

УДК 669.018.95

А.Л. Яковлев<sup>1</sup>, Н.А. Ночовная<sup>1</sup>, С.В. Путьрский<sup>1</sup>, В.А. Крохина<sup>2</sup>

## ТИТАНОПОЛИМЕРНЫЕ СЛОИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-56-62

*Рассмотрен новый класс слоистых композиционных материалов – титанополимерные материалы. Представлены результаты текущих разработок, актуальные вопросы и перспективы применения. За рубежом ведется активная разработка титанополимерных слоистых материалов и имеются определенные успехи в этой области. Отечественных аналогов такого рода материалов в настоящее время не существует, что подтверждает актуальность проблемы и необходимость ведения активных исследований и разработок в данном направлении.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 6.2. «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** композиционный материал, титан, титанополимерный материал, формование, подготовка поверхности.

*The article describes a new class of layered composite materials – titanium-polymer materials. The results of current developments, actual issues and application prospects are presented. Active development of the titanium-polymer hybrid laminates is carried out abroad and has some success in this area. Domestic analogues of such materials does not exist currently that confirms the importance of the problem and the need to conduct active research and development in this direction.*

*The work is performed within the framework of complex scientific direction 6.2. «Layered crack resistant, high strength metal-polymer materials» («The strategic directions of development of materials and technologies for processing them for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** composite material, titanium, titanium-polymer hybrid laminate, moulding, surface treatment.

<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

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана [Bauman Moscow State Technical University]; e-mail: bauman@bmstu.ru

**Введение**

Совершенствование аэродинамических характеристик планера летательных аппаратов и обеспечение весовой эффективности во многом решается благодаря применению перспективных композиционных материалов. Они становятся одними из основных конструкционных материалов в современном авиастроении, поэтому создание материалов нового поколения, обладающих высокой прочностью, в том числе удельной, является одной из наиболее актуальных задач [2, 3].

Широко известны металлополимерные композиционные слоистые материалы, состоящие из слоев алюминиевого сплава и полимерных композитов на основе стеклянных и арамидных волокон. Эти материалы имеют повышенные механические свойства по сравнению с листами алюминиевого сплава, а также обладают высокой трещиностойкостью при усталостном разрушении. За рубежом наиболее часто

используются слоистые металлополимерные композиционные материалы «алюминий–стеклопластик» под маркой GLARE, в Российской Федерации их аналогом являются материалы, выпускаемые под маркой СИАЛ. В настоящее время за рубежом такие материалы применяются в конструкции самолетов гражданской авиации, в частности в конструкции самолетов фирмы Airbus (A-380, A-350). Слоистый материал СИАЛ содержит слои алюминиевого сплава и стеклопластика, армированного стеклянными волокнами. Главным преимуществом материалов СИАЛ и GLARE является низкая скорость развития и распространения трещин [4, 5]. Другим возможным вариантом композиции металлополимерных материалов является сочетание листов титановых сплавов и препрегов углепластиков, обладающее кроме всего прочего высоким модулем упругости (95–115 ГПа).

Коррозионные испытания и исследование

электрохимических свойств металлических материалов в контакте с углепластиком показали, что наиболее уязвимы в таких сборочных единицах магниевые и алюминиевые сплавы, а также оцинкованные и кадмированные стали. Наиболее устойчивыми к коррозии в контакте с углепластиком считаются титановые сплавы.

Разработка титанополимерного слоистого материала предполагает решение целого комплекса проблем: получение тонких листов из титановых сплавов, разработка технологии подготовки поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионной прочности соединений титана с углепластиком, получение препрегов углепластиков на основе различных связующих, разработка технологии формования титанополимерного слоистого материала, выбор оптимальных методов резки и механической обработки титанополимерных материалов.

За рубежом ведется активная разработка титанополимерных слоистых материалов и имеются определенные успехи в этой области. Отечественных аналогов такого рода материалов в настоящее время не существует, что подтверждает актуальность проблемы и необходимость ведения активных исследований и разработок в данном направлении [6–8].

#### Материалы и методы

В качестве материалов для исследований использовали листы толщиной 0,5 мм из титановых сплавов BT20 и BT23M, препреги углепластиков с теплостойкостью 150, 175 и 200°C, титанополимерные слоистые материалы на основе вышеуказанных составляющих.

Проведены следующие виды испытаний (при температуре 20°C):

– на растяжение образцов из листов титановых сплавов на испытательной машине Zwick/Roell Z 400 (по ГОСТ 1497–84);

– на растяжение препрегов углепластиков и титанополимерных материалов на испытательной машине LFM-250 со скоростью испытания 10 мм/мин (по ГОСТ 25.601–80);

– на статическое сжатие препрегов углепластиков и титанополимерных материалов на испыта-

тельной машине Тиратест-2300 со скоростью испытания 5 мм/мин (по ГОСТ 25.601–80) и на испытательной машине Тиратест-2200 (по ГОСТ 25.602–80);

– на сдвиг соединений титан-углепластик на универсальной испытательной машине УТС-110М-501-У (по ГОСТ 14759–69);

– на МЦУ титанополимерных материалов на испытательной машине Walter+bai LFV-100 (по ГОСТ 25.506–85);

– титанополимерных материалов на общую коррозионную стойкость в течение 3 мес в камере солевого тумана SC-1000 (по ГОСТ 9.308–85).

Измерение плотности образцов из листов титановых сплавов и титанополимерных материалов проводили методом гидростатического взвешивания на электронных весах GR-200 по ГОСТ 20018–74.

#### Результаты

С целью выбора титанового сплава для его использования в качестве металлической прослойки в титанополимерных материалах проведен анализ данных по эксплуатационным характеристикам ( $\sigma_b$ ,  $d$ ,  $\delta$ ) листовых полуфабрикатов из высокопрочных титановых сплавов разного уровня прочности (табл. 1). Приведенные данные получены на листах в отожженном состоянии с последующей проглажкой и правкой [9–11].

По результатам проведенного анализа для дальнейшего исследования и разработки титанополимерных материалов выбраны сплавы различных классов – BT20 (псевдо- $\alpha$ ) и BT23M ( $\alpha+\beta$ ) [12]. Для изготовления титанополимерных материалов необходимы листы толщиной не более 0,5 мм. С этой целью разработаны технологии получения тонких листов толщиной 0,5 мм из титановых сплавов BT20 и BT23M [13, 14]. На основании разработанных технологий получены листовые полуфабрикаты в промышленных условиях ПАО «Корпорация ВСМПО–АВИСМА». Уровень свойств полученных листов представлен в табл. 2.

Титанополимерные слоистые материалы имеют высокие прочностные характеристики и работоспособны в широком диапазоне температур – от -60 до не менее +150°C [15]. В связи с этим для применения в титанополимерных материалах

Таблица 1

Характеристики листов из титановых сплавов

Сплав	Толщина листов, мм	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$d$ , г/см <sup>3</sup>
OT4-1	0,3÷0,7	590–785	25	4,55
OT4	0,5÷1,0	685–885	20	4,55
BT5-1	0,8÷1,2	735–930	15	4,42
BT14	0,8÷5,0	885–1050	8	4,52
BT6	1,0÷10,5	885–1080	8	4,43
BT20	0,8÷1,8	930–1130	12	4,45
	0,8÷4,0	980–1180	9	
BT23 (BT23M)	0,5÷1,8	1000–1200	6–8	4,57

Таблица 2

Результаты испытаний образцов из листов титановых сплавов BT20 и BT23M (средние значения)

Сплав	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Удельная прочность, км (усл. ед.)
BT20	1050	119,4	4,423	23
BT23M	1086	110,2	4,523	24

Таблица 3

Механические свойства углепластиков (средние значения)

Углепластики с теплостойкостью, °С	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Предел прочности при сжатии, МПа
150	1850	125	915
175	1870	130	935
200	1900	140	1110

выбраны препреги углепластиков с теплостойкостью 150, 175 (на основе клеевых связующих) и 200°С (на основе расплавленного связующего), а также разработаны технологии изготовления препрегов и углепластиков на их основе [16–19]. Механические свойства полученных углепластиков представлены в табл. 3.

Для определения вариантов подготовки поверхности титановых сплавов BT20 и BT23M для обеспечения требуемой адгезионной прочности листов из титановых сплавов с препрегами углепластиков с теплостойкостью 150, 175 и 200°С исследованы различные составы растворов, режимы химической и электрохимической обработок. По результатам проведенных исследований выбраны растворы, обеспечивающие высокую адгезионную прочность соединений титана с углепластиком ( $\tau_a \geq 14$  МПа), в том числе после воздействия повышенной влажности ( $\phi=98\%$ , 1 мес).

Для изготовления титанополимерного слоистого материала выбраны следующие варианты комбинации слоев «титан–углепластик» (рис. 1):

- листы титанового сплава толщиной 0,5 мм каждый;
- слой углепластика из двух препрегов толщиной 0,2 мм каждый.

Исследованные составы титанополимерных материалов представлены в табл. 4.

В зависимости от применяемого оборудования, физико-химических свойств связующих, используемых в препрегах углепластиков, а также от режимов формования препрегов углепластиков выбраны технологические параметры формования (температурные режимы, время подачи и величина давления), в соответствии с которыми изготовлены слоистые титанополимерные материалы (рис. 2) [20].

В процессе изготовления заготовок и образцов из титанополимерных материалов методом рубки на гильотинных ножницах (традиционная технология получения заготовок из титановых листов) на части материала происходило расслоение

(рис. 3). Для предотвращения расслоения опробованы различные способы изготовления заготовок и образцов из титанополимерных материалов. Установлено, что наиболее оптимальной технологической схемой изготовления образцов, при которой практически отсутствует расслаивание, является вырезка предварительных заготовок из листов титанополимерных материалов на гидроабразивном станке с последующей доводкой до готовых образцов на токарных, фрезерных или других станках с регулируемой подачей. Данным методом изготовили образцы из титанополимерных материалов для испытаний механических свойств, а также постановки в камеры солевого тумана и тропического климата для исследования влияния на них климатических факторов. Однако работы по отработке технологий изготовления заготовок и образцов из слоистых титанополимерных материалов необходимо продолжать, в том числе с целью промышленного применения и выпуска соответствующей нормативной документации.

Структура титанополимерного слоистого материала представлена на рис. 4.

Результаты испытаний образцов из титанополимерных материалов, изготовленных методом автоклавного формования, на определение плотности и механических свойств представлены в табл. 5, пример разрушенного при растяжении образца – на рис. 5.

Установлено, что титанополимерные материалы обладают высоким уровнем механических свойств и превосходят по показателям предела прочности (более чем на 15%) и удельной прочности (более чем на 50%) титановые сплавы.

Проведены предварительные испытания титанополимерных слоистых материалов на определение скорости роста трещины усталости (СРТУ) и малоциклового усталости (МЦУ). Однако для получения полноценных результатов и возможности их анализа необходима разработка специальных методик испытаний титанополимерных слоистых материалов [21, 22].

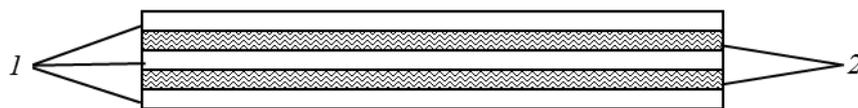


Рис. 1. Схема титанопolyмерного материала: 1 – листы титанового сплава; 2 – слой углепластика

Составы титанопolyмерных материалов

Таблица 4

Условный номер образца	Титановый сплав	Препреги углепластиков с теплостойкостью, °С
1	BT23M	150
2		175
3		200
4	BT20	150
5		175
6		200

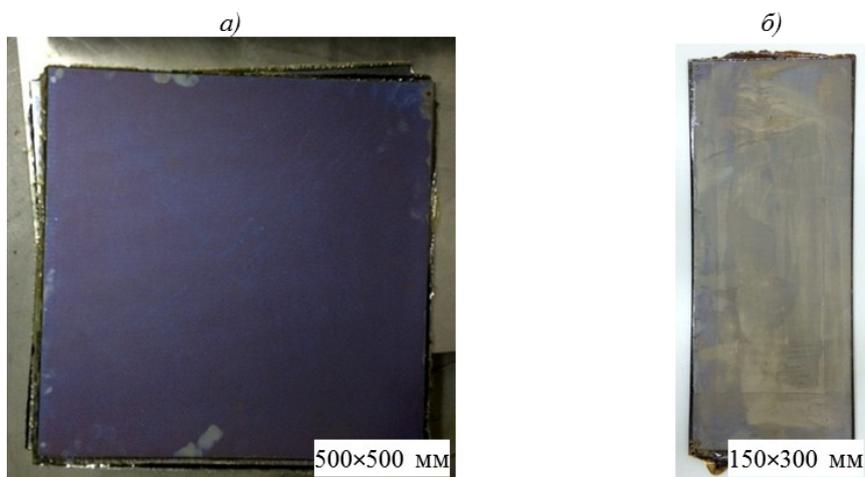


Рис. 2. Титанопolyмерные материалы:  
 а – сплав BT23M с электрохимической подготовкой поверхности+препрег углепластика с теплостойкостью 200°C (автоклавное формование); б – сплав BT20 с химической подготовкой поверхности+препрег углепластика с теплостойкостью 150°C (прессовое формование)



Рис. 3. Расслоение титанопolyмерных материалов при изготовлении заготовок и образцов рубкой на гильотинных ножницах (а) и фрезеровкой под готовый образец (б)

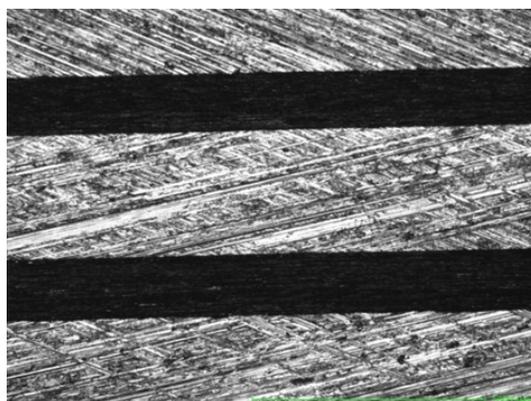


Рис. 4. Структура слоистого титанопolyмерного материала

Таблица 5

**Плотность и механические свойства титанополимерных материалов (средние значения)**

Условный номер образца (см. табл. 4)	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Удельная прочность, км (усл. ед.)
1	1248	98,5	1118	3,526	35,4
2	1368	107	1205	3,522	38,8
3	1276	104	860	3,258	39,2
4	1261	100,5	1011	3,457	36,5
5	1276	106,5	1096	3,484	36,6
6	1202	102	813	3,186	37,7
Лист из сплава ВТ20	1050	111,9	–	4,423	23



Рис. 5. Разрушенный образец титанополимерного слоистого материала при испытаниях на растяжение

Таблица 6

**Механические свойства образцов из титанополимерных материалов после экспозиции в камерах солевого тумана и тропического климата (средние значения)**

Условный номер образца	Климатический фактор	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа
Сплав ВТ23М+препреги углепластика с теплостойкостью 200°C			
1	Исходное состояние	1276	104
2	Камера солевого тумана	1250	93
3	Тропическая камера	1260	98
Сплав ВТ20+препреги углепластика с теплостойкостью 200°C			
4	Исходное состояние	1202	102
5	Камера солевого тумана	1210	93
6	Тропическая камера	1235	95
Сплав ВТ23М+препреги углепластика с теплостойкостью 150°C			
7	Исходное состояние	1248	98,5
8	Камера солевого тумана	1260	97
9	Тропическая камера	1257	105
Сплав ВТ20+препреги углепластика с теплостойкостью 150°C			
10	Исходное состояние	1261	100,5
11	Камера солевого тумана	1210	96
12	Тропическая камера	1177	89
Сплав ВТ23М+препреги углепластика с теплостойкостью 175°C			
13	Исходное состояние	1368	107
14	Камера солевого тумана	1463	110
15	Тропическая камера	1447	108
Сплав ВТ20+препреги углепластика с теплостойкостью 175°C			
16	Исходное состояние	1276	106,5
17	Камера солевого тумана	1400	105
18	Тропическая камера	1357	104

Проведены исследования влияния климатических факторов (камеры солевого тумана и тропического климата – в течение 3 мес в каждой) на слоистые титанополимерные материалы экспериментальных составов. Оптико-визуальные исследования, проводимые с применением стереоскопического микроскопа МБС-9, не выявили коррозионных повреждений и расслоений на образцах в течение всего периода экспозиции.

По окончании экспозиции образцов титанополимерных материалов в камерах солевого тумана и тропического климата, образцы испытали на растяжение. Результаты испытаний представлены в табл. 6.

Установлено, что климатические факторы могут оказывать влияние на модуль упругости при растяжении отдельных вариантов экспериментальных составов титанополимерных материалов (сплав ВТ23М+препреги углепластика с теплостойкостью 200°C, сплав ВТ20+препреги углепластика с теплостойкостью 200 и 150°C), в этих случаях снижение уровня модуля упругости составляет  $\leq 11\%$ . Не выявлено разницы между влиянием камер солевого тумана и тропического климата на свойства титанополимерных материалов [23].

Установлено, что наилучшее сочетание механических свойств, в том числе с учетом влияния климатических факторов, получено на титанополимерном материале на основе листов титанового сплава ВТ23М и препрегов углепластика с теплостойкостью 175°C.

Разработанные экспериментальные составы титанополимерных материалов могут работать вплоть до температуры 200°C.

Следует отметить, что представленные в данной статье материалы являются результатом только начального этапа разработки титанополимерных материалов. Требуется отработка множества научных и технических вопросов [24]:

- опробование различных компоновок и укладок слоев;
- исследование влияния различных методов механической обработки на прочность соединений «титан–углепластик»;
- отработка технологий формования и формообразования;

- разработка методик неразрушающего контроля титанополимерных слоистых материалов;
- отработка технологий резки и механической обработки титанополимерных материалов;
- разработка методик испытаний титанополимерных материалов;
- разработка методов соединения элементов из титанополимерных материалов с деталями из других материалов;
- разработка методов защиты кромок элементов и деталей из титанополимерных материалов от воздействия климатических факторов.

### Заключения

Титанополимерные слоистые материалы являются одним из наиболее перспективных направлений развития металлополимерных материалов. За рубежом ведется активная разработка титанополимерных слоистых материалов и имеются определенные успехи в этой области. Отечественных аналогов такого рода материалов в настоящее время не существует, что подтверждает актуальность проблемы и необходимость ведения активных исследований и разработок в данном направлении.

Уже на начальном этапе разработки титанополимерных слоистых материалов получены результаты, показывающие, что данные материалы обладают высоким уровнем механических свойств и превосходят по показателям предела прочности и удельной прочности титановые сплавы и, кроме того, имеются перспективы для повышения указанных характеристик.

Титанополимерные слоистые материалы перспективны для применения в элементах крыла, фюзеляжа и оперения в конструкциях перспективных самолетов, однако требуется еще большой объем работ в этом направлении для внедрения конструкций из титанополимерных материалов в конечные изделия.

*Авторы выражают благодарность за помощь в проведении работы И.Н. Гуляеву, И.А. Хрулькову, Н.Ф. Лукиной, О.В. Шуклиной, С.В. Сибилевой, Л.В. Захаровой, Л.С. Козловой.*

### 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. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // *Наука и жизнь*. 2010. №4. С. 2–7.
4. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестов В.В. Слоистые металлополимерные композиционные материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 226–230.
5. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмокомпозитов на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. №SP2. С. 174–183.
6. Каблов Е.Н. *Материалы и химические технологии*

- для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
7. 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: 25.04.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.
  8. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. № 1. С. 3–12.
  9. Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Бокков К.А. Экономнолегированные титановые сплавы для слоистых металлополимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №11. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.04.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-2-2.
  10. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А. Влияние термической обработки на свойства листов из высокопрочного титанового сплава BT23M // Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 8–13.
  11. Хорев А.И. Титановый сплав BT23 и его сравнение с лучшими зарубежными сплавами // Титан. 2006. №1 (18). С. 47–52.
  12. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. М.: Металлургия, 1992. 352 с.
  13. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б. Отечественные жаропрочные листовые титановые сплавы // Технология легких сплавов. 2014. №4. С. 47–51.
  14. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Филатов А.А., Бурханова А.А., Попова Ю.А. Эффективность применения титанового сплава BT23 в новых изделиях «ОКБ Сухого» // Титан. 2013. №2 (40). С. 39–42.
  15. 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.
  16. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.03.2016).
  17. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е. Клеевые препреги и слоистые материалы на их основе // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 19–21.
  18. 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. №S. С. 260–265.
  19. 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.
  20. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 20–26.
  21. Путьрский С.В., Плохих А.И., Яковлев А.Л. Исследование структуры и свойств многослойных материалов на основе титановых сплавов // Проблемы производства слитков и полуфабрикатов из сложнолегированных и интерметаллидных титановых сплавов: сб. докл. науч. конф. М.: ВИАМ, 2015. С. 9.
  22. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.
  23. 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.
  24. 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: 24.01.2016).