

УДК 620.1:669.295

М.Р. Орлов¹, С.А. Наприенко¹**РАЗРУШЕНИЕ ДВУХФАЗНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ
В МОРСКОЙ ВОДЕ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-10-10

Методом растровой электронной микроскопии исследованы особенности статического и малоциклового усталостного разрушения двухфазных титановых сплавов VT3-1, VT6, VT8, VT9, VT18U и VT22 в морской воде и воздушной атмосфере.

Определены пороговые значения коэффициентов интенсивности напряжений в условиях статического замедленного разрушения ($K_{I3,p}^{\min}$) и малоциклового нагружения (ΔK_I^{\min}), соответствующие началу движения трещин по механизму коррозионного растрескивания.

Работа выполнена в рамках реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1]:

– направление 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль»;

– направление 18. «Климатические исследования для обеспечения безопасности и защиты от коррозии, старения и биоповреждения материалов, конструкций и сложных технических систем в природных средах».

Ключевые слова: *двухфазные титановые сплавы, коррозионное растрескивание, замедленное разрушение под напряжением, коррозионно-активная среда, морская вода, коэффициент интенсивности напряжений.*

Features of static and low-cyclic fatigue fracture of two-phase titanium alloys VT3-1, VT6, VBT8, VT9, VT18U and VT22 in sea water and air were investigated by scanning electron microscopy.

Threshold values of stress intensity factors in the conditions of static ($K_{I3,p}^{\min}$) and low-cyclic loading (ΔK_I^{\min}), corresponding to the beginning of crack propagation were determined by the mechanism of corrosion cracking.

Work is performed within implementation of «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030» [1]:

– direction 2. «Fundamental oriented researches, qualification of materials, non-destructive testing»;

– direction 18. «Environmental test for providing protection of materials, structures and complex technical systems against corrosion, aging and biodamages».

Keywords: *two-phase titanium alloys, corrosion cracking, delayed fracture under load, corrosive environment, sea water, stress intensity factor.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Изделия авиационной техники, эксплуатирующиеся в условиях морского базирования, наряду с высокими силовыми нагрузками подвержены агрессивному климатическому воздействию. В этой связи вопросы повышения ресурса и надежности авиационной техники определяют актуальность и практическую значимость испытаний

и исследований поведения двухфазных титановых сплавов в коррозионно-активных средах с целью определения механизма и кинетики развития разрушений [2–5].

Присутствие механических концентраторов напряжений и дефектов поверхности деталей и элементов конструкций в сочетании с воздействием агрессивной среды может способствовать развитию замедленного разрушения (коррозионному растрескиванию) двухфазных титановых сплавов при действующих напряжениях ниже расчетных. В условиях коррозионного растрескивания двухфазных титановых сплавов величина коэффициента интенсивности напряжений при замедленном разрушении $K_{Iz,p}$ в вершине движущейся трещины может быть значительно меньше параметра K_{Ic} , соответствующего условиям перехода трещины в закритическую стадию развития (долон) в условиях испытаний в воздушной среде [6–10].

Результаты исследований механизма и кинетики развития коррозионных трещин в двухфазных титановых сплавах [8, 10–12] являются основой оптимизации химического состава, структуры и технологии производства изделий авиационного назначения [13–15].

Материалы и методы исследований

Для исследований механизма и кинетики развития коррозионных трещин в двухфазных титановых сплавах изготовлены образцы из сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, ВТ18У и ВТ22. Химический состав сплавов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав двухфазных титановых сплавов

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)									
	Ti	Al	Mo	V	Zr	Nb	Fe	Cr	Sn	Si
ВТ3-1	Основа	6,1	2,4	–	–	–	0,4	1,2	–	0,2
ВТ8	Основа	6,5	3,2	–	–	–	–	–	–	0,3
ВТ9	Основа	6,3	3,2	–	1,2	–	–	–	–	0,3
ВТ18У	Основа	7,0	0,6	–	4,1	1,2	–	–	2,2	0,2
ВТ22	Основа	4,8	4,2	4,9	–	–	1,3	1,2	–	–

Фрактографические и микроструктурные исследования проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на электронном микроскопе JSM6490-LV фирмы Jeol.

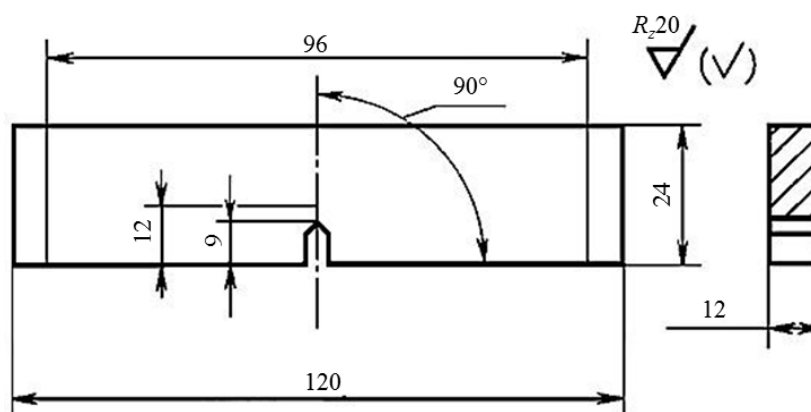


Рис. 1. Эскиз образца для испытаний на трехточечный изгиб по ГОСТ 25.506 с боковой усталостной трещиной

Испытания проводили на образцах размером 12×24×120 мм с боковой усталостной трещиной (рис. 1) на сервогидравлической испытательной машине LFV-100кН производства фирмы Walter+bai ag по ГОСТ 25.506. Нагружение производили по схеме

трехточечного изгиба в воздушной атмосфере, в воде Черного моря, в нейтральных, щелочных и кислых коррозионно-активных средах.

Результаты исследований

На рис. 2 представлена микроструктура исследуемых материалов. Сплавы ВТ3-1, ВТ8 и ВТ9 представлены глобулярной структурой. Микроструктура сплавов ВТ18 и ВТ22 пластинчатая.

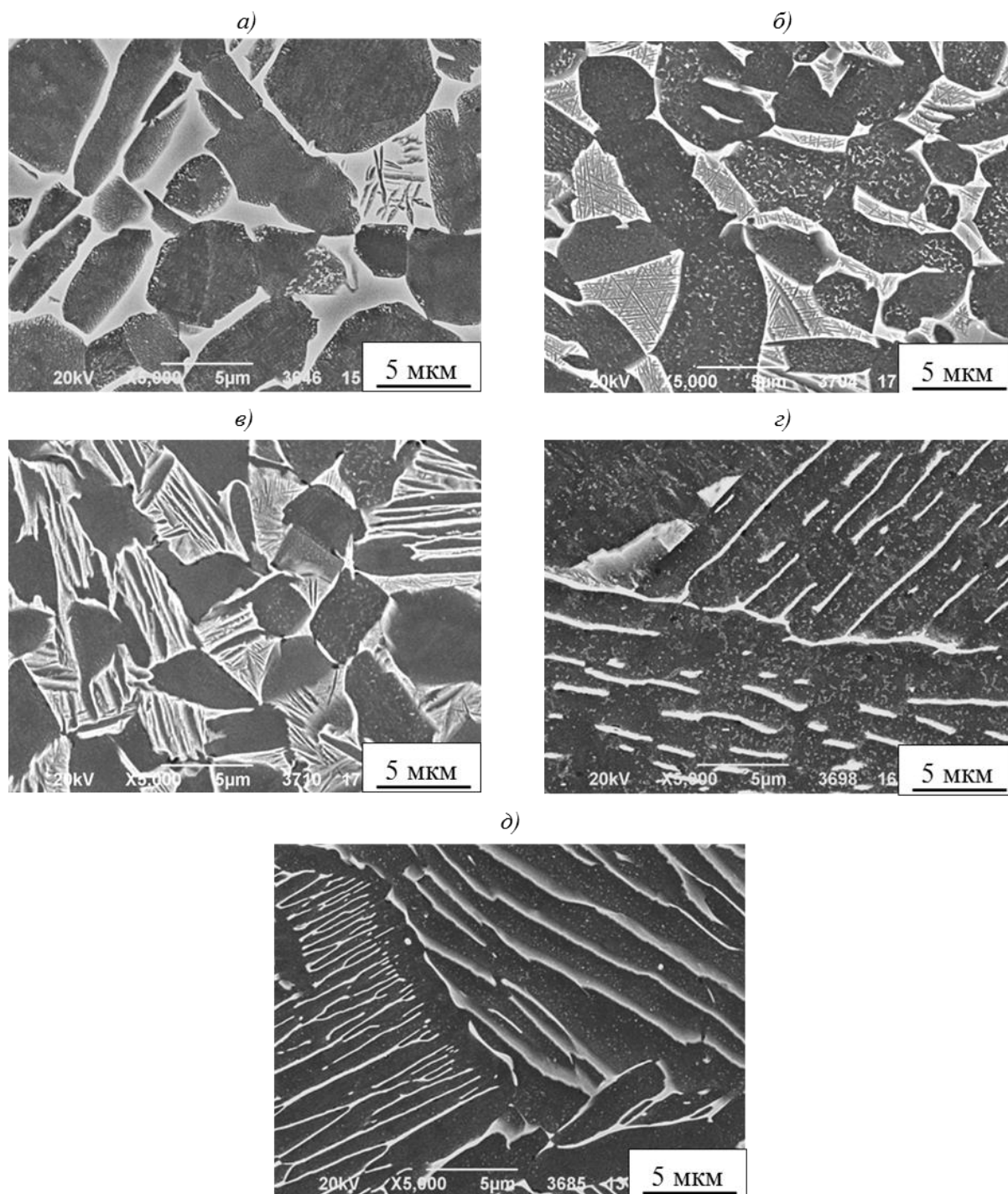


Рис. 2. Микроструктура двухфазных титановых сплавов ВТ3-1 (а) ВТ8 (б), ВТ9 (в), ВТ18У (г) и ВТ22 (д)

Испытания двухфазных титановых сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, ВТ18У и ВТ22 при растяжении в воздушной атмосфере и в воде Черного моря проводили с различными скоростями нагружения. Результаты испытаний показали различную склонность двухфазных титановых сплавов к коррозионному растрескиванию в морской воде (табл. 2).

Таблица 2

Свойства двухфазных титановых сплавов в морской воде и воздушной атмосфере						
Среда	Скорость нагружения, мм/мин	$K_{I3,p}$, МПа $\sqrt{м}$, для сплавов				
		ВТ3-1	ВТ8	ВТ9	ВТ18У	ВТ22
Воздух	2	97	89	55	79	82
Морская вода	2	104	74	–	–	–
	0,2	65	65	–	–	–
	0,02	47	50	42	35	78
	0,002	43	42	42	36	77
	0,0002	33	38	37	31	61
Пороговое значение $K_{I3,p}^{\min}$		34	38	41	33	72
Пороговое значение $\Delta K_I^{\min*}$		25	36	30	18	42

* При малоциклового усталости для условия: частота $F=0,05$ Гц; $R_\sigma=0,1$.

Фрактографические исследования методом РЭМ позволили выявить в изломах всех образцов титановых сплавов, испытанных в морской воде, зоны разрушения по механизму квазискола (рис. 3, а, в, д, ж, к), не характерному для статического разрушения этих сплавов в воздушной атмосфере (рис. 3, б, г, е, и, л).

Наряду с испытаниями с постоянной скоростью нагружения проводили испытания при постоянном значении $K_{I3,p}$. По результатам испытаний образцов титановых сплавов при постоянном значении коэффициента интенсивности напряжений $K_{I3,p}$ выявлена зависимость скорости роста статической коррозионной трещины ($V_{3,p}$) от величины коэффициента интенсивности напряжений (КИН) – $K_{I3,p}$ (табл. 3).

Таблица 3

Результаты определения скорости роста трещины $V_{3,p}$ в образцах титанового сплава ВТ3-1 в морской воде при различных значениях КИН в вершине трещины ($K_{I3,p}$)			
КИН в вершине трещины $K_{I3,p}$, МПа $\sqrt{м}$	Время развития трещины $\tau_{3,p}$, с	Длина трещины $L_{3,p}$, мкм	Скорость роста трещины $V_{3,p}$, мкм/с
34,95	14500	70	$5 \cdot 10^{-3}$
36,21	170	540	3,2
37,85	65	570	8,8
45,64	45	865	19,2

Полученный результат свидетельствует о том, что механизм коррозионного растрескивания двухфазных титановых сплавов контролируется по развитию диффузионных процессов в вершине трещины, имеющих свои кинетические параметры.

Наиболее высокой подвижностью в титане обладает водород, диффузия которого фиксируется при комнатной температуре. Различие в механизмах и кинетике замедленного статического разрушения двухфазных титановых сплавов в воздушной атмосфере и морской воде свидетельствует о том, что основным источником водорода, участвующим в замедленном разрушении, является не растворенный в сплаве водород, а водород, адсорбированный ювенильными поверхностями растущей трещины из коррозионно-активной среды.

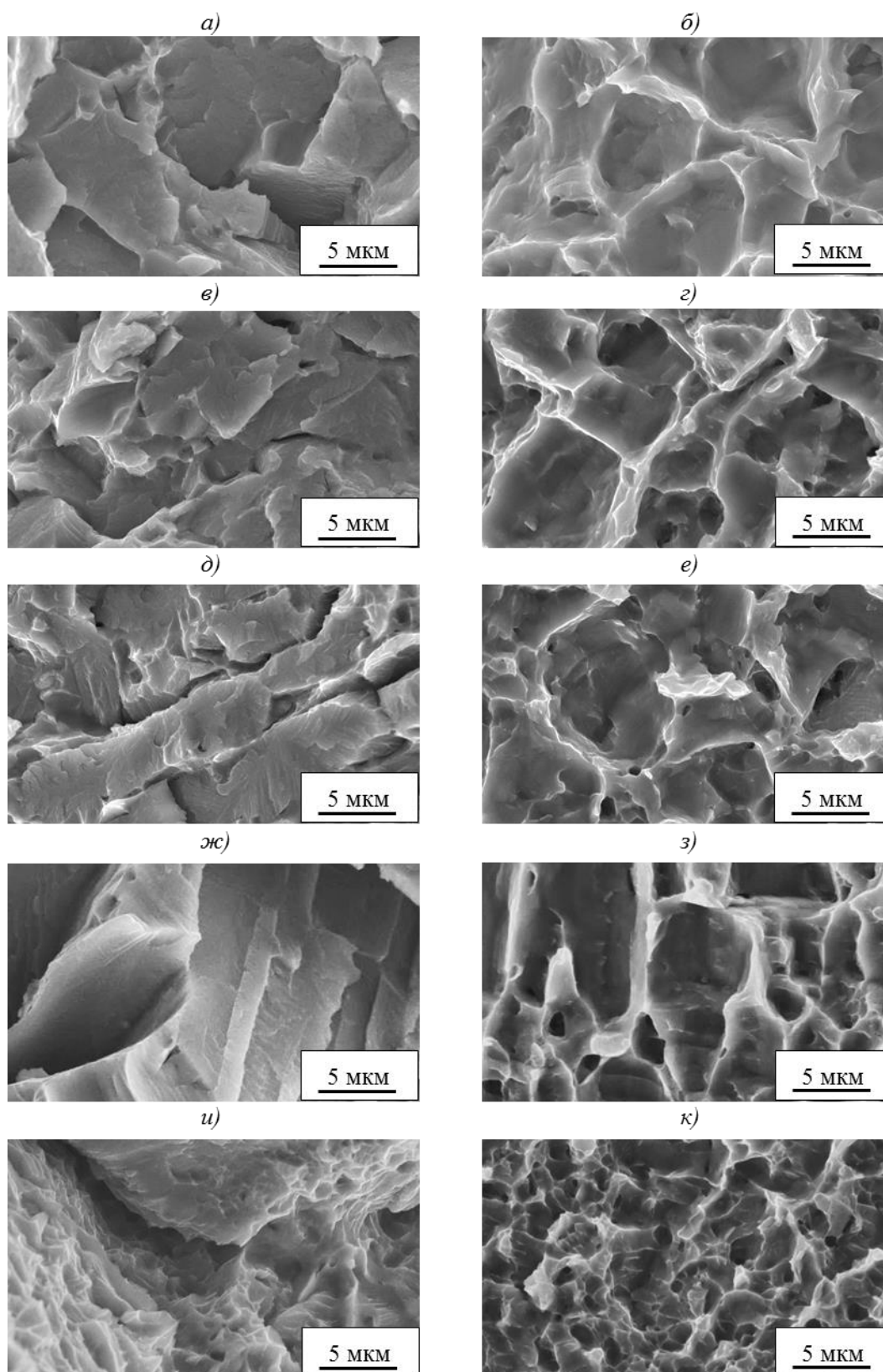


Рис. 3. Структура изломов образцов двухфазных титановых сплавов ВТ3-1 (а, б); ВТ8 (в, г); ВТ9 (д, е); ВТ18У (ж, з) и ВТ22 (и, к) после однократных статических испытаний в воде Черного моря (а, в, д, ж, и) и в воздушной атмосфере (б, г, е, з, к)

В работе [6] показано, что фактором, способствующим наводороживанию титановых сплавов, являются растягивающие напряжения, формирующие диффузионный поток водорода в зону вершины растущей трещины.

По результатам испытаний образцов двухфазных титановых сплавов построены кинетические модели в виде полинома

$$V_{3,p}=A+B \cdot K_{I3,p}-C(K_{I3,p})^2,$$

где A, B, C – коэффициенты полинома.

Определение порогового значения коэффициента интенсивности напряжений $K_{I3,p}^{\min}$ производится путем решения квадратного уравнения относительно $K_{I3,p}$ при равенстве нулю значений $V_{3,p}$:

$$A \cdot K_{I3,p}^{\min} + C(K_{I3,p}^{\min})^2 = -A.$$

Установлено, что пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений $K_{I3,p}^{\min}$ с большой точностью соответствует величине $K_{I3,p}$, полученной при минимальной скорости нагружения образцов в морской воде $V=2 \cdot 10^{-4}$ мм/мин (табл. 2).

На образцах исследуемых титановых сплавов проводили испытания при циклическом нагружении в воде Черного моря при коэффициенте асимметрии цикла нагружения $R_\sigma=0,1$ с различной частотой нагружения F и различными значениями ΔK_I .

По результатам экспериментальных данных построены кинетические модели малоциклового усталостного разрушения титановых сплавов в морской воде при заданной величине коэффициента асимметрии цикла нагружения R_σ в виде полинома

$$V_{\text{МЦУ}}^{\text{кас}} = A + B \cdot \Delta K_I + C \cdot F + D \cdot \Delta K_I^2 + E \cdot F^2 + G \Delta K_I F,$$

где A, B, C, D, E, G – коэффициенты полинома; $V_{\text{МЦУ}}^{\text{кас}}$ – скорость роста трещины малоциклового усталости в коррозионно-активной среде.

Кинетическая модель малоциклового усталостного разрушения двухфазного титанового сплава ВТЗ-1 в морской воде при величине коэффициента асимметрии цикла нагружения $R_\sigma=0,1$ представляет собой полином первого порядка:

$$V_{\text{МЦУ}}^{\text{кас}} = 3,25 + 1,6 \cdot \Delta K_I - 175 \cdot F.$$

Определение пороговых значений ΔK_I^{\min} двухфазных титановых сплавов для фиксированных значений коэффициента асимметрии цикла нагружения R_σ и частоты нагружения F осуществляли посредством решения уравнения относительно параметра ΔK_I при условии $V_{\text{МЦУ}}^{\text{кас}} = 0$.

Испытания образцов при циклическом нагружении показали, что для двухфазных титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ8, ВТ9, ВТ18У и ВТ22 пороговая величина КИН (ΔK_I^{\min}) для условий циклического нагружения при частоте $F=0,5$ Гц и $R_\sigma=0$ в морской воде значительно ниже величины порогового значения КИН ($K_{I3,p}$) для условий статического развития коррозионной трещины в морской воде (табл. 2).

Фрактографические исследования изломов двухфазных титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ8, ВТ9, ВТ18У и ВТ22 в зоне развития усталостной трещины в коррозионно-активной среде позволили установить, что рельеф поверхности трещин при МЦУ в условиях воздействия морской воды идентичен рельефу статического разрушения этих сплавов в морской воде (рис. 4) и представлен фасетками квазискола.

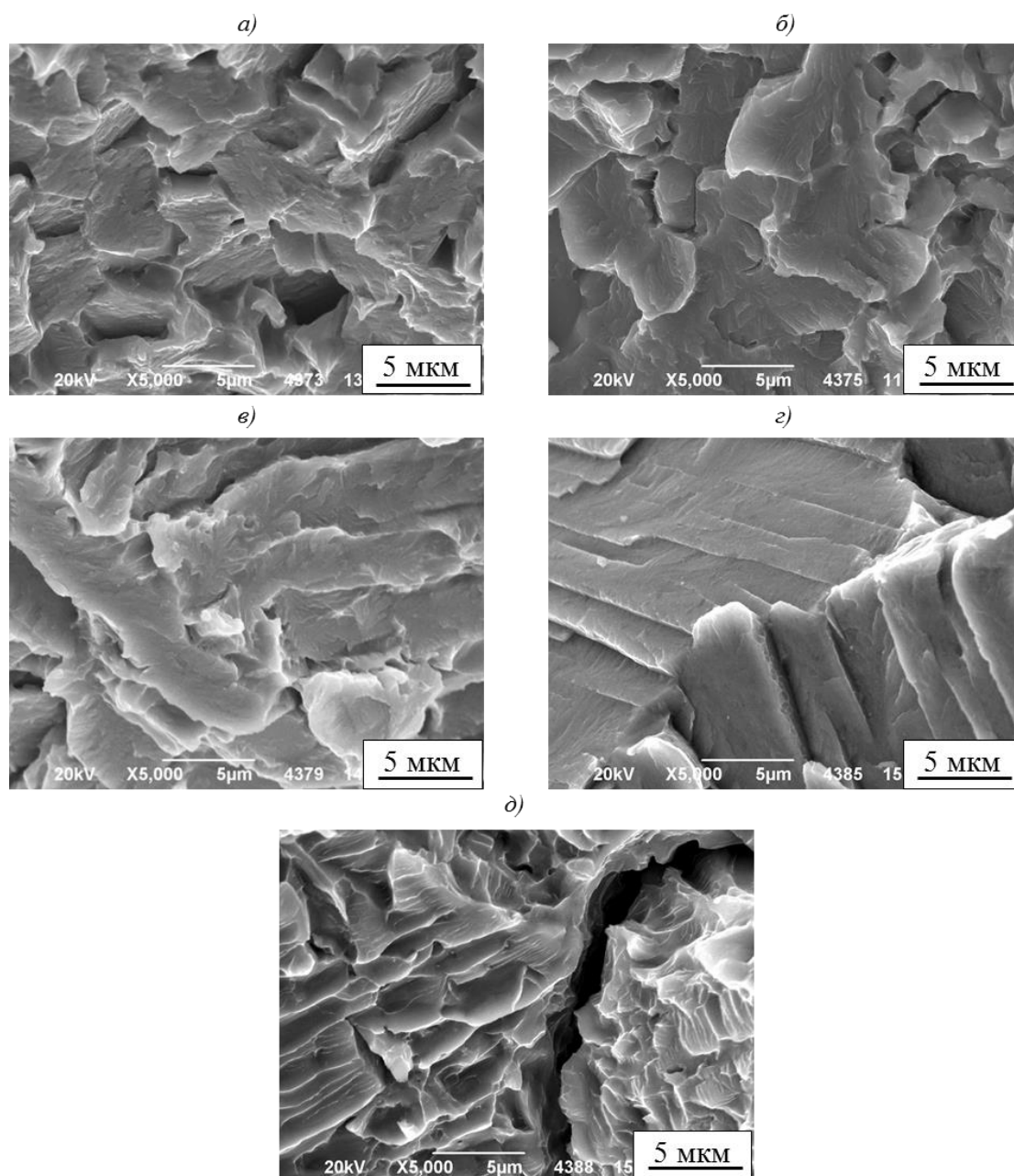


Рис. 4. Строение изломов образцов двухфазных титановых сплавов ВТ3-1 (а), ВТ8 (б), ВТ9 (в), ВТ18У (з) и ВТ22 (д) после усталостных испытаний в воде Черного моря

Для выявления химических элементов коррозионно-активной среды, как определяющих механизм замедленного разрушения двухфазных титановых сплавов, так и лимитирующих скорость коррозионного растрескивания, выполнены эксперименты по замедленному разрушению образцов титанового сплава ВТ22 в различных коррозионно-активных средах, включая нейтральную, кислую и щелочную среду, при скорости деформации образцов с усталостной трещиной, равной 0,0002 мм/мин.

В качестве коррозионно-активных сред использовали:

- воду Черного моря;
- нейтральный 3%-ный водный раствор NaCl;
- нейтральный 4,38%-ный водный раствор хлористой меди $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, который по концентрации ионов Cl эквивалентен 3%-ному водному раствору NaCl;

- кислый 1,87%-ный водный раствор HCl, который по концентрации ионов Cl⁻ эквивалентен 3%-ному водному раствору NaCl;
- щелочной 2%-ный водный раствор NaOH, который по концентрации ионов Na⁺ эквивалентен 3%-ному водному раствору NaCl.

Результаты испытаний по определению статической трещиностойкости сплава BT22 в зависимости от среды испытания представлены в табл. 4.

Таблица 4

Величина статической трещиностойкости сплава BT22 в зависимости от скорости нагружения образца с нанесенной усталостной трещиной и среды испытания

Условия испытания	Скорость нагружения, мм/мин	$K_{Iz.p}$, МПа $\sqrt{м}$
Воздушная атмосфера	2	82
	0,02	83
Вода Черного моря 3%-ный NaCl в воде 4,38%-ный CuCl ₂ ·2H ₂ O в воде 1,87%-ный HCl в воде 2%-ный NaOH в воде	0,0002	61
	0,0002	60
	0,0002	72
	0,0002	70
	0,0002	82

В результате выполненных исследований по влиянию состава коррозионно-активной среды на статическую трещиностойкость и механизм замедленного разрушения сплава BT22 установлено, что воздействие синтезированной морской воды (3%-ный водный раствор NaCl) приводит к снижению величины статической трещиностойкости сплава BT22 (как и воды Черного моря), не изменяя при этом механизм замедленного разрушения.

Замена в растворе катионов натрия на катионы меди, обладающие меньшей диффузионной подвижностью, приводит к меньшему снижению величины статической трещиностойкости сплава BT22, не изменяя при этом хрупкий механизм замедленного разрушения.

Замена в растворе катионов натрия на катионы водорода, обладающие большей диффузионной подвижностью в титане, также приводит к меньшему снижению величины статической трещиностойкости сплава BT22, не изменяя при этом хрупкий механизм замедленного разрушения.

Замена в растворе анионов хлора на гидроксильную группу OH⁻ не приводит к снижению величины статической трещиностойкости сплава BT22 в сравнении с его трещиностойкостью в воздушной среде, а также к развитию хрупкого механизма замедленного разрушения (табл. 4).

Обсуждение и заключения

Для двухфазных титановых сплавов BT3-1, BT8, BT9, BT18У и BT22 определены пороговые значения коэффициентов интенсивности напряжений для условий статического развития коррозионной трещины в морской воде ($K_{Iz.p}^{min}$) и условий циклического развития коррозионной трещины в морской воде (ΔK_I^{min}) при частоте нагружения $F=0,05$ Гц и коэффициенте асимметрии цикла нагружения $R_\sigma=0,1$.

В результате фрактографических исследований методом растровой электронной микроскопии установлено, что механизм разрушения двухфазных титановых сплавов BT3-1, BT8, BT9, BT18У и BT22 в условиях воздействия морской воды одинаков для статического и малоциклового усталостного разрушения.

На примере сплава BT22 показано, что хлорсодержащие нейтральные (NaCl, CuCl₂·2H₂O) и кислотные (HCl) растворы приводят к снижению величины статической трещиностойкости сплава, не изменяя при этом хрупкого механизма замедленного разрушения. Испытания в щелочной среде, где ион Cl⁻ заменили на гидроксильную группу OH⁻, не приводят к снижению величины статической трещиностойкости сплава.

Установлено, что наиболее сильное снижение статической трещиностойкости ($K_{I,p}$) двухфазных титановых сплавов происходит в условиях воздействия морской воды и синтетической морской воды, при этом снижение характеристики трещиностойкости обратно пропорционально скорости нагружения образцов.

Благодарности

Авторы благодарят А.В. Лаврова за проведение механических испытаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения о предоставлении субсидии №14.595.21.0002 от 22.08.2014 г., уникальный идентификатор №RFMEFI59514X0002, с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания ФГУП «ВИАМ»», а также при поддержке гранта РФФИ по проекту НК 13-08-001125/13.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. К 80-летию ВИАМ // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. №5. С. 78–82.
3. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
4. Каблов Е.Н., Гриневиц А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 370–379.
5. Дроздовский Б.А., Проходцева Л.В., Новосильцева Н.И. Трещиностойкость титановых сплавов. М.: Металлургия, 1983. 192 с.
6. Полянский В.М., Пучков Ю.А., Орлов М.Р., Наприенко С.А., Лавров А.В. Влияние растягивающих напряжений на коррозионную стойкость титанового сплава BT22 в водном растворе NaCl // Материаловедение. 2016. №7. С. 13–19.
7. Орлов М.Р., Пучков Ю.А., Наприенко С.А., Лавров А.В. Исследование эксплуатационного разрушения лопатки вентилятора авиационного газотурбинного двигателя из титанового сплава BT3-1 // Титан. 2014. №4. С. 23–30.
8. Орлов М.Р., Наприенко С.А., Лавров А.В. Фрактографический анализ эксплуатационного разрушения диска компрессора высокого давления из сплава BT18Y // Титан. 2014. №2. С. 16–21.
9. Орлов М.Р., Наприенко С.А., Лавров А.В. Исследование разрушения двухфазных титановых сплавов в условиях воздействия морской воды // Сб. докл. IV Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат-2014». М.: ВИАМ, 2014. С. 9.
10. Наприенко С.А., Зайцев Д.В., Попов М.А., Заводов А.В. Особенности разрушения титанового сплава BT41 при ударном (динамическом) нагружении при различных температурах // Авиационные материалы и технологии. 2016. №2 (41). С. 60–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-60-68.
11. Проходцева Л.В., Наприенко С.А. Особенности разрушения титанового сплава BT41 в различном структурном состоянии при статическом и динамическом нагружении // Деформация и разрушение материалов. 2014. №2. С. 42–47.
12. Проходцева Л.В., Филонова Е.В., Наприенко С.А., Моисеева Н.С. Исследование закономерностей развития процессов разрушения при циклическом нагружении сплава BT41 // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 407–412.
13. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
14. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №3. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2016).
15. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства жаропрочного титанового сплава для лопаток КВД // Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 8–14.