

УДК 620.1:669.017

*С.В. Путьрский¹, А.А. Арисланов¹, А.Л. Яковлев¹, Н.А. Ночовная¹***ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ
СПЛАВОВ VT23M И VT43,
ОЦЕНКА ИХ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ
В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО КЛИМАТА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-101-110

Статья посвящена изучению механических свойств деформированных полуфабрикатов высокопрочных титановых сплавов мартенситного класса VT23M и VT43 при комнатной и пониженной температурах. Особенностью проведенной работы является то, что исследуемые полуфабрикаты изготовлены по одинаковой технологии. Выполнена оценка влияния климатических факторов, свойственных арктическому климату, на свойства образцов из титановых сплавов VT23M и VT43, а также оценена их коррозионная стойкость в контакте с углепластиковыми материалами.

Ключевые слова: высокопрочные титановые сплавы, деформация, климатические испытания, механические свойства, термическая обработка, микроструктура, Арктика, коррозия.

*S.V. Putyrskiy¹, A.A. Arislanov¹, A.L. Yakovlev¹, N.A. Nochovnaya¹***RESEARCHING OF MECHANICAL PROPERTIES
OF DEFORMED SEMI-FINISHED PRODUCTS
OF VT23M AND VT43 ALLOYS,
ASSESSMENT OF THEIR CLIMATIC STABILITY
IN THE ARCTIC CLIMATE**

The following article is dedicated to the studying of the mechanical properties of deformed semi-finished products of high-strength titanium alloys of the martensitic class VT23M and VT43 at room and lower temperatures. The peculiarity of this work is that the semi-finished products are manufactured using the same technology. An estimation of the influence of climatic factors peculiar to the Arctic climate on the properties of titanium alloy samples was made. Corrosion resistance of alloys VT23M and VT43 in contact with carbon plastics has also been evaluated.

Keywords: high-strength titanium alloys, deformation, climatic tests, mechanical properties, heat treatment, microstructure, Arctic, corrosion.

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

Во ФГУП «ВИАМ» разработана широкая номенклатура титановых сплавов, в том числе высокопрочных, для применения в авиа- и ракетостроении [1]. Высокопрочные титановые сплавы, такие как VT6ч., VT23, VT14, VT16 и VT22 [2, 3], успешно используются для изготовления элементов конструкции планера и шасси военных и гражданских самолетов. Комплекс механических свойств высокопрочных титановых сплавов делает перспективным их применение не только в авиации и ракетостроении, но и в других областях техники [4, 5], в которых могут применяться технологии авиационного назначения [6].

Сплав ВТ23 – ($\alpha+\beta$)-сплав мартенситного класса системы Ti–Al–Mo–V–Cr–Fe [7], предназначен для изготовления силовых деталей, а также сварных и паяных конструкций авиационной, космической и ракетной техники: лонжеронов, шпангоутов, балок, гидроцилиндров, обшивок, закладных элементов композиционных конструкций, деталей шасси, емкостей, баллонов высокого давления. Отличительной чертой высокопрочного сплава ВТ23 является возможность изготовления из него всех видов полуфабрикатов. Во ФГУП «ВИАМ» разработана модификация сплава ВТ23 – сплав ВТ23М, обладающий суженным диапазоном легирования, за счет чего обеспечивается повышение гарантированного уровня свойств.

Сплав ВТ43 является перспективным сплавом системы Ti–Al–Mo–V–Cr–Fe–Zr–Nb–Cu. Химический состав сплава, разработанный на основе теории комплексного легирования, отличается от состава сплава ВТ23 дополнительным легированием Zr, Nb и Cu [8, 9]. Дополнительное легирование сплава ниобием обеспечивает повышение однородности распределения β -стабилизаторов в различных зонах, что способствует получению стабильного уровня механических свойств. Цирконий выполняет функцию модификатора и раскислителя приграничных объемов сплава, а также эффективного упрочнителя α - и β -твердых растворов.

Необходимо отметить, что система легирования сплавов ВТ23М и ВТ43 разработана с учетом элементной базы, доступной на территории Российской Федерации. Так, в широко применяемом в зарубежном авиастроении сплаве IMI 310 (состав Ti–10V–2Fe–3Al) в 2 раза больше ванадия, что значительно увеличивает его стоимость.

В настоящее время большой потенциал имеет промышленное освоение территорий, обладающих значительными запасами полезных ископаемых, находящихся в климатических поясах, которым свойственен арктический климат [10, 11]. Климат данных территорий предъявляет особые требования к надежности применяемых технических средств. Принципиальным условием выбора материала является его способность сохранять свои рабочие характеристики при пониженных температурах, а также сопротивляться коррозии, в том числе в контакте с другими конструкционными материалами. Высокими значениями удельных прочностных характеристик [12, 13] и сопротивлением коррозии во всеклиматических условиях обладают высокопрочные титановые сплавы.

В современных образцах техники все более широкое применение находят композиционные материалы на полимерной основе [14–16]. Их применение позволяет значительно снизить массу конструкции и обеспечить требуемую прочность и надежность. Существует конструктивная проблема выполнения соединений элементов, изготовленных из углепластика, с элементами, выполненными из алюминиевых сплавов и сталей. Прямые коррозионные испытания и исследование электрохимических свойств сталей, алюминиевых и магниевых сплавов показали их уязвимость в контакте с углепластиком, в то время как титановые сплавы считаются наиболее устойчивыми к коррозии в контакте с углепластиком [17]. Указанное свойство титановых сплавов делает возможной разработку слоистых композиционных материалов на основе листов высокопрочных титановых сплавов и препрегов углепластиков. Неметаллические композиционные материалы обладают более высокими значениями удельных прочностных характеристик в сравнении с металлическими сплавами, применяемыми в конструкции летательных аппаратов, но хуже сопротивляются развитию трещин. Совместить в себе преимущества двух классов материалов призваны гибридные слоистые материалы.

В данной статье представлено исследование свойств высокопрочных титановых сплавов ВТ23М и ВТ43 применительно к условиям арктического климата. Особенностью данного исследования является то, что исследуемые полуфабрикаты прошли одинаковый цикл изготовления, что упрощает их сравнительный анализ. Работа выполнена

в рамках реализации комплексной научной проблемы 12.4. «Титановые сплавы, совместимые с углепластиком» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [18].

Материалы и методы

Для проведения исследований из сплавов ВТ23М и ВТ43 изготовлены полуфабрикаты – прутки и листы. Весь технологический цикл изготовления полуфабрикатов выполнен во ФГУП «ВИАМ». Первоначально проводили подготовку шихтовых материалов, включающую размельчение лигатур ВнАл, АМТ, АНК; стружку алюминиевых, циркониевых, медных и железных заготовок. Подготовили порционные навески для прессования расходоуемых электродов. Для выплавки одного слитка изготавливали по два прессованных электрода массой 12,5 кг. Выплавку слитков производили методом двойного вакуумно-дугового переплава в печи ALD VAR L200. Всего было изготовлено четыре слитка, по два каждого сплава, общей массой 100 кг. Печь ALD VAR L200 и итоговый вид слитка представлены на рис. 1.

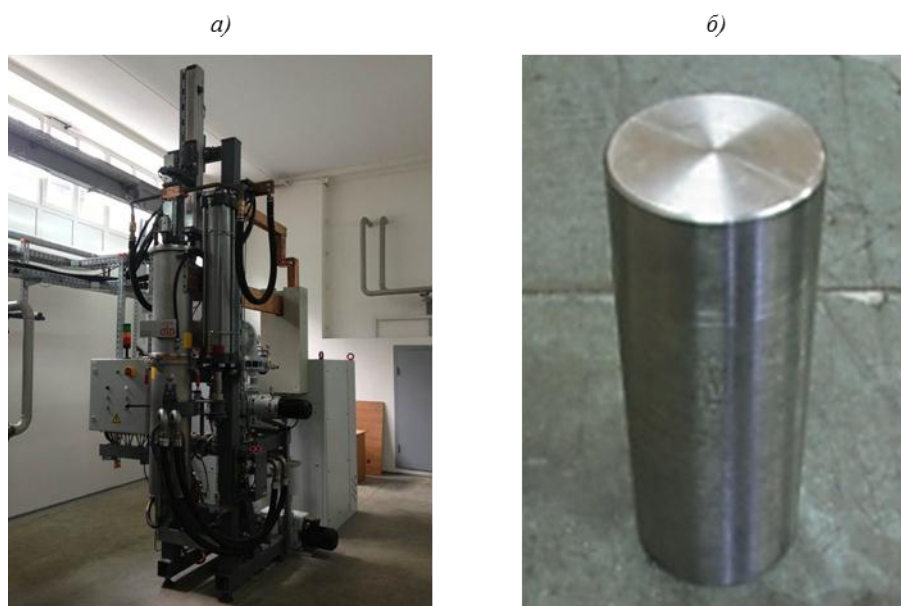


Рис. 1. Вакуумно-дуговая печь ALD VAR L200 (а) и слиток после двукратного переплава и обточки (б)

После обточки слитков проведен анализ химического состава каждого слитка атомно-эмиссионным методом в трех зонах (низ, середина, верх). Результаты испытаний приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав слитков из сплава ВТ43

Условный номер слитка	Зона слитка	Содержание элементов, % (по массе)								
		Ti	Al	Cr	Fe	Mo	Nb	V	Zr	Cu
1	Верх	Основа	4,03	0,82	0,432	1,59	0,82	4,01	0,94	0,35
	Середина	Основа	5,07	1,04	0,526	2,04	1,04	4,33	1,16	0,37
	Низ	Основа	4,58	0,96	0,521	1,81	0,92	4,15	1,15	0,33
2	Верх	Основа	4,69	1,03	0,574	1,85	0,94	4,06	1,19	0,34
	Середина	Основа	4,60	1,05	0,525	1,88	0,93	4,21	1,14	0,39
	Низ	Основа	5,10	1,03	0,534	2,10	1,06	4,10	1,22	0,35

Химический состав слитков из сплава ВТ23М

Условный номер слитка	Зона слитка	Содержание элементов, % (по массе)					
		Ti	Al	V	Mo	Fe	Cr
1	Верх	Основа	5,43	4,26	2,03	0,401	1,19
	Середина	Основа	5,50	4,37	2,07	0,401	1,17
	Низ	Основа	5,40	4,18	1,85	0,416	1,08
2	Верх	Основа	5,46	4,99	2,32	0,59	1,53
	Середина	Основа	5,60	4,71	2,38	0,60	1,33
	Низ	Основа	5,08	4,27	2,06	0,47	1,22

Показано, что химические составы соответствуют интервалам, указанным в паспортах на исследуемые сплавы.

Следующим этапом изготовления деформируемых полуфабрикатов являлась ковка слитков на сутунки (рис. 2) по технологии, включающей чередование нагрева и деформации при температуре β -области с нагревом и деформацией в $(\alpha+\beta)$ -области. Последний этапковки осуществляли в $(\alpha+\beta)$ -области.



Рис. 2. Сутунки послековки (а), после резки и обточки (б)

Прутки из сутунок сплавов ВТ23М и ВТ43 получены посредством всестороннейковки и обточки для доведения до требуемого диаметра. Из полученных прутков вырезали заготовки под образцы, на которых проведена упрочняющая термическая обработка по режиму: нагрев до температуры $T_{п.п}-100^{\circ}\text{C}$; выдержка; закалка в воде; нагрев до температуры $T_{п.п}+400^{\circ}\text{C}$; выдержка; охлаждение на воздухе.

Прокатку сутунок из сплавов ВТ23М и ВТ43 для получения листов толщиной 2,5–3 мм проводили по следующей технологии:

- нагрев в печи до температуры $T_{п.п}+60^{\circ}\text{C}$, выдержка;
- горячая прокатка на толщину 10 ± 1 мм;
- нагрев листов в печи при температуре $T_{п.п}-100^{\circ}\text{C}$, выдержка;

- горячая прокатка на толщину 2,5–3 мм;
- термическая обработка;
- пескоструйная обработка;
- кислотнo-щелочное травление;
- травление в щелочах – NaOH и NaO₃;
- травление в кислотах – HF и HNO₃.

Отметим, что листы из сплава ВТ43 впервые получены при выполнении данной работы.

После прокатки листов до толщины 2,5–3 мм проведена термическая обработка – отжиг по режиму: нагрев до температуры $T_{п.п.}-200^{\circ}\text{C}$, выдержка, охлаждение с печью. Из полученных листов вырезали заготовки в соответствии с разработанной схемой раскроя, затем изготавливали образцы для проведения испытаний. Изготовленные полуфабрикаты представлены на рис. 3.



Рис. 3. Прутки $\varnothing 60$ мм (а) и листы (б) после прокатки до толщины 10 мм из сплавов ВТ23М и ВТ43

Основная цель проводимых испытаний – получение значений механических характеристик полуфабрикатов исследуемых сплавов, а также выявлению деградации их свойств в условиях арктического климата путем проведения механических испытаний на образцах, прошедших ускоренные климатические испытания.

Испытания на растяжение образцов из титановых сплавов ВТ23М и ВТ43 проводили по ГОСТ 1497, на растяжение при пониженных температурах – по ГОСТ 11150 на испытательной машине Zwick/Roell Z400; испытания на ударный изгиб образцов из титановых сплавов – по ГОСТ 9454. Ускоренные климатические испытания проводили в соответствии со следующими стандартами: ГОСТ 9.308, ГОСТ 9.707, ГОСТ 28.209.

Результаты и обсуждение

На подготовленных шлифах проводили исследование микроструктуры полученных полуфабрикатов.

Как видно из приведенных на рис. 4 изображений, структура полученных полуфабрикатов является типичной для деформируемых полуфабрикатов сплавов $(\alpha+\beta)$ -класса. При этом следует отметить, что средний размер структурных составляющих полуфабрикатов из сплава ВТ43 мельче, чем у полуфабрикатов из сплава ВТ23М. В будущем целесообразно проведение микрорентгеноспектрального анализа для выявления закономерностей распределения легирующих элементов в зернах материала.

Таблица 3

**Результаты испытаний на растяжение титановых листов из сплавов ВТ23М и ВТ43
при комнатной температуре**

Сплав	Направление прокатки	Модуль упругости, ГПа	Условный предел текучести	Предел прочности при растяжении	Относительное удлинение δ_5 , %
			МПа		
ВТ23М	Продольное	106	931	1016	9,5
ВТ43	Продольное	104	1041	1123	9,8
	Поперечное	118	1178	1243	7,6

Таблица 4

**Результаты испытаний на растяжение титановых листов
(продольное направление прокатки)
из сплавов ВТ23М и ВТ43 при температуре -60°C**

Сплав	Модуль упругости, ГПа	Условный предел текучести	Предел прочности при растяжении	Относительное удлинение δ_5 , %
		МПа		
ВТ23М	118	1043	1076	6,6
ВТ43	124	1146	1196	7,3

Из приведенных в табл. 3 и 4 значений видно, что при одинаковых режимах изготовления листов из исследуемых сплавов сплав ВТ43 обладает на 9,6% большей прочностью при почти равном относительном удлинении. Сравнение проводили для продольного направления вырезки образцов. При пониженной температуре наблюдается увеличение прочности листов из сплава ВТ23М на 6% и снижение пластичности на 30%. На листах из сплава ВТ43 прочность возрастает на 6%, при этом пластичность снижается на 25%. Прочность листов из сплава ВТ43 в поперечном направлении на 4% выше, чем в продольном направлении прокатки; пластичность в продольном направлении выше на 22%.

Таблица 5

**Результаты испытаний на растяжение прутков из титановых сплавов ВТ23М и ВТ43
при комнатной температуре**

Сплав	Модуль упругости, ГПа	Условный предел текучести	Предел прочности при растяжении	Относительное удлинение δ_5 , %
		МПа		
ВТ23М	110	1153	1250	5,0
ВТ43	113	1170	1305	6,0

Таблица 6

**Результаты испытаний на растяжение прутков из титановых сплавов ВТ23М и ВТ43
при температуре -60°C**

Сплав	Модуль упругости, ГПа	Условный предел текучести	Предел прочности при растяжении	Относительное удлинение δ_5 , %
		МПа		
ВТ23М	118	1326	1350	2,4
ВТ43	123	1285	1370	3,7

Из результатов, представленных в табл. 5 и 6, видно, что для образцов из сплава ВТ23М, вырезанных из изготовленных прутков и прошедших упрочняющую термическую обработку, увеличение прочности при температуре -60°C составляет 7%, пластичность снижается на 50% по сравнению с образцами, испытанными при комнатной

температуре. Для сплава ВТ43 увеличение прочности составляет 6%, снижение пластичности 38%. По результатам испытаний можно заключить, что образцы из отожженных листов меньше подвержены падению пластичности при отрицательных температурах, чем образцы, вырезанные из прутка и подвергнутые упрочняющей термической обработке.

В табл. 7 и 8 представлены результаты испытаний по определению ударной вязкости образцов исследуемых сплавов при комнатной и пониженной температурах.

Таблица 7

Результаты испытаний на определение ударной вязкости при комнатной температуре образцов из титановых сплавов ВТ23М и ВТ43

Сплав	Вид полуфабриката	КСУ, кДж/м ²
ВТ23М	Пруток	395
ВТ43	Пруток	277
ВТ23М	Лист	552
ВТ43	Лист	415

Таблица 8

Результаты испытаний на определение ударной вязкости при температуре -60°С образцов из титановых сплавов ВТ23М и ВТ43

Сплав	Вид полуфабриката	КСУ, кДж/м ²
ВТ23М	Пруток	353
ВТ43	Пруток	248
ВТ23М	Лист	470
ВТ43	Лист	339

Из представленных в табл. 7 и 8 значений видно, что наблюдается снижение значений ударной вязкости при испытаниях в условиях пониженной температуры, но при этом оно не является значительным и не превышает 15%.

Одним из основных требований, предъявляемых к материалам, рекомендуемым для использования в конструкции технических средств, эксплуатирующихся в условиях Арктики, является их коррозионная стойкость в условиях морского климата и отсутствие деградации механических свойств. В данной работе проводили испытания образцов из титановых сплавов на общую коррозионную стойкость в течение 3 мес в камере солевого тумана (КСТ). Условия испытаний следующие: солевой туман из 5%-ного раствора NaCl, температура 35°С, влажность φ=98% – при периодическом распылении. По агрессивности среды условия испытаний соответствуют условиям морского климата. С целью проведения сравнительного анализа свойств материала до и после выдержки в условиях КСТ, в камеру помещали образцы, подготовленные для проведения испытаний на растяжение и ударную вязкость.

Оптико-визуальные исследования состояния поверхности испытанных образцов из титановых сплавов проводили с помощью стереоскопического микроскопа. За время испытаний коррозионных повреждений образцов не выявлено. Проведенные после испытаний на коррозионную стойкость испытания на растяжение и ударную вязкость показали, что снижения значений механических свойств образцов из сплавов ВТ23М и ВТ43 не наблюдается.

С целью подтверждения коррозионной стойкости титановых сплавов ВТ23М и ВТ43 в условиях арктического климата при наличии контакта с углепластиком проведены следующие климатические испытания – выдержка при отрицательной температуре с периодическим увлажнением в течение 21 сут с циклом по схеме: при температуре

-20°C и влажности 90% в течение 22 ч + при температуре -50°C в течение 2 ч. Испытаниям подвергали девять листовых образцов из сплавов ВТ23М и ВТ43. Образцы укладывали в специальное приспособление послойно (рис. 5, а), чередуя со слоями углепластика. Плиты приспособления выполнены из титанового сплава ВТ1-0, вся конструкция скреплена стальными болтами для обеспечения плотного контакта между титаном и углепластиком. После проведения испытаний следов коррозии на титановых образцах не обнаружено, при этом стальные болты корродировали значительно (рис. 5, б). Испытания на растяжение, проведенные после климатических испытаний, показали, что свойства титановых сплавов остались на прежнем уровне.



Рис. 5. Образцы из сплавов ВТ23М и ВТ43, послойно уложенные с углепластиком, в исходном состоянии (а) и после проведения климатических испытаний (б)

Заключения

По результатам выполненной работы показано, что титановые сплавы ВТ23М и ВТ43 обладают высокими значениями прочностных характеристик, а также высокой стойкостью к климатическим воздействиям, присущим арктическому климату. Свойства сплавов не ухудшаются после климатических испытаний, и они не склонны к существенному снижению значений ударной вязкости при пониженных температурах (табл. 8). Однако сравнение значений ударной вязкости образцов из сплавов ВТ23М и ВТ43 показывает значительное превосходство первого сплава. Необходимо также отметить, что выбранные для исследованных полуфабрикатов одинаковые режимы термической обработки могут не являться оптимальными для сплава ВТ43.

Сплав ВТ23М положительно зарекомендовал себя при применении в конструкции самолетов – увеличение его применения позволит повысить весовую эффективность элементов конструкции. Сплав ВТ43 создан на основе теории комплексного легирования и демонстрирует возможность получения высоких значений механических свойств полуфабрикатов.

В дальнейшем необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на определение оптимальных технологических параметров изготовления полуфабрикатов из сплава ВТ43 и режимов их термической обработки. Эффективным может являться также применение листов из сплава ВТ43 для изготовления слоистых титанополимерных материалов. Однако в этом случае необходимо проведение комплекса работ по разработке технологии получения тонких листов (толщиной ~0,5 мм) из сплава ВТ43.

Сочетание значений механических характеристик, системы легирования и высокой технологичности делает сплавы ВТ23М и ВТ43 экономически выгодными для изготовления элементов конструкции как образцов авиационной техники, так и других видов транспортных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. *Авиационные материалы: справочник в 13 т. 7-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.Н. Каблова*. М.: ВИАМ, 2010. Т. 6: Титановые сплавы. 96 с.
3. Ширяев А.А., Анташев В.Г. Особенности разработки высокопрочного самозакаливающегося высокотехнологичного псевдо- β -титанового сплава // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №4. С. 23–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-23-30.
4. Яковлев А.Л., Филатов А.А., Бурханова А.А., Попова Ю.А., Ночовная Н.А. Эффективность применения титанового сплава ВТ23 в новых изделиях «ОКБ Сухого» // *Титан*. №2 (40). 2013. С. 39–42.
5. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
6. Лопатин Н.В., Бубнов М.В., Роголев А.М., Коробова Н.В., Сидоров А.А. Изотермическая штамповка заготовок диска из сплава ЭП741-НП, полученных методами порошковой металлургии // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №5. С. 31–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S5-31-37.
7. Хорев А.И. Комплексно-легированный титановый сплав ВТ23 универсального применения // *Технология машиностроения*. 2007. №7. С. 5–11.
8. Хорев А.И. Разработка титановых сплавов методом комплексного легирования // *Физико-химическая механика материалов*. 2006. Т. 42. №5. С. 45–50.
9. 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: 20.03.2018).
10. 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.
11. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. №2 (14). С. 16–21.
12. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сеник В.Я. и др. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 14–16.
13. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Путырский С.В., Крохина В.А. Титанополимерные слоистые материалы. // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №2 (44). С. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-56-62.
14. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №4. С. 41–45.
15. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Сереженков А.А. и др. Клеевые препреги и композиционные материалы на их основе // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 53–56.
16. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 260–265.
17. Арисланов А.А., Гончарова Л.Ю., Ночовная Н.А., Гончаров В.А. Перспективы использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №10. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.03.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.
18. 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.