



УДК 620.194.22:669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-12-12

**ВЛИЯНИЕ КИСЛОРОДА ВОЗДУХА И ТОЛЩИНЫ
СОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА КОРРОЗИОННОЕ
РАСТРЕСКИВАНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ
ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В КОНТАКТЕ С NaCl**

Л.В. Захарова

Октябрь 2014

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. Захарова*¹

ВЛИЯНИЕ КИСЛОРОДА ВОЗДУХА И ТОЛЩИНЫ СОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В КОНТАКТЕ С NaCl

Титановые сплавы находят широкое применение в авиационной технике, эксплуатирующейся во всеклиматических условиях, где возможно отложение на их поверхности морской соли, вызывающей при повышенных температурах ($\geq 250^\circ\text{C}$) горячесолевою коррозию. Влияние толщины солевых отложений на коррозионное растрескивание титановых сплавов в условиях повышенных температур и растягивающих или знакопеременных нагрузок, а также роль кислорода воздуха в процессе горячесолевого коррозии изучено в данной работе.

В результате проведенных исследований установлено, что кислород воздуха принимает активное участие в процессе горячесолевого коррозии и основной составляющей твердых продуктов коррозии является TiO_2 . Показано, что толщина солевых отложений оказывает влияние на стойкость титановых сплавов к растрескиванию при высоких температурах под напряжением и наибольшей агрессивностью обладают солевые слои толщиной ~ 50 мкм.

Ключевые слова: *титановые сплавы, горячесолевого коррозии, солевые отложения, охрупчивание, коррозионное растрескивание, окисление, долговечность.*

L.V. Zakharova

INFLUENCE OF AIR OXYGEN AND THICKNESS OF SALT DEPOSITS ON CORROSION CRACKING OF TITANIUM ALLOYS AT HIGH TEMPERATURES IN CONTACT WITH NaCl

Titanium alloys find a wide application in aircraft equipment operating in all-climatic conditions, where a sea salt deposition on their surface causing hot salt corrosion at raised temperatures ($\geq 250^\circ\text{C}$) is possible. An influence of salt deposits thickness on corrosion cracking of titanium alloys under conditions of raised temperatures and stretching or alternating loads and also a role of air oxygen in the course of hot salt corrosion was studied in this work.

As a result of the conducted researches it was established that oxygen of air takes an active part in the process of hot salt corrosion and the main component of hard products of corrosion is TiO_2 . It was shown that thickness of salt deposits has an impact on cracking resistance of titanium alloys at high temperatures under loads and salt layers of ~ 50 microns of thickness have the highest aggression.

Keywords: *titanium alloys, hot salt corrosion, salt deposits, embrittlement, corrosion cracking, oxidation, durability.*

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 широко применяются при изготовлении деталей и узлов авиационной техники [1–9], эксплуатирующейся во всеклиматических, в том числе морских, условиях, где возможно образование на их поверхности отложений морской соли, в связи с чем проблема горячесолевого коррозии титановых сплавов в контакте с NaCl (основным компонентом морской соли) является весьма актуальной и привлекает внимание исследователей [10–16].

Горячесолевая коррозия проявляется в том, что в местах контакта с соевым налетом при повышенных температурах ($\geq 250^\circ\text{C}$) на поверхности титановых сплавов появляются коррозионные поражения в виде питтингов и язв, сопровождающиеся охрупчиванием, что при одновременном приложении растягивающих напряжений может стать источником возникновения коррозионных трещин. Постепенно развиваясь в глубь металла, такие трещины способны привести к его преждевременному разрушению.

Толщина слоя соли, образующегося в естественных условиях, может быть различной, поэтому важно исследовать влияние данного фактора на процесс коррозионного растрескивания. Сведения по этому вопросу, имеющиеся в зарубежной литературе, противоречивы.

Влияние толщины соевых отложений на коррозионную стойкость титановых сплавов в условиях повышенных температур и растягивающих или знакопеременных нагрузок, а также роль кислорода воздуха в процессе коррозионного растрескивания изучено в данной работе.

Материалы и методы

Коррозионные испытания при статическом приложении растягивающих напряжений осуществляли на установках и образцах, предназначенных для испытаний на длительную прочность.

Изучение влияния толщины соевых отложений (δ_{NaCl}) проводили на образцах, изготовленных из листа сплава VT5-1 толщиной 1,2 мм в состоянии поставки, при температуре 400°C и напряжении 390 МПа ($\sigma_{\text{в}}^{400^\circ} = 550$ МПа), определяя долговечность (время до разрушения) образцов с соевыми отложениями различной толщины (≤ 10 ; 30; 50; ≥ 100 мкм).

Для выявления корреляции между степенью засоленности поверхности титановых сплавов и их чувствительностью к растрескиванию при различных температурах и длительности испытаний определяли пределы длительной прочности ($\sigma_{\text{т}}^t$) на базе 100 и 500

ч для титановых сплавов ВТ25У и ВТ18У – при температурах 400, 500, 550°С и сплава ВТ8М – при температуре 450°С с солевыми отложениями толщиной 5–7, 15–20 и 50 мкм.

Далее рассчитывали коэффициент, который представляет собой отношение

$$K'_{\text{тNaCl}} = \sigma'_{\text{тNaCl}_x} / \sigma'_{\text{тNaCl}_{50}},$$

где NaCl_{50} – солевые отложения толщиной ~50 мкм; NaCl_x – солевые отложения толщиной 15–20 и 5–7 мкм.

Коррозионные испытания при знакопеременном нагружении выполняли на образцах и установках, предназначенных для испытаний на многоцикловую усталость в условиях чистого изгиба с вращением с частотой 50 Гц при температуре 500°С. Определяли пределы усталости на базе $2 \cdot 10^7$ циклов ($\sigma_{-1}^{500^\circ}$) для образцов из сплава ВТ25У с различной толщиной солевых отложений (5–7, 15–20 и 50 мкм).

Солевой налет различной толщины на рабочей поверхности образцов создавали послойным пневматическим напылением насыщенного водного раствора NaCl (ч.д.а.) при помощи пульверизатора и с последующей сушкой при температуре 105°С в течение 15–20 мин. Эти операции повторяли до получения требуемой толщины солевых отложений. Толщину солевого налета $\delta_{\text{NaCl}} \geq 30$ мкм измеряли микрометром на контрольных образцах. Чтобы получить солевое отложение толщиной $\delta_{\text{NaCl}} < 30$ мкм, предварительно по массе слоев соли толщиной 30, 50 и 100 мкм рассчитали массу слоя соли толщиной 1 мкм на 1 см² поверхности, которая составила 1 мг. Далее рассчитывали привес NaCl, необходимый для получения солевого налета заданной толщины, и наносили его, периодически взвешивая образцы.

Для изучения роли кислорода воздуха в процессе коррозионного растрескивания в контакте с NaCl проведены испытания на специальных полых образцах из сплава ВТ20.

Коррозионная среда наносилась пульверизатором на стенки полости (в виде налета соли) или ей заполняли всю полость (в виде кристаллического NaCl), затрудняя доступ воздуха к внутренней поверхности образцов. В последнем случае отверстия в образцах закрывали пробками с резьбой.

Внутреннее пространство части образцов с солевым налетом заполняли аргоном (ГОСТ 10157) с избыточным давлением 0,05 ат (0,005 МПа). Герметизацию образцов, заполненных аргоном, выполняли в камере аргоно-дуговой сварки путем заваривания пробок, закрывающих отверстия в образцах.

В ходе коррозионных испытаний определяли долговечность образцов, подвергающихся воздействию среды различного состава при температуре 350°C и растягивающем напряжении 630 МПа ($\sigma_b^{350^\circ} = 690$ МПа).

По окончании испытаний исследовали состояние наружной и внутренней поверхностей образцов, для чего образцы, не разрушенные при коррозионных испытаниях, разрезали вдоль оси.

Исследование состояния поверхности и изломов образцов после высокотемпературных коррозионных испытаний проводили оптико-визуальным методом с помощью бинокулярного микроскопа МБС-2.

Рентгенофазовый анализ продуктов коррозии осуществляли при съемке с «монолита» на дифрактометре ДРОН-3 с монохроматическим $\text{Cu } K_\alpha$ -излучением.

Результаты и обсуждение

Результаты коррозионных испытаний сплава ВТ5-1 в контакте с соевыми отложениями различной толщины представлены на рис. 1, на котором видно, что наибольшая чувствительность сплава к растрескиванию наблюдается при толщине солевого налета ~50 мкм, тогда как тонкие ($\delta_{\text{NaCl}} \leq 10$ мкм) и толстые ($\delta_{\text{NaCl}} \geq 100$ мкм) соевые отложения в меньшей степени способствуют коррозионному растрескиванию титановых сплавов.

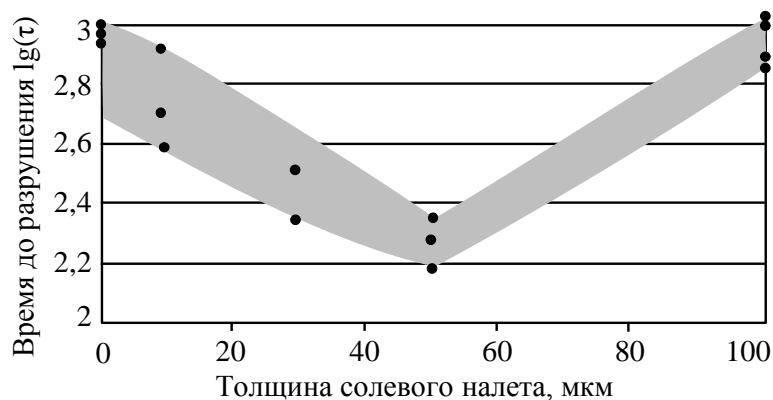


Рисунок 1. Время до разрушения образцов из сплава ВТ5-1 в зависимости от толщины солевого налета при температуре 400°C и напряжении 390 МПа

Оптико-визуальные исследования состояния поверхности образцов, прошедших коррозионные испытания, выявили, что воздействие соли начинается с возникновения на поверхности вокруг соевых кристаллов пятен округлой формы, соответствующих по цвету более толстой оксидной пленке, чем пленка, образующаяся в местах, не покрытых солью (рис. 2).

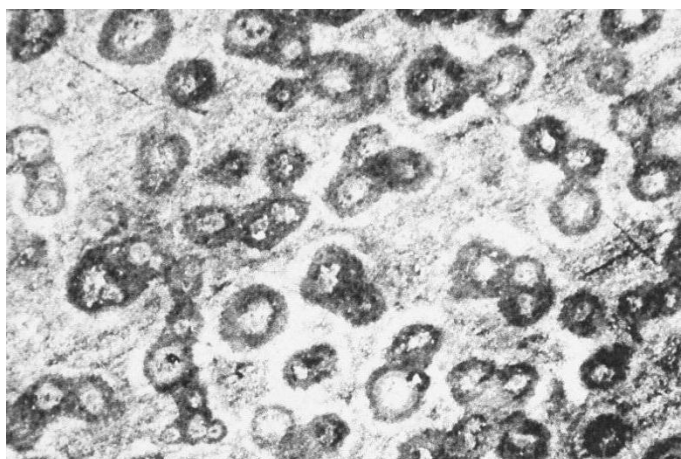


Рисунок 2. Повышенная окисляемость поверхности титанового сплава BT5-1 вокруг кристаллов NaCl при температуре 400°C ($\times 20$)

Это явление «пятнистости» свидетельствует об активном участии кислорода воздуха в реакции взаимодействия титана и NaCl, причем процесс окисления в присутствии соли идет более интенсивно.

Рентгеноструктурный анализ твердых продуктов коррозии, образующихся на титановых сплавах в контакте с солью, показал, что TiO_2 является их основной составляющей, следовательно, кислород воздуха должен принимать участие в реакции взаимодействия титана с NaCl.

Слабая склонность сплава к воздействию NaCl, нанесенного на поверхность образцов в виде толстой солевой корки, по-видимому, связана с тем, что при этом затрудняется доступ воздуха к поверхности образца.

Невысокая чувствительность титановых сплавов к воздействию тонкого солевого налета объясняется, вероятно, беспрепятственным удалением с поверхности металла газообразных продуктов солевой коррозии (водорода, хлористого водорода или хлора), которые, как предполагают, вызывают охрупчивание титановых сплавов или способствуют ему [17].

Влияние температуры и длительности испытаний на агрессивность солевых отложений различной толщины и их способность вызывать растрескивание титановых сплавов при статическом приложении растягивающих напряжений показано в табл. 1 в виде изменения коэффициента $K'_{\tau, NaCl}$ в зависимости от условий испытаний сплавов BT8M, BT25Y и BT18Y.

Таблица 1

Зависимость коэффициента $K_{\tau\text{NaCl}}^t$ от толщины солевых отложений, температуры и длительности испытаний сплавов ВТ25У, ВТ18У и ВТ8М

Температура, °С	Сплав	Значения коэффициента $K_{\tau\text{NaCl}}^t$ при толщине солевого налета δ_{NaCl} , мкм			
		15–20*		5–7	
		при длительности испытаний, ч			
		100	500	100	500
400	ВТ25У ВТ18У	1,02–1,05	1,15–1,18	1,05–1,1	1,2–1,25
450	ВТ8М				
500	ВТ25У ВТ18У			1,4–1,5	1,65–1,7
550	ВТ25У ВТ18У			1,35	1,4

* Исследования проводили на сплавах ВТ25У и ВТ8М.

Согласно полученным данным коэффициент $K_{\tau\text{NaCl}}^t > 1$, т. е. солевые отложения толщиной ~50 мкм являются наиболее агрессивными и в большей степени снижают длительную прочность при заданных условиях испытаний по сравнению с соевыми отложениями других рассмотренных толщин. Из данных табл. 1 также следует, что повышение агрессивности солевой корки толщиной ~50 мкм по сравнению с толщиной 15–20 мкм невелико и практически одинаково для всех температур испытаний. С увеличением длительности испытаний со 100 до 500 ч влияние толщины солевых отложений несколько возрастает ($K_{100\text{NaCl}}^t = 1,02–1,05$, $K_{500\text{NaCl}}^t = 1,15–1,18$).

Для солевых отложений толщиной 5–7 мкм зависимость коэффициента $K_{\tau\text{NaCl}}^t$ от температуры и длительности испытания более сложная. При повышении температуры до 500°С и увеличении длительности испытаний до 500 ч коэффициент $K_{\tau\text{NaCl}}^t$ заметно возрастает с $K_{100\text{NaCl}}^{400^\circ} = 1,05–1,1$ до $K_{500\text{NaCl}}^{500^\circ} = 1,65–1,7$. Однако при повышении температуры испытаний до 550°С значения коэффициента $K_{\tau\text{NaCl}}^t$ несколько снижаются ($K_{\tau\text{NaCl}}^{550^\circ} = 1,35–1,4$), хотя и остаются достаточно высокими. Это, вероятно, связано, с одной стороны, с развитием на поверхности титановых сплавов в контакте с соевыми отложениями толщиной ~50 мкм относительно равномерной общей коррозии, затрудняющей локальное образование коррозионных трещин. С другой стороны ввиду относительной несплошностью солевого налета толщиной 5–7 мкм, при повышении температуры усиливается возникновение и развитие локальных очагов коррозии, являющихся источником коррозионных трещин, снижающих значение $\sigma_{\tau\text{NaCl}}^{550^\circ}$.

Влияние толщины солевых отложений на усталостную прочность сплава ВТ25У при температуре 500°С показано в табл. 2.

Таблица 2

Влияние толщины солевых отложений на $\sigma_{-1}^{500^\circ}$ сплава ВТ25У

Толщина солевого налета δ_{NaCl} , мкм	$\sigma_{-1}^{500^\circ}$, МПа, на базе $2 \cdot 10^7$ циклов
5–7	245
15–20	216
50	167

Из приведенных данных следует, что наибольшей агрессивностью в диапазоне изученных толщин (5–7, 15–20 и 50 мкм) при знакопеременном нагружении, как и при статическом приложении растягивающих напряжений, обладают солевые отложения толщиной ~50 мкм.

В табл. 3 приведены результаты испытаний полых образцов из сплава ВТ20 при участии кислорода воздуха в процессе коррозионного растрескивания от горячесолевого коррозии.

Исследование состояния поверхности отверстия в образцах показало, что его стенки, покрытые солевым налетом, в случае заполнения образцов аргоном были светлыми, не окисленными. Окраска внутренней поверхности образцов, заполненных солью (в воздушной атмосфере), и контрольных (воздух) была практически одинаковой и соответствовала окраске наружной поверхности образцов.

Таблица 3

Долговечность полых образцов из сплава ВТ20 в зависимости от заполняющей их среды при температуре 350°С и напряжении 630 МПа

Среда внутри образца	Долговечность, ч
Воздух	>2200
NaCl (солевой налет)+воздух	150*
NaCl (по всему объему)+воздух	>2200
NaCl (солевой налет)+аргон	>2200

* Образцы разрушились.

В том случае, когда образцы испытывали в воздушной атмосфере с солевым налетом на стенках внутренней полости, оксидная пленка под слоем NaCl приобретала серо-фиолетовый оттенок. Обнаружено также, что трещины, вызывавшие при этом разрушение образцов, развивались от внутренней поверхности, контактирующей с солью, к наружной поверхности, что свидетельствует об их коррозионном происхождении.

Анализ результатов испытаний и осмотр образцов показали, что наличие кислорода воздуха является необходимым фактором для протекания процесса коррозионного растрескивания в контакте с NaCl.

Кроме того, установлено, что в том случае, когда внутренняя полость заполнена NaCl и доступ кислорода воздуха к поверхности образца затруднен (как и в случае толстой солевой корки), коррозионное растрескивание если и будет происходить, то лишь по истечении времени, значительно большего, чем долговечность образцов, у которых стенки внутренней полости покрыты солевым налетом.

С учетом вышеизложенного при исследовании горячесолевой коррозии титановых сплавов для ускорения испытаний и получения сравнимых результатов следует использовать солевые отложения на поверхности образцов толщиной ~50 мкм.

Заключение

В работе показано, что толщина солевых отложений оказывает влияние на стойкость титановых сплавов к растрескиванию при высоких температурах под напряжением и наибольшей агрессивностью обладают солевые слои толщиной $\delta_{\text{NaCl}} \approx 50$ мкм. Установлено, что кислород воздуха принимает активное участие в процессе горячесолевой коррозии и основной составляющей твердых продуктов коррозии является TiO_2 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каримова С.А., Павловская Т.Г. Разработка способов защиты от коррозии конструкций, работающих в условиях космоса //Авиационные материалы и технологии. 2013. №51. С. 35–40.
4. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №51. 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. №51. С. 10–14.
6. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. М.: Металлургия. 1992. 352 с.
7. 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).
8. 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).
 9. Хорев А.И. Влияние комплексного легирования на механические свойства сварных соединений и основного металла ($\alpha+\beta$)- и β -титановых сплавов //Технология машиностроения. 2007. №2. С. 29–34.
 10. Солонина О.П., Глазунов С.Г. Титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия. 1976. 448 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. №2. P. 79–84.
 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. 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.
 17. Ulrich Zwicker. Titan und Titanlegierungen. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg. New York. 1974. 512 p.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials - the basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii.

2012. №3. S. 10–15.
3. Karimova S.A., Pavlovskaja T.G. Razrabotka sposobov zashhity ot korrozii konstrukcij, robotajushhijh v uslovijah kosmosa [Development of methods of corrosion protection structures operating in the space environment] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 35–40.
 4. Kablov E.N. Materialy dlja izdelija «Buran» – innovacionnye reshenija formirovanija shestogo tehnologicheskogo uklada [Materials for the product «Buran» – innovative solutions forming the sixth technological order] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 3–9.
 5. Horev A.I. Fundamental'nye i prikladnye raboty po titanovym splavam dlja «Burana» i perspektivnye napravlenija ih razvitija [Fundamental and applied research in titanium alloys for «Buran» and future directions of their development] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 10–14.
 6. Horev A.I., Belov S.P., Glazunov S.G. Metallovedenie titana i ego splavov [Physical metallurgy of titanium and its alloys]. M.: Metallurgija. 1992. 352 s.
 7. Kashapov O.S., Novak A.V., Nochovnaja N.A., Pavlova T.V. Sostojanie, problemy i perspektivy sozdaniya zharoprochnyh titanovyh splavov dlja detalej GTD [Status, problems and prospects for the creation of high-temperature titanium alloys for GTD parts] //Trudy VIAM. 2013. №3. St. 02 (viam-works.ru).
 8. Horev A.I. Fundamental'nye i prikladnye raboty po konstrukcionnym titanovym splavam i perspektivnye napravlenija ih razvitija [Fundamental and applied research in structural titanium alloys and future directions of their development] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 04 (viam-works.ru).
 9. Hopev A.I. Vlijanie kompleksnogo legipovanija na mehanicheskie svojstva svapnyh soedinenij i osnovnogo metalla ($\alpha+\beta$)- i β -titanovyh splavov [Influence of complex legipovaniya on the mechanical properties of the welded joints and base metal ($\alpha+\beta$)- and β -titanium alloys] //Tehnologija mashinostroenija. 2007. №2. S. 29–34.
 10. Solonina O.P., Glazunov S.G. Titanovye splavy. Zharoprochnye titanovye splavy [Titanium alloys. Heat-resistant titanium alloys]. M.: Metallurgija. 1976. 448 s.
 11. Gorynin I.V., Ushakov S.S., Hatuncev A.N., Loshakova I.L. Titanovye splavy dlja morskoy tehniki [Titanium alloys for marine equipment]. SPb.: Politehnika. 2007. 387 s.
 12. Sinjavskij S.V. Soprotivlenie titanovyh splavov razlichnym vidam korrozionnogo rastreskivaniya [Resistance of titanium alloys, various types of stress-corrosion cracking] //Tehnologija legkih splavov. 2010. №4. S. 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. №2. P. 79–84.
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. 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.
17. Ulrich Zwicker. Titan und Titanlegierungen. Springer-Verlag Berlin. Heidelberg. New York. 1974. 512 p.