Повышение служебных характеристик тонколистовых титановых сплавов оптимизацией параметров газонасыщенных слоев и режимов воздушного отжига

Шахов Сергей Викторович, ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество», ул. Циолковского, 27, 394029, Воронеж, Россия, ведущий инженер-конструктор отдела Главного технолога, 8(915)540-48-98

e-mail: shahovsv@gmail.com

Аннотация

Исследовано влияние различной глубины газонасыщенного слоя и последующего низкотемпературного воздушного отжига на служебные характеристики тонколистовых полуфабрикатов из титановых сплавов различных групп прочности ВТ1-0, ПТ7м и ВТ6ч широко используемых для производства деталей и узлов авиационной техники. Показано, что при достижении оптимальных параметров поверхностного газонасыщенного слоя повышаются ресурсные характеристики исследуемых титановых сплавов.

Введение

Технология производства листовых полуфабрикатов из титановых сплавов (листов, лент и фольги) толщиной до 3,0 мм включает ряд операций: горячая прокатка в интервале температур 650-850 °С, травление, теплая прокатка, промежуточный отжиг, травление (удаление газонасыщенных слоев), резка листов, сдача готовой продукции [1].

Одной из основных проблем производства титановых полуфабрикатов, является активное взаимодействие с кислородом при температуре нагрева выше 650 °С, что приводит к окислению поверхности и образованию плотной окалины. Нагрев титана и его сплавов в интервале температур 300-600 °С сопровождается

образованием поверхностной окисной пленки глубиной не более 20-85 нм. При повышении температуры нагрева происходит растворение кислорода в матрице основного металла с образованием газонасыщенных (альфированных) слоев повышенной твердости и хрупкости. В альфированном слое содержание кислорода постепенно уменьшается от предела растворимости кислорода в α-фазе до его содержания в основном металле [2].

Важно отметить, что толщина газонасыщенных слоев зависит от температуры и длительности нагрева. В работе [3] имеются данные о кинетики окисления технического титана марки ВТ1-0 на воздухе при температуре 200-800 °С при длительном нагреве от 25 до 1000 часов. После отжига при температуре 800 °С длительностью 25-500 часов толщина газонасыщенных слоев составила 75-660 мкм.

По мнению большинства авторов газонасыщенные слои, образовавшиеся при высокотемпературном нагреве, снижают механические свойства титановых сплавов, особенно сильно это влияние происходит при циклических нагрузках [4-6].

В работе [7] приведены данные о повторно-статической выносливости листовых образцов толщиной 2 мм с отверстием-концентратором после воздушного отжига в течение 1 ч. Показано что при температуре отжига 750 °С повторно-статическая выносливость образцов снижается практически на 50 % по сравнению с образцами без отжига. Наряду с отрицательным действием газонасыщенных слоев в литературных данных [8] было показано, что при неполном их стравливании появляется эффект заметного повышения циклической долговечности. Эффект повышения долговечности можно было бы использовать с целью уменьшения глубины травления при производстве листовых титановых полуфабрикатов. Сохраняя полезную часть газонасыщенных слоев для повышения механических характеристик титановых сплавов, можно одновременно достигать снижения безвозвратных потерь дорогостоящего материала.

В настоящее время технология производства листовых титановых конструкций, в частности для авиационной промышленности, включает в себя операции сварки, гибки, штамповки, рихтовки, которые в свою очередь сопровождаются последующим отжигом для снятия остаточных напряжений [9].

В данной работе исследовали влияние различных параметров газонасыщенных слоев и низкотемпературного воздушного отжига на ресурсные характеристики (повторно-статическая долговечность), а также кратковременные механические характеристики (ударная вязкость, временное сопротивление разрыву) технического титана марки ВТ1-0, и сплавов ПТ7м и ВТ6ч широко используемых при производстве деталей и узлов авиационной техники.

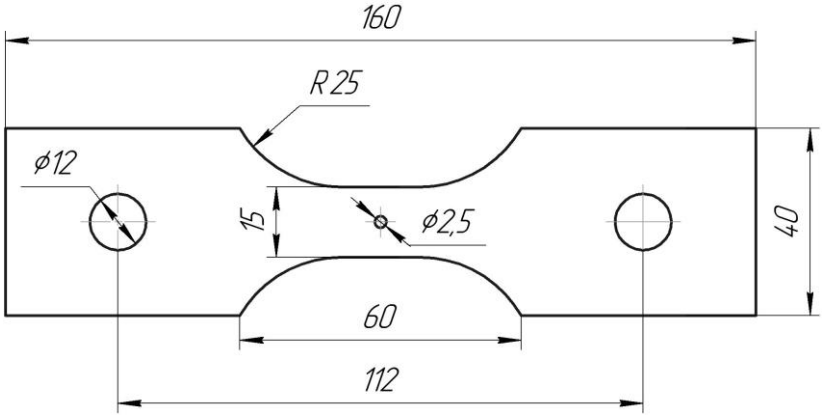
Методика проведения эксперимента

Образцы изготавливали из листов технического титана ВТ1-0, и сплавов ПТ7м и ВТ6ч толщиной 0,8-1,2 мм (рис. 1). После вырезки образцы подвергали высокотемпературному воздушному отжигу в течении 2 ч. при температуре 800 °С (образцы из технического титана ВТ1-0) и в течении 1 ч. при температуре 850 °С (образцы из сплавов ПТ7м и ВТ6ч) в лабораторной печи с целью формирования регламентированного газонасыщенного слоя глубиной 100 мкм (рис.2). Удаление поверхностной окалины выполняли пескоструйной обработкой при избыточном давлении 0,1 МПа с целью избегания поверхностного наклепа, послойное облагораживающее травление выполняли в смеси кислот HF и HNO_3 с целью исключения наводораживания. Микротвердость поверхности образцов после мерного травления определяли на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 0,51 Н.

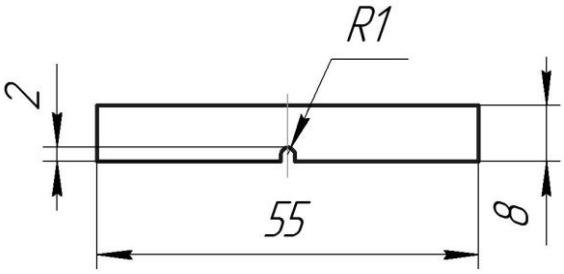
В конце проводили одночасовой воздушный финишный отжиг образцов в интервале температур 350-650 °С.

Испытания на повторно-статическую долговечность выполняли на модернизированной установке УММ-10 при коэффициенте асимметрии цикла R=+0,1 и частоте циклов f =0,6-0,8 Гц при максимальном напряжении цикла σ_{max} = 290 МПа.

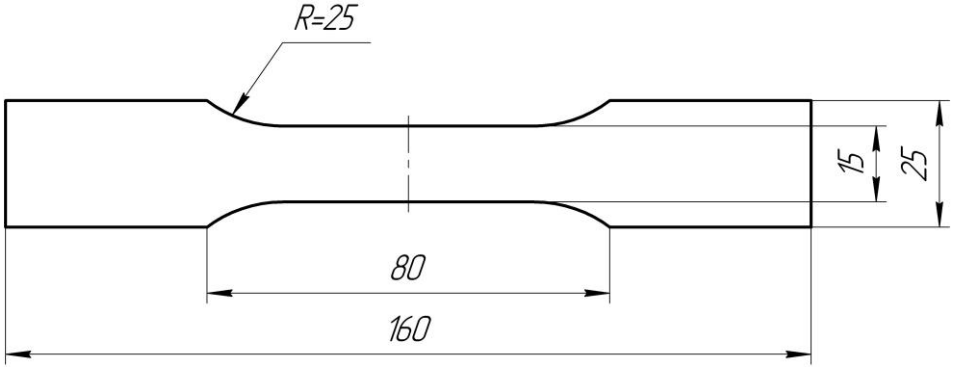
Испытания образцов на ударную вязкость (KCU) производили согласно требованиям ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре со шкалой 5 кг·м. Для исключения потери устойчивости и изгиба листовых образцов в процессе испытания применяли специальное приспособление.



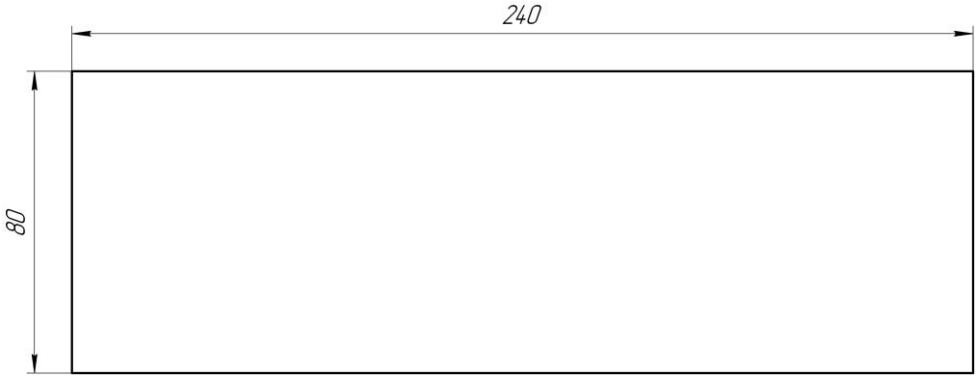
а)



б)

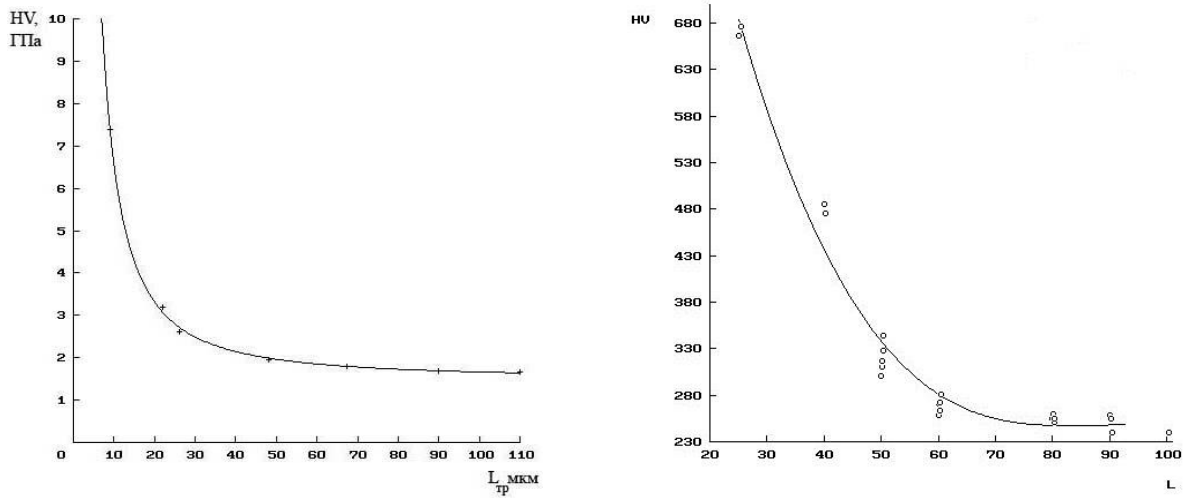


в)

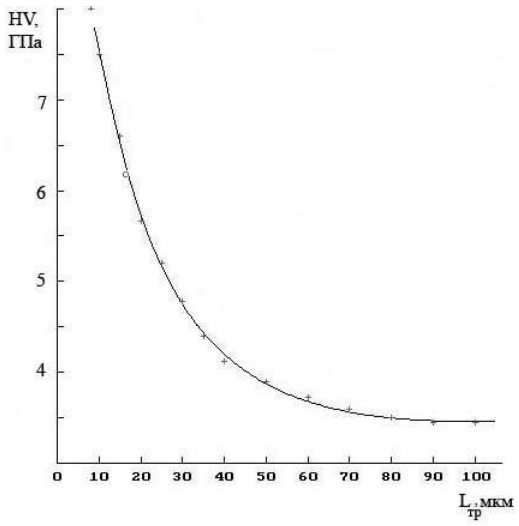


г)

Рис. 1 – Образцы для испытаний на: повторно-статическую долговечность (а); ударную вязкость (б); временное сопротивление разрыву (в); пробу Эриксена (г)



а) б)



в)

Рис. 2 – Зависимость микротвёрдости поверхности образцов из титана ВТ1-0 после отжига при 800 ºС, 2 ч. (а) и из сплавов ПТ7м (рис. 2б) и ВТ6ч (рис. 2в) после отжига при 850 ºС, 1 ч. от глубины травления

Испытания на кратковременное сопротивление разрыву ($\sigma_в$) проводили на модернизированной установке УММ-10 мощностью 10 т на образцах, показанных на рис. 1 (в).

Испытания на пробу Эриксена с определением глубины вытяжки до образования трещины (Н) производили с помощью прибора МТЛ-10Г-1 при диаметре матрицы и шарика 27 и 20 мм соответственно на образцах по рис. 1 (г).

Ось главных напряжений от внешнего нагружения во всех случаях была перпендикулярна направлению проката листов.

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

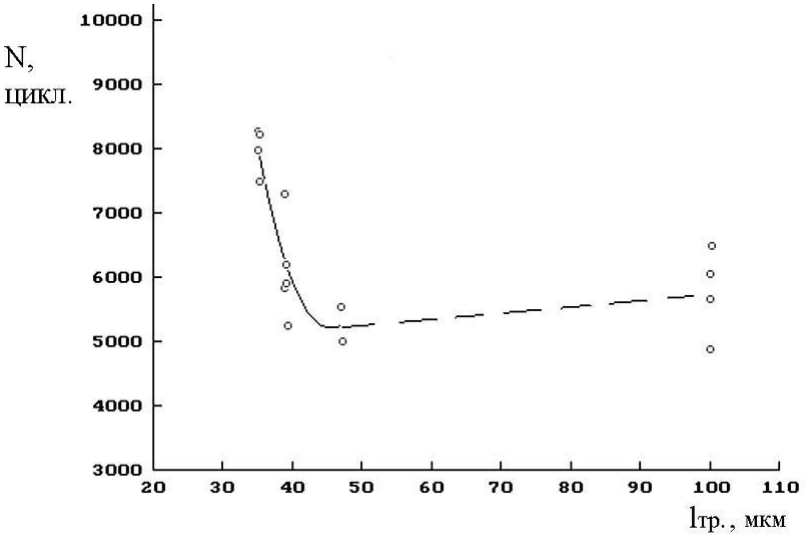
$$y = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f \qquad (1)$$

Определение коэффициентов уравнения регрессии и коэффициентов корреляции, построение графиков производилось в программе "1.12 (С). Статистическая графика".

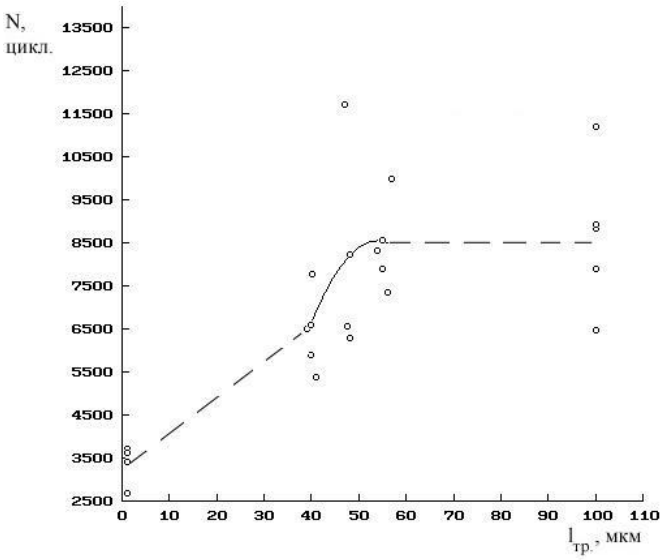
Результаты испытаний и их обсуждение

1. Исследование влияния газонасыщенных слоев на циклическую долговечность титановых сплавов

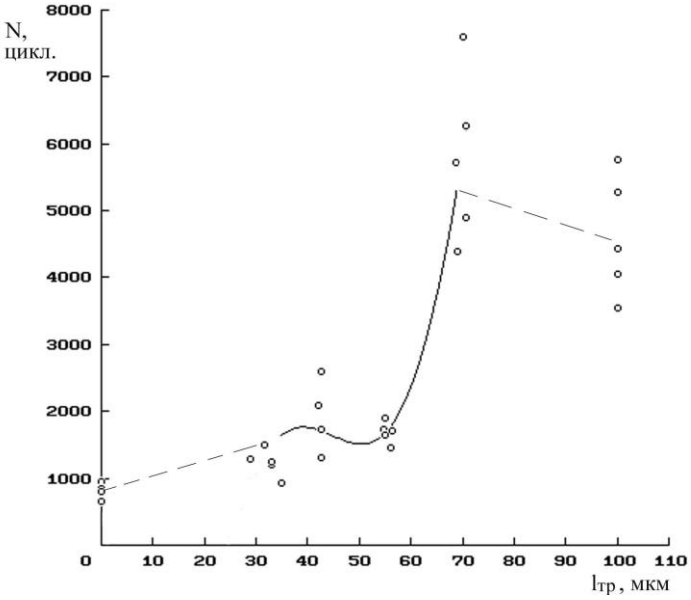
Исследование влияния газонасыщенных слоев на малоцикловую усталость выполняли на образцах, представленных на рис. 1 (а). На рис. 3 приведены результаты испытаний образцов на повторно-статическую долговечность для технического титана ВТ1-0 (а), и сплавов ПТ7м (б) и ВТ6ч (в), данные представлены в зависимости $N_{цикл.}=f(l_{тр.})$.



а)



б)



в)

Рис. 3 – Зависимость повторно-статической долговечности образцов в зависимости от глубины травления $N_{цикл.}=f(l_{тр.})$: а – для технического титана ВТ1-0; б – для сплава ПТ7м; в – для сплава ВТ6ч

Из результатов испытаний следует, что для технического титана ВТ1-0 максимальной циклической долговечностью обладают образцы с подслоем $l_{тр.}\approx27$ мкм, долговечность возрастает примерно на 100 %. При увеличении глубины травления наблюдается монотонное снижение долговечности, при глубине травления $l_{тр.}\approx48$ мкм достигает уровня основного металла без газонасыщенного слоя.

Для сплава ПТ7м характер зависимости $N_{цикл.}=f(l_{тр.})$ рис. 3 (б) остается аналогичным: максимальная долговечность достигается при частичном съёме слоя на глубину $l_{тр.}\approx55$ мкм. Прирост долговечности составляет более 20 % по сравнению с образцами без газонасыщенного слоя ($l_{тр.}=100$ мкм).

Из представленных в формате $N_{цикл.}=f(l_{тр.})$ данных рис. 3 (в) видно, что максимум долговечности образцов достигается при стравливании газонасыщенного слоя на глубину $l_{тр.}\approx70$ мкм. При этом циклическая долговечность возрастает на ~25 % по сравнению с образцами с полностью удалённым газонасыщенным слоем ($l_{тр.}=100$ мкм).

2. Анализ влияния степени приповерхностного газонасыщения при наличии оксидных плёнок на циклическую долговечность титановых сплавов

В процессе изготовления деталей из титановых сплавов они подвергаются отжигу для снятия напряжений [3], в процессе которого на поверхности металла формируются оксидные плёнки, а при температурах свыше 600 °С помимо окисления начинается заметное растворение кислорода в металле.

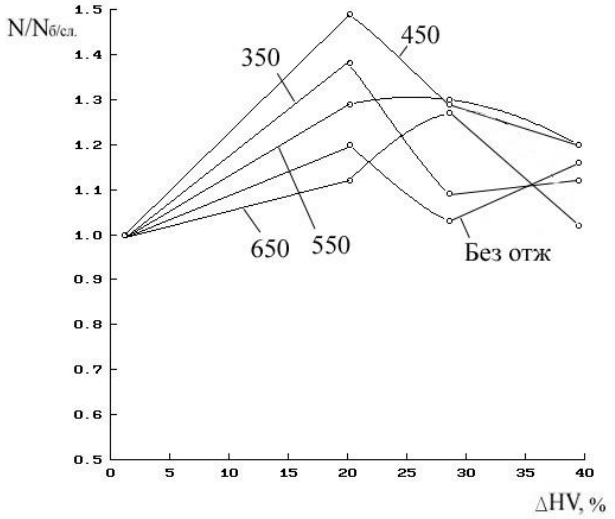
В связи с этим возникает вопрос, каким образом будут влиять на циклическую долговечность частично сохраняемые газонасыщенные слои совместно с разными оксидными плёнками, формирующимися в процессе отжига для снятия напряжений. Для проведения испытаний образцы с предварительными газонасыщенными слоями подвергали финишному отжигу в интервале температур 350-650 ºС, в течении 1 ч.

Данные представлены на рис. 4-6 в виде коэффициента $N/N_{б/с}$ (отношение среднего значения малоцикловой усталости образцов без слоя к среднему значению малоцикловой усталости при определенном значении микротвердости).

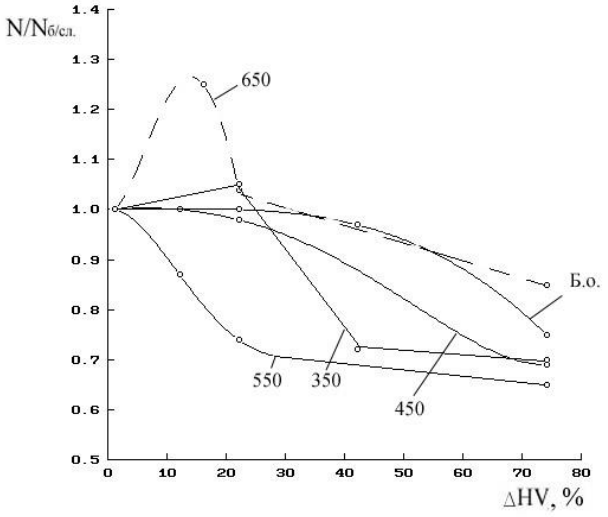
Значения перепадов микротвердости ΔHV % при определенной глубине травления $l_{тр.}$ для технического титана ВТ1-0, а так же сплавов ПТ7м и ВТ6ч представлены в табл. 2 (см. рис. 2-3).

Табл. 2 – Значения перепадов микротвердости ΔHV % при определенной глубине травления $l_{тр.}$

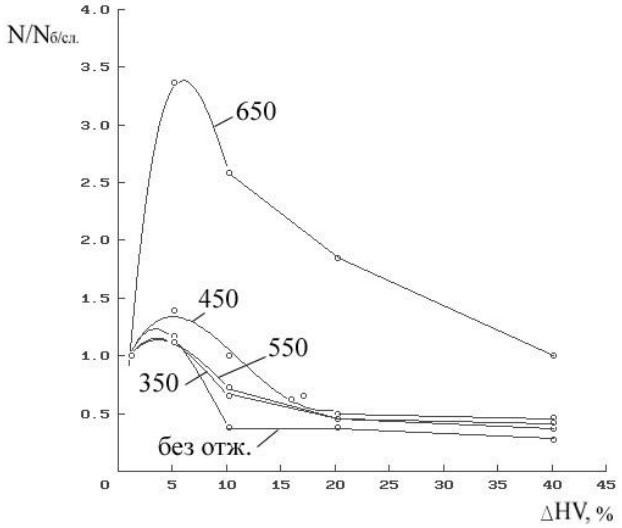
Технический титан ВТ1-0		Сплав ПТ7м		Сплав ВТ6ч	
$l_{тр.}$, мкм	ΔHV, %	$l_{тр.}$, мкм	ΔHV, %	$l_{тр.}$, мкм	ΔHV, %
35 мкм	39,4%	40 мкм	74%	30 мкм	40%
39 мкм	28,5%	54 мкм	22%	43 мкм	20%
48 мкм	19%	60 мкм	12%	55 мкм	10%
100 мкм	0%	100 мкм	0%	70 мкм	5%
-	-	-	-	100 мкм	0%



а)



б)



в)

Рис. 4 – Сравнительные зависимости коэффициентов $N/N_{б/с}$ от значений микротвердости ΔHV при разных температурах финишного отжига: а – для технического титана ВТ1-0; б – для сплава ПТ7м; в – для сплава ВТ6ч

Из результатов исследований представленных на рис. 4(а) видно, что для технического титана ВТ1-0, имеющего оксидную плёнку, формирующуюся в процессе отжига, наличие приповерхностного газонасыщенного слоя оказывает положительное влияние на повторно-статическую долговечность металла. Наибольший эффект выявлен для оксидной плёнки, формирующейся при низкотемпературном отжиге с Т=350-450 °С в сочетании с газонасыщенным подслоем с ΔHV=20 % ($l_{тр.}$≈48 мкм). Повышение долговечности в сравнении с металлом без подслоя при этом составляет ~ 1,4…1,5 раза.

Из данных представленных на рис. 4(б) видно, что для сплава ПТ7м газонасыщенный подслой с ΔHV≤20% ($l_{тр.}$≈60 мкм) практически не влияет на долговечность металла без видимой оксидной плёнки (без отжига) и с оксидной плёнкой, формирующейся при Т=350-450 °С.

Для всех изученных газонасыщенных подслоев с перепадами микротвёрдости в диапазоне ΔHV=0…74% наибольшую долговечность показал металл с оксидной плёнкой, сформировавшейся при Т=450 °С. При этом устойчивый минимум долговечности приходится на плёнку, образуемую при отжиге с Т= 550 °С.

Для высокопрочного сплава ВТ6ч рис. 4(в) для всех оксидных плёнок, формирующихся при температурах отжига от 350 до 650°С, а также без отжига, максимумы долговечности наблюдаются при ΔHV=5%. Повышение долговечности в сравнении с металлом без подслоя при этом составляет ~1,2 раза. Наибольшую долговечность показал металл с оксидной плёнкой, сформировавшейся при Т=450 °С.

3. Исследование влияния газонасыщенных слоев на ударную вязкость титановых сплавов

В процессе эксплуатации авиационной техники существует вероятность возникновения ударных нагрузок. В настоящее время в литературных источниках отсутствуют сведения, касающиеся влияния газонасыщенных слоев на работоспособность тонколистового титана при кратковременных динамических нагрузках, в частности, на ударную вязкость.

Испытания образцов выполняли на образцах, представленных на рис. 1 (б), мерное облагораживающее травление выполняли на глубину аналогично пункту 3.1 данной пояснительной записки. Результаты испытаний представлены на рис. 7 в зависимости KCU=f($l_{тр.}$).

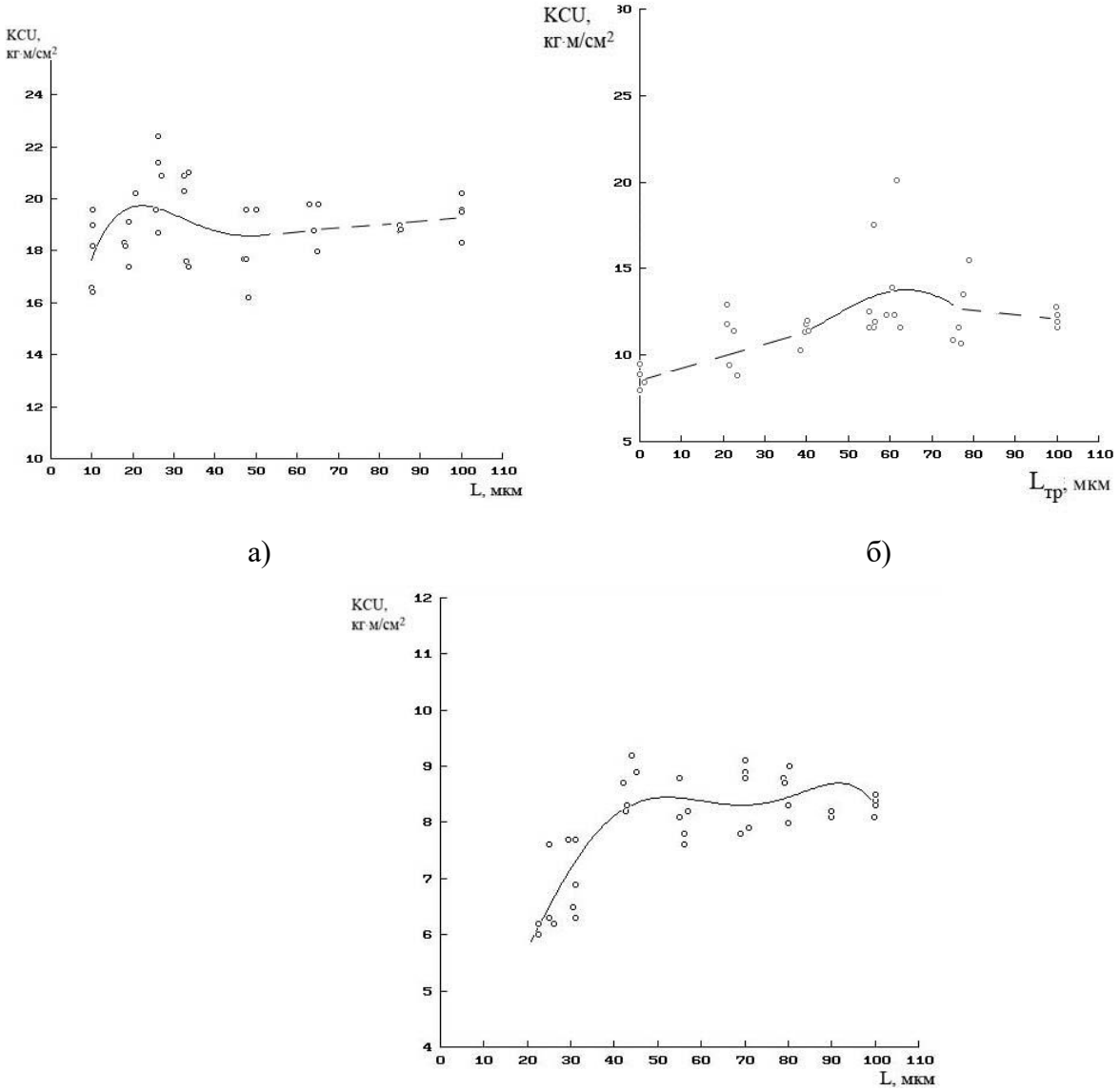


Рис. 5 – Зависимость ударной вязкости образцов в зависимости от глубины травления KCU=f($l_{тр.}$): а – для технического титана ВТ1-0; б – для сплава ПТ7м; в – для сплава ВТ6ч.

Из представленных результатов видно, что значение ударной вязкости для технического титана ВТ1-0 достигает максимума при $l_{тр.}$≈27 мкм, ударная вязкость возрастает примерно на ≈12 % по сравнению с образцами без газонасыщенного слоя (рис. 5а). Для сплава ПТ7м рис. 5(б) устойчивый максимум достигается при глубине

травления $l_{тр.}$≈55-60 мкм и составляет 10 %. Для высокопрочного сплава ВТ6ч рис. 5(в) выявлено, что восстановление KCU до значений чистого металла (с полностью стравленным газонасыщенным слоем) происходит уже при L≈ 42 мкм.

4. Исследование влияния степени приповерхностного газонасыщения при наличии оксидных плёнок на ударную вязкость титановых сплавов

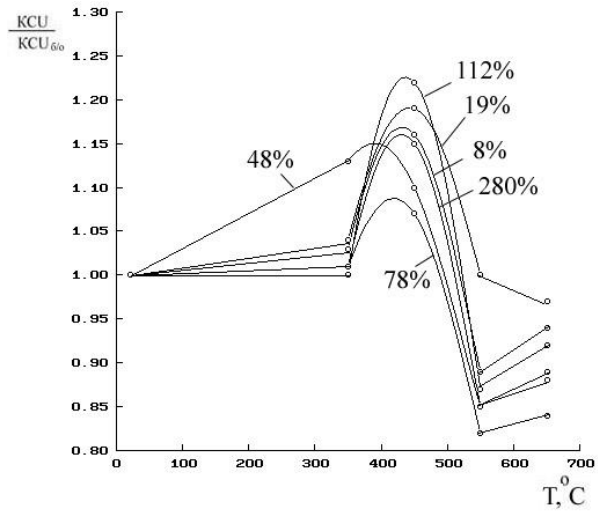
Для проведения испытаний образцы с предварительными газонасыщенными слоями подвергали финишному отжигу в интервале температур 350-650 ºС, в течении 1 ч.

На основании полученных экспериментальных данных были построены зависимости в координатах $KCU/KCU_{бо}= f(T)$, где $KCU_{бо}$ – ударная вязкость металла с рассматриваемым газонасыщенным подслоем без проведения финишного отжига. То есть отношение $KCU/KCU_{бо}$ показывает, какое воздействие оказывает $T_{отж.}$ (оксидная плёнка, формирующаяся при данной $T_{отж.}$) на ударную вязкость при выбранном подслое.

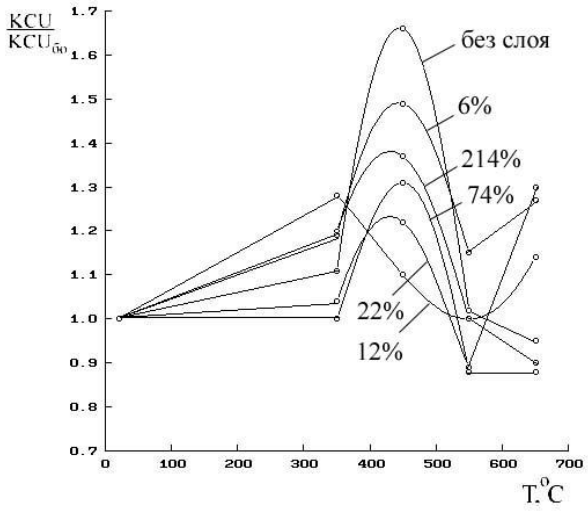
Табл. 3 – Значения перепадов микротвердости ΔHV % при определенной глубине травления $l_{тр.}$

Технический титан ВТ1-0		Сплав ПТ7м		Сплав ВТ6ч	
$l_{тр.}$, мкм	ΔHV, %	$l_{тр.}$, мкм	ΔHV, %	$l_{тр.}$, мкм	ΔHV, %
10 мкм	280%	22 мкм	214%	20 мкм	68%
20 мкм	112%	40 мкм	74%	30 мкм	40%
27 мкм	78%	54 мкм	22%	43 мкм	16%
33 мкм	48%	60 мкм	12%	55 мкм	9%
48 мкм	19%	76 мкм	6%	70 мкм	5%
65 мкм	8%	100 мкм	0%	80 мкм	3%
100 мкм	0%	-	-	100 мкм	0%

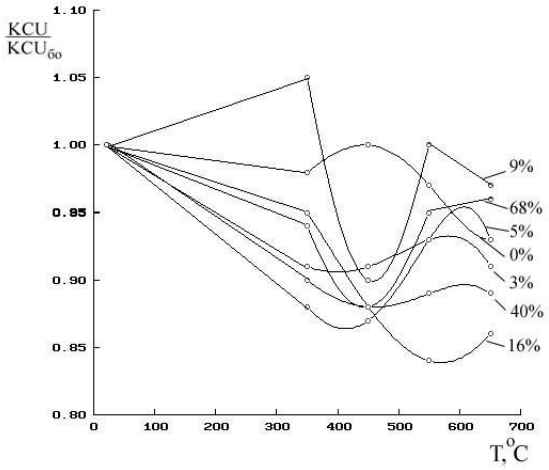
Данные сравнительных зависимостей $KCU/KCU_{бо}= f(T)$ представлены на рис. 8.



а)



б)



в)

Рис.8 – Сравнительные зависимости $KCU/KCU_{бо}$= f(T) при различных перепадах микротвердости ΔHV %: а – для технического титана ВТ1-0; б – для сплава ПТ7м; в - для сплава ВТ6ч

Для титановых сплавов низкой и средней прочности ВТ1-0 и ПТ7М обнаружена устойчивая закономерность, проявляющаяся в достижении максимума при температуре финишного отжига 450 °С.

Данный эффект проявляется практически при всех исследованных вариантах газонасыщенных подслоев.

Для титана ВТ1-0 коэффициент повышения KCU (К = $KCU/KCU_{бо}$) при $T_{отж.}$=450 °С в сравнении с вариантом без отжига составляет К=1,15…1,20 для всех газонасыщенных подслоев.

Для сплава ПТ7М коэффициент повышения имеет наибольшие значения для чистого металла без газонасыщенного подслоя (1,66) и с небольшим подслоем с ΔHV = 6% (1,49); при больших значениях (ΔHV = 12…214%) данный коэффициент уменьшается до К=1,10…1,37.

Выявленный максимум при $T_{отж.}$=450 °С по-видимому связан с формированием оптимальной оксидной плёнки, оказывающей выраженное упрочняющее действие и повышающее работу по зарождению и распространению трещины при испытаниях.

Повышение $T_{отж.}$ до 550-650 °С, сопровождающееся дальнейшим ростом оксидной плёнки и одновременным началом растворения кислорода в титане приводит к снижению ударной вязкости титана ВТ1-0 на 10-15 % (К=0,85…0,90), а для сплава ПТ7М – возвращению KCU к исходным значениям (без отжига). Указанная тенденция снижения KCU выявляется практически для всех значений ΔHV газонасыщенного подслоя.

При этом, как правило, для $T_{отж.}$=550°С значения KCU оказывались ниже, чем при $T_{отж.}$=650°С, что можно связать с развитием процесса растворения кислорода в титан.

Для высокопрочного сплава ВТ6ч выявлена тенденция небольшого (до 10-15%) снижения KCU после проведения финишного отжига во всём исследованном диапазоне температур 350-650°С и для всех вариантов газонасыщенных подслоев, причём минимум во всех случаях приходится на $T_{отж.}$=450 °С.

Это можно объяснить негативным воздействием оксидных плёнок, обладающих упрочняющим воздействием, для высокопрочного металла с ограниченной пластичностью.

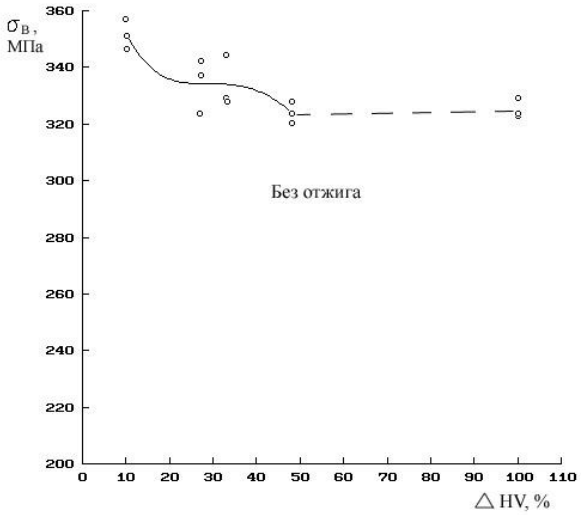
Следует отметить, что для чистого металла без газонасыщенного подслоя не отмечается снижения KCU после отжига при $T_{отж.}$=450 °С.

5. Исследование влияния газонасыщенных слоев и оксидных плёнок на временное сопротивление и технологическую пластичность титановых сплавов

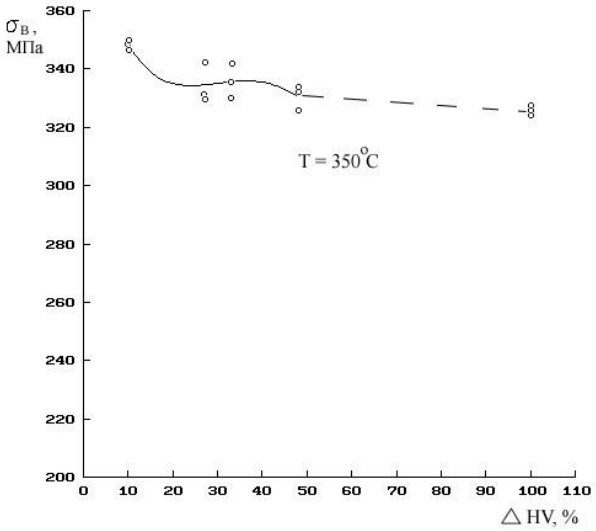
Проводили сравнительные испытания на временное сопротивление разрыву $\sigma_в$, МПа и технологическую пластичность - пробу Эриксена с определением глубины выдавливания до образования трещины при различной глубине травления и температуре финишного отжига $T_{отж.}$=350-450 °С.

Испытания на кратковременный разрыв с определением $\sigma_в$ проводили на модернизированной установке УММ-10 мощностью 10 т на образцах, показанных на рис. 1(в). Испытания на пробу Эриксена с определением глубины вытяжки до образования трещины Н, мм производили с помощью прибора МТЛ-10Г-1 при диаметре матрицы и шарика 27 и 20 мм соответственно на образцах по рис. 2(г). Вопрос о влиянии неполного съема газонасыщенных слоев и последующего воздушного отжига имеет практическую значимость на технологическую пластичность, т.к. в процессе изготовления детали подвергаются деформации (или рихтовке).

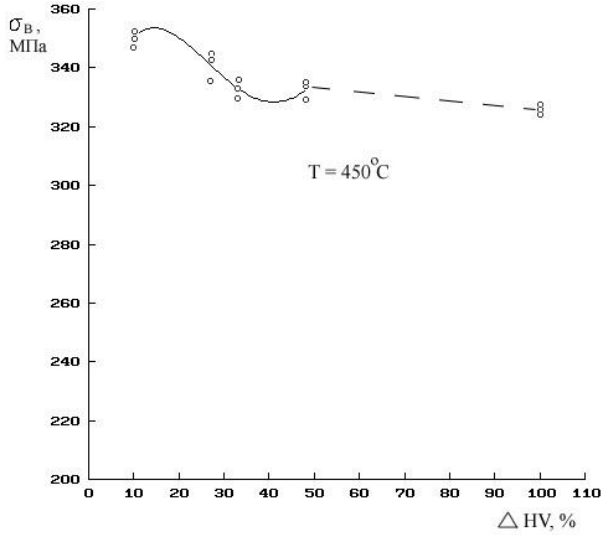
Результаты испытаний на кратковременный разрыв показаны на рис. 9-11, на пробу Эриксена представлены на рис. 12.



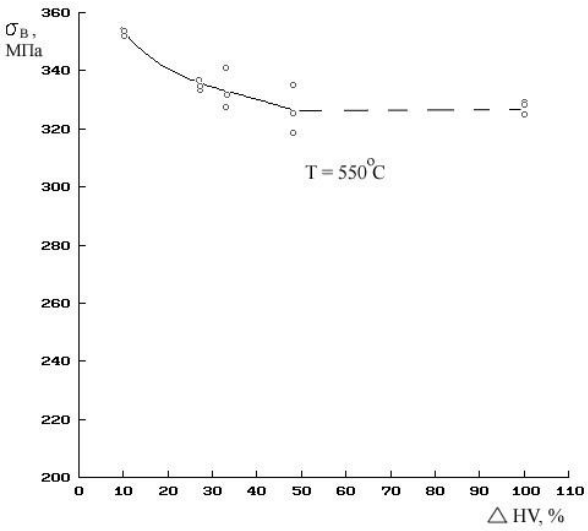
а)



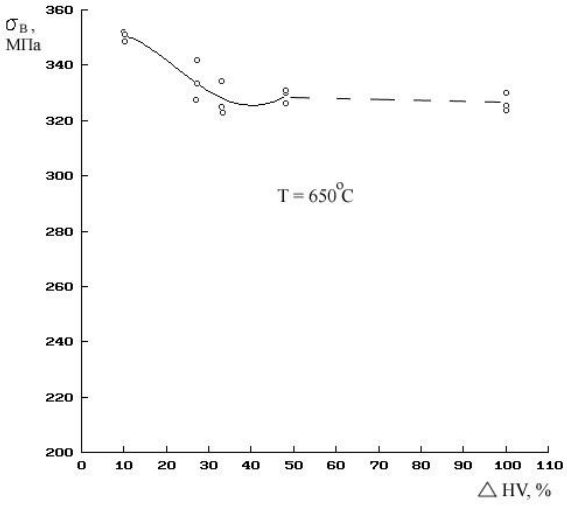
б)



в)

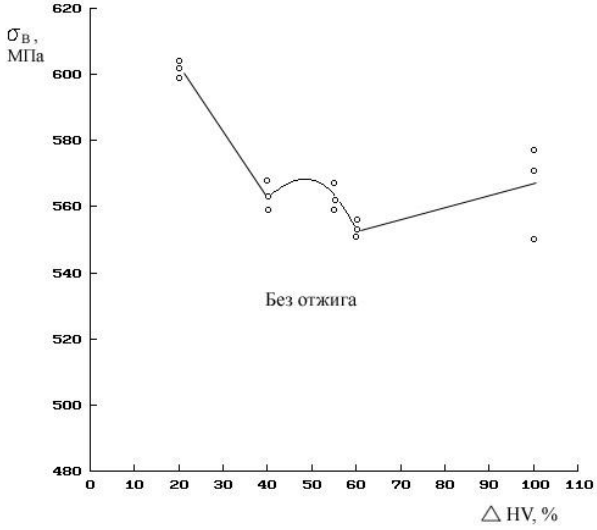


г)

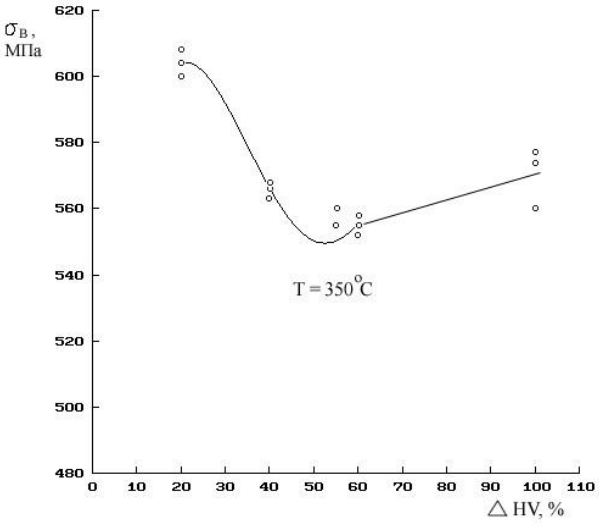


д)

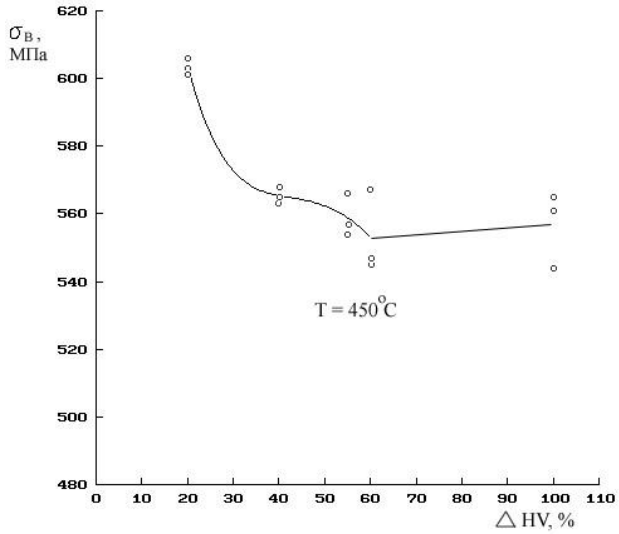
Рис. 9 – Зависимость временного сопротивления образцов в зависимости от глубины травления $\sigma_в = f(l_{тр.})$ для технического титана ВТ1-0 при различных $T_{отж.}$: а – 0 °С; б – 350 °С; в – 450 °С; г – 550 °С; д – 650 °С.



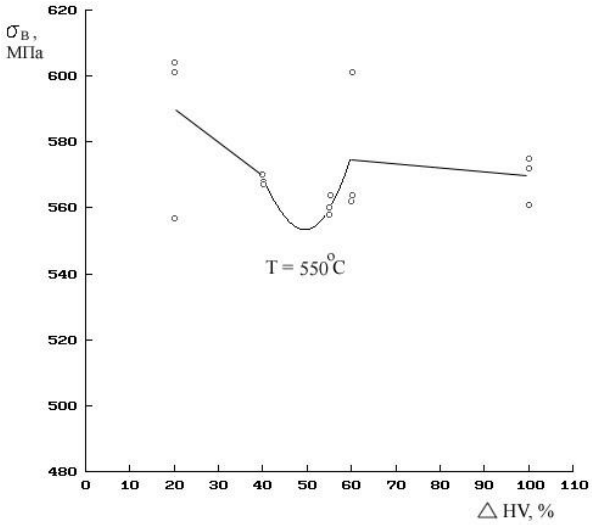
а)



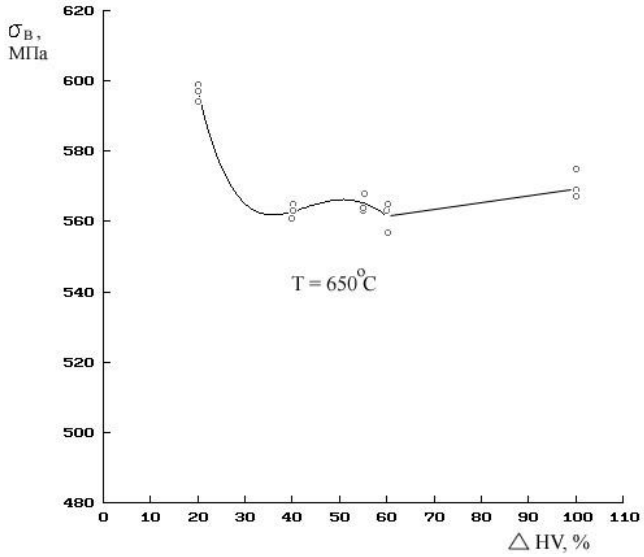
б)



в)

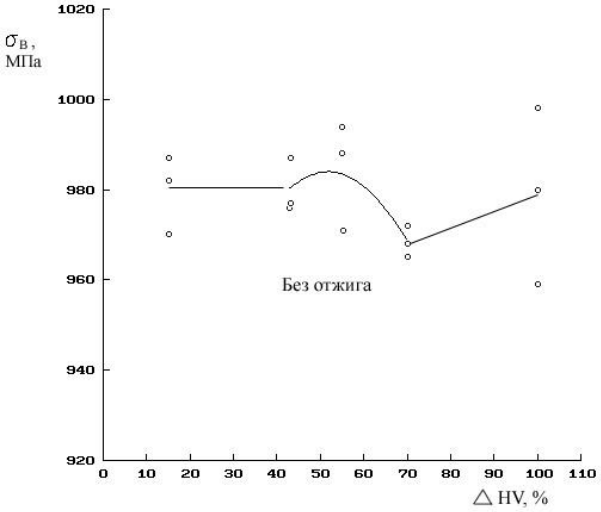


г)

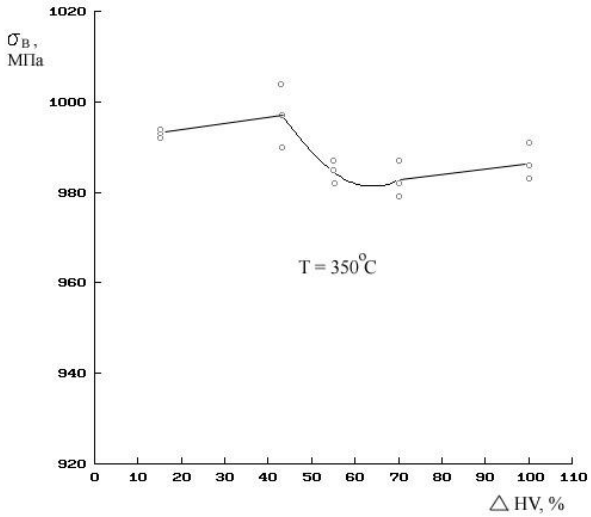


д)

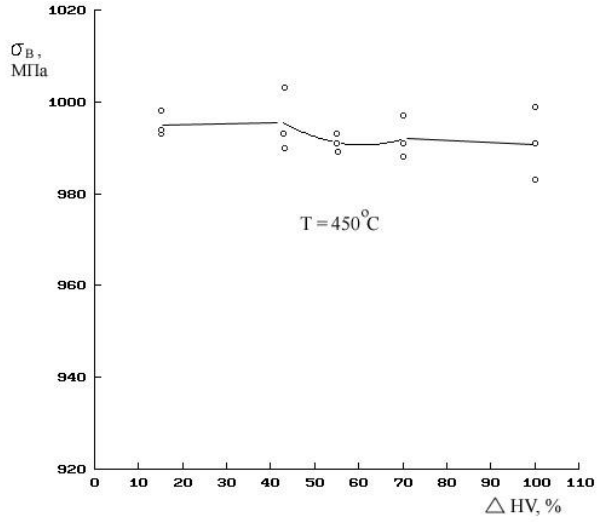
Рис. 10 – Зависимость временного сопротивления образцов в зависимости от глубины травления $\sigma_в = f(l_{тр.})$ сплава ПТ7м при различных $T_{отж.}$: а – 0 °С; б – 350 °С; в – 450 °С; г – 550 °С; д – 650 °С.



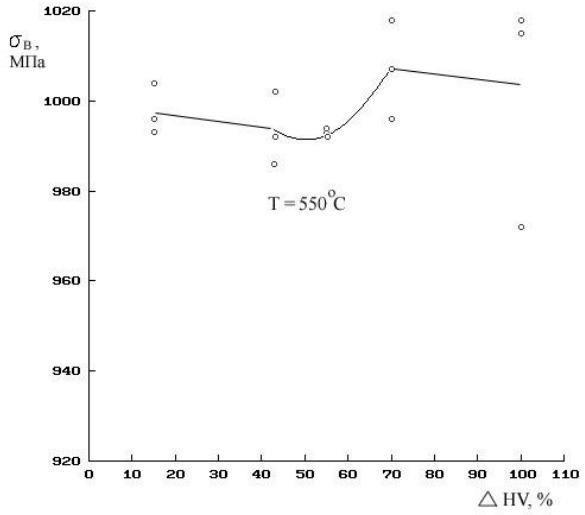
а)



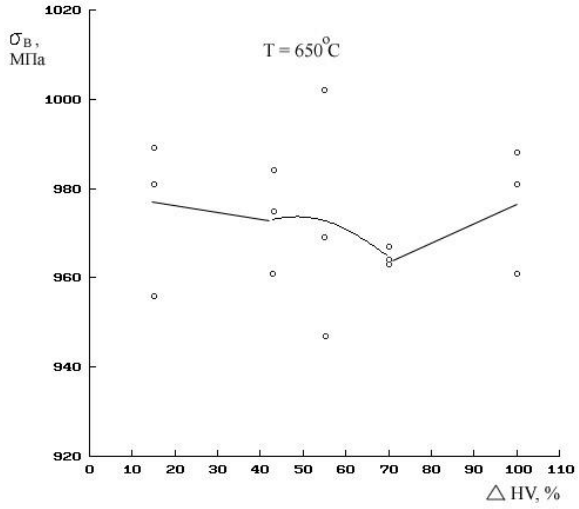
б)



в)



г)



д)

Рис. 11 – Зависимость временного сопротивления образцов в зависимости от глубины травления $\sigma_в = f(l_{тр.})$ сплава ВТ6ч при различных $T_{отж.}$: а – 0 °С; б – 350 °С; в – 450 °С; г – 550 °С; д – 650 °С.

Из представленных данных видно, что максимум значений $\sigma_в$ технического титана ВТ1-0 достигается при глубине травления $l_{тр.}$≈10 мкм, восстановление значений временного сопротивления до уровня основного металла происходит при глубине травления $l_{тр.}$≈48 мкм, Поверхностное окисление при отжиге в интервале температур 350-650 °С не оказывает значительного влияния на значения $\sigma_в$.

Для сплава ПТ7м максимум значений $\sigma_в$ проявляется при глубине травления $l_{тр.}$≈55 мкм, восстановление значений временного сопротивления до уровня основного металла достигается при глубине травления $l_{тр.}$≈60 мкм. Поверхностное окисление при температурах отжига 350-450 °С не оказывает значительного влияния

на значения $\sigma_в$ при всех значениях глубины травления. Последующее окисление при температуре отжига 550 °С повышает значение $\sigma_в$ примерно на 10 МПа, что по-видимому отрицательно влияет на значения усталостные характеристики и ударную вязкость. Снижение значений временного сопротивления при температуре отжига 650 °С для всех значений глубины травления связано с началом растворения кислорода в основном металле и охрупчиванием поверхности образцов.

Для высокопрочного сплава ВТ6ч восстановление значений временного сопротивления разрыву достигается при значениях глубины травления $l_{тр.}$≈70 мкм. Последующее окисление в интервале температур 350-550 °С повышает показатель $\sigma_в$ при всех значениях глубины травления, максимум достигается при температуре 550 °С.

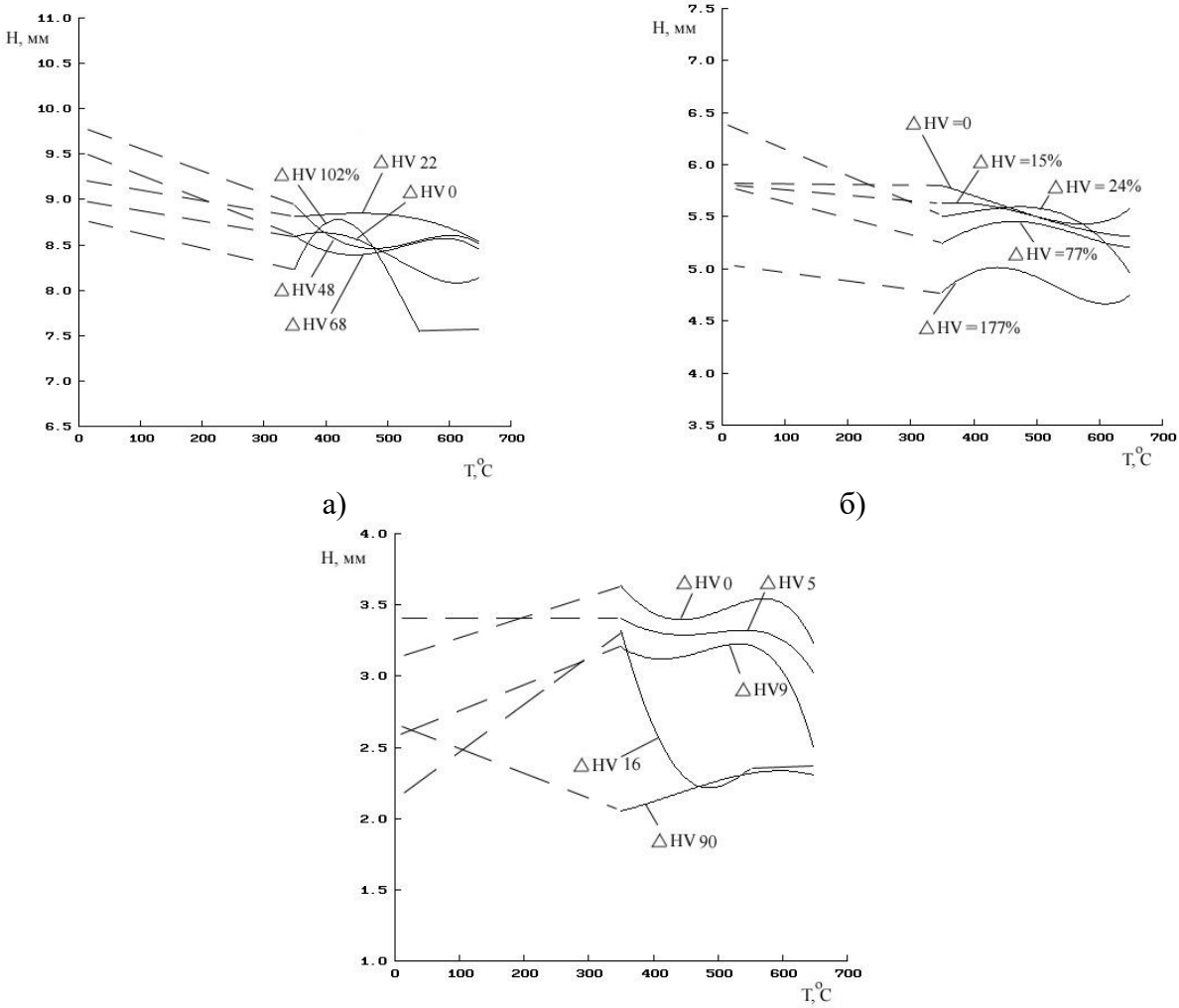


Рис. 12 – Сравнительные зависимости глубины вытяжки образцов H=f(T) при различных значениях ΔHV,%: а – для технического титана ВТ1-0; б – сплава Пт7м; в – сплава ВТ6ч

Из представленных результатов испытаний рис. 12 следует, что максимальная пластичность у технического титана ВТ1-0 достигается при перепаде микротвердости ΔHV=22 % (глубина травления $l_{тр.}$≈48 мкм). Последующий отжиг диапазоне температур 350-650 °С незначительно снижает технологическую пластичность при перепадах микротвердости ΔHV=0 % и ΔHV=22 %, при увеличении микротвердости поверхности технологическая пластичность снижается для всех указанных температур отжига.

Технологическая пластичность для сплава ПТ7м восстанавливается при перепаде микротвердости ΔHV=15 % (глубина травления $l_{тр.}$≈60 мкм). Последующий отжиг при температурах 350-650 °С снижает технологическую пластичность, что связано с упрочняющим действием оксидных плёнок.

Для высокопрочного сплава ВТ6ч технологическая пластичность восстанавливается до уровня основного металла при перепаде микротвердости ΔHV=5 % (глубина травления $l_{тр.}$≈70 мкм). Для основного металла ΔHV=0 % и с перепадом микротвердости ΔHV=5 % максимальная технологическая пластичность достигается при температуре отжига 350 °С, последующий отжиг при $T_{отж.}$=450-550 °С незначительно снижает технологическую пластичность, оксидная плёнка оказывает упрочняющее действие.

Выводы по работе

1. Для технического титана ВТ1-0 при отжиге с Т=350…550 °С и без отжига целесообразно наличие газонасыщенного подслоя с ΔHV=20 до 28,5%. Это даёт дополнительный прирост долговечности в 1,1…1,4 раза в сравнении с металлом без газонасыщенного подслоя. Оптимальная $T_{отж.}$=450 °С.

2. Для сплава ПТ7М при отжиге с Т≤450 °С наличие газонасыщенного подслоя с ΔHV ≤20 % не снижает повторно-статической долговечности, а оптимальной температурой является 450 °С.

3. Для сплава ВТ6ч наличие газонасыщенного подслоя с ΔHV=5% является полезным для всех оксидных плёнок, формирующихся при температурах отжига от 350 до 650°С, а также без отжига.

4. Ударная вязкость для технического титана ВТ1-0 достигает максимальных значений при перепаде микротвердости ΔHV=19 %, для сплава ПТ7м при перепаде микротвердости ΔHV ≤20 %, для высокопрочного сплава ВТ6ч восстановление KCU достигается при значениях перепада от 5 до 20 %. Для сплавов ВТ1-0 и ПТ7м оксидные плёнки, формирующиеся при температуре отжига 450 °С повышают ударную вязкость 15-20 % по сравнению вариантами без отжига. Для высокопрочного титанового сплава наблюдается незначительное убывание ударной вязкости при всех температурах отжига, максимальные значения ударной вязкости достигаются при перепаде микротвердости ΔHV=5 %.

5. Значения временного сопротивления и технологической пластичности восстанавливаются для технического титана ВТ1-0, сплавов ПТ7м и ВТ6ч при достижении перепадов микротвердости 48 %, 22 % и 20 % соответственно, что совпадает с показателями максимумов повторно-статической долговечности. Оксидные плёнки, формирующиеся в процессе отжига, не оказывают значительного влияния на временное сопротивление и технологическую пластичность для технического титана ВТ1-0 и сплава ПТ7м.

Практическая значимость

1. Определены оптимальные и безопасные значения микротвёрдости газонасыщенных слоев, формирующихся при нагреве, для изделий из титановых сплавов, эксплуатирующихся в условиях усталостного и динамического нагружения.

2. Проведенные исследования позволяют обоснованно выбирать режимы неполного и низкотемпературного отжига титановых деталей взамен полного отжига.

3. Получены результаты по влиянию оксидных плёнок на технологическую пластичность листовых титановых сплавов.

4. На основании полученных результатов работы разработаны технические рекомендации по корректировке технологического процесса производства деталей и узлов из титановых сплавов на ПАО «ВАСО».

Библиографический список

1. Александров В.К. Полуфабрикаты из титановых сплавов. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.

2. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1981. – 416 с.

3. Корнилов И.И., Забродская М.Н., Борискина Н.Г. Кинетика длительного окисления титана // МиТОМ. 1977. №3. с. 49-51.

4. Матюшкин Б.А., Горшков А.И. О влиянии газонасыщенного слоя на образование трещин при замедленном разрушении сплавов титана после сварки // Сварочное производство. 1976. № 4. С.11-12

5. Чечулин Б.Б., Ушков С.С., Разуваева И.Н., Гольдфайн В.Н. Титановые сплавы в машиностроении М.:Машиностроение.1977. – 248 с.

6. Моисеев В.Н., Пономарев А.П., Шохолова Л.В., Грибков Ю.А. Влияние состояния поверхности на характеристики работоспособности листов из титановых сплавов ОТ4 и ВТ14 // В сб. статей “Легирование и термическая обработка титановых сплавов”. ОНТИ ВИАМ. 1977. С. 307- 310.

7. Горшков А.И., Вакс И.А. Влияние температуры отжига на величину остаточных напряжений и свойства сварных соединений из сплава ОТ4 // Сварочное производство. 1967. №8 С.37-39.

8. Матюшкин Б.А., Горшков А.И. О влиянии газонасыщенного слоя на образование трещин при замедленном разрушении сплавов титана после сварки // Сварочное производство. 1976. № 4. С.11-12.

9. Моисеев В.Н., Куликов Ф.Р., Кириллов Ю.Г., Васькин Ю.В. Сварные соединения титановых сплавов. - М.: Металлургия. 1979. - 248 с. с ил.