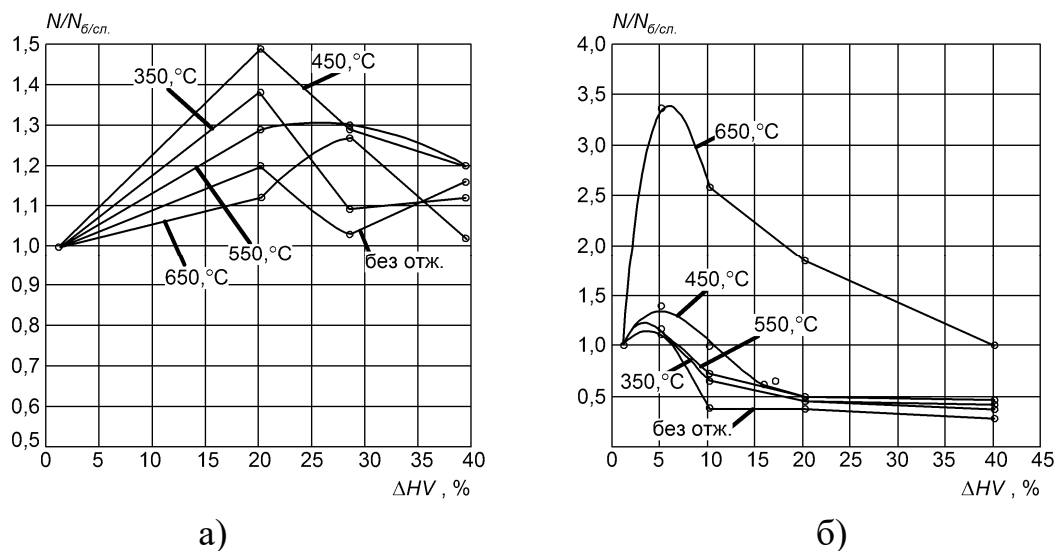


Рисунок 3 – Влияние поверхностных перепадов микротвёрдости ΔHV на соотношение $K_c = N/N_{б.сл.}$: а – для технического титана ВТ1-0; б - для сплава ВТ6ч

Особенно благоприятное влияние оказывают газонасыщенные слои в присутствии оксидных плёнок, формирующиеся при нагреве до 350...450 °С. Прирост малоцикловой усталости здесь увеличивается на 30-50% в сравнении с основным металлом. Максимумы малоцикловой усталости наблюдаются при $\Delta HV \sim 20-30\%$.

Для сплава ВТ6ч (см. рис. 3, б) обнаружен аналогичный устойчивый максимум при $\Delta HV = 5\%$, более высокие перепады микротвёрдости вызывают снижение малоцикловой усталости. Наиболее благоприятное влияние сохраняемых слоёв так же, как и для технического титана ВТ1-0, проявляется в присутствии оксидных плёнок, формирующихся при отжиге до 450 °С.

Для сплава ПТ7М выраженного максимума по ΔHV не наблюдали, но лучшие результаты соответствуют варианту отжига при 450 °С либо без отжига. При этом перепады $\Delta HV \leq 20\%$ практически не вызывают снижения малоцикловой усталости практически для всех температур низкотемпературного отжига.

На рис. 4 представлены зависимости в виде $K_T = N/N_{б.сл.}$, где для данного перепада микротвёрдости (ΔHV) N – малоцикловая усталость после

низкотемпературного отжига, с поверхностной оксидной плёнкой, а $N_{6/0}$ – без отжига и, соответственно, без плёнки.

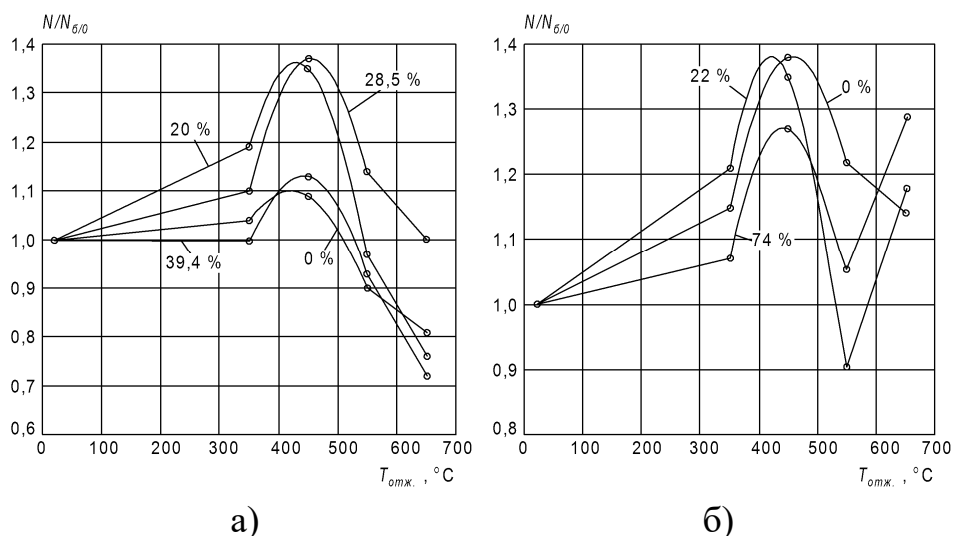


Рисунок 4 – Влияние температуры низкотемпературного отжига $T_{отж}$ на соотношение $K_T = N/N_{6/0}$: а – для технического титана VT1-0; б - для сплава ПТ7М

Видно, что для технического титана и сплава ПТ7М для всех исследованных вариантов ΔHV имеет место устойчивый максимум малоциклового усталости при температуре отжига 450 °С, что свидетельствует о благоприятной роли оксидных плёнок как при наличии частично сохраняемых газонасыщенных слоёв, так и без такого слоя.

В работе впервые исследовали влияние газонасыщенных слоев на ударную вязкость тонколистовых титановых полуфабрикатов. Установлено, что частичное сохранение газонасыщенных слоев оказывает благоприятное влияние либо не понижает ударной вязкости (см. рис. 5).

Для технического титана VT1-0 уже при глубине травления $l_{тр.} \approx 27$ мкм ($\Delta HV = 78\%$) ударная вязкость достигает уровня основного металла без слоя.

Для сплава ПТ7М максимум ударной вязкости достигается при глубине травления $l_{тр.} \approx 55-60$ мкм ($\Delta HV = 12\%$), превышение ударной вязкости по сравнению с металлом без слоя составляет $\sim 10\%$.

Для высокопрочного сплава VT6ч не выявлено эффекта повышения ударной вязкости, но восстановление КСУ до значений чистого металла (с полностью стравленным газонасыщенным слоем) происходит уже при $l_{тр.} \approx 43$ мкм ($\Delta HV = 20\%$).

Для изучения влияния частично сохраняемых газонасыщенных слоёв на ударную вязкость при наличии поверхностных оксидных плёнок образцы дополнительно подвергали одночасовому низкотемпературному воздушному

отжигу $T_{отж.}$ при температурах 350, 450, 550 и 650 °С соответственно и рассчитывали коэффициенты $K_c = KCU/KCU_{б.сл}$ и $K_T = KCU/KCU_{б/о}$, аналогично малоцикловой усталости.

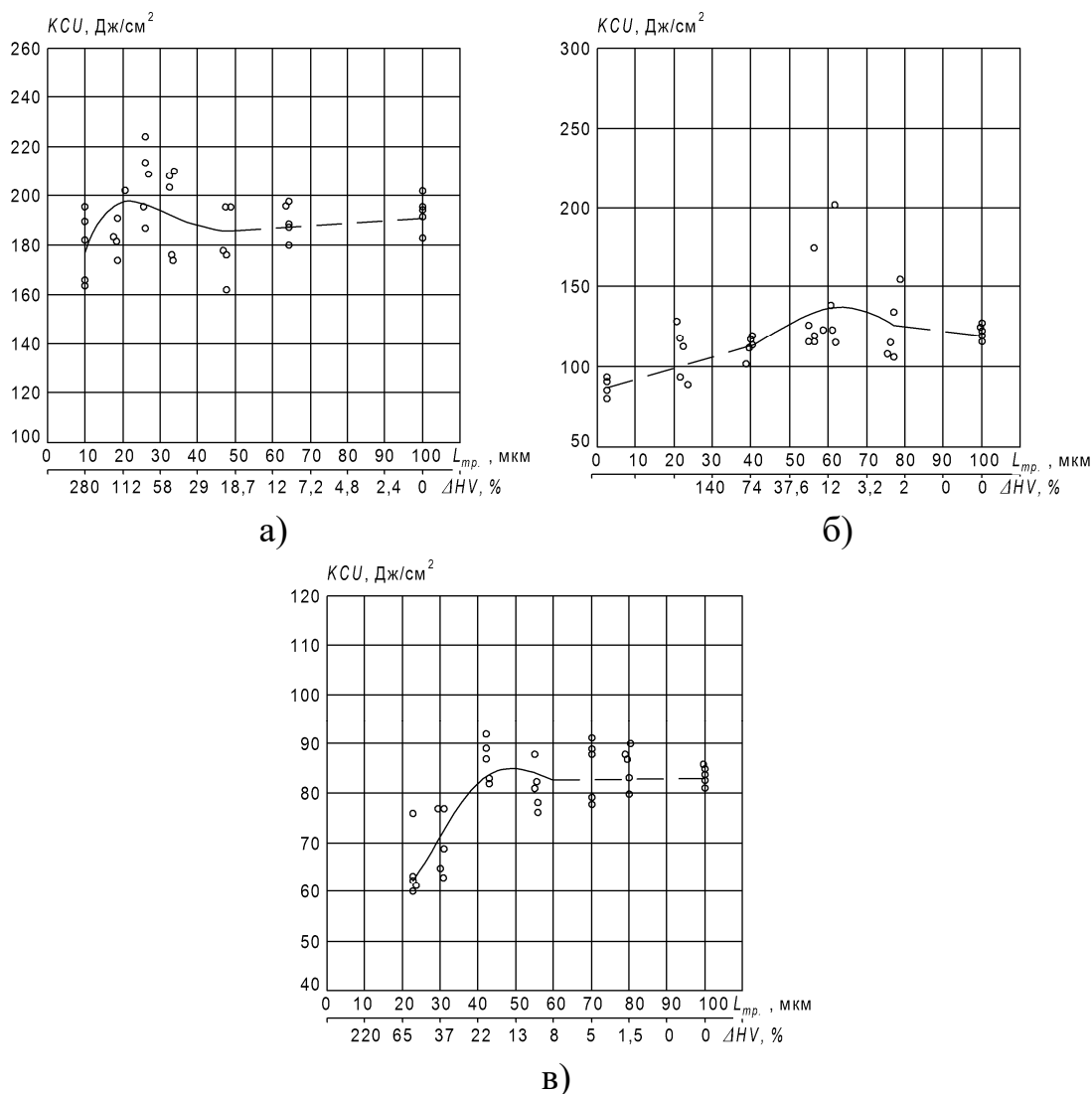


Рисунок 5 – Зависимость ударной вязкости (KCU) образцов от глубины травления ($L_{тр.}$): а – для технического титана VT1-0; б – для сплава ПТ7М; в – для сплава VT6ч

На рис. 6 показаны зависимости $K_T = KCU/KCU_{б/о}$ при различных перепадах микротвердости ΔHV , где KCU – ударная вязкость металла с оксидной плёнкой, а $KCU_{б/о}$ – без плёнки.

Для сплавов низкой и средней прочности VT1-0 и ПТ7М, как и для малоцикловой усталости, выявляется устойчивый максимум, соответствующий температуре отжига 450 °С (см. рис. 6). Данный эффект проявляется практически при всех исследованных вариантах ΔHV .

Для высокопрочного сплава VT6ч выявлена тенденция монотонного снижения ударной вязкости (до 10-15%) по мере повышения температуры отжига в диапазоне

350-650 °С для всех вариантов ΔHV, причём минимум во всех случаях приходится на $T_{отж} = 450$ °С.

Выявленный для сплавов ВТ1-0 и ПТ7М максимум КСУ при $T_{отж} = 450$ °С свидетельствует о полезном действии формирующейся при отжиге поверхностной оксидной плёнки, повышающей работу по зарождению и распространению трещины. Повышение $T_{отж}$ до 550-650 °С, сопровождающееся ростом толщины оксидной плёнки и одновременным началом растворения кислорода в титане, приводит к снижению показателя КСУ.

Для сплава ВТ6ч отрицательное действие плёнок можно связать с чрезмерным упрочнением в сочетании с ограниченным запасом пластичности высокопрочного сплава.

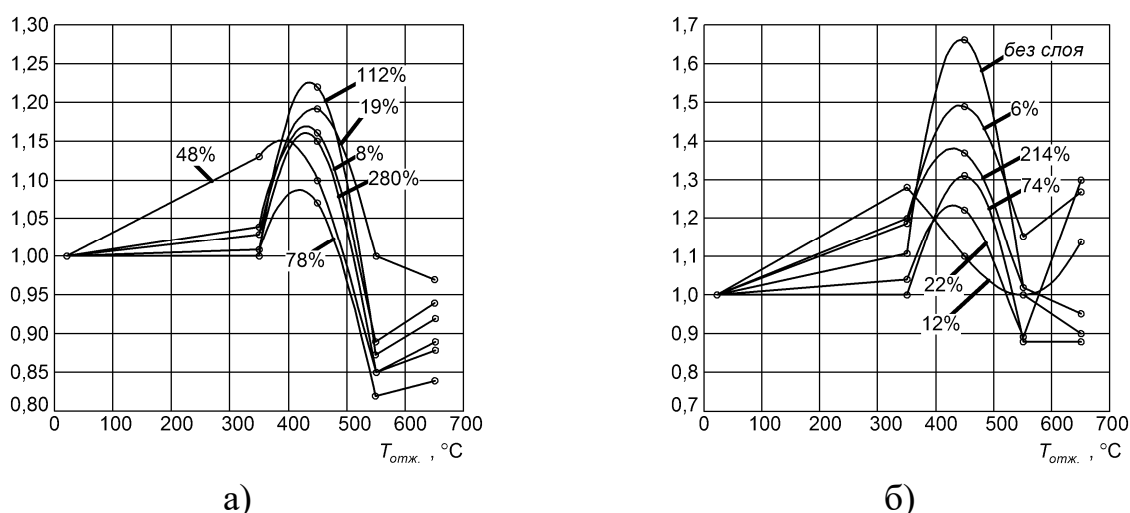


Рисунок 6 – Влияние температуры низкотемпературного отжига $T_{отж}$ на соотношение $K_T = KCU/KCU_{6/0}$: а – для технического титана ВТ1-0; а – для сплава ПТ7М

Положительное влияние оксидных плёнок на малоцикловую усталость и ударную вязкость титановых сплавов может быть связано с тем, что тонкие плёнки на поверхности препятствуют распространению дислокаций через плёнку и вызывают их торможение. В ранних исследованиях Демера и Крамера указывается на создание заторможенных групп дислокаций, что приводит к возникновению напряжений обратного (по отношению к внешнему источнику) знака, и это несколько уменьшает влияние приложенного напряжения.

Таким образом, проведенные в данной работе исследования показали, что оптимальным положительным эффектом обладают плёнки, формирующиеся при одночасовом воздушном отжиге при температуре отжига 450 °С, и дальнейший рост температуры отжига не приводит к повышению положительного воздействия. Это совпадает с выводами Демера и Крамера, что упрочняющий эффект плёнки с ростом

её толщины возрастает до определённого предела, после которого он перестаёт расти.

Толщину оксидных пленок, формирующихся пленок после воздушного отжига при температурах отжига 350-650 °С оценивали по цветам «побежалости» поверхности образцов и сравнивали с литературными данными, полученными в работах Б.А. Колачева. Выявлено, что цвета «побежалости» оксидных пленок сплавов ПТ7М и ВТ6ч мало отличаются от цветов технического титана ВТ1-0 при температурах отжига ≤ 550 °С. Толщина оксидной пленки, формирующейся при температуре 450 °С в течении 1 ч составляет примерно 35-45 нм.

Проводили также фрактографический анализ изломов образцов после испытаний на ударную вязкость. Исследования проводили на образцах, после пескоструйной обработки и имеющих достаточно протяжённые (около 70...80 мкм) поверхностный газонасыщенный слой, в области концентратора и боковой поверхности.

На основании проведенных исследований выявлено, что по мере снижения микротвердости в зоне концентратора характер излома меняется с хрупкого на более вязкий, участки квазискола сменяются на ямочные для всех исследуемых сплавов. Наиболее вязкий излом для участков с газонасыщенным слоем наблюдается для технического титана, что согласуется с результатами испытаний (ударная вязкость имеет максимум уже при глубине травления 27 мкм $\Delta HV = 78\%$).

Таким образом, проведенные исследования показали, что газонасыщенные слои с перепадами микротвердости ΔHV не более 19% для технического титана ВТ1-0, 12% для сплава ПТ7м и 5% для сплава ВТ6ч повышают, либо не снижают малоцикловую усталость и ударную вязкость тонколистовых титановых полуфабрикатов. Оптимальным положительным эффектом обладают плёнки, формирующиеся при одночасовом воздушном отжиге при температуре отжига 450 °С.

Глава 4. Влияние регламентированных параметров газонасыщенных слоев и оксидных пленок на технологическую пластичность титановых сплавов и динамические характеристики сварных соединений

В процессе производства листовых конструкций металл подвергается технологическим операциям формообразования и сварки. В связи с этим в работе исследовали, какое влияние оказывают регламентированные поверхностные газонасыщенные слои на характеристики пластичности, а также на работоспособность сварных соединений с β -превращенной крупнозернистой структурой в условиях усталостного и динамического нагружения.

Сравнительные испытания во всех случаях проводили на образцах, выполненных с регламентированным газонасыщением и с полностью стравленным слоем.

В партиях с регламентированными газонасыщенными слоями при начальной толщине газонасыщенного слоя заготовок ~ 100 мкм глубина травления составила 48, 60 и 70 мкм соответственно для сплавов ВТ1-0, ПТ7М и ВТ6ч. Остающиеся при этом газонасыщенные слои соответствовали перепадам микротвёрдости поверхности и сердцевины 19, 12 и 5%, обеспечивающие наиболее высокие значения малоциклового усталости и ударной вязкости.

Для образцов без газонасыщенного слоя глубина травления составляла 100 мкм. Результаты испытаний на угол загиба и пробу Эриксона приведены в табл. 6.

Таблица 6 – Результаты испытаний на угол загиба и пробу Эриксона приведены

Вид испытаний	Значения показателей	Марка сплава	ΔHV , %	$T_{отж.}, ^\circ C$				
				б/о	350	450	550	650
Угол загиба	α^{0*} $ВТ1-0 \geq 120^0$ $ПТ7М \geq 120^0$ $ВТ6ч \geq 40^0$	ВТ1-0	19%	160	160	153	157	148
			0%	166	151	154	154	136
		ПТ7М	12%	140	134	131	131	130
			0%	138	133	131	136	132
		ВТ6ч	5%	89	93	90	85	67
			0%	100	108	110	67	75
Проба Эриксона	Н, мм	ВТ1-0	19%	9,20	8,81	8,45	8,79	8,53
			0%	8,96	8,60	8,39	8,53	8,44
		ПТ7М	12%	5,85	5,69	5,58	5,44	5,59
			0%	5,85	5,80	5,60	5,40	5,31
		ВТ6ч	5%	3,35	3,41	3,29	3,32	3,01
			0%	3,20	3,69	3,40	3,53	3,20

По результатам испытаний на угол загиба влияния было установлено, что для всех исследуемых сплавов данный показатель значительно превышает значения, гарантированные ОСТом на поставку тонколистовых титановых полуфабрикатов. При этом общая закономерность для всех сплавов как с газонасыщенными подслоями, так и без подслоя, заключается в некотором (~ на 10%) снижении угла загиба в интервале температур отжига 350...650 °С.

Примерно та же зависимость выявлена и при испытаниях на пластичность в условиях двухосного растяжения по Эриксону сплавов ВТ1-0 и ПТ7М: оксидные плёнки, формирующиеся при нагреве до температур выше 450 °С незначительно (на 3%) снижают пластичность как при наличии газонасыщенного подслоя, так и без

него. Для высокопрочного сплава ВТ6ч выявлено, что при наличии газонасыщенного подслоя показатель пластичности не меняется в изученном диапазоне температур отжига.

Таким образом, проведенные исследования не выявили заметного отрицательного влияния оптимальных газонасыщенных слоёв на пластические характеристики металла.

При изучении влияния поверхностного газонасыщения и окисления применительно к сварным соединениям в работе ставились две задачи.

Первой задачей было установить, будет ли зона термического влияния слабым звеном сварного соединения в присутствии газонасыщенных слоёв и оксидных плёнок.

Вторая задача – это установить закономерности влияния газонасыщения и различных оксидных плёнок на работоспособность металла зоны термического влияния. Для этого при малоцикловых испытаниях на расстоянии $1 \pm 0,1$ мм от линии сплавления наносили концентратор в виде отверстия диаметром 2,5 мм с целью гарантированного разрушения образцов по зоне термического влияния. После отжига в воздушной атмосфере часть образцов, подвергалась травлению на глубину 10 мкм, а часть образцов имела окисные плёнки на поверхности.

Для выполнения первой задачи был выбран сплав ВТ6ч, как наиболее прочный и склонный к охрупчиванию из исследуемых сплавов в данной работе.

На основании полученных результатов выявлено, что в целом работоспособность сварного соединения в основном превышает работоспособность основного металла: большая часть образцов разрушилась по основному металлу вблизи радиусной части рабочей зоны, по сварке разрушались только образцы с высокой микротвёрдостью поверхности $\Delta HV > 100\%$. Наибольшая малоцикловая усталость была получена на сварных образцах с глубиной газонасыщенных слоев 30 мкм ($\Delta HV = 5\%$) – как и при испытаниях образцов из основного металла.

При решении второй задачи для всех исследуемых сплавов, из полученных результатов прослеживаются следующие закономерности (см. табл. 9):

- малоцикловая усталость зоны термического влияния всех исследуемых сплавов заметно возрастает при удалении поверхностной оксидной плёнки, формирующейся в процессе отжига в воздушной атмосфере.

- наличие оптимального газонасыщенного подслоя при отсутствии поверхностных оксидных плёнок значительно увеличивает малоцикловую усталость низкопрочных сплавов ВТ1-0 и ПТ7М и практически не оказывает влияния для высокопрочного сплава ВТ6ч.

- Отжиг в интервале температур 350-450 °С повышает показатели малоциклового усталости сварных соединений для всех исследуемых титановых сплавов.

Таблица 9 – Значения малоциклового усталости сварных образцов из титановых сплавов с регламентированными газонасыщенными слоями и без слоя (при наличии и отсутствии оксидных пленок, полученных при различных температурах отжига)

Марка сплава	ΔHV, %	T _{отж.} , °С					Наличие оксидной пленки
		б/о	350	450	550	650	
BT1-0	19%	17013	16476	15481	12787	7641	с оксидной пленкой
	19%	17013	21620	18442	13999	10804	без оксидной пленки
	0%	18168	16590	18466	11962	8302	с оксидной пленкой
	0%	18168	14666	16588	15307	9754	без оксидной пленки
ПТ7М	12%	6424	5988	4777	4562	3707	с оксидной пленкой
	12%	6424	8851	5140	5875	7417	без оксидной пленки
	0%	4476	4375	4709	4318	3388	с оксидной пленкой
	0%	4476	5225	6756	4934	5332	без оксидной пленки
BT6ч	5%	5520	5735	4300	3252	3510	с оксидной пленкой
	5%	5520	7029	6015	5527	5174	без оксидной пленки
	0%	5450	5176	4837	3957	3904	с оксидной пленкой
	0%	5450	6035	6919	6307	4925	без оксидной пленки

В работе также исследовано влияние газонасыщенного подслоя и оксидных плёнок на ударную вязкость металла ЗТВ сварных соединений титановых сплавов. При этом центр надреза Ø2 мм располагали на расстоянии 1±0,1 мм от линии сплавления, а также по центру шва, затем подвергали одночасовому воздушному отжигу в интервале температур 350-650 °С.

При испытании образцов с концентратором на расстоянии 1±0,1 мм от линии сплавления выявлено, что для низкопрочных сплавов BT1-0 и ПТ7М наличие подслоя сказывается положительно и практически не сказывается для высокопрочного сплава BT6ч. Оксидные плёнки, формирующиеся при отжиге, положительно влияют на ударную вязкость металла ЗТВ для технического титана преимущественно после низкотемпературного отжига, а для сплава BT6ч – во всём исследованном диапазоне температур отжига.

При испытании образцов с концентратором, расположенным по центру шва установлено, что некоторое легирование металла шва кислородом, перешедшим в сварной шов при перемешивании поверхностного газонасыщенного слоя, не

оказывает заметного влияния на ударную вязкость технического титана ВТ1-0 и сплавов ПТ7м и ВТ6ч.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основании проведенных исследований по влиянию газонасыщенных слоев с различными перепадами микротвердости и оксидных пленок, формирующихся при низкотемпературном воздушном отжиге в интервале температур $T_{отж} = 350-550$ °С на малоцикловую усталость и ударную вязкость. Установлено, что перепады микротвердости в диапазоне $\Delta HV = 5-20\%$ газонасыщенных слоев, обеспечивают существенное повышение сопротивляемости динамическим нагрузкам листовых полуфабрикатов из технического титана ВТ1-0 до 60%, сплавов ПТ7м до 40% и ВТ6ч до 10% при наличии оксидных пленок, формирующихся при отжиге.

2. Исследовано влияние технологических факторов изготовления – низкотемпературного воздушного отжига, сварки – на сопротивляемость динамическим нагрузкам листов из титановых сплавов с наличием поверхностного газонасыщенного слоя.

Показано, что регламентированное поверхностное газонасыщение с перепадами микротвердости ΔHV для ВТ1-0 – до 19%, ПТ7м – до 12% и ВТ6ч – до 5 % сохраняет полезное воздействие и при формировании оксидных плёнок при отжиге, и для крупнозернистой микроструктуры металла в зоне термического влияния сварных соединений.

3. Изучено влияние оксидных пленок, формирующихся в процессе отжига в интервале температур 350...650 °С на малоцикловую усталость и ударную вязкость титановых листов.

Установлено, что наибольшим положительным эффектом обладают оксидные пленки, формирующиеся при воздушном отжиге в интервале температур 350...450 °С при этом рост усталости технического титана ВТ1-0 составляет 5-10%, сплава ПТ7м на 15-40%, а ударной вязкости - на 15% и на 65% соответственно в сравнении с основным металлом.

Положительное влияние оксидных пленок на указанные показатели, формирующихся после воздушного отжига при температурах 350-450 °С, как при наличии газонасыщенного слоя, так и без него, что может объясняться препятствием распространения дислокаций через плёнку и возникновению напряжений обратного знака. Положительное действие от оксидных пленок снижается при повышении прочности сплава.

4. Проведено исследование по влиянию регламентированных газонасыщенных слоев с перепадами микротвердости ΔHV для ВТ1-0 – 19%, ПТ7М – 12% и ВТ6ч – 5 % и оксидных плёнок, формирующихся при низкотемпературном отжиге в интервале температур 350-650 °С на технологическую пластичность листов титановых сплавов применительно к процессам формообразования в производстве узлов и деталей.

Присутствие газонасыщенного подслоя при наличии оксидных плёнок положительно сказывается на технологической пластичности низкопрочного титана ВТ1-0, практически не влияет на пластичность сплава ПТ7М и несколько понижает данный показатель для высокопрочного сплава ВТ6ч.

5. Исследовано влияние газонасыщенных слоев и оксидных плёнок на малоцикловую усталость листовых сварных соединений, выполненных из высокопрочного сплава ВТ6ч. Установлено, что разрушение сварного соединения идёт преимущественно по основному металлу, то есть наличие регламентированного газонасыщенного слоя не приводит к охрупчиванию зоны сварного соединения.

6. Исследовано влияние регламентированного газонасыщения на сопротивляемость динамическим нагрузкам металла зоны термического влияния листовых сварных соединений из титановых сплавов ВТ1-0, ПТ7М и ВТ6ч с перепадами микротвердости ΔHV - 19%, 12%, 5 % соответственно.

Установлено, что присутствие регламентированного газонасыщенного слоя значительно увеличивает малоцикловую усталость металла и ударную вязкость зоны термического влияния для сплавов ВТ1-0 и ПТ7М и практически не оказывает влияния для сплава ВТ6ч.

Выявлено, что оксидные плёнки, формирующиеся в процессе отжига интервале температур 350...650 °С, отрицательно влияют на малоцикловую усталость зоны термического влияния исследованных сплавов, однако повышают показатели ударной вязкости. Удаление оксидных пленок, формирующихся при отжиге на поверхности листовых сварных соединений, повышает их малоцикловую усталость на 20...40%.

7. Выявленные закономерности и разработанные технологические рекомендации по выбору оптимальных перепадов микротвердости газонасыщенных подслоев позволяют наряду с сокращением потерь в производстве титановых листовых полуфабрикатов обеспечить повышение долговечности тонколистовых титановых конструкций в условиях динамического нагружения.

8. Основные результаты работы использованы на ПАО «ВАСО» при корректировке технологических процессов изготовления тонколистовых титановых

конструкций, что подтверждено Актом использования, приведенном в Приложении к диссертации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Список публикаций в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК

1. *Коломенский, А.Б.* Влияние газонасыщенных слоев на механические характеристики листов из титановых сплавов / А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Б.А. Коломенский // *Металловедение и термическая обработка металлов.* - 2016. - №6. - С. 30-35.

2. *Коломенский, А.Б.* Влияние газонасыщенных слоёв и оксидных плёнок на ударную вязкость титановых сплавов различных групп прочности / А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Б.А. Коломенский // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* - 2017. - Т.13. - №2. - С.132-139.

3. *Коломенский, А.Б.* Ударная вязкость сварных титановых соединений с окисленной поверхностью / А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Б.А. Коломенский // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* - 2017. - Т.13. - №4. - С.114-119.

4. *Коломенский, А.Б.* Повышение ресурсных характеристик технического титана путем оптимизации параметров газонасыщенных слоев /А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Б.А. Коломенский, И.В. Зубарев // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* - 2018. - Т.14. - №3. - С. 135-140.