

УДК:620.194.22:669.295

Л.В. Захарова<sup>1</sup>**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА, ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И СТРУКТУРЫ НА СТОЙКОСТЬ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ К РАСТРЕСКИВАНИЮ ОТ ГОРЯЧЕСОЛЕВОЙ КОРРОЗИИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-11-11

Сообщается об исследовании влияния на чувствительность титановых сплавов к растрескиванию от горячесолевой коррозии под напряжением их химического состава, термической обработки и микроструктуры. Показано, что бинарный сплав системы Ti–Al, содержащий 3% (по массе) Al, обладает низкой чувствительностью к растрескиванию от горячесолевой коррозии под напряжением при температурах испытаний 400 и 500°C. При увеличении содержания Al в титановых сплавах до 5–8% (по массе) их склонность к растрескиванию существенно возрастает.

Выявлена положительная роль Fe и Mo, отсутствие влияния V и отрицательная роль Sn в качестве легирующих элементов в сплавах системы Ti–Al для повышения их стойкости к растрескиванию от горячесолевой коррозии под напряжением при температурах испытаний 400 и 500°C. Показано, что влияние Zr и Cr неоднозначно и зависит от содержания в сплавах Al и температуры испытаний.

Установлено, что при температурах испытаний <500°C отожженное состояние обеспечивает более высокую стойкость к растрескиванию от горячесолевой коррозии титановых сплавов, чем термически упрочненное. При температуре 500°C и выше влияние термообработки нивелируется.

**Ключевые слова:** титановые сплавы, горячесолевая коррозия, солевые отложения, охрупчивание, коррозионное растрескивание, длительная прочность, термическая обработка, микроструктура, легирующие элементы.

*It is reported about research of influence of chemical composition, thermal treatment and microstructure on titanium alloys sensitivity to cracking from hot salt stress corrosion. It is shown that the binary alloy of Ti–Al system containing 3% of Al possesses low sensitivity to cracking from hot salt stress corrosion at tests temperatures 400 and 500°C. At increase of Al quantity to 5–8% in titanium alloys their tendency to cracking significantly increases.*

*The positive role of Fe and Mo, lack of V influence and negative role of Sn as alloying elements in Ti–Al system alloys for their cracking resistance increase from hot salt corrosion at tests temperatures 400 and 500°C is revealed. It is shown that influence of Zr and Cr is ambiguous and depends on the contents of Al in alloys and testing temperature.*

*It is found out that the annealed condition provides with higher resistance to cracking from hot salt corrosion of Ti alloys than thermally strengthened at test temperature lower than 500°C. At temperature of 500°C and above influence of heat treatment is negligible.*

**Keywords:** titanium alloys, hot salt stress corrosion, salt deposits, fragility, corrosion cracking, long durability, thermal treatment, microstructure, doping elements.

<sup>1</sup>Федеральное 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**

Титановые сплавы находят широкое применение в изделиях авиационной техники [1–8], эксплуатирующейся во всеклиматических, в том числе морских, условиях, где возможно образование на их поверхности отложений морской соли.

Известно, что контакт с NaCl – основным компонентом морской соли – способен при повышенных температурах ( $\geq 250^\circ\text{C}$ ) вызывать горячесолевую коррозию титановых сплавов. При этом на их поверхности появляются коррозионные поражения в виде питтингов и язв, сопровождающиеся охрупчиванием, что при одновременном воздействии растягивающих напряжений может стать причиной возникновения коррозионных трещин [9–15].

В связи с тем, что титановые сплавы являются сложнолегированными композициями, представляет интерес изучение влияния на их чувствительность к растрескиванию таких факторов, как их химический состав, термическая обработка и микроструктура.

В данной работе исследовали влияние легирующих элементов (алюминия, олова, циркония, ванадия, молибдена, хрома и железа), термической обработки (отжиг, закалка+старение) и типа микроструктуры на склонность титановых сплавов к растрескиванию от горячесолевой коррозии.

### Материалы и методы

Влияние алюминия и других легирующих элементов изучали на специально изготовленных композициях сплавов. Влияние алюминия в диапазоне промышленного легирования исследовали на сплавах системы Ti–Al, содержащих 3; 5 и 8% (по массе) Al.

Принимая во внимание, что большинство промышленных титановых сплавов легировано алюминием, влияние других элементов изучали на тройных сплавах, созданных на основе бинарных сплавов систем Ti–5Al и Ti–8Al. Количество вводимых добавок соответствовало 2–4% (по массе). Исследовано влияние большинства элементов (Sn, Zr, V, Mo, Cr, Fe), вводимых в промышленные титановые сплавы.

Модельные сплавы выплавляли в виде слитков массой 20 кг в вакуумной печи с расходуемым электродом методом двойного переплава.

Исходными материалами для изготовления слитков служили: титановая губка марки ТГ100, алюминий, железо, цирконий, хром и олово, которые вводили в чистом виде, а также молибден и ванадий, вводимые в виде двойных лигатур, содержащих алюминий.

Ковку слитков модельных сплавов после обточки на  $\varnothing 185$  мм осуществляли при температурах  $\beta$ -области, чтобы обеспечить идентичную структуру при хорошей технологичности, в том числе и сплавов с 8% (по массе) Al. Изотермический отжиг заготовок под образцы проводили по режиму: нагрев при температуре  $0,8 \cdot t_{\text{п.п}}$  в течение 1 ч, охлаждение до  $400^\circ\text{C}$  с печью, далее – на воздухе (где  $t_{\text{п.п}}$  – температура полиморфного превращения).

Химический состав модельных сплавов и температуры полиморфного превращения приведены в табл. 1.

Влияние термической обработки и структуры изучали на титановых сплавах: ВТ9 с микроструктурой 2–3 типов в отожженном и термически упрочненном состоянии, ВТ8 с микроструктурой 2–3 и 7–9 типов в отожженном и термически упрочненном состоянии и ВТ3-1 со структурой 1–3, 5–6, 7–8 типов в отожженном состоянии.

Термическую обработку заготовок под образцы осуществляли по серийным режимам, рекомендуемым для исследуемых сплавов. Типы микроструктур соответствуют девяти типичной шкале для прутков из  $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов (инструкция ПИ1.2.785–2009 – см. рис. А.3 [16]).

Изучение растрескивания титановых сплавов от горячесолевой коррозии проводили на образцах и установках ZST3/3, предназначенных для испытаний на длительную прочность.

Таблица 1

Химический состав и температуры полиморфного превращения ( $t_{п.п}$ ) модельных сплавов

Система сплава	Содержание легирующих элементов, % (по массе)							$t_{п.п}$ , °C
	Al	Sn	Zr	V	Mo	Cr	Fe	
Ti-3Al	2,9	–	–	–	–	–	–	960
Ti-5Al	4,5	–	–	–	–	–	–	1000
Ti-8Al	7,6	–	–	–	–	–	–	1050
Ti-5Al-4Sn	5,08	3,5	–	–	–	–	–	1000
Ti-5Al-4Zr	5,1	–	4,0	–	–	–	–	1010
Ti-5Al-4V	5,1	–	–	3,93	–	–	–	950
Ti-5Al-4Mo	5,25	–	–	–	4,05	–	–	960
Ti-5Al-3Cr	5,07	–	–	–	–	3,06	–	950
Ti-5Al-4Cr	4,97	–	–	–	–	3,68	–	940
Ti-5Al-4Fe	4,94	–	–	–	–	–	3,96	925
Ti-8Al-2Sn	8,18	1,82	–	–	–	–	–	1050
Ti-8Al-4Zr	8,2	–	4,1	–	–	–	–	1040
Ti-8Al-4V	8,0	–	–	3,9	–	–	–	1010
Ti-8Al-4Mo	7,6	–	–	–	4,0	–	–	1020
Ti-8Al-3Cr	7,8	–	–	–	–	2,95	–	990
Ti-8Al-4Cr	7,5	–	–	–	–	3,6	–	970
Ti-8Al-4Fe	7,86	–	–	–	–	–	3,91	970

Солевой налет на поверхности образцов создавали послойным пневматическим напылением насыщенного водного раствора NaCl (ч.д.а.) с помощью пульверизатора и последующей сушкой при температуре 105–110°C в течение 15–20 мин до получения слоя заданной толщины. Исследования, проведенные при отработке методики испытаний, показали, что толщина солевых отложений влияет на стойкость титановых сплавов к растрескиванию от горячесолевой коррозии, и наибольшей агрессивностью обладает солевой налет толщиной  $\delta_{NaCl} \approx 50$  мкм [17]. Поэтому все исследования проводили с соевым налетом данной толщины, что обеспечивало сравнимые условия испытаний, а также ускоряло процесс коррозионного растрескивания, что соответствует реализации исследований в рамках комплексного научного направления 18.2. «Развитие методов климатических испытаний и инструментальных методов исследования» [1].

На рис. 1 показан образец с соевыми отложениями.



Рис. 1. Образец с соевыми отложениями

В результате коррозионных испытаний определяли разрушающие напряжения на базе 100 ч при постоянно действующей нагрузке и заданной температуре, т. е. предел сточасовой длительной прочности – в соответствии с ГОСТ 10145–81 [18].

Влияние легирующих элементов исследовали на модельных сплавах при температурах испытаний 400 и 500°C. Влияние термической обработки и микроструктуры изучали на сплавах: ВТ9 – при температурах 400 и 550°C, ВТ8 – при температуре 500°C и ВТЗ-1 – при температурах 400 и 450°C.

В связи с тем, что разрушающие напряжения при контакте с NaCl ( $\sigma_{\tau\text{NaCl}}^t$ ) не определяют чувствительности металла к растрескиванию, поскольку не учитывают его исходной жаропрочности ( $\sigma_{\tau}^t$ ), в результате испытаний определяли  $\sigma_{100\text{NaCl}}^t$  и  $\sigma_{100}^t$ , а в качестве критерия оценки стойкости титановых сплавов к растрескиванию от горячесолевого коррозии приняли относительную величину  $\sigma_{\tau\text{NaCl}}^t/\sigma_{\tau}^t$  в %. Эта характеристика позволяет наглядно проследить влияние различных факторов на склонность титановых сплавов к растрескиванию от горячесолевого коррозии и дать ему количественную оценку.

### Результаты и обсуждение

В табл. 2–4 представлены данные по длительной прочности и стойкости к растрескиванию от горячесолевого коррозии под напряжением при температурах 400 и 500°C на базе 100 ч модельных титановых сплавов изученных систем легирования, а также приведены данные по пределу прочности ( $\sigma_{\text{в}}^t$ ) сплавов при температурах испытаний.

В табл. 2 показано, что сплав, содержащий 3% (по массе) Al, является практически не чувствительным к растрескиванию, тогда как с увеличением содержания Al до 5 или 8% (по массе) склонность к растрескиванию сплавов системы Ti–Al существенно возрастает – особенно при 500°C.

Таблица 2

Длительная прочность и стойкость к растрескиванию  
в контакте с NaCl модельных сплавов системы Ti–Al

Температура испытания, °C	Система сплава	$\sigma_{\text{в}}^t$	$\sigma_{100}^t$	$\sigma_{100\text{NaCl}}^t$	$\sigma_{100\text{NaCl}}^t/\sigma_{100}^t$ , %
		МПа			
400	Ti–3Al	309	294	285	97
	Ti–5Al	442	432	392	91
	Ti–8Al	633	589	275	47
500	Ti–3Al	250	137	128	93
	Ti–5Al	410	226	118	52
	Ti–8Al	530	392	98	25

Как следует из данных табл. 3 и 4, введение по 4% (по массе) Mo и Fe в сплавы, содержащие Al, приводит к ослаблению их склонности к растрескиванию. Легирование титановых сплавов оловом (2 или 4% (по массе)) является неблагоприятным с точки зрения их стойкости к растрескиванию от горячесолевого коррозии при температурах 400 и 500°C.

Особый интерес представляет действие циркония. Введение 4% (по массе) Zr не только не снижает, но даже несколько повышает (сплав на основе Ti–8Al) коррозионную стойкость титановых сплавов при 400°C. В то же время при 500°C чувствительность к растрескиванию тройных сплавов, легированных Zr, значительно выше, чем у бинарных сплавов Ti–Al.

Таблица 3

**Длительная прочность и стойкость к растрескиванию  
в контакте с NaCl модельных сплавов на основе Ti-5Al**

Температура испытания, °С	Система сплава	$\sigma_B^t$	$\sigma_{100}^t$	$\sigma_{100NaCl}^t$	$\sigma_{100NaCl}^t / \sigma_{100}^t, \%$
		МПа			
400	Ti-5Al	442	432	392	91
	Ti-5Al-4Sn	509	461	373	81
	Ti-5Al-4Zr	472	451	402	89
	Ti-5Al-4V	533	530	481	91
	Ti-5Al-4Mo	649	608	549	92
	Ti-5Al-3Cr	649	628	559	89
	Ti-5Al-4Cr	709	667	589	88
	Ti-5Al-4Fe	757	618	559	91
500	Ti-5Al	410	226	118	52
	Ti-5Al-4Sn	459	255	108	42
	Ti-5Al-4Zr	447	314	79	25
	Ti-5Al-4V	516	304	157	52
	Ti-5Al-4Mo	616	392	265	66
	Ti-5Al-3Cr	620	412	245	58
	Ti-5Al-4Cr	622	422	255	60
	Ti-5Al-4Fe	658	363	216	73

Таблица 4

**Длительная прочность и стойкость к растрескиванию  
в контакте с NaCl модельных сплавов на основе Ti-8Al**

Температура испытания, °С	Система сплава	$\sigma_B^t$	$\sigma_{100}^t$	$\sigma_{100NaCl}^t$	$\sigma_{100NaCl}^t / \sigma_{100}^t, \%$
		МПа			
400	Ti-8Al	633	588	275	47
	Ti-8Al-2Sn	678	608	157	23
	Ti-8Al-4Zr	743	736	402	55
	Ti-8Al-4V	829	765	383	50
	Ti-8Al-4Mo	883	824	549	67
	Ti-8Al-3Cr	948	883	530	59
	Ti-8Al-4Cr	961	903	520	58
	Ti-8Al-4Fe	1050	873	579	66
500	Ti-8Al	530	383	98	26
	Ti-8Al-2Sn	599	392	79	20
	Ti-8Al-4Zr	697	559	68	12
	Ti-8Al-4V	755	471	118	25
	Ti-8Al-4Mo	800	589	177	31
	Ti-8Al-3Cr	850	589	147	25
	Ti-8Al-4Fe	927	434	235	54

Согласно полученным данным, введение 3 или 4% (по массе) Cr в Ti-Al сплавы представляется благоприятным с точки зрения ослабления чувствительности к растрескиванию: при 400°С – сплава Ti-8Al, при 500°С – сплава Ti-5Al.

Легирование ванадием в количестве 4% (по массе) практически не влияет на стойкость Ti-Al сплавов к растрескиванию от горячесолевой коррозии в исследованном температурном интервале.

Следует отметить, что введение молибдена, ванадия и железа в количества 4% (по массе) и хрома в количестве 3 или 4% (по массе) благоприятно с точки зрения повышения уровня длительной прочности ( $\sigma'_{100}$  и  $\sigma'_{100\text{NaCl}}$ ) как при 400°C, так и при 500°C по сравнению с бинарными сплавами системы Ti–Al.

На рис. 2 приведено изменение стойкости к растрескиванию в контакте с NaCl сплава ВТ9 в отожженном и термически упрочненном состояниях на базе 100 ч в зависимости от температуры испытаний. Как следует из графика, влияние термообработки неоднозначно и зависит от температуры испытаний. Так, если при температурах 400 и 450°C можно обеспечить более высокую стойкость сплава к растрескиванию, используя отожженное состояние, то при 500°C влияние термической обработки нивелируется. Наконец, при 550°C некоторым, но весьма незначительным преимуществом, не имеющим практического значения, обладает сплав в термически упрочненном состоянии. По-видимому, ослабление влияния термообработки при температурах >450°C связано с активацией процессов диффузии, способствующих распаду метастабильных фаз и развитию процесса коагуляции.

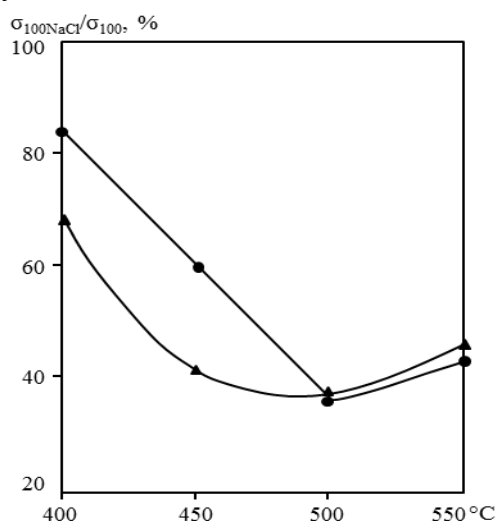


Рис. 2. Изменение стойкости к растрескиванию в контакте с NaCl сплава ВТ9 в отожженном (●) и термически упрочненном состояниях (▲) в зависимости от температуры испытаний (на базе 100 ч)

Некоторое снижение чувствительности сплава к растрескиванию при 550°C связано с изменением характера коррозионных повреждений и развитием относительно равномерной общей коррозии поверхности металла, затрудняющей локальное образование коррозионных трещин.

Существование температурного предела, при котором термическая обработка перестает оказывать влияние на чувствительность сплава к растрескиванию от горячесолевой коррозии, подтверждено и на сплаве ВТ8 (табл. 5).

Таблица 5

**Стойкость сплава ВТ8 с различной микроструктурой к растрескиванию в контакте с NaCl при температуре 500°C**

Тип микроструктуры (ПИ1.2.785.2009)	Термическая обработка	$\sigma'_{100}$	$\sigma'_{100\text{NaCl}}$	$\sigma'_{100\text{NaCl}}/\sigma'_{100}, \%$
		МПа		
2–3	Закалка+старение	520	216	42
	Отжиг	491	216	44
7–9	Закалка+старение	549	167	30
	Отжиг	559	167	30

При температуре испытаний 500°C термическая обработка не оказывает влияния на коррозионную стойкость сплава ВТ8. В то же время обнаружено влияние микроструктуры, размера зерна. Так, крупнозернистая структура 7–9 типов, полученная деформацией из  $\beta$ -области, более склонна к растрескиванию, чем мелкозернистая равноосная структура 2–3 типов, сформированная при деформации из  $(\alpha+\beta)$ -области. Такая закономерность установлена как для отожженного, так и для термоупрочненного состояний. Подобное влияние микроструктуры, размера зерна прослеживается и на сплаве ВТЗ-1 в отожженном состоянии (табл. 6). Как следует из данных таблицы, сплав с крупнозернистой пластинчатой микроструктурой 7–8 типов более чувствителен к растрескиванию, чем с мелкозернистой структурой 5–6 и 1–3 типов. В то же время различия во влиянии на стойкость к растрескиванию от горячесолевого коррозии глобулярно-пластинчатой структуры (5–6 типов) и равноосной (1–3 типов) обнаружено не было.

Таблица 6

Стойкость сплава ВТЗ-1 с различной микроструктурой к растрескиванию в контакте с NaCl

Температура испытания, °С	Тип микроструктуры (ПИ1.2.785.2009)	$\sigma'_{100}$	$\sigma'_{100\text{NaCl}}$	$\sigma'_{100\text{NaCl}}/\sigma'_{100}$ , %
		МПа		
400	7–8	775	589	76
	5–6	775	667	86
	1–3	795	667	84
450	5–6	628	471	74
	1–3	628	451	72

Металлографические исследования показали, что характер развития коррозионных трещин зависит от структуры сплава. В сплавах с мелкозернистой структурой 1–3 типов трещины развиваются, огибая частицы  $\alpha$ -фазы, а местами и рассекая ее. В металле с микроструктурой 5–6 типов наблюдается смешанный характер растрескивания по телу и вдоль границ зерен, а при крупнозернистой структуре 7–9 типов – в основном транскристаллитное разрушение по телу зерна.

а)



б)



Рис. 3. Фрагменты коррозионных трещин в сплаве ВТЗ-1 (в отожженном состоянии) с микроструктурой 1–3 типов (а –  $\times 600$ ) и 7–8 типов (б –  $\times 340$ )

На рис. 3 показан вид коррозионных трещин в сплаве ВТ3-1 с микроструктурой 1–3 и 7–8 типов.

### Заключение

Установлено, что бинарные сплавы системы Ti–Al с содержанием Al до 3% (по массе) обладают низкой чувствительностью к растрескиванию от горячесолевого коррозии. Выявлено, что с увеличением содержания Al в титановых сплавах до 5–8% (по массе) их склонность к растрескиванию возрастает.

Изучено влияние легирующих элементов (Sn, Zr, V, Mo, Cr, Fe) на склонность сплавов на основе Ti–5Al и Ti–8Al к растрескиванию от горячесолевого коррозии. Установлено, что введение по 4% (по массе) Mo и Fe положительно влияет на стойкость к растрескиванию сплавов на основе Ti–5Al и Ti–8Al при температурах испытания 400 и 500°C. Обнаружено, что введение Sn (2 или 4% (по массе)) приводит к повышению чувствительности сплавов на основе Ti–5Al и Ti–8Al к растрескиванию от горячесолевого коррозии при температурах 400 и 500°C. Показано, что легирование Zr в количестве 4% (по массе) не влияет (сплав Ti–5Al) или даже несколько повышает (сплав Ti–8Al) стойкость к растрескиванию при 400°C и существенно снижает ее при 500°C. Выявлено, что введение 3 или 4% (по массе) Cr благоприятно с точки зрения повышения стойкости к растрескиванию при 400°C (сплав Ti–8Al) и 500°C (сплав Ti–5Al). Обнаружено, что легирование V в количестве 4% (по массе) не оказывает влияния на коррозионную стойкость изученных композиций при температурах 400 и 500°C. Показано, что введение Mo, Fe, Cr и V в исследованных концентрациях благоприятно с точки зрения повышения уровня длительной прочности ( $\sigma_{100}^t$  и  $\sigma_{100\text{NaCl}}^t$ ) по сравнению с бинарными Ti–Al сплавами как при 400°C, так и при 500°C.

Установлено, что подбор режимов термообработки может стать одним из путей повышения стойкости титановых сплавов к растрескиванию от горячесолевого коррозии при температурах 400 и 450°C. Показано, что при температуре  $\geq 500^\circ\text{C}$  вид термообработки не оказывает существенного влияния на стойкость исследованных сплавов к растрескиванию от горячесолевого коррозии.

Обнаружено, что мелкозернистая равноосная структура 1–3 типов и глобулярно-пластинчатая структура 5–6 типов обеспечивают более высокую стойкость титановых сплавов к растрескиванию от горячесолевого коррозии, чем крупнозернистая структура 7–9 типов. Выявлено, что характер развития коррозионных трещин зависит от типа микроструктуры и размера зерна титановых сплавов.

### 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. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
3. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 157–167.
4. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S1. С. 3–9.
5. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по титановым сплавам для «Бурана» и перспективные направления их развития // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S1. С. 10–14.

6. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблема 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: 26.05.2016).
7. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.05.2016).
8. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
9. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1976. 448 с.
10. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова А.А. Механические свойства титана и его сплавов. М.: Металлургия, 1974. 543 с.
11. Горынин И.В., Ушаков С.С., Хатунцев А.Н., Лошакова И.Л. Титановые сплавы для морской техники. СПб.: Политехника, 2007. 387 с.
12. Синявский С.В. Сопротивление титановых сплавов различным видам коррозионного растрескивания // Технология легких сплавов. 2010. №4. С. 80–85.
13. Li S.Q., Lei J.F., Liu Y.-Y., Yu B.-X., Li Y.-L., Yang R. Fushi Kexue yu Fandhu Jishu. Hot-salt stress corrosion of titanium alloys of Ti811 and TC4 // Corros. Sci. And Prol. Tehnol. 2010. V. 22. N2. P. 79–84.
14. Xiong Y., Zhu S., Wang F. Synergistic corrosion behavior of coated Ti60 alloys with NaCl deposit in moist air at elevated temperature // Corros. Sci. 2008. V. 50. P. 15–22.
15. Ulrich Zwicker. Titan und Titanlegierungen. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg. New York, 1974. 512 p.
16. Металлографический анализ титановых сплавов: ПИ1.2.785.2009. М.: ВИАМ, 2009. 45 с.
17. Захарова Л.В. Влияние кислорода воздуха и толщины солевых отложений на коррозионное растрескивание титановых сплавов при высоких температурах в контакте с NaCl // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №10. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.05.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-12-12.
18. ГОСТ 10145–81. Металлы. Метод испытания на длительную прочность. М: Изд-во стандартов, 1981. 7 с.