



УДК 620.172.254:669.018.44:669.295
DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-4-4

**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

А.Н. Савушкин

О.С. Кашапов

кандидат технических наук

С.А. Голынец

Март 2015

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.

УДК 620.172.254:669.018.44:669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-4-4

А.Н. Савушкин¹, О.С. Кашапов¹, С.А. Голынец¹

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Работа посвящена исследованию влияния условий нагружения на механические свойства жаропрочных титановых ($\alpha+\beta$)- и псевдо- α -титановых сплавов VT18U, VT41, VT8 и VT8M-1. Проведены испытания при растяжении образцов с различной скоростью нагружения при 20°C и при максимальных рабочих температурах для каждого сплава на испытательной машине TIRA-test 2300/1. Установлено, что в зависимости от степени легирования жаропрочные титановые сплавы обладают различной чувствительностью к скорости нагружения.

Ключевые слова: титановые сплавы, испытания при растяжении, микроструктура, механические свойства.

A.N. Savushkin, O.S. Kashapov, S.A. Golyneec

AN INFLUENCE OF LOADING RATE ON MECHANICAL PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT TITANIUM ALLOYS

Mechanical properties of heat-resistant ($\alpha+\beta$) titanium alloys and pseudo- α -titanium alloys VT18U, VT41, VT8, VT8M-1 were investigated depending on loading conditions. The tension test of specimens with different loading rates at 20°C and maximal working temperatures were made for each alloy with the use of TIRA-test 2300/1 testing machine. It was found out that sensibility of heat-resistant titanium alloys to the loading rate varies depending on the alloying level.

Keywords: titanium alloys, tension tests, microstructure, mechanical properties.

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

Авиационное материаловедение играет значительную роль в развитии авиации и является существенным фактором при создании новых моделей авиационной и космической техники. С целью упорядочения и выбора наиболее важных направлений развития материаловедения, в ВИАМ разработаны «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1], где большое внимание уделено, в том числе, и титановым сплавам [1–4].

Жаропрочные титановые сплавы широко применяются для изготовления деталей авиационных ГТД, включая рабочие лопатки компрессора [5–10]. В отраслевой документации регламентируется методика проведения контрольных испытаний при растяжении в соответствии с требованиями ГОСТ Р 1497 и ГОСТ Р 9651, а также ОСТ1 90002 «Лопатки штампованные из титановых сплавов. Технические требования», где дополнительно оговорено, что скорость передвижения захватов при растяжении образцов должна быть 0,4–0,6 от расчетной длины образца. Для контроля механических свойств на готовых деталях или в случае малогабаритных размеров лопаток возможно использование нестандартных образцов, не регламентированных ГОСТ. Исследование влияния параметров испытаний на характеристики механических свойств жаропрочных титановых сплавов, применяемых для изготовления лопаток, позволит оценить фактическое различие в результатах испытаний при разных условиях их проведения, а также определить чувствительность механических свойств того или иного сплава в зависимости от степени его легирования.

Материалы и методы

Исследования проводили на катаных прутках из сплавов ВТ8 и ВТ18У, изготовленных по ОСТ1 90006, в отожженном состоянии; на лопатках из сплава ВТ8М-1 габарита «К», изготовленных по ОСТ1 90002, в отожженном состоянии; на прутках диаметром 22 мм и штамповках лопаток габарита «Мг» из сплава ВТ41 в отожженном состоянии. Микроструктура материалов приведена на рис. 1.

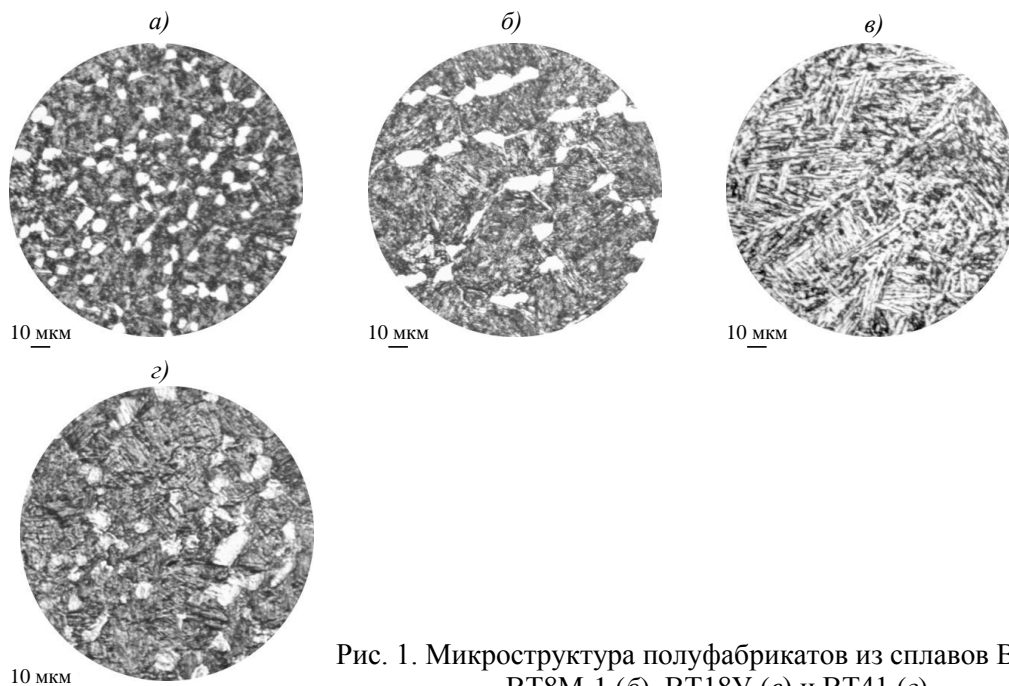


Рис. 1. Микроструктура полуфабрикатов из сплавов ВТ8 (а), ВТ8М-1 (б), ВТ18У (в) и ВТ41 (г)

Микроструктура является типичной для данных сплавов и полуфабрикатов [11–14]: для прутков и лопаток из сплавов ВТ8, ВТ8М-1 и ВТ41 – глобулярно-пластинчатого типа, для прутков из сплава ВТ18У – пластинчатая.

Испытания проводили на испытательной машине TIRA-test 2300/1 при комнатной температуре, а также при повышенных температурах: 450°C – для сплавов ВТ8, ВТ8М-1, 600°C – для сплавов ВТ18У и ВТ41 (по ГОСТ Р 1497 и ГОСТ Р 9651). Механические свойства сплавов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства сплавов ВТ41, ВТ18У, ВТ8 и ВТ8М-1 (стандартные образцы)

Сплав	V, мм/мин	$\sigma_B^{20^\circ}$	$\sigma_{0,2}^{20^\circ}$	δ^{20°	ψ^{20°	$T_{\text{исп.}}$ °C	σ_B , МПа	δ	ψ
		МПа		%				%	
ВТ18У	2	1005	910	11	28	600	725	12,5	41
	5	980	910	10	28	600	745	11,5	38
	10	985	915	8,5	28	600	700	10	35
ВТ41	2	995	920	20,5	42	600	645	32	75
	5	1025	950	16,5	42	600	640	30	74
	10	1015	950	16	43	600	650	28	74
ВТ8	2	1065	985	17	52	450	805	16	63
	5	1090	1030	12	44	450	795	14	64
	10	1075	1000	12,5	41	450	775	16	67
ВТ8М-1	2	1070	980	14	44	450	780	11	44
	5	1060	980	15	46	450	820	13	62
	10	1075	1000	12,5	37	450	780	16	65

Результаты и обсуждение

По результатам испытаний механических свойств рассматриваемых жаропрочных титановых сплавов установлено, что они обладают различной чувствительностью к скорости нагружения. Для объяснения выявленных различий более подробно рассмотрим композиции сплавов по уровню легирования α - и β -твердых растворов основными легирующими элементами. Диаграмма, на которой сплавы распределены в зависимости от уровня легирования β -стабилизаторами, выраженного через структурный молибденовый эквивалент ($[Mo]_{\text{ЭКВ}}$) [15], представлена на рис. 2.

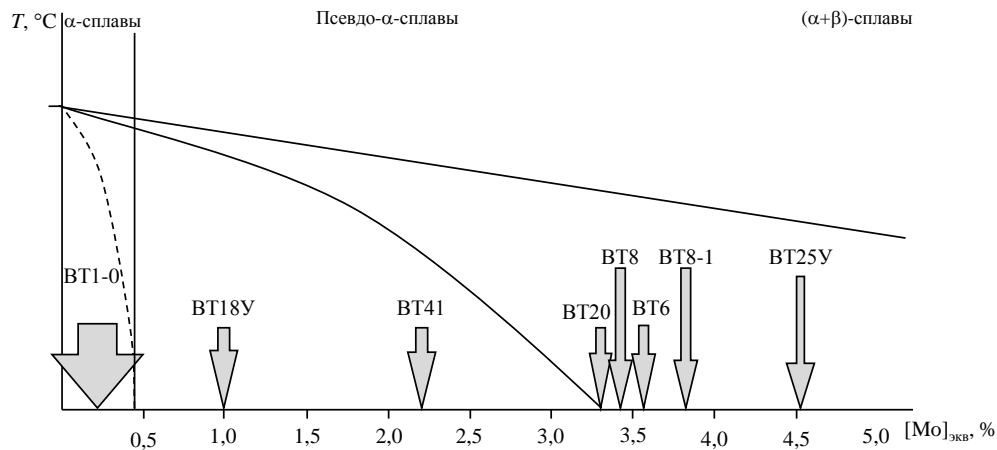


Рис. 2. Уровень легирования титановых сплавов β -стабилизаторами, выраженный через структурный эквивалент по молибдену ($[Mo]_{\text{ЭКВ}}$)

Значения структурного эквивалента по алюминию ($[Al]_{\text{ЭКВ}}$), характеризующие сплавы с точки зрения степени легирования α -твердого раствора, и структурного эквивалента по молибдену ($[Mo]_{\text{ЭКВ}}$), а также содержание Si – одного из наиболее значимых легирующих элементов жаропрочных титановых сплавов, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Уровень легирования жаропрочных титановых сплавов

Характеристика	Значения характеристик для сплавов			
	VT18У	VT41	VT8	VT8М-1
$[Al]_{\text{ЭКВ}}$, %	9,3	8,7	8,3	5,9
$[Mo]_{\text{ЭКВ}}$, %	1,0	2,2	3,4	3,75
Содержание Si, % (по массе)	0,15	0,3	0,3	0,2

Закономерности изменения характеристик кратковременной прочности при комнатной температуре представлены на рис. 3.

Прочностные характеристики сплавов в условиях испытаний при растяжении при 20°C с увеличением скорости нагружения от 2 до 10 мм/мин возрастают. Наиболее чувствительной характеристикой является относительное удлинение, величина которого заметно изменяется для сплавов с бóльшим содержанием кремния (BT41 и BT8). По относительному сужению наибольшую чувствительность проявили ($\alpha+\beta$)-сплавы (BT8, BT8M-1). Среди рассматриваемых сплавов сплав BT8 оказался наиболее чувствительным к условиям испытаний, наименее чувствительным – сплав BT18У, что, вероятно, обусловлено отличием типа микроструктуры (пластинчатая) от остальных сплавов (глобулярно-пластинчатая) и, как следствие, минимальными значениями пластичности этого материала.

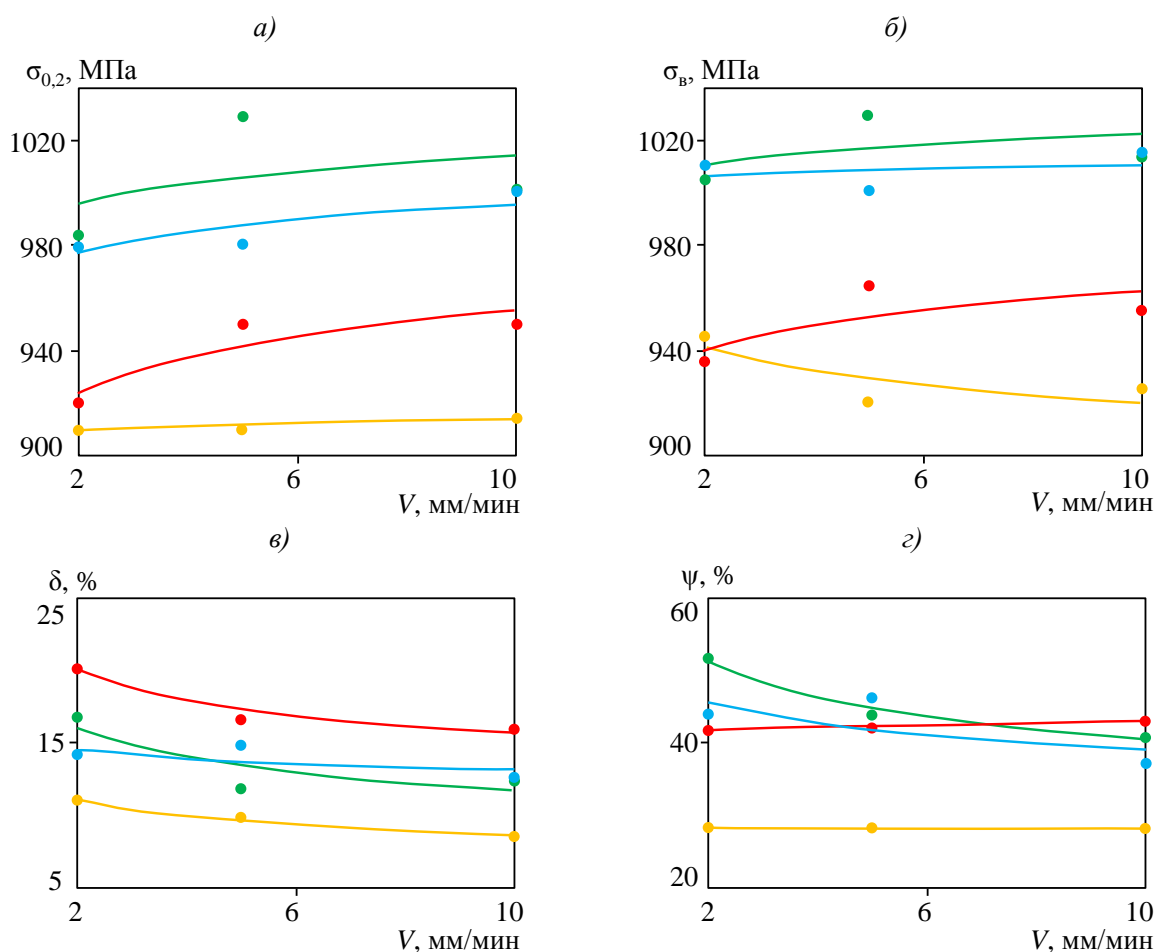


Рис. 3. Механические свойства сплавов BT18У (●), BT41 (●), BT8 (●) и BT8M-1 (●) при 20°C в зависимости от скорости перемещения захватов при растяжении:

a – предел текучести; b – предел прочности; v – относительное удлинение; z – относительное сужение

На рис. 4 представлены закономерности изменения характеристик механических свойств при повышенных температурах (450°C – для сплавов ВТ8 и ВТ8М-1, 600°C – для сплавов ВТ18У и ВТ41).

При повышенных температурах прочностные характеристики рассматриваемых сплавов практически не изменяются. Характеристики пластичности сплавов ВТ8, ВТ41 и ВТ18У также практически не зависят от скорости нагружения при повышенных температурах. Для сплава ВТ8М-1 наблюдается повышение величины относительного сужения. Как известно, β -фаза с ОЦК кристаллической ячейкой является более пластичной и менее жаропрочной по сравнению с α -фазой с ГП ячейкой. Степень ее упрочнения будет определяться уровнем легирования, наибольший вклад в который вносит элемент внедрения – кремний. Это, вероятно, объясняет рост относительного сужения в сплаве ВТ8М-1 – с наибольшим содержанием стабильной β -фазы при наименьшем ее легировании кремнием.

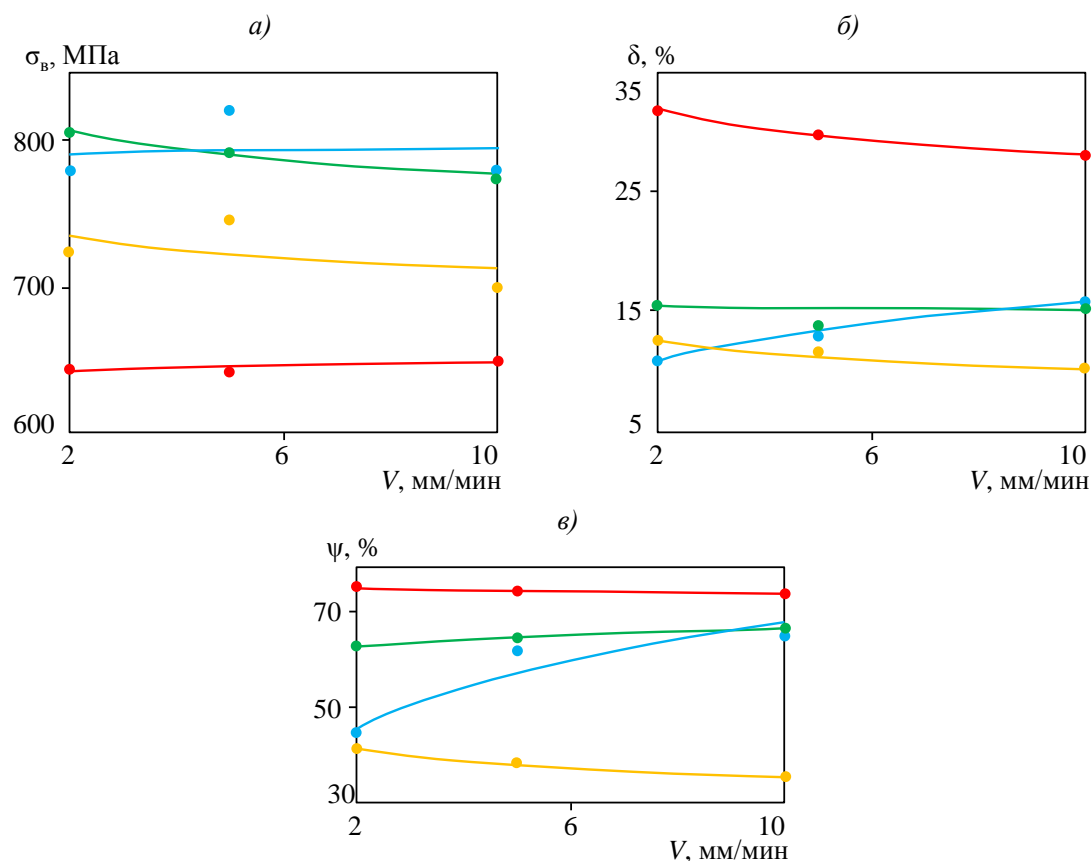


Рис. 4. Механические свойства сплавов ВТ18У (●), ВТ41 (●), ВТ8 (●) и ВТ8М-1 (●) при повышенных температурах в зависимости от скорости перемещения захватов при растяжении (450°C – для $(\alpha+\beta)$ -сплавов ВТ8 и ВТ8М-1, 600°C – для псевдо- α -сплавов ВТ18У и ВТ41):

a – предел прочности; b – относительное удлинение; v – относительное сужение

Рассмотрим влияние типа образца на результаты испытаний механических свойств на примере сплава ВТ41. Для испытаний были изготовлены нестандартные образцы из малогабаритной штамповки лопатки и прутка, с меньшим диаметром и расчетной длиной рабочей части.

Результаты испытаний при растяжении при скорости передвижения захватов $V=10$ мм/мин приведены в табл. 3.

Таблица 3

Механические свойства нестандартных образцов (при $V=10$ мм/мин)

Материал	$\sigma_B^{20^\circ}$	$\sigma_{0,2}^{20^\circ}$	δ^{20°	ψ^{20°	$\sigma_B^{600^\circ}$	δ^{600°	ψ^{600°
	МПа		%		МПа	%	
Пруток, штамповка	1050	970	14,5	40	640	21,5	71
лопатки из сплава ВТ41	1065	975	18,5	39	640	19,5	68
	1045	975	11	32	690	17,5	60
	1025	965	13,5	36	640	16	59

Сравнительные результаты испытаний стандартных и микрообразцов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Механические свойства прутков и штамповок лопаток из сплава ВТ41 при испытании стандартных и микрообразцов

Образец	$\sigma_B^{20^\circ}$	$\sigma_{0,2}^{20^\circ}$	δ^{20°	ψ^{20°	$\sigma_B^{600^\circ}$	δ^{600°	ψ^{600°
	МПа		%		МПа	%	
Нестандартный ($d_0=3$ мм, $l_0=8$ мм)	1045	970	14,5	37	650	18,5	64
По ГОСТ ($d_0=5$ мм, $l_0=25$ мм)	1015	950	16	43	650	28	74

По данным табл. 4 видно, что практически все характеристики механических свойств, за исключением кратковременной прочности при 600°C , изменяются в зависимости от вида образца. Как отмечалось ранее, при испытаниях титановых сплавов регламентируют скорость передвижения захватов испытательной машины, которую связывают с расчетной длиной образца. Скорость перемещения захватов (в мм/мин) не должна превышать 0,6 от расчетной длины образца. При скорости 10 мм/мин для стандартного образца этот коэффициент равен 0,4, для нестандартного микрообразца: 1,25.

При таких условиях испытания в случае сплава ВТ41 пластическая деформация материала не успевает протекать в полной мере, что приводит к снижению относительного удлинения и сужения в рабочей части образца. Для прутков из сплава ВТ41 было экспериментально установлено, что при снижении скорости передвижения захватов до величины 2 мм/мин значения относительного удлинения и сужения возрастают на 3–8%.

Заключение

С увеличением скорости передвижения захватов с 2 до 10 мм/мин характеристики прочности при комнатной температуре возрастают, а характеристики пластичности – снижаются, причем это более заметно по величине относительного удлинения. С повышением температуры испытаний наиболее чувствительными характеристиками к скорости нагружения являются характеристики пластичности. Чувствительность сплавов к скорости нагружения возрастает с увеличением степени легирования β -стабилизаторами.

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. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 5–6.
3. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО “Сатурн”» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
4. 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.
5. Ночовная Н.А., Панин П.В. Анализ остаточных макронапряжений в сварных соединениях титановых сплавов разных классов //Труды ВИАМ. 2014. №5. Ст. 02 (viam-works.ru).
6. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 440–448.
7. Моисеев В.Н. Высокопрочные титановые сплавы для авиакосмической техники /В сб. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. Юбилейный науч.-технич. сб. /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2002. С. 115–121.

8. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
9. 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).
10. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. М.: Metallurgia. 1992. 352 с.
11. Способ термической обработки высокопрочных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов: пат. 2465366 Рос. Федерация; опубл. 15.09.2011 (Каблов Е.Н.)
12. Способ термомеханической обработки изделий из титановых сплавов: пат. 2457273 Рос. Федерация; опубл. 05.04.2011 (Каблов Е.Н.)
13. Горынин И.В., Кудрявцев А.С., Ушков С.С. и др. Опыт изготовления слитков массой до 17 тонн из псевдо-альфа сплавов //Титан. 2013. №2. С. 23–28.
14. Горынин И.В., Ушков С.С., Баранов А.В., Михайлов В.И., Ушаков Б.Г. Титановые сплавы для конструкций морского применения //Морские интеллектуальные технологии. 2009. №4. С. 61–66.
15. Ilyin A., Kolachev B., Volodin V., Ryndenkov D. About the purposefulness of comprasion of titanium alloys in terms of aluminium and Molybdenium equivalents /In: Titanium–99. Science and technology. 1999. P. 53–60.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih perera-botki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. S. 7–17.
2. Tarasov Ju.M., Antipov V.V. Novye materialy VIAM – dlja perspektivnoj aviacionnoj tehniki proizvodstva OAO «OAK» [New materials VIAM - for promising aviation equipment produced by JSC «UAC»] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. S. 5–6.
3. Shmotin Ju.N., Starkov R.Ju., Danilov D.V., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Novye materialy dlja perspektivnogo dvigatelja OAO «NPO “Saturn”» [New materials for advanced engine JSC «NPO „Saturn”»] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. S. 6–8.
4. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaja N.A. Vlijanie rezhimov termicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva zharoprochnogo titanovogo splava dlja lopatok KVD [Effect of heat treatment on the structure and properties of heat-resistant titanium alloy blades for HPC] //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. S. 8–14.

5. Nochovnaja N.A., Panin P.V. Analiz ostatochnyh makronaprjazhenij v svarnyh soedinenijah titanovyh splavov raznyh klassov [Analysis of residual macroscopic stresses in welded joints of titanium alloys of different classes] //Trudy VIAM. 2014. №5. St. 02 (viam-works.ru).
6. Erasov V.S., Jakovlev N.O., Nuzhnyj G.A. Kvalifikacionnye ispytaniya i issledovanija prochnosti aviacionnyh materialov [Qualification testing and research strength of aircraft materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 440–448.
7. Moiseev V.N. Vysokoprochnye titanovyje splavy dlja aviakosmicheskoj tehniki [High-strength titanium alloys for aerospace engineering] /V sb. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2002. Jubilejnyj nauch.-tehnič. sb. /Pod obshh. red. E.N. Kablova. 2002. S. 115–121.
8. Kablov E.N. Materialy dlja izdelija «Buran» – innovacionnye reshenija formirovanija shestogo tehnologičeskogo uklada [Materials for the product «Buran» – innovative solutions forming the sixth technological order] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S1. S. 3–9.
9. 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 of creating heat-resistant titanium alloys for GTE parts] //Trudy VIAM. 2013. №3. St. 02 (viam-works.ru).
10. 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.
11. Sposob termicheskoj obrabotki vysokoprochnyh ($\alpha+\beta$)-titanovyh splavov [A method of heat treatment of high ($\alpha+\beta$) alloy titanic]: pat. 2465366 Ros. Federacija; opubl. 15.09.2011.
12. Sposob termomehanicheskoj obrabotki izdelij iz titanovyh splavov [Method of thermomechanical processing of titanium alloys]: pat. 2457273 Ros. Federacija; opubl. 05.04.2011.
13. Gorynin I.V., Kudrjavcev A.S., Ushkov S.S. i dr. Opyt izgotovlenija slitkov massoj do 17 tonn iz psevdo-alfa splavov [Experience of producing ingots weighing up to 17 tons of pseudo-alpha alloys] //Titan. 2013. №2. S. 23–28.
14. Gorynin I.V., Ushkov S.S., Baranov A.V., Mihajlov V.I., Ushakov B.G. Titanovyje splavy dlja konstrukcij morskogo primenenija [Titanium alloys for marine applications designs] //Morskie intellektual'nye tehnologii. 2009. №4. S. 61–66.
15. Ilyin A., Kolachev B., Volodin V., Ryndenkov D. About the purposefulness of comprasion of titanium alloys in terms of aluminium and Molybdenium equivalents /In: Titanium–99. Science and technology. 1999. P. 53–60.