
Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-95-106

ВЫСОКОМОДУЛЬНЫЕ УГЛЕПЛАСТИКИ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ (обзор)

И.Н. Гуляев¹, К.А. Павловский¹

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

Аннотация. Представлен обзор разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ углепластиков на основе высокомодульных углеродных волоконных и тканых армирующих наполнителей. Показано отличие высокомодульных армирующих наполнителей от высокопрочных. Приведены основные отечественные и зарубежные марки волокон, а также информация по упруго-прочностным характеристикам разработанных высокомодульных углепластиков, в том числе при различных температурах. Проведено сравнение отечественных углепластиков с зарубежными материалами аналогичных состава и структуры.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал (ПКМ), высокомодульный углепластик, углеродное волокно, графитизированное волокно, конструкционные свойства ПКМ, авиационные материалы

Для цитирования: Гуляев И.Н., Павловский К.А. Высокомодульные углепластики для изделий гражданской авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-95-106.

Scientific article

HIGH MODULUS CARBON PLASTICS FOR CIVIL AVIATION EQUIPMENT (review)

I.N. Gulyaev¹, K.A. Pavlovskiy¹

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

Abstract. The review of carbon fiber reinforced plastics based on high-modulus carbon fiber and woven reinforcing fillers developed at the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM is presented. The difference between high-modulus reinforcing fillers and high-strength fillers is shown. The main domestic and foreign fiber brands are presented, as well as information on the elastic-strength characteristics of the developed high-modulus carbon fiber plastics, including at various temperatures. The comparison of domestic carbon fiber plastics with foreign materials of similar composition and structure is carried out.

Keywords: polymer composite material (PCM), high-modulus carbon fiber, carbon fiber, graphitized fiber, structural properties of PCM, aviation materials

For citation: Gulyaev I.N., Pavlovskiy K.A. High modulus carbon plastics for civil aviation equipment (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-95-106.

Введение

Количество внедряемых полимерных композиционных материалов (ПКМ) при производстве изделий, в том числе и в российской промышленности, постоянно

увеличивается. Наиболее быстрорастущим сегментом являются ПКМ на основе углеродных волокнистых наполнителей, используемых в качестве армирующих элементов. Широко применяются углепластики при изготовлении различных деталей и агрегатов авиационной техники и космических аппаратов, силовых элементов крыла, планера, малой механизации, мотогондолы, авиационных двигателей и т. п. При этом требования к прочности и модулю упругости применяемых материалов постоянно повышаются [1, 2].

Необходимость разработки углепластиков с улучшенными характеристиками жесткости и температурной размерной стабильности при сохранении высоких показателей прочности диктуется потребностями таких объектов новой техники, которые по условиям эксплуатации должны сохранить стабильность геометрических размеров при больших знакопеременных силовых и температурных нагрузках. Применение данных материалов в объектах авиационной техники нового поколения позволяет достичь аэродинамической жесткости элементов планера, особенно при малой строительной высоте конструктивных элементов [3, 4].

Отличительная особенность высокомодульных углепластиков – повышенная степень анизотропии упругих и прочностных характеристик. Наиболее высоких значений прочности и жесткости достигают в композициях с однонаправленным расположением непрерывных волокон в направлении укладки при нагружении, а наименьших – при нагружении в ортогональном направлении [5].

Углеродные волокна обладают следующими уникальными свойствами, которые обеспечивают их незаменимость при разработке современных ПКМ и конструкций на их основе:

- высокие удельные характеристики прочности и модуля упругости при растяжении;
- высокая термостойкость в инертных средах или в вакууме при температуре до 3000 °С, а на воздухе до 550 °С;
- удельное электрическое сопротивление от $0,02 \cdot 10^{-6}$ до $1,0 \cdot 10^9$ Ом·м;
- большая активная поверхность (до 2500 м²/г) и сорбционная способность;
- высокая атмосферо- и химическая стойкость к концентрированным кислотам, щелочам и растворителям, устойчивость к действию света и проникающей радиации;
- биостойкость и биоинертность, жаростойкость и трудногорючесть.

Наиболее широкое распространение в качестве волокон для изготовления конструкционных углепластиков получили углеродные волокна на основе полиакрилонитрила (ПАН-волокно). Процесс производства углеродных волокнистых наполнителей включает следующие стадии: окисление (200–325 °С) с вытягиванием, карбонизация (1000–1500 °С) и графитация (2500–2800 °С). В зависимости от того, при какой температуре завершен производственный цикл, получают волокна с высокой прочностью (карбонизованное волокно) или высоким модулем упругости (графитированное волокно) [5–8].

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Высокомодульные углеродные волокна

В Российской Федерации производством высокомодульных углеродных волокон на основе ПАН-волокна занимается ООО «Аргон» (г. Балаково), а на основе вискозного волокна – ООО «Завод углеродных и композиционных материалов» (г. Челябинск). В настоящее время еще одним производителем высокомодульных волокон является компания ЮМАТЕКС.

Освоен следующий ассортимент углеродных волокнистых наполнителей: углеродные волокна (нити, жгуты) для армирования углеродных композитов (УКН-П, УКН-М, Грапан, КАЖ, ГЖ) и углеродные ленты для армирования углепластиков (ЛУ-П, ЭЛУР, ЛЖУ-М, ЛЖУ-П).

В табл. 1 приведены основные типы, марки и характеристики углеродных волокон, применяемых для армирования конструкционных материалов.

Таблица 1

Основные типы, марки и свойства углеродных армирующих наполнителей, производимых в Российской Федерации

Тип наполнителя	Марка наполнителя	Прочность волокна, МПа	Модуль упругости волокна, ГПа
Высокопрочный (жгутовый, карбонизованный)	УКН-М, УКН-П	3500	210–270
Среднепрочный (ленточный, карбонизованный)	ЭЛУР, ЛУ-П	3000	250
Среднемодульный (ленточный, графитированный)	ЛУ-24П, ЛЖУ-35	2800	320
Высокомодульный (ленточный, жгутовый, графитированный)	Кулон, ГЖ, УМТ	2500	400–450

Из данных, представленных в табл. 1, видно, что по мере увеличения степени графитации волокна прочность углеродных волокон снижается, а модуль упругости возрастает.

В табл. 2 приведены свойства высокомодульных жгутовых наполнителей, разработанных и производимых в Российской Федерации [6–10].

Таблица 2

Свойства высокомодульных жгутовых наполнителей отечественных производителей

Марка жгута	Модуль упругости волокна, ГПа	Прочность волокна, МПа	Число филаментов (К-кило)	Линейная плотность, текс	Плотность, г/см ³
ГЖ-20	380	2500	10К 12К	500 600	1,87
ГЖ-25	450	2400	6К 12К	370 570	1,93
ЖГВ-430	430	4000	12К	445	1,84
ВМН-4МТИ	450	2440	12К	720	1,76
ВМУ	450	50 Н	10К	350	1,85
			12К	530	1,90
УМТ 400	400	4200	12К	710	1,82
УМТ 430	430	4000	12К	700	1,84
УМТ 530	530	3800	12К	680	1,93

Разработанные в России высокомодульные углепластики на основе отечественных углеродных наполнителей марок ГЖ-20, Кулон, ЛУ-24П не применяются, так как прекращен выпуск соответствующих исходных компонентов.

В настоящее время российская промышленность осваивает выпуск новых перспективных волокон марки УМТ, которые позволяют разрабатывать размеростабильные материалы и авиационные конструкции.

Импортные высокомодульные углеродные наполнители имеют ограничения на поставку в Российскую Федерацию.

Основными производителями высокомодульных волокон за рубежом являются компании Toray (США), Teijin и Mitsubishi chemical (Япония). Свойства ряда таких волокон представлены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства высокомодульных жгутовых наполнителей зарубежных производителей

Марка жгута	Модуль упругости волокна, ГПа	Прочность волокна, МПа	Число филаментов (К-кило)	Линейная плотность, текс	Плотность, г/см ³
Волокна Torex TM компании Toray (США)					
M35J	343	4700	6К 12К	225 450	1,75
M46J	436	4210	6К 12К	223 445	1,84
M55J	540	4020	6К	218	1,91
M60J	588	3820	3К 6К	100 200	1,94
Волокна Tenax TM компании Teijin (Япония)					
HMA35	355	3300	12К	760	1,78
UMS40	390	4700	12К 24К	390 800	1,79
UMS45	425	4600	12К	385	1,83
UMS55	550	4000	12К	360	1,91
Волокна Ryofil TM компании Mitsubishi chemical (Япония)					
MS40	345	4610	12К	600	1,77
HR40	390	4410	12К	600	1,82
HS40	450	4410	12К	430	1,85

Высокомодульные волокна представлены в широком ассортименте, что позволяет использовать их для производства большого количества изделий как в России, так и за рубежом. Материалы обладают повышенной стойкостью к воздействию химических агрессивных жидкостей и газов, что открывает возможность их применения в химическом машиностроении, в том числе для производства реакторов, трубопроводов, центрифуг, лопастей насосов и других конструктивных элементов. Высокая износостойкость позволяет использовать данные волокна для изготовления деталей ткацкого оборудования (ремизных рам, рапир, спиц), что снижает стоимость эксплуатации изделий благодаря увеличению срока их службы. Повышенная электропроводность способствует применению высокомодульных углеродных волокон в качестве нагревательных элементов, а низкие значения коэффициента линейного теплового расширения (ГОСТ Р 57708–2017) дают ощутимые преимущества при производстве изделий криогенной техники. Кроме того, углепластики находят применение в электротехнике, судостроении, железнодорожном транспорте, нефтяной и газодобывающих отраслях российской промышленности, при разработке и изготовлении спортивного инвентаря [11–13].

Высокомодульные углепластики

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ имеется опыт разработки углеродных композиционных материалов на основе армирующих высокомодульных углеродных волокон, таких как материалы марок КМУ-7л, КМУ-4ВМ, ВКУ-14, ВСТ-1208/ГЖ-25, ВКУ-37 и ВКУ-38 [14–27].

Углепластик марки КМУ-7л разработан для изготовления деталей конструкционного назначения с повышенными требованиями по жесткости (тонкие оболочковые конструкции, пластины и стержни). Данный материал выполнен на основе связующего ВС-2526к и углеродной ленты конструкционного назначения ЛУ-24П. Его основные свойства представлены в табл. 4.

Таблица 4

Упруго-прочностные свойства углепластика марки КМУ-7л

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств углепластика в направлении армирования [0°]
Модуль упругости, ГПа: при растяжении при сжатии при изгибе	20	215
	150	195
	170	160
	20	170
	150	155
	170	–
	20	213
	150	185
	170	174
Предел прочности, МПа: при растяжении при сжатии при изгибе при межслойном сдвиге	20	970
	150	850
	170	720
	20	750
	150	650
	170	340
	20	1360
	150	1340
	170	1160
	20	62
	150	41
	170	41
Ударная вязкость, кДж/м ²	20	35
	150	30
	170	23

Разработанный на рабочую температуру 150 °С композиционный материал КМУ-7л сохраняет свои основные упруго-прочностные характеристики при рабочей температуре: модуль упругости при растяжении находится на уровне 90 %, при этом уровень сохранения прочности при растяжении и сжатии составляет соответственно 87 и 86 %, а прочности при межслойном сдвиге: 66 %.

В табл. 5 приведены сравнительные свойства углепластиков на основе эпоксидной матрицы ВС-2526к и различных армирующих наполнителей из высокомодульных волокон.

Таблица 5

Сравнение свойств высокомодульных углепластиков с различными армирующими наполнителями

Свойства	Значения свойств углепластиков		
	КМУ-7л	КМУ-7тВМ	КМУ-7к
Армирующий наполнитель	ЛУ-24П	УОЛ-600-10к	Кулон
Толщина монослоя, мм	0,10	0,23	0,10
Модуль упругости при растяжении, ГПа	215	210	320
Предел прочности, МПа: при растяжении при сжатии	970	1200	800
	750	800	900

Разработанный позднее углеродный композит марки КМУ-4ВМ, представляющий собой слоистый материал на основе растворного эпоксидного связующего ЭНФБ-2М, армированного тканой однонаправленной лентой УОЛ-300-0,23/190-ЭД (сформированной по основе графитированного жгута ГЖ-20/500), рекомендован для изготовления изделий, работающих при температурах от -60 до $+150$ °С, в том числе при $+150$ °С в течение 100 ч. Данный углепластик предназначен для применения в элементах жесткости, стенках оболочек и подкрепляющем силовом наборе. Основные свойства материала марки КМУ-4ВМ представлены в табл. 6.

Таблица 6

Упруго-прочностные свойства углепластика марки КМУ-4ВМ

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств углепластика в направлении армирования [0°]
Модуль упругости при растяжении, ГПа	20	224
	120	210
Предел прочности, МПа: при растяжении	20	1270
	120	1280
	150	1200
при сжатии	20	439
	120	313
	150	228
при межслойном сдвиге	20	27
	120	20
	150	16

Разработанный на рабочую температуру 120 °С композиционный материал КМУ-4ВМ сохраняет свои основные упруго-прочностные характеристики при рабочей температуре: модуль упругости при растяжении находится на уровне >95 %, при этом уровень сохранения прочности при растяжении и сжатии составляет соответственно 100 и 70 %, а прочности при межслойном сдвиге: 75 %.

Углепластики на основе расплавленного полициануратного связующего ВСТ-1208 и углеродных высокомодульных жгутовых наполнителей ГЖ-25 (ВСТ-1208/ГЖ-25) и ЖГВ-430-12К (ВКУ-37) предназначены для применения в размеростабильных рамных конструкциях, работающих при температуре до 170 °С. Основные свойства углепластика на основе препрега ВСТ-1208/ГЖ-25 представлены в табл. 7.

Таблица 7

Упруго-прочностные свойства углепластика на основе препрега ВСТ-1208/ГЖ-25

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств углепластика в направлении армирования [0°]
Плотность, г/см ³	–	1,52–1,56
Модуль упругости при растяжении, ГПа	20	235
	120	230
	170	230
Предел прочности, МПа: при растяжении	20	1570
	120	1460
	170	1210
при сжатии	20	960
	170	770
при изгибе	20	1520
при межслойном сдвиге	20	29

Исследование образцов из углепластика на основе препрега ВСТ-1208/ГЖ-25 после длительной экспозиции (60 сут) при температуре 60 °С и относительной влажности 85 % показало, что среднее значение влагопоглощения (1,03 %) сравнимо с влагопоглощением типовых углепластиков на основе эпоксидной матрицы (до 1,2 %).

Разработанный на рабочую температуру 170 °С композиционный материал ВКУ-37 сохраняет свои основные упруго-прочностные характеристики при рабочей температуре: модуль упругости при растяжении находится на уровне 95 %, при этом уровень сохранения прочности при растяжении и сжатии составляет не менее 85 %, а прочности при межслойном сдвиге: 70 %. Основные свойства данного материала представлены в табл. 8.

Таблица 8

Упруго-прочностные свойства углепластика ВКУ-37

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств углепластика в направлении армирования [0°]	
		однаправленный [0°] _л	квазиизотропный [0°/90°/±45°] _л
Предел прочности, МПа: при растяжении	20	2020	525
	170	1784	510
при сжатии	20	1030	390
	170	890	375
при межслойном сдвиге	20	69	–
	170	47	–
Модуль упругости, ГПа: при растяжении	20	235	80
	170	225	80
при сжатии	20	210	–

В табл. 9 представлено сравнение основных свойств углепластиков ВКУ-37 и КМУ-4ВМ с зарубежным аналогом на основе эпоксидной матрицы.

Таблица 9

Сравнение свойств высокомодульных углепластиков на основе эпоксидной матрицы

Свойства	Значения свойств углепластиков		
	ВКУ-37	КМУ-4ВМ	HexPly 954-3/M46J
Предел прочности при растяжении, МПа	2020	1273	2205
Модуль упругости при растяжении, ГПа	235	224	245
Максимальная рабочая температура, °С	170 (в течение 1000 ч)	150 (в течение 100 ч)	120 (данных нет)

Наиболее высокотемпературными высокомодульными углепластиковыми материалами, разработанными на рабочие температуры не менее 350–400 °С, являются материалы на основе лестничных полимеров, такие как ВКУ-14 и ВКУ-38, имеющие в своем составе связующее на основе тетрафталоитрильного мономера и катализатора.

Наиболее высокую эксплуатационную стойкость при температурах до 400 °С показал материал ВКУ-14 на основе связующего ИП-5. При изготовлении углепластика применяется метод нанесения порошка связующего на армирующие волокна электростатическим осаждением в камере псевдоожижения.

Основное назначение материала – изготовление термонагруженных деталей конструкционного назначения, в том числе широкохордных рабочих, статорных лопаток и других конструктивных элементов газотурбинного двигателя. Результаты исследования углепластика ВКУ-14 также показывают, что он обладает температурной стойкостью, в том числе при 370 °С в течение 500 ч и при 400 °С в течение 50 ч [22–26]. Основные свойства данного материала представлены в табл. 10.

Таблица 10

Упруго-прочностные свойства углепластика марки ВКУ-14

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств углепластика в направлении армирования [0°]	
		однаправленный [0°] _n	квазиизотропный [0°/90°/±45°] _n
Модуль упругости при растяжении, ГПа	20	210	
	300	160	
	400	140	
Предел прочности, МПа: при растяжении	20	1100	
	300	1000	
	400	990	
при сжатии	20	540	
	300	450	
	400	420	
при изгибе	20	1010	
	300	670	
	400	600	
при межслойном сдвиге	20	17	
	300	17	
	400	17	
Ударная вязкость, кДж/м ²	20	68	

Разработанный на рабочую температуру до 400 °С композиционный материал ВКУ-14 сохраняет свои основные упруго-прочностные характеристики при рабочей температуре: модуль упругости при растяжении находится на уровне 65–70 %, при этом уровень сохранения прочности при растяжении и сжатии составляет соответственно 90 и 75 %, а прочности при межслойном сдвиге: 100 %.

На основе порошкообразного связующего ВСН-31 и углеродного однонаправленного тканого наполнителя УТОВ-300-200 из жгута ЖГВ-430-12К разработан углепластик ВКУ-38, который изготавливают по препреговой технологии методом нанесения порошка связующего с последующим его оплавлением. Основные свойства данного материала представлены в табл. 11.

Таблица 11

Упруго-прочностные свойства углепластика ВКУ-38

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств углепластика в направлении армирования [0°]	
		однаправленный [0°] _n	квазиизотропный [0°/90°/±45°] _n
Предел прочности, МПа: при растяжении	20	1170	350
	300	1170	350
	400	820	280
при сжатии	20	500	234
	300	420	182
	400	360	163
при изгибе	20	940	–
	300	650	–
	400	560	–
при межслойном сдвиге	20	48	–
	300	34	–
	400	31	–
Модуль упругости, ГПа: при растяжении	20	265	91
	300	250	80
	400	175	78
при сжатии при изгибе	20	201	70
	20	185	–
	300	185	–
Удельная ударная вязкость при изгибе, кДж/м ²	400	170	–
	20	83	68

Разработанный на рабочую температуру до 350 °С композиционный материал ВКУ-38 при однонаправленной укладке сохраняет свои основные упруго-прочностные характеристики при рабочей температуре: модуль упругости при растяжении находится на уровне 65 %, при этом уровень сохранения прочности при растяжении и сжатии составляет соответственно 70 и 72 %, а прочности при межслойном сдвиге: 65 %.

В табл. 12 приведено сравнение свойств высокотемпературных углепластиков ВКУ-38 и ВКУ-14 с зарубежным аналогом на основе фталонитрильного связующего.

Таблица 12

**Сравнение свойств высокомодульных углепластиков
на основе высокотемпературных связующих**

Свойства	Значения свойств углепластика		
	ВКУ-38	ВКУ-14	Phthalonitrile/IM7 (12k)
Предел прочности, МПа: при растяжении	1170	1100	2000
при межслойном сдвиге	45	20	85
Модуль упругости при растяжении, ГПа	255	210	183
Рабочая температура, °С	До 400	400	350

Заключение

Разработанные высокомодульные углепластики на основе российских углеродных волокнистых однонаправленных и тканых наполнителей предназначены для применения в высоко- и средненагруженных авиационных конструкциях (таких как крыло, центроплан), элементах механизации крыла, корпусных деталях двигателя, антеннах и каркасах спутников, размеростабильных конструкциях, работающих при повышенных температурах, и используются при создании различных конструкций современной и перспективной авиационной и космической техники, отвечающих повышенным требованиям к жесткости, а также в энергетике, машино- и судостроении, атомной промышленности.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Каблов Е.Н. Для освоения космоса нужны новые материалы // Научная Россия. URL: <https://scientificrussia.ru/interviews/akademik-e-n-kablov-dlya-osvoeniya-kosmosa-nuzhny-novye-materialy> (дата обращения: 10.06.2022).
4. 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.
5. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / под ред. А.А. Берлина. 3-е изд., испр. и доп. СПб.: Профессия, 2011. 556 с.
6. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). Ст. 05. URL: <http://www.viam-woks.ru> (дата обращения: 16.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
7. Сидорина А.И., Гуняева А.Г. Рынок углеродных волокон // Химические волокна. 2016. № 4. С. 48–53.

8. Старцев О.В., Христофоров Д.А., Колушниченко А.Б., Физулов Б.Г., Румянцев А.Ф., Гуняев Г.М., Раскутин А.Е. Размеростабильность высокомодульных углеродных волокон и углепластиков на их основе // Тез. докл. межотрасл. науч.-практ. конф. «Проблемы создания новых материалов для авиакосмической отрасли в XXI веке». М.: ВИАМ, 2002. С. 87.
9. Углеволокно: высокотехнологичное углеродное волокно на основе ПАН-прекурсора // Юматекс: офиц. сайт. URL: <https://umatex.com/production/fiber/> (дата обращения: 20.07.2022).
10. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ. Т. 7: Полимерные композиционные материалы. 2010. 210 с.
11. TenaxTM Filament Yarn // Teijin Carbon: офиц. сайт. URL: <https://www.tejjincarbon.com/products/tenaxr-carbon-fiber/tenaxr-filament-yarn> (дата обращения: 03.02.2023).
12. Валуева М.И., Евдокимов А.А., Начаркина А.В., Губин А.М. Полимерные композиционные материалы и технологии в автомобилестроении (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 06. URL: <http://www.viam-woks.ru> (дата обращения: 15.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-53-65.
13. Мишкин С.И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 08. URL: <http://www.viam-woks.ru> (дата обращения: 15.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
14. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносое А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
15. Раскутин А.Е. Полимерные композиционные материалы нового поколения для авиационной и космической техники // Сб. докл. конф. «Современные достижения в области создания перспективных неметаллических композиционных материалов и покрытий для авиационной и космической техники». М.: ВИАМ, 2015. URL: <https://conf.viam.ru/conf/172/proceedings> (дата обращения: 25.05.2022).
16. Раскутин А.Е. Конструкционные углепластики на основе новых связующих расплавленного типа и тканей Porcher // Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. № 5. Ст. 01. URL: <http://materialsnews.ru> (дата обращения: 04.06.2022).
17. Мишуоров К.С., Мишкин С.И., Гуняева А.Г. Полимерные композиционные материалы для перспективных авиационных двигателей // Материалы II Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». М.: ВИАМ, 2017. С. 131–145.
18. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
19. Гуняева А.Г. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области полимерных композиционных материалов для авиационной и других отраслей промышленности // Тр. IV междисциплинарного научн. форума с междунар. участием «Новые материалы и перспективные технологии»: в 3 т. М.: Буки Веди, 2018. Т. 3. С. 71–72.
20. Валуева М.И., Зеленина И.В., Мишуоров К.С., Гуляев И.Н. Обзор публикаций по разработкам лопаток из полимерных композиционных материалов для вентилятора авиационного двигателя // Вестник машиностроения. 2019. № 2. С. 34–41.
21. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
22. Гуняева А.Г., Раскутин А.Е., Гуляев И.Н., Сидорина А.И., Мишкин С.И. Полимерные композиционные материалы нового поколения для авиационной, электротехнической и строительной промышленности // Сб. докл. II Междунар. науч.-техн. конф. «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России». М.: ВИАМ, 2017. URL: <http://conf.viam.ru/conf/254/proceedings> (дата обращения: 25.05.2022).

23. High temperature plastics market by type (polysulfones, polyimides, polyphenylene sulfide, fluoropolymers, and others), by end-use industries (electrical & electronic, transportation, industrial, medical, and others) – Global trends & forecast to 2019 // Markets and Markets™: офиц. сайт. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/high-temperature-plastics-market-1192.html> (дата обращения: 17.11.2021).
24. Шимкин А.А., Пономаренко С.А., Мухаметов Р.Р. Исследование процесса отверждения дифталонитрильного связующего // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. № 2. С. 256–264.
25. Зеленина И.В., Гуляев И.Н., Кучеровский А.И., Мухаметов Р.Р. Термостойкие углепластики для рабочего колеса центробежного компрессора // Труды ВИАМ. 2016. № 2 (38). Ст. 08. URL: <http://www.viam-woks.ru> (дата обращения: 15.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
26. Раскутин А.Е. Термостойкие углепластики для конструкций авиационной техники, эксплуатирующихся при температурах до 400 °С: дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 166 с.
27. Валедин Е.О., Зеленина И.В., Мараховский П.С., Гуляев А.И., Бухаров С.В. Исследование влияния тепловлажностного воздействия на фталонитрильную матрицу // Материаловедение. 2015. № 9. С. 15–19.

References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 24.
2. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Kablov E.N. New materials are needed for space exploration. *Nauchnaya Rossiya*. Available at: <https://scientificrussia.ru/interviews/akademik-e-n-kablov-dlya-osvoeniya-kosmosa-nuzhny-novye-materialy> (accessed: June 10, 2022).
4. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. et al. *Polymer composite materials: structure, properties, technology*: textbook. Ed. A.A. Berlin. 3rd ed., rev. and add. St. Petersburg: Profession, 2011, 556 p.
6. 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: June 10, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
7. Sidorina A.I., Gunyaeva A.G. Carbon fiber market. *Khimicheskie volokna*, 2016, no. 4, pp. 48–53.
8. Startsev O.V., Khristoforov D.A., Kolyushnichenko A.B., Fizulov B.G., Rumyantsev A.F., Gunyaev G.M., Raskutin A.E. Dimensional stability of high-modulus carbon fibers and carbon plastics based on them. *Reports of intersectoral scientific-practical. conf. "Problems of creating new materials for the aerospace industry in the XXI century"*. Moscow: VIAM, 2002, p. 87.
9. *Carbon fiber: high-tech carbon fiber based on PAN precursor*. Available at: <https://umatex.com/production/fiber/> (accessed: July 20, 2022).
10. *Aviation materials: a reference book in 13 vols*. Ed. E.N. Kablov. 7th ed., rev. and add. Moscow: VIAM, vol. 7: Polymer composite materials, 2010, 210 p.
11. Tenax™ Filament Yarn. Available at: <https://www.teijinacarbon.com/products/tenaxr-carbon-fiber/tenaxr-filament-yarn> (accessed: February 03, 2023).
12. Valueva M.I., Evdokimov A.A., Nacharkina A.V., Gubin A.M. Polymer composite materials and technologies in the automotive industry (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-53-65.
13. Mishkin S.I. Application of carbon fiber plastics in constructions of pilotless devices (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
14. Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder VSE-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. and Toho Tenax. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.

15. Raskutin A.E. Polymer composite materials of a new generation for aviation and space technology. *Report conf. "Modern achievements in the field of creating promising non-metallic composite materials and coatings for aviation and space technology"*. Moscow: VIAM, 2015. Available at: <https://conf.viam.ru/conf/172/proceedings> (accessed: May 25, 2022).
16. Raskutin A.E. Structural carbon plastics based on new melt-type binders and Porcher fabrics. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2013, no. 5. URL: <http://materialsnews.ru> (date of access: 04.06.2022).
17. Mishurov K.S., Mishkin S.I., Gunyaeva A.G. Polymer composite materials for advanced aircraft engines. *Materials of II All-Rus. sci.-tech. conf. "Polymer composite materials and production technologies of a new generation"*. Moscow: VIAM, 2017, pp. 131–145.
18. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
19. Gunyaeva A.G. Developments of FSUE "VIAM" in the field of polymer composite materials for aviation and other industries. Reports of IV Interdisciplinary scientific forum with International participation "New materials and promising technologies": in 3 vols. Moscow: Buki Vedi, 2018, vol. 3, pp. 71–72.
20. Valueva M.I., Zelenina I.V., Mishurov K.S., Gulyaev I.N. Review of publications on the development of blades made of polymer composite materials for an aircraft engine fan. *Vestnik mashinostroeniya*, 2019, no. 2, pp. 34–41.
21. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
22. Gunyaeva A.G., Raskutin A.E., Gulyaev I.N., Sidorina A.I., Mishkin S.I. Polymer composite materials of a new generation for the aviation, electrical and construction industry. *Reports of II Intern. sci.-tech. conf. "New materials and technologies for deep processing of raw materials – the basis for the innovative development of the Russian economy"*. Moscow: VIAM, 2017. Available at: <http://conf.viam.ru/conf/254/proceedings> (accessed: May 25, 2022).
23. *High temperature plastics market by type (polysulfones, polyimides, polyphenylene sulfide, fluoropolymers, and others), by end-use industries (electrical & electronic, transportation, industrial, medical, and others) – Global trends & forecast to 2019*. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/high-temperature-plastics-market-1192.html> (accessed: November 17, 2021).
24. Shimkin A.A., Ponomarenko S.A., Mukhametov R.R. Study of the curing process of a diphthalonitrile binder. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2016, vol. 89, no. 2, pp. 256–264.
25. Zelenina I.V., Gulyayev I.N., Kucherovskiy A.I., Mukhametov R.R. Heat-resistant CFRP for the impulse wheel of the centrifugal compressor. *Trudy VIAM*, 2016, no. 2 (38), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
26. Raskutin A.E. *Heat-resistant carbon plastics for aircraft structures operating at temperatures up to 400 °C*: Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2007, 166 p.
27. Valevin E.O., Zelenina I.V., Marakhovskiy P.S., Gulyaev A.I., Bukharov S.V. Investigation of the effect of heat and moisture exposure on the phthalonitrile matrix. *Materialovedenie*, 2015, no. 9, pp. 15–19.

Информация об авторах

Гуляев Иван Николаевич, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Павловский Константин Андреевич, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ivan N. Gulyaev, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Konstantin A. Pavlovskiy, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.10.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.10.2022.
 The article was submitted 03.10.2022; approved and accepted for publication after reviewing 18.10.2022.