



УДК 621.793:620.193.27

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-2-2

**АНОДНО-ОКСИДНОЕ ПОКРЫТИЕ – ЗАЩИТА
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ОТ ГОРЯЧЕСОЛЕВОЙ
КОРРОЗИИ**

Л.В. Захарова

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Л.В. Захарова¹

АНОДНО-ОКСИДНОЕ ПОКРЫТИЕ – ЗАЩИТА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ОТ ГОРЯЧЕСОЛЕВОЙ КОРРОЗИИ

Титановые сплавы широко применяются в изделиях авиационной техники, длительно работающей во всеклиматических, в том числе и морских условиях, где возможно осаждение на их поверхности морской соли, способной при повышенных температурах ($\geq 250^\circ\text{C}$) вызывать горячесолевую коррозию, сопровождаемую охрупчиванием поверхности титана.

Принимая во внимание потенциальную опасность горячесолевой коррозии для высоконагруженных деталей из титановых сплавов, эксплуатирующихся в условиях морского климата при температурах $> 250^\circ\text{C}$, представляет интерес выявить покрытия, способные обеспечить их защиту от влияния солевых отложений.

В данной работе показана возможность защиты поверхности титановых сплавов с помощью анодно-оксидного покрытия толщиной 10–15 мкм от воздействия отложений NaCl (основного компонента морской соли) при температурах до 500°C , растягивающих напряжениях и знакопеременных нагрузках.

Ключевые слова: *титановые сплавы, анодное оксидирование, горячесолевая коррозия, солевые отложения, охрупчивание, длительная прочность, многоцикловая усталость.*

L. V. Zakharova

ANODIC OXIDE COATING – PROTECTION OF TITANIUM ALLOYS AGAINST HOT SALT CORROSION

Titanium alloys are widely applied in products of aviation engineering operating during long term in all climates including sea climate conditions, where deposition of sea salt on their surface can cause hot salt corrosion at elevated temperatures ($\geq 250^\circ\text{C}$) accompanied with titanium surface embrittlement.

Taking into account the potential danger of hot salt corrosion for high-loaded parts from titanium alloys operating in sea climate conditions at temperatures $\geq 250^\circ\text{C}$, the opportunity of identifying of coatings able to protect such parts from the influence of salt deposits seems to be of interest.

This paper shows the possibility of protection of the surface of titanium alloys by anodic oxide coating of 10–15 μm in thickness against the impact of NaCl deposits (the main component of sea salt) at temperatures under 500°C, tensile stress and alternating loads.

Keywords: titanium alloys, anodic oxidation, hot salt corrosion, salt deposits, embrittlement, long-term strength, high-cycle fatigue.

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

Титановые сплавы применяются в изделиях авиационной техники с высоким ресурсом эксплуатации [1–6], длительно работающих во всеклиматических, в том числе и морских условиях, где возможно образование на их поверхности отложений морской соли.

На рис. 1 показан налет соли на поверхности лопаток двигателя, эксплуатировавшегося в морских условиях короткое время (~15 ч).



Рисунок 1. Титановые лопатки компрессора ГТД с солевыми отложениями

Известно, что контакт с NaCl, основным компонентом морской соли, при повышенных температурах ($\geq 250^\circ\text{C}$) способен вызывать горячесолевую коррозию титановых сплавов, сопровождаемую охрупчиванием, в результате чего при одновременном воздействии растягивающих или знакопеременных напряжений их прочность и долговечность могут существенно снижаться [7–13].

Принимая во внимание потенциальную опасность горячесолевой коррозии для деталей из титановых сплавов, эксплуатирующихся во всеклиматических условиях при температурах $>250^\circ\text{C}$, проводится поиск обработок поверхности, эффективно защища-

ющих титановые сплавы от горячесолевой коррозии и не снижающих механические свойства титановых сплавов [8, 14, 15].

В данной работе показана возможность защиты титановых деталей с помощью анодно-оксидного покрытия толщиной 10–15 мкм от воздействия отложений NaCl при температурах до 500°C, растягивающих напряжениях и знакопеременных нагрузках.

Толщина солевых отложений может быть различной в зависимости от условий и длительности эксплуатации. При отработке методики испытаний на горячесолевую коррозию установлено [16], что наибольшей агрессивностью обладают отложения NaCl толщиной ~50 мкм. В связи с этим все дальнейшие исследования проводили с отложениями NaCl указанной толщины, что обеспечивало сравнимые и наиболее жесткие условия испытаний.

При испытаниях на горячесолевую коррозию степень коррозионного воздействия зависит не только от толщины солевых отложений, но и от температуры, длительности испытаний и уровня приложенных напряжений. Для того чтобы учесть влияние вышеперечисленных факторов, стойкость титановых сплавов к растрескиванию от горячесолевой коррозии под напряжением оценивали с помощью служебных характеристик, таких как длительная прочность и многоцикловая усталость.

Материалы и методы

Для изготовления образцов использовали горячекатаные прутки титановых сплавов марок ВТ3-1, ВТ8М, ВТ8М-1, ВТ9, ВТ18У и ВТ25У в отожженном состоянии.

Испытания на длительную прочность проводили при температуре 450°C на сплавах ВТ3-1 и ВТ8М-1 (на базе 100 ч) и ВТ8М (на базе 100, 500 и 1000 ч), а также при температуре 500°C на сплавах ВТ18У (на базе 100 ч) и ВТ25У (на базе 100 и 500 ч) при статическом приложении растягивающих напряжений в соответствии с требованиями ГОСТ 10145 на гладких цилиндрических образцах с помощью испытательной машины ZST 2/3 – ВИЭТ.

Испытания на многоцикловую усталость (МнЦУ) проводили при температурах 450°C (сплав ВТ3-1) и 500°C (сплавы ВТ18У и ВТ25У) в условиях чистого изгиба с вращением с частотой 50 Гц на базе $2 \cdot 10^7$ циклов в соответствии с требованиями ГОСТ 25502 на тороидальных образцах с помощью испытательной машины МВИ-611М.

Создание на рабочей поверхности образцов солевого налета толщиной ~50 мкм осуществляли 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. Эту операцию повторяли до получения солевых отложений требуемой толщины, которую измеряли микрометром на контрольных образцах.

На рис. 2 показан образец для испытаний на длительную прочность с солевым налетом. Визуально-оптические исследования состояния поверхности и изломов образцов после испытаний проводили с помощью бинокулярного микроскопа МБС-2 и микроскопа «Неофот».



Рисунок 2. Образец с солевыми отложениями ($\delta_{\text{NaCl}}=45\text{--}50$ мкм) для испытаний на длительную прочность

Процесс анодного оксидирования образцов титановых сплавов выполняли в кислотном растворе в импульсном режиме при напряжении выше начала искрения. Толщина покрытия составляла 10–15 мкм. Данное анодно-оксидное покрытие толщиной до 15 мкм не оказывает влияния на чистоту поверхности и механические свойства (σ_b , δ , ψ) обработанной титановой детали. Микротвердость покрытия превышает микротвердость основы более чем в 1,5 раза и составляет 6600–6700 МПа. Цвет покрытия – от светло-серого до серого в зависимости от сплава.

В данной работе исследовали влияние длительных высокотемпературных выдержек на структуру и фазовый состав анодно-оксидного покрытия. Для этого образцы из сплавов ВТ8М и ВТ25У, изготовленные в виде шайб толщиной 2 мм и $\varnothing 23$ мм, с анодно-оксидным покрытием подвергали длительным высокотемпературным нагревам: из сплава ВТ8М при 450°C – до 2000 ч, из сплава ВТ25У при 500°C – до 1000 ч в термостате марки СНОЛ-1,6.2,5.1/9-ИЗ.

Рентгенофазовый анализ состава анодно-оксидного покрытия осуществляли при съемке монолитного образца на дифрактометре ДРОН-3 с монохроматическим $\text{Cu } K_\alpha$ -излучением.

Электронно-микроскопические исследования строения анодно-оксидного покрытия выполняли на электронном микроскопе GSM-350F.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 показаны значения пределов длительной прочности, полученные при испытаниях образцов из титановых сплавов без покрытия и с анодно-оксидным покрытием в исходном состоянии и с солевыми отложениями.

Как следует из приведенных результатов, наличие солевых отложений на поверхности титановых образцов без покрытия существенно снижает их длительную прочность в заданных условиях. В то же время, согласно полученным данным, анодно-оксидное покрытие не только не снижает длительную прочность титановых сплавов, но и обеспечивает практически стопроцентную (95–100%) защиту их от горячесолевого коррозии в заданных условиях.

Таблица 1

Эффективность анодно-оксидного покрытия в качестве защиты титановых сплавов от горячесолевого коррозии при испытании на длительную прочность

Сплав	Температура испытания, °С	Длительность испытания, ч	Длительная прочность, МПа, для образцов			
			без покрытия		с покрытием	
			без соли	в контакте с NaCl	без соли	в контакте с NaCl
BT3-1	450	100	550	390	>555	550
BT8M	450	100	640	540	–	640
		500	590	325	>605	590
		1000	550	265	–	550
BT8M-1	450	100	685	550	–	685
BT9	500	100	600	195	–	570
BT18Y	500	100	600	165	–	590
BT25Y	500	100	685	165	–	665
		500	570	130	–	550

На рис. 3 представлены фрагменты поверхности образцов из сплава BT8M-1 без покрытия после испытания на длительную прочность при температуре 450°C без солевых отложений и в контакте с NaCl. Изломы вышеуказанных образцов из сплава BT8M-1 приведены на рис. 4. Видно, что образец с солевым налетом имеет хрупкий характер разрушения и вся поверхность покрыта многочисленными трещинами в отличие от контрольного образца. В изломе образца, испытанного в контакте с NaCl, наблюдается окисленная приповерхностная трещина, приведшая к его преждевременному разрушению.

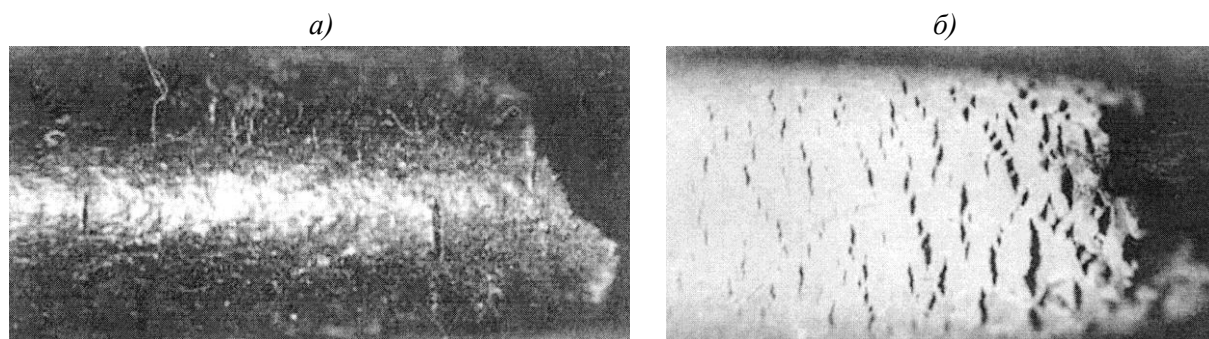


Рисунок 3. Фрагменты поверхности образцов из сплава BT8M-1 после испытания на длительную прочность при 450°C:

а – без покрытия ($\sigma=685$ МПа, $\tau=104$ ч); *б* – без покрытия+NaCl ($\sigma=590$ МПа, $\tau=33$ ч)

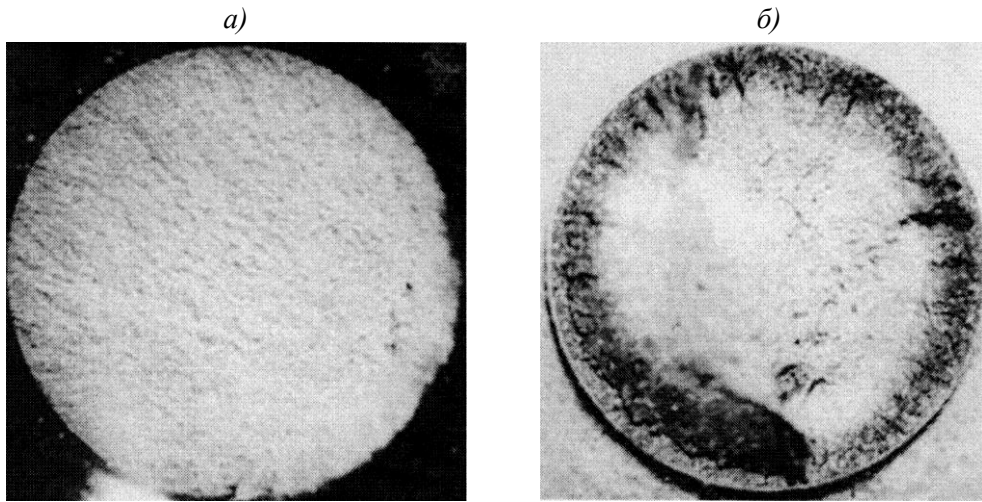


Рисунок 4. Изломы образцов из сплава ВТ8М-1 после испытания на длительную прочность при 450°С:

а – без покрытия ($\sigma=685$ МПа, $\tau=104$ ч); *б* – без покрытия+NaCl ($\sigma=590$ МПа, $\tau=33$ ч)

На рис. 5 и 6 показан вид образцов из сплавов ВТ8М-1 и ВТ25У без покрытия и с анодно-оксидным покрытием после испытаний на длительную прочность без солевых отложений и в контакте с NaCl. Хрупкий характер разрушения образцов без покрытия, испытанных в контакте с NaCl, существенно отличается от более пластичного разрушения контрольных образцов. Образцы с анодно-оксидным покрытием, испытанные в контакте с NaCl в идентичных условиях, не разрушены, нарушений анодной пленки и коррозионных повреждений на их поверхности не наблюдается.

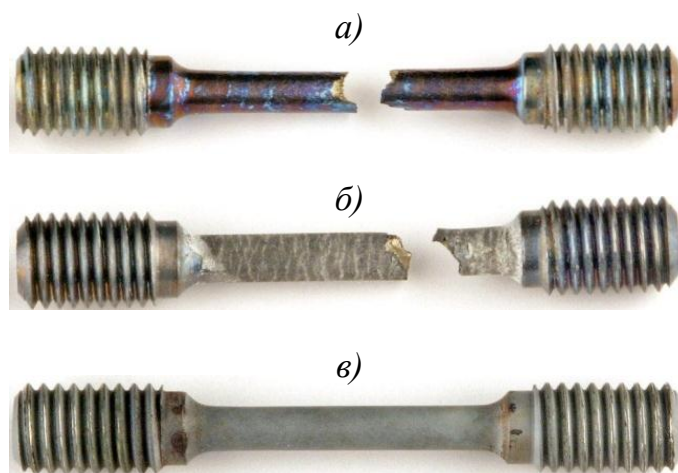


Рисунок 5. Вид образцов из сплава ВТ8М-1 после испытаний на длительную прочность при 450°С:

а – без покрытия ($\sigma=685$ МПа, $\tau=104$ ч); *б* – без покрытия+NaCl ($\sigma=590$ МПа, $\tau=33$ ч); *в* – с анодно-оксидным покрытием+NaCl ($\sigma=665$ МПа, $\tau>193$ ч)

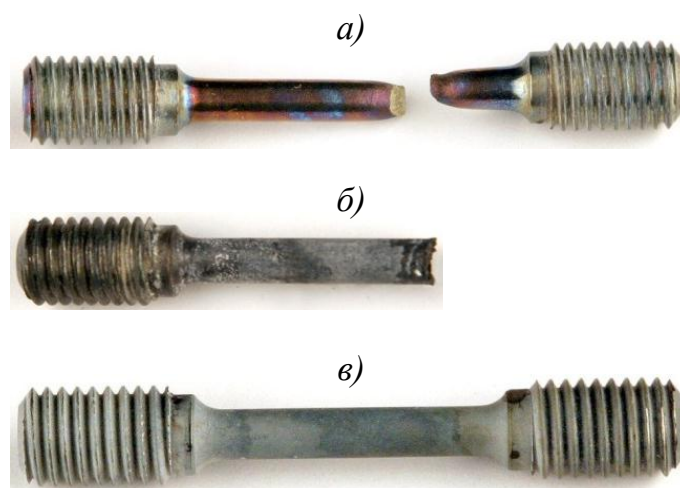


Рисунок 6. Вид образцов из сплава ВТ25У после испытаний на длительную прочность при 500°С:

a – без покрытия ($\sigma=685$ МПа, $\tau=190$ ч); *б* – без покрытия+NaCl ($\sigma=165$ МПа, $\tau=128$ ч); *в* – с анодно-оксидным покрытием+NaCl ($\sigma=665$ МПа, $\tau>169$ ч)

В табл. 2 приведены значения МнЦУ (σ_{-1}^t), полученные при испытаниях образцов из титановых сплавов без покрытия и с анодно-оксидным покрытием без солевых отложений и в контакте с NaCl. Согласно полученным данным, в условиях МнЦУ анодно-оксидное покрытие обеспечивает 95%-ное сохранение предела выносливости при температуре 450°С и 80%-ное – при температуре 500°С, существенно превышая значения σ_{-1}^t образцов с солевыми отложениями без покрытия.

Таблица 2

Эффективность анодно-оксидного покрытия в качестве защиты титановых сплавов от горячесолевой коррозии в условиях МнЦУ

Сплав	Температура испытания, °С	Наличие солевых отложений	Покрытие	МнЦУ: σ_{-1} , МПа, на базе $2 \cdot 10^7$ циклов
ВТ3-1	450	-	–	410
		+	–	135
		+	Ан. Окс.	390
ВТ18У	500	-	–	410
		+	–	79
		+	Ан. Окс.	335
ВТ25У	500	-	–	570
		+	–	155
		-	Ан. Окс.	570
		+	Ан. Окс.	450

На рис. 7 представлены образцы из сплава ВТ25У после испытаний на МнЦУ. Визуально-оптические исследования образцов после усталостных испытаний в контакте с NaCl показали, что на поверхности незащищенных образцов имеются продукты

коррозии черного цвета, под которыми обнаружены пятна, питтинги и язвы. Установлено также, что в изломах образцов без покрытия, испытанных с солевыми отложениями и имевших на поверхности коррозионные повреждения, обнаруживается большее количество очагов зарождения усталостных трещин, чем у контрольных образцов. Это, очевидно, является причиной снижения пределов выносливости и преждевременного разрушения образцов под влиянием NaCl. В то же время показано, что поверхность образцов с анодно-оксидным покрытием, испытанных в контакте с NaCl, повреждений не имела.

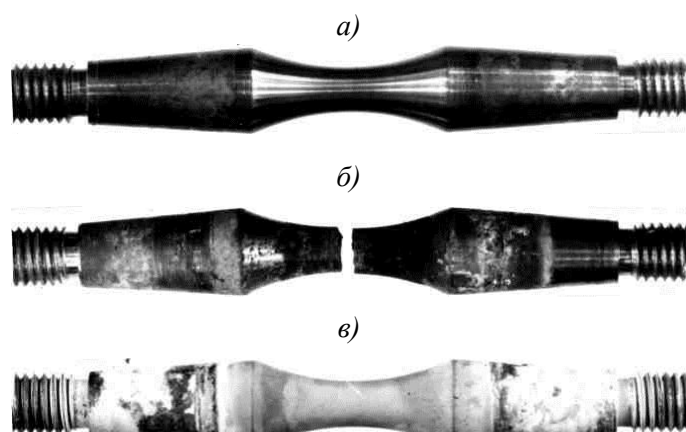


Рисунок 7. Вид образцов из сплава ВТ25У после испытаний на МнЦУ при 500°C:
а – без покрытия ($\sigma=510$ МПа, $N>29880000$ цикл); б – без покрытия+NaCl ($\sigma=195$ МПа, $N=12640000$ цикл); в – с анодно-оксидным покрытием+NaCl ($\sigma=410$ МПа, $N>25122000$ цикл)

Электронно-микроскопическими исследованиями выявлено, что поверхность анодно-оксидного покрытия развитая и имеет ячеистую структуру (рис. 8). Покрытие пористое, но поры замкнуты в объеме покрытия и не достигают поверхности металла. Диаметр пор – от 100 до 500 нм. Рентгенофазовый анализ показал, что анодно-оксидное покрытие, независимо от материала подложки, состоит из анатаза с небольшим количеством рутила ($A \gg P$).

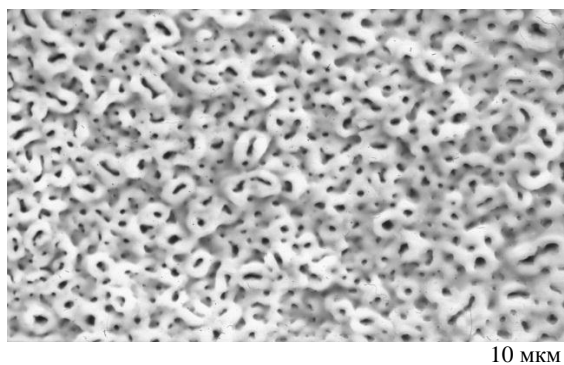


Рисунок 8. Микроструктура ($\times 1000$) поверхности анодно-оксидного покрытия

Установлено также, что состав и структура покрытия не претерпевают заметных изменений по сравнению с исходными при длительных высокотемпературных выдержках образцов из сплава ВТ8М-1 при температуре 450°С в течение 2000 ч и из сплава ВТ25У при температуре 500°С в течение 1000 ч.

Заключение

Показано, что под влиянием солевых отложений на поверхности образцов образуются продукты коррозии и коррозионные повреждения, в результате чего значения длительной прочности и МнЦУ титановых сплавов существенно снижаются.

Установлено, что анодно-оксидное покрытие толщиной 10–15 мкм является эффективной защитой титановых сплавов от горячесолевой коррозии до температуры 500°С при статическом и знакопеременном нагружении.

Выявлено, что анодно-оксидное покрытие имеет ячеистую структуру с диаметром пор от 100 до 500 нм и состоит из анатаза с небольшим количеством рутила (А>>Р).

Обнаружено, что состав и структура покрытия не претерпевают заметных изменений по сравнению с исходным состоянием при длительных высокотемпературных выдержках образцов из сплава ВТ8М-1 при температуре 450°С в течение 2000 ч и из сплава ВТ25У при температуре 500°С в течение 1000 ч.

Работа выполнялась под руководством к.т.н. Л.Н. Пивоваровой.

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. С. 3–33.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
4. 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.

5. 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. 2013. №3. Ст. 02 (viam-works.ru).
6. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 04 (viam-works.ru).
7. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия. 1976. 448 с.
8. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова А.А. Механические свойства титана и его сплавов. М.: Металлургия. 1974, 543 с.
9. Горынин И.В., Ушаков С.С., Хатунцев А.Н., Лошакова И.Л. Титановые сплавы для морской техники. СПб.: Политехника. 2007. 387 с.
10. Синявский С.В. Сопротивление титановых сплавов различным видам коррозионного растрескивания //Технология легких сплавов. 2010. №4. С. 80–85.
11. 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. №2. P. 79–84.
12. 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.
13. Ulrich Zwicker. Titan und Titanlegierungen. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg. New York. 1974. 512 с.
14. Bacos M.-P., Thomas M., Raviart J.-L., Morel A., Mercier S., Josso P. Influence of an oxidation protective coating upon hot corrosion and mechanical behavior of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy //Intermetallics. 2011. V. 19. №8. P. 1120–1129.
15. Yingun Hua, Yuchuan Bai, Yunxia Ye, Qing Xue, Haixie Liu, Ruifang Chen, Kangmin Chen. Hot corrosion behavior of TC11 titanium alloy treated by laser shock processing //Applied Surface Science. 2013. V. 283. №15. P. 775–780.
16. Захарова Л.В. Влияние кислорода воздуха и толщины солевых отложений на коррозионное растрескивание титановых сплавов при высоких температурах в контакте с NaCl //Труды ВИАМ. 2014. №10. Ст. 12 (viam-works.ru).

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 go-

- da» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1. S. 3–33.
2. Kablov E.N. Sovremennyye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials – basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.
 3. Kablov E.N. Materialy dlja izdelija «Buran» – innovacionnye reshenija formirovaniya shestogo tehnologicheskogo uklada [Materials for the product «Buran» – innovative solutions of forming of the sixth technological way] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 3–9.
 4. Horev A.I. Fundamental'nye i prikladnye raboty po titanovym splavam dlja «Burana» i perspektivnye napravlenija ih razvitija [Fundamental and applied works on titanium alloys for «Buran» and the perspective directions of their development] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 10–14.
 5. Kashapov O.S., Novak A.V., Nochovnaja N.A., Pavlova T.V. Sostojanie, problemy i perspektivy sozdaniya zharoprochnyh titanovyh splavov dlja detalej GTD [Condition, problems and perspectives of creation of heat resisting titanium alloys for GTD details] //Trudy VIAM. 2013. №3. St. 02 (viam-works.ru).
 6. Horev A.I. Fundamental'nye i prikladnye raboty po konstrukcionnym titanovym splavam i perspektivnye napravlenija ih razvitija [Fundamental and applied works on structural titanium alloys and perspective directions of their development] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 04 (viam-works.ru).
 7. Solonina O.P., Glazunov S.G. Titanovye splavy. Zharoprochnye titanovye splavy [Titanium alloys. Heat resisting titanium alloys]. M.: Metallurgija. 1976. 448 s.
 8. Kolachev B.A., Livanov V.A., Buhanova A.A. Mehanicheskie svoystva titana i ego splavov [Mechanical properties of titanium and its alloys]. M.: Metallurgija. 1974, 543 s.
 9. Gorynin I.V., Ushakov S.S., Hatuncev A.N., Loshakova I.L. Titanovye splavy dlja morskoy tehniki [Titanium alloys for sea equipment]. SPb.: Politehnika. 2007. 387 s.
 10. Sinjavskij S.V. Soprotivlenie titanovyh splavov razlichnym vidam korrozionnogo rastreskivaniya [Resistance of titanium alloys to different types of corrosion cracking] //Tehnologija legkih splavov. 2010. №4. S. 80–85.

11. 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. №2. P. 79–84.
12. 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.
13. Ulrich Zwicker. Titan und Titanlegierungen. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg. New York. 1974. 512 c.
14. Bacos M.-P., Thomas M., Raviart J.-L., Morel A., Mercier S., Josso P. Influence of an oxidation protective coating upon hot corrosion and mechanical behavior of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy //Intermetallics. 2011. V. 19. №8. P. 1120–1129.
15. Yingun Hua, Yuchuan Bai, Yunxia Ye, Qing Xue, Haixie Liu, Ruifang Chen, Kangmin Chen. Hot corrosion behavior of TC11 titanium alloy treated by laser shock processing //Applied Surface Science. 2013. V. 283. №15. P. 775–780.
16. Zaharova L.V. Vliyanie kisloroda vozduha i tolshhiny solevyh otlozhenij na korrozionnoe rastreskivanie titanovyh splavov pri vysokih temperaturah v kontakte s NaCl [Influence of oxygen of air and thickness of salt deposits on corrosion cracking of titanium alloys at high temperatures in contact with NaCl] //Trudy VIAM. 2014. №10. St. 12 (viam-works.ru).