

Научная статья

УДК 669

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-20-31

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОИСТЫХ ТИТАНОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

А.А. Толстиков¹, А.А. Арисланов¹, С.В. Путырский¹, В.В. Шестов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены разные по составу варианты слоистых титанополимерных материалов. Приведены результаты комплекса физико-механических исследований слоистых титанополимерных материалов на основе различных титановых сплавов в комбинации с угле- и органопластиками. Выполнен анализ полученных результатов и определен наиболее оптимальный состав материала. Показана актуальность применения слоистых титанополимерных материалов для изготовления элементов конструкции изделий авиационной техники взамен аналогов, в том числе импортного производства.

Ключевые слова: титановые сплавы, клеевой препрег, обработка поверхности, автоклавное формование, слоистые титанополимерные материалы, механические свойства, физические свойства

Для цитирования: Толстиков А.А., Арисланов А.А., Путырский С.В., Шестов В.В. Исследование механических свойств слоистых титанополимерных материалов на основе титановых сплавов // Труды ВИАМ. 2023. № 2 (120). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-20-31.

Scientific article

STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM COMPOSITE LAMINATES MATERIALS BASED ON TITANIUM ALLOYS

A.A. Tolstikov¹, A.A. Arislanov¹, S.V. Putyrskiy¹, V.V. Shestov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Presents various of titanium composite laminates. The results of a complex of physic-mechanical studies of titanium composite laminates based on various titanium alloys in combination with carbon and organoplastics are presented. The analysis of the obtained results was carried out and the most optimal composition of the material was determined. The relevance of the use of titanium composite laminates for the manufacture of structural elements of aircraft products instead of analogues, including imported ones, is shown.

Keywords: titanium alloys, adhesive prepreg, surface treatment, autoclave molding, titanium composite laminates, mechanical properties, physical properties

For citation: Tolstikov A.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Shestov V.V. Study of the mechanical properties of titanium composite laminates materials based on titanium alloys. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-20-31.

Введение

Для создания агрегатов и изделий авиационного машиностроения, отвечающих современным требованиям по надежности и экономичности при эксплуатации, необходимо применение современных материалов, обладающих высокими значениями удельных прочностных характеристик и повышенным сопротивлением усталостному разрушению [1–4].

Неметаллические композиционные материалы по сравнению с металлическими сплавами, применяемыми в конструкции летательных аппаратов, обладают более высокими значениями удельных прочностных характеристик, однако имеют меньшее сопротивление развитию трещин. Совместить в себе преимущества неметаллических композиционных материалов и металлических сплавов способны слоистые металлополимерные композиционные материалы.

Так, за рубежом в конструкции самолетов гражданской авиации находят применение слоистые металлополимерные композиционные материалы, имеющие по сравнению с металлическими сплавами преимущества по трещиностойкости и плотности. Высоких значений удельных прочностных характеристик достигают благодаря использованию угле- и органопластиков, которые в составе металлополимерного материала можно совместить с титановыми сплавами, ввиду отсутствия развития коррозионных повреждений в созданных композициях [5, 6].

В настоящее время не существует отечественных аналогов титанополимерных слоистых материалов, что только подтверждает возникновение острой необходимости в активных исследованиях и разработках в данном направлении. Высокая весовая эффективность титанополимерного слоистого материала позволит рационально его применять при создании конструкций сверхзвукового пассажирского самолета и тем самым повысить их надежность [7].

Проведены исследования и анализ механических свойств разработанных слоистых титанополимерных материалов на основе титановых сплавов в композиции с угле- и органопластиками.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

Для изготовления слоистых титанополимерных материалов на основе титановых сплавов, а также угле- и органопластиков использовали следующие материалы (рис. 1):

- листы титанового сплава марки ОТ4-1 толщиной 0,3 мм производства ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» (поставка по ОСТ1 90218–76);
- листы титанового сплава марки ВТ23М толщиной 0,5 мм производства ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» (поставка по ТУ 1825-719-07510017);
- препрег органопластика марки ВКО-26 производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (поставка по ТУ 13.96.14-026-07545412 «Препрег органопластика марки ВКО-26»);
- препрег углепластика марки ВКУ-68 производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (поставка по ТУ 23.99.14-035-07545412 «Препрег клеевой марки КМКУ-4м.175.УМТ49»).

Листы титанового сплава марок ОТ4-1 толщиной 0,3 мм и ВТ23М толщиной 0,5 мм в состоянии поставки обладают механическими свойствами, представленными в табл. 1.

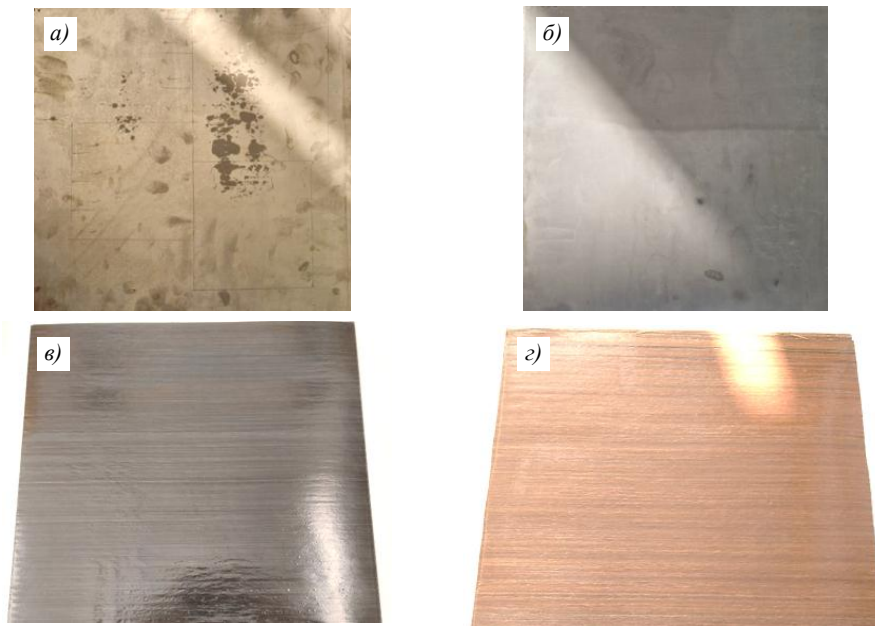


Рис. 1. Внешний вид листов титанового сплава марок ОТ4-1 (а) и ВТ23М (б), а также фрагментов препрегов углепластика марки ВКУ-68 (в) и органопластика марки ВКО-26 (г) для изготовления слоистых титанопolyмерных материалов

Таблица 1

Механические свойства титанового сплава различных марок в состоянии поставки

Сплав	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\delta_5, \%$
	МПа		
ОТ4-1	≥ 550	≥ 630	≥ 48
ВТ23М	≥ 1000	≥ 1090	$\geq 12,5$

Препреги угле- и органопластиков марок ВКУ-68 и ВКО-26 соответственно обладают механическими свойствами при растяжении, представленными в табл. 2.

Таблица 2

**Механические свойства при растяжении
препегов углепластика ВКУ-68 и органопластика ВКО-26**

Препрег	σ_B МПа	E , ГПа
Углепластика ВКУ-68	≥ 1935	≥ 155
Органопластика ВКО-26	≥ 1430	≥ 75

Изготовление слоистых титанопolyмерных материалов происходило по следующей схеме:

- подготовка поверхности заготовок листов титановых сплавов;
- послойная сборка пакета (титан–пластик–титан–пластик–титан);
- сборка вакуумного мешка с заготовками с последующим помещением в автоклав;
- процесс формования по разработанному режиму;
- охлаждение и распрессовка.

В результате изготовлены следующие слоистые титанопolyмерные материалы (рис. 2) в компоновке 3×2 (титан–пластик–титан–пластик–титан) на основе:

- титанового сплава ОТ4-1 и углепластика ВКУ-68;
- титанового сплава ОТ4-1 и органопластика ВКО-26;
- титанового сплава ВТ23М и углепластика ВКУ-68;
- титанового сплава ВТ23М и органопластика ВКО-26.

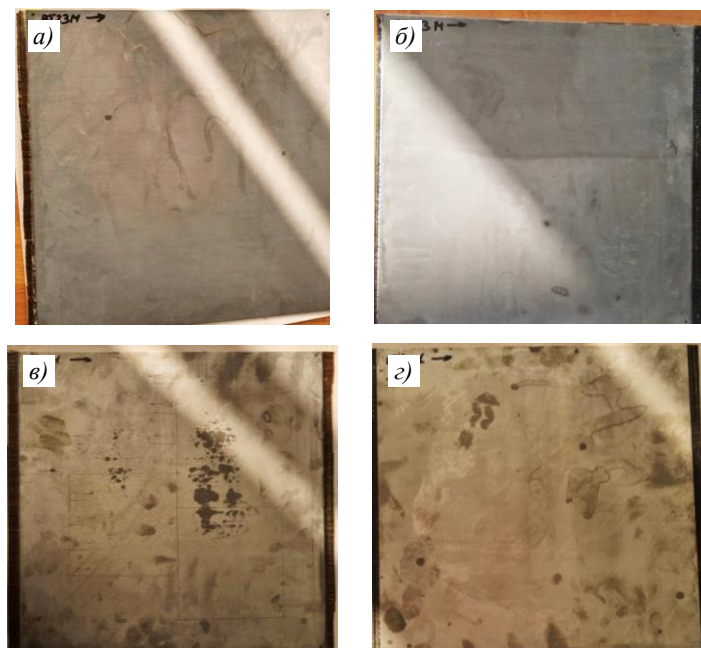


Рис. 2. Титанополимерные материалы после формования в компоновке «листы титанового сплава + органо- или углепластик»: а – BT23M + ВКО-26; б – BT23M + ВКУ-68; в – OT4-1 + ВКУ-68; з – OT4-1 + ВКО-26

Анализ структуры полученных материалов выполняли на оптическом микроскопе Olympus GX51.

Образцы из листов титановых сплавов испытывали на растяжение (E , σ_b) на испытательной машине Zwick/Roell Z 400 в соответствии с ГОСТ 1497–84.

Из препрега органопластика марки ВКО-26 методом автоклавного формования изготовили образцы и исследовали их свойства. Определены следующие физические и физико-механические характеристики образцов данного органопластика: плотность, толщина монослоя, прочность и модуль упругости при растяжении, прочность и модуль упругости при изгибе и прочность при межслойном сдвиге (по ММ 1.2.039–2005, ГОСТ 15139–80, ГОСТ Р 56785–2015, ГОСТ 56810–2015 и ГОСТ 32659–2014 соответственно).

Из клевого препрега марки КМКУ-4м.175.UMT49 методом автоклавного формования изготовили образцы углепластика марки ВКУ-68 и исследовали их физико-механические характеристики: пределы прочности при растяжении (ГОСТ 56785–2015), сжатии (ГОСТ 33519–2015), межслойном сдвиге образцов (ГОСТ 32659–2014), а также предел прочности при сдвиге клеевых соединений (ГОСТ Р 57834–2017).

Испытания на растяжение (E , σ_b) образцов слоистых титанополимерных материалов осуществляли при температурах 20 и 175 °С на испытательной машине Zwick/Roell Z 400 по ГОСТ 1497–84, а испытания на определение плотности выполняли методом обмера и взвешивания при помощи весов электронных GR-200, штангенциркуля цифрового ШЦЦ-I-200-0,01 и термогигрометра ИВА-6 (модификация ИВА-6Н) в соответствии с ГОСТ 15139–69.

Результаты и обсуждение

Титановые сплавы

Первоначальная задача при изготовлении слоистого композиционного материала на основе титановых сплавов – выбор исходных материалов, в частности титановых сплавов. Для этого проанализированы тенденции применения полуфабрикатов (листов) из титановых сплавов наименьших толщин. Известно, что для изготовления титановых

листов используют сплавы с наилучшей технологической пластичностью, что позволяет получить гарантированно годный полуфабрикат без каких-либо дефектов (например, без трещин) [8–12].

Исследованы изготавливаемые листовые полуфабрикаты из титановых сплавов различных толщин, определены их механические свойства. На основании анализа полученных данных выбраны сплавы марок ОТ4-1 и ВТ23М, которые в большей степени соответствуют необходимым требованиям конструкций для авиастроения [11, 12].

С целью исследования механики разрушения композиции изготавливаемых титанополимерных материалов также проведено моделирование образца. Полученная конечно-элементная модель состоит из трех титановых слоев и двух слоев углепластика, испытываемого на растяжение. Выполненные расчеты позволили установить следующие стадии разрушения титанополимера: разрушение углепластика, образование шейки в титановых слоях и разрушение титановых слоев. Кроме того, можно предположить локальное нарушение связи «титан–углепластик» в зоне, где и происходит разрыв слоев. При этом, как видно из цветовой индикации на рис. 3, а, напряжения в слоях распределяются неравномерно, достигая более высокого уровня в неметаллической составляющей (красный цвет) [3].

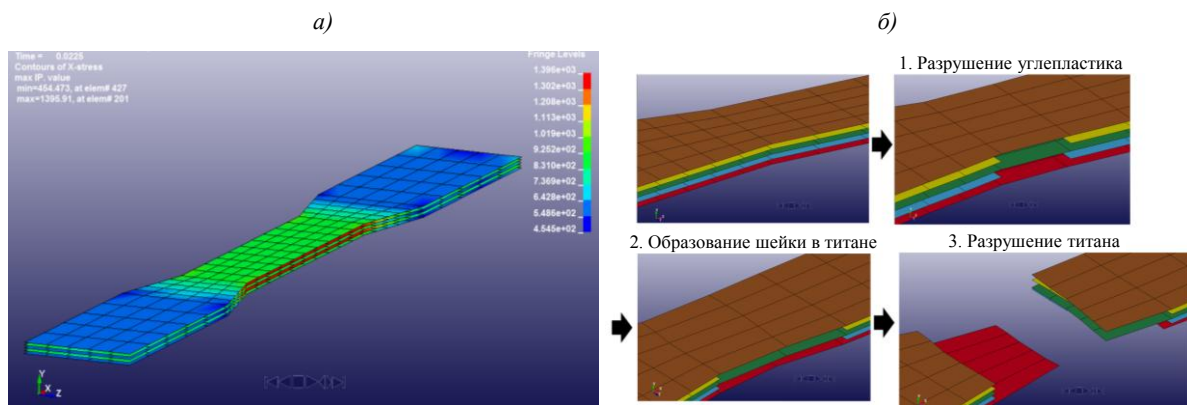


Рис. 3. Модель образца слоистого титанополимерного материала (а) и стадии его разрушения (б)

Все сказанное ранее подтверждается анализом графика «напряжение–время» (рис. 4) для конечных элементов в зоне разрушения.

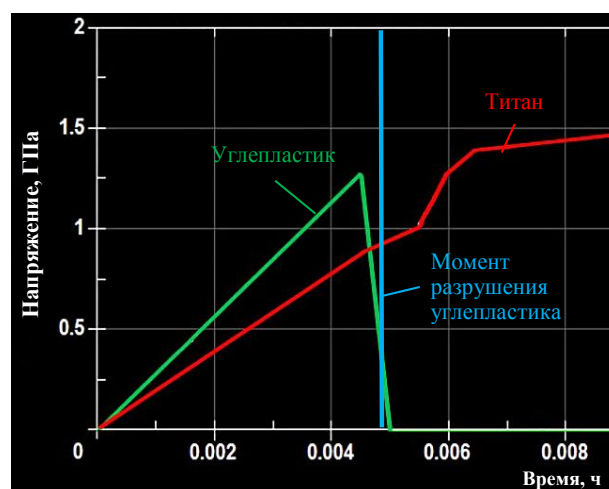


Рис. 4. Зависимость «напряжение–время» для разрушаемых элементов образца титанополимерного материала, испытываемого по схеме с постоянно возрастающей нагрузкой

Из данных, представленных на рис. 4, видно, что в композиционном материале разрушение первоначально происходит в углепластике в тот момент, когда величина прикладываемого напряжения в титановом листе еще не достигает его предела прочности. Данная модель является вспомогательной для понимания механики разрушения слоистого титанополимерного материала. В дальнейшем необходимо в большей степени детализировать зону непосредственного разрушения для получения более точной картины и стадий разрушения. Однако полученные результаты дают общее понимание о влиянии каждого компонента на механические свойства итоговой структуры.

Полимерные материалы

Подбор полимерной составляющей является следующей и не менее важной задачей при создании слоистого титанополимерного материала. Для выбора связующих и армирующих наполнителей полимерных композиционных материалов проведен анализ научно-технической информации в области технологии изготовления клевого препрега и композиционного материала на его основе. Исходя из зарубежного опыта сделан вывод, что наилучшие показатели свойств демонстрируют угле- и органопластики.

Широкое применение при изготовлении препрегов по расплавной технологии получили эпоксидные связующие на основе модифицированных высокопрочных клеевых композиций с регулируемыми характеристиками (вязкоупругими, прочностными, деформационными и т. д.). Среди номенклатуры клеевых связующих особо следует отметить связующее марки ВСК-14-4м, обладающее наибольшей рабочей температурой (175 °С). Данное связующее обеспечивает высокую адгезию к титановым сплавам и хорошую совместимость с армирующими (арамидным и углеродным) наполнителями. Клеевое связующее марки ВСК-14-4м с работоспособностью до 175 °С широко используется в авиационной отрасли при производстве клеевых препрегов на основе стеклонаполнителей для изготовления деталей из полимерных композиционных клеевых материалов, в том числе сотовой и слоистой конструкций [13, 14].

По результатам проведенного анализа данных для препрега углепластика, предназначенного для использования в составе слоистого титанополимерного материала, выбрано отечественное клеевое связующее марки ВСК-14-4м с рабочей температурой до 175 °С, обладающее пределом прочности при сдвиге отвержденного образца при температуре 20 °С, равным $\geq 21,0$ МПа, при температуре 175 °С: $\geq 22,5$ МПа; массовая доля летучих веществ составила 1,6–1,7 %.

В настоящее время в связи с трудностями в поставке углеродных армирующих наполнителей ряда зарубежных фирм возникла необходимость разработки препрегов на основе альтернативных высокопрочных жгутовых углеродных наполнителей. Для достижения высоких значений прочности углепластика (на основании научно-технического задела) для получения препрега и углепластика на его основе выбран отечественный углеродный жгутовой наполнитель марки UMT49S-12K-EP.

Исследованы и выбраны технологические режимы изготовления препрега на основе клеевого связующего марки ВСК-14-4м с рабочей температурой до 175 °С и отечественного углеродного наполнителя марки UMT49S-12K для получения препрегов требуемого качества (без видимых дефектов – перетяжки, раздвижки волокон) и обеспечения отклонения по содержанию связующего в препрегах не более 2 % (по массе) от номинальной величины (39 ± 2 % (по массе) – слои для формирования углепластика заданной толщины; 63 ± 2 % (по массе) – слой, образующий контактную пару титан/полимер). Технология изготовления препрега позволяет достичь довольно высокого уровня свойств. Основные характеристики данного материала представлены в табл. 3.

Кроме того, по результатам проведенного анализа данных для изготовления препрега и органопластика на его основе выбрано арамидное волокно Русар-НТ и связующее марки ВСК-14-4м [13, 14].

Таблица 3

Свойства углепластика марки ВКУ-68

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств*
Предел прочности, МПа: при растяжении при сжатии при межслойном сдвиге	20	<u>1880–1990</u> 1935
	175	<u>1690–2010</u> 1860
	20	<u>1140–1290</u> 1235
	175	<u>770–990</u> 865
	20	<u>68–79</u> 73
Модуль упругости при растяжении, ГПа	20	<u>149–160</u> 155
	175	<u>140–148</u> 148

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Определено, что для получения препрега органопластика необходимо следующее:

- оптимальное содержание связующего в препреге должно быть в диапазоне от 34 до 50 % (по массе) (при поверхностной плотности препрега 240–360 г/м²);
- отклонение по содержанию связующего в препреге должно составлять не более 2 % (по массе);
- двухсторонний способ нанесения связующего (по сравнению с односторонним) позволяет получить более качественный препрег с равномерным нанесением связующего;
- при температуре <80 °С степень проникновения связующего в объем армирующего наполнителя недостаточна для качественной пропитки армирующего наполнителя связующим. При температуре 140 °С благодаря снижению вязкости связующего происходит его вытекание за пределы армирующего наполнителя.

В результате изготовлен органопластик марки ВКО-26, обладающий высоким уровнем свойств, представленных в табл. 4.

Таблица 4

Свойства органопластика марки ВКО-26

Свойство	Температура испытания, °С	Значения свойств*
Плотность, г/см ³	20	<u>1,383–1,392</u> 1,388
Толщина монослоя, мм	20	<u>0,202–0,204</u> 0,203
Предел прочности, МПа: при растяжении при изгибе при межслойном сдвиге	20	<u>1390–1530</u> 1430
	150	<u>1200–1320</u> 1270
	20	<u>720–730</u> 720
	150	<u>400–415</u> 405
	20	<u>68–73</u> 71
	150	<u>40–50</u> 48
Модуль упругости при растяжении, ГПа	20	<u>72–78</u> 75

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Формование слоистого титанополимерного материала

Формование заготовок слоистого титанополимерного материала проводили в автоклаве Magnabosco с максимальной температурой нагрева 250 °С и максимальным давлением в вакууме 0,098 МПа по следующей схеме:

- помещение заготовки в вакуумном мешке в автоклав;
- создание под мешком разряжения;
- повышение температуры в автоклаве и выдерживание заготовки;
- увеличение давления в автоклаве при сохранении разряжения в мешке, отключение вакуум-насоса и контроль на протяжении всего процесса отверждения герметичности вакуумного мешка;
- повышение температуры в автоклаве и выдерживание заготовки под давлением;
- охлаждение заготовки под давлением (без принудительного охлаждения), а затем ее распрессовка [15–17].

Варианты составов титанополимерных материалов могут быть следующие:

- листы сплава BT23M + органопластик ВКО-26;
- листы сплава BT23M + углепластик ВКУ-68;
- листы сплава OT4-1 + органопластик ВКО-26;
- листы сплава OT4-1 + углепластик ВКУ-68.

Схема комбинации слоев титанового сплава и углепластика представлена на рис. 5. На изготовленных титанополимерных материалах визуальных дефектов (трещин, расслоений и т. д.) не обнаружено.

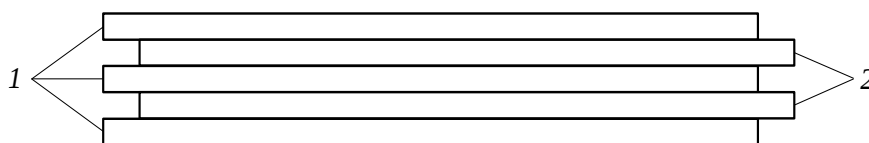


Рис. 5. Схема комбинации слоев титанополимерного материала (1 – лист титанового сплава; 2 – угле- или органопластик)

Для проведения испытаний на определение основных физико-механических свойств (механических свойств при растяжении, плотности методом обмера и взвешивания) слоистые титанополимерные материалы разрезали на заготовки под образцы. С целью минимизации случаев расслоения образцы изготавливали следующим образом: заготовки под образцы вырезали методом гидроабразивной резки с последующей доводкой образцов до финальных размеров на токарных и фрезерных станках. В основном на полученных образцах видимые расслоения или иные дефекты отсутствуют (процент отбракованных образцов крайне мал). Однако для минимизации возникновения брака в процессе механической обработки материалов работы по оптимизации данного процесса (в том числе по технологии сверления отверстий) необходимо продолжать для обеспечения оптимальной технологичности в условиях промышленного изготовления.

Результаты испытаний образцов из слоистых титанополимерных материалов на определение их механических свойств (в том числе при повышенных температурах) и плотности представлены в табл. 5 и 6.

Образцы, полученные из слоистого титанополимерного материала на основе листов из титанового сплава марки BT23M, показывают гораздо более высокий уровень предела прочности, чем образцы из слоистого титанополимерного материала на основе листов из титанового сплава марки OT4-1.

Таблица 5

**Результаты испытаний на растяжение образцов из слоистых
титанополимерных материалов различного состава при температуре 20 °С**

Состав материала	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Плотность, г/см ³
ОТ4-1 + ВКУ-68	120	1140	2,95
	119	1090	
	116	1150	
ОТ4-1 + ВКО-26	95	770	3,03
	96	820	
	97	790	
ВТ23М + ВКУ-68	120	1380	3,75
	121	1390	
	118	1350	
ВТ23М + ВКО-26	106	1210	3,5
	104	1220	
	106	1240	

Таблица 6

**Результаты испытаний на растяжение образцов из слоистых
титанополимерных материалов различного состава при температуре 175 °С**

Состав материала	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности при растяжении, МПа
ОТ4-1 + ВКУ-68	107	1100
	102	1000
	104	1000
ОТ4-1 + ВКО-26	68	520
	63	455
	65	440
ВТ23М + ВКУ-68	113	1060
	104	1120
	109	1010
ВТ23М + ВКО-26	94	1010
	90	980
	88	950

Следует также отметить, что явно выделяются образцы из материала на основе сплава ВТ23М и углепластика ВКУ-68, показывающие наилучшие свойства среди всех вариантов составов. Это свидетельствует о необходимости проведения дополнительных всесторонних исследований характеристик материала указанного состава, значения которых определяют возможность применения данных материалов в конкретных агрегатах и изделиях авиационной техники как общего, так и специального назначения [18–21].

Заключения

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что слоистые титанополимерные материалы способны обеспечить достаточно высокий уровень прочностных характеристик, тем самым составив конкуренцию материалам-аналогам по применению, к которым можно отнести металлополимерные материалы группы СИАЛ, а также высокопрочные листовые полуфабрикаты из титановых сплавов, таких как Т-6-4, ВТ6 и ВТ23М. Кроме того, установлено, что титанополимерные материалы

по прочностным характеристикам заметно превосходят перечисленные аналоги, при этом обладают гораздо меньшей (по сравнению с листовыми титановыми полуфабрикатами) плотностью (от $\sim(15-20)$ %) благодаря наличию в их составе высокого процентного содержания препрегов угле- или органопластиков.

Следует также отметить, что значения основных физических (плотность) и механических прочностных свойств, а также толщины материала в целом могут регулироваться путем изменения количества слоев пластика и титана, а также монослоев пластиков в зависимости от требований, предъявляемых к конкретной детали и условиям ее эксплуатации.

Сделан также вывод о необходимости продолжения исследований данной группы материалов с целью оптимизации процессов механической обработки (в частности, процессов сверления и резки) слоистых титанополимерных материалов.

Возможность достижения высоких значений прочностных характеристик в совокупности с низкой плотностью делает актуальным применение класса слоистых титанополимерных материалов в изделиях авиационной техники как общего, так и специального назначения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ К.Е. Куцевичу и Н.А. Соловьевой за сотрудничество в исследованиях в области препрегов угле- и органопластиков, а также А.В. Князеву и М.А. Далину за сотрудничество в области подготовки поверхности листов из титановых сплавов и методики неразрушающего контроля.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы. Проблемы ускорения развития аддитивных технологий в России // Металлы Евразии. 2017. № 3. С. 2–6.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
4. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Кулагина Г.С., Соловьева Н.А. Опыт применения расплавных полимерных связующих для препрегов органопластиков // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93. № 3. С. 378–385.
5. Панин П.В., Ночовная Н.А., Каблов Д.Е., Алексеев Е.Б., Ширяев А.А., Новак А.В. Практическое руководство по металлографии сплавов на основе титана и его интерметаллидов: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2020. 200 с.
6. Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Шульдешова П.М., Черных Т.Е. Органопластики на основе термостойких полимерных волокон и матриц // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-78-86.
7. Арисланов А.А., Гончарова Л.Ю., Ночовная Н.А., Гончаров В.А. Перспективы использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах // Труды ВИАМ. 2015. № 10. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.
8. Глазунов С.Г., Ясинский К.К. Титановые сплавы для авиационной техники и других отраслей промышленности // Технология легких сплавов. 1993. № 7–8. С. 47–54.
9. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974. 368 с.
10. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИАМ; МАТИ, 2009. 520 с.

11. Моисеев В.Н. Бета-титановые сплавы и перспективы их развития // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1998. № 12. С. 11–14.
12. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-стабилизаторы // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
13. Железина Г.Ф., Тихонов И.В., Черных Т.Е., Бова В.Г., Войнов С.И. Арамидные волокна третьего поколения Русар-НТ для армирования органотекстолитов авиационного назначения // *Пластические массы*. 2019. № 3–4. С. 43–47.
14. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 6–7 (89). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.08.2022). DOI: 10.16577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
15. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Ильичев А.В., Соловьева Н.А. Исследование механических характеристик слоистого металлополимерного композиционного материала на основе листов алюминия и слоев углепластика // *Вопросы материаловедения*. 2018. № 4 (96). С. 20–28.
16. Leyens C., Peters M. *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. 513 p.
17. Boyer R.R., Briggs R.D. The Use of β Titanium Alloys in the Aerospace Industry // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2005. Vol. 14 (6). P. 681–685.
18. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Путырский С.В., Крохина В.А. Титанополимерные слоистые материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № S2. С. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-56-62.
19. Дуюнова В.А., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Огурцов П.С., Сомов А.В. Методы формообразования металлополимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.08.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
20. Kazemi M.E., Shanmugam L., Yang L., Yang J. A review on hybrid titanium composite laminates (HTCLs) with focuses on surface treatments, fabrications, and mechanical properties // *Composites. Part A*. 2020. No. 128. Art. 15.
21. Xin L., Xin Z., Jinglei Y. et al. Mechanical behavior of Ti/CFRP/Ti laminates with different surface treatments of titanium sheets // *Composite structures*. 2016. No. 12. Art. 33.

References

1. Kablov E.N. Dominant of national technological initiative. Problems of accelerating the development of additive technologies in Russia. *Metally of Evrazii*, 2017, no. 3, pp. 2–6.
2. Kablov E.N. What to make the future from? The materials of the new generation, the technology of their creation and processing are the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
3. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
4. Zhelezina G.F., Voinov S.I., Kulagina G.S., Solovyova N.A. Experience in the use of melting polymer binders for the prepares of organoplastics. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2020, vol. 93, no. 3, pp. 378–385.
5. Panin P.V., Night N.A., Kablov D.E., Alekseev E.B., Shiryayev A.A., Novak A.V. *Practical guide for metallography of alloys based on titanium and its intermetallids*: textbook. Ed. E.N. Kablov. M.: VIAM, 2020. 200 p.
6. Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Shuldeshova P.M., Chernykh T.E. Organoplastics based on heat-resistant polymer fibers and matrices. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-78-86.
7. Arislanov A.A., Goncharova L.J., Nochovnaya N.A., Goncharov V.A. Prospects for the use of titanium alloys in laminated composite materials. *Trudy VIAM*, 2015, no. 10, paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.
8. Glazunov S.G., Yasinsky K.K. Titanium alloys for aviation equipment and other industries. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 1993, no. 7–8, pp. 47–54.

9. Glazunov S.G., Moiseev V.N. *Structural titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 368 p.
10. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanium alloys. Composition, structure, properties: reference*. Moscow: VILS; MATI, 2009, 520 p.
11. Moiseev V.N. Beta-titan alloys and prospects for their development. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1998, no. 12, pp. 11–14.
12. Kablov E.N., Kashapov O.S., Medvedev P.N., Pavlova T.V. Study of a $\alpha + \beta$ -titanium alloy based on a system of Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
13. Zhelezina G.F., Tikhonov I.V., Blacks, I.E., Bova V.G., Voinov S.I. Third-generation Aramid fibers of Rusar-n for reinforcement of organotextolites of aviation purposes. *Plasticheskiye massy*, 2019, no. 3–4, pp. 43–47.
14. Kolobkov A.S. Polymer composite materials for various aircraft structures (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 17, 2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
15. Voinov S.I., Zhelezina G.F., Ilyichev A.V., Solovyova N.A. The study of the mechanical characteristics of layered metallomantic compositional material based on aluminum sheets and layers of carbon fiber. *Voprosy materialovedeniya*, 2018, no. 4 (96), pp. 20–28.
16. Leyens C., Peters M. *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003, 513 p.
17. Boyer R.R., Briggs R.D. The Use of β Titanium Alloys in the Aerospace Industry. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2005, vol. 14 (6), pp. 681–685.
18. Yakovlev A.L., Nochovnaya N.A., Putyrskiy S.V., Krohina V.A. Titanium-polymer laminated materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. S2, pp. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-56-62.
19. Duyunova V.A., Serebrennikova N.Yu., Nefedova Yu.N., Sidelnikov V.V., Somov A.V. Methods of forming metal-polymer composite materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 17, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
20. Kazemi M.E., Shanmugam L., Yang L., Yang J. A review on hybrid titanium composite laminates (HTCLs) with focuses on surface treatments, fabrications, and mechanical properties. *Composites. Part A*, 2020, no. 128, art. 15.
21. Xin L., Xin Z., Jinglei Y. et al. Mechanical behavior of Ti/CFRP/Ti laminates with different surface treatments of titanium sheets. *Composite structures*, 2016, no. 12, art. 33.

Информация об авторах

Толстик Алексей Александрович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Арисланов Аскаджон Абдурасулович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Путырский Станислав Владимирович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шестов Виталий Викторович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Aleksey A. Tolstikov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Askadzhon A. Arislanov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Stanislav V. Putyrskiy, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vitaliy V. Shestov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.08.2022.

The article was submitted 30.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 31.08.2022.