

УДК 678.8

А.Е. Раскутин<sup>1</sup>

## РОССИЙСКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ, ИХ ОСВОЕНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367

*Приведены основные физико-механические характеристики разработанных полимерных композиционных материалов (ПКМ) из стеклянных и углеродных армирующих волокон в сочетании с полимерными связующими на основе эпоксидных, цианэфирных, фталонитрильных и винилэфирных смол, в том числе в сравнении с их зарубежными аналогами. ПКМ нового поколения на основе связующих расплавного типа разрабатывались с учетом конструкционных и технологических особенностей изготовления деталей и элементов конструкций, т. е. реализована концепция единства, выдвинутая во ФГУП «ВИАМ», при разработке материалов – «материал–технология–конструкция», что позволяет существенно сократить сроки и затраты на разработку и внедрение таких материалов.*

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, углепластик, стеклопластик, органический пластик, препрег, основные свойства ПКМ.

A.E. Raskutin

## Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions

*The article presents the basic physical and mechanical properties of developed PCM from glass and carbon reinforcing fibers in combination with polymeric bindings on the basis of epoxy, cyano-ether, phthalonitrile and vinyl ester resins, including in comparison with their foreign analogs.*

*PCM of new generation on the basis of melt type bindings were developed taking into account constructional and technological features of manufacturing of details and elements of constructions, i. e. the concept put forward at VIAM is implemented when developing the new materials «material–technology–construction» that allows to reduce significantly terms and expense for development and implementation of PCM of new generation.*

**Keywords:** polymer composite material, carbon fiber, fiberglass, organic plastics, prepreg, basic properties of PCM.

---

<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

## Введение

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) нового поколения — благодаря использованию новых связующих с различной теплостойкостью и прочностью — способны обеспечивать как все возрастающие требования к упруго-прочностным характеристикам и их эксплуатационной стабильности, необходимым для обеспечения работоспособности конструкций, так и (с учетом современных технологий переработки) различные требования, в том числе экологические [1–3].

Использование расплавных связующих [4] благодаря отсутствию растворителей обеспечивает содержание пористости в ПКМ менее 1%. Применение современных пропиточных линий позволяет получать содержание связующего в препрегах в пределах  $\pm 3\%$ , что обеспечивает точность выставления зазоров между валами технологического оборудования для изготовления препрегов и приводит к снижению разброса по его содержанию [5].

В соответствии со «Стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» разработаны конструкционные ПКМ с высоким сопротивлением статическим, повторно-статическим и динамическим нагрузкам, обладающие специальными свойствами, с широким температурным диапазоном эксплуатации — на основе терморезистивных полимерных матриц и углеродных, стеклянных и органических наполнителей различных текстильных форм [6].

Создание конструкций из ПКМ нового поколения требует решения ряда задач, таких как разработка современных полимерных связующих, позволяющих использовать ПКМ в диапазоне температур от  $-130$  до  $+400^\circ\text{C}$ ; создание современных волокнистых стеклянных и углеродных наполнителей различной текстильной формы, обеспечивающих получение требуемых прочностных характеристик; разработка технологии их совмещения для получения полуфабриката и/или формирования ПКМ [7–9].

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны более двух десятков марок ПКМ нового поколения, планирующих к применению в перспективных изделиях авиационной техники, таких как вертолетные двигатели, газотурбинные установки (ГТУ), в широкофюзеляжном дальнемагистральном самолете по совместному российско-китайскому проекту и др. Ряд ПКМ таких марок, как ВКУ-25, ВКУ-29, ВКУ-39, ВПС-48/7781 и ВПС-48/120, прошли квалификационные испытания с целью дальнейшего применения в изделиях авиационной техники. Из этих материалов планируется изготавливать элементы мотогондолы двигателя ПД-14 для самолета МС-21, конструкция которой разработана специалистами ОА «ОДК-Авиадвигатель» [10–13]. Налажено производство и обеспечен выпуск препрегов данных марок ПКМ — производство препрегов сертифицировано АР МАК.

В последнее время в мире большое внимание уделяется созданию ПКМ на основе как эпоксидных, так и цианэфирных связующих, которые позволяют получать композиционные материалы, обладающие высокими механическими, диэлектрическими и теплофизическими характеристиками, а также высокой стабильностью свойств в различных условиях эксплуатации, в том числе при воздействии повышенных температур и влажности.

В данной статье приведены основные физико-механические характеристики разработанных ПКМ на основе стеклянных и углеродных армирующих волокон в сочетании с полимерными связующими на основе эпоксидных, цианэфирных, эпоксивинилэфирных и фталонитрильных полимерных матриц.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [6].

### **ПКМ на основе высокодеформативной эпоксидной полимерной матрицы расплавного типа ВСЭ-1212**

Создать целый ряд ПКМ нового поколения во ФГУП «ВИАМ» в период с 2002 по 2010 г. позволило развитие и совершенствование технологической базы для их производства и оснащение современными пропиточными машинами. На рис. 1 показана пропиточная машина Coatema VL-2800, разработанная по требованиям ФГУП «ВИАМ», для изготовления препрегов по расплавной технологии из жгутов марок 1к-24к (безуточные препреги) шириной 100–600 мм и углеродных тканей шириной до 1000 мм.



Рис. 1. Пропиточная машина Coatema VL-2800

Во ФГУП «ВИАМ» разработано перерабатываемое по расплавной технологии полимерное высокодеформативное связующее ВСЭ-1212 на основе эпоксидных смол, зарубежным аналогом которого является эпоксидное связующее марки HexPly® M21 фирмы Hexcel.

На основе связующего ВСЭ-1212 и различных стеклянных и углеродных наполнителей разработаны препреги стеклопластиков марок ВПС-48/7781 и ВПС-48/120, а также углепластиков марок ВКУ-25, ВКУ-29, ВКУ-39 – для изготовления высоконагруженных конструкций методом автоклавного формования.

*Углепластик конструкционного назначения марки ВКУ-25* на основе импортного однонаправленного жгутового наполнителя марки Tenax® HTS45 12K E23 800tex фирмы Toho Tenax и российского связующего ВСЭ-1212, получаемый методом ручной или механизированной выкладки безуточного препрега с последующим формованием в автоклаве, может эксплуатироваться в диапазоне температур от  $-60$  до  $+120^{\circ}\text{C}$  (во влагонасыщенном состоянии – до  $+80^{\circ}\text{C}$ ). Углепластик ВКУ-25 рекомендуется для изготовления высоконагруженных конструкций планера для авиационной техники, деталей фюзеляжа, крыла и хвостового оперения. Препрег производится по расплавной технологии, которая является экологически более чистой и пожаробезопасной по сравнению с традиционной растворной технологией.

Преимуществом углепластика ВКУ-25 перед материалами аналогичного назначения являются:

– перед углепластиком КМУ-15ТЛ – предел прочности при растяжении выше на 38%; модуль упругости при растяжении выше на 14%; температура стеклования выше на  $50^{\circ}\text{C}$ ; максимальная рабочая температура выше на  $40^{\circ}\text{C}$ ;

– перед импортным материалом HexPly 8552/40%/AS4-12k фирмы Hexcel – предел прочности при растяжении выше на 26%, при этом модуль упругости при растяжении, температура стеклования и максимальная рабочая температура находятся на одном уровне.

В табл. 1 приведены сравнительные свойства углепластиков ВКУ-25 и HexPly 8552/40%/AS4-12k, испытания которых проводили в соответствии со стандартами ASTM, и углепластика КМУ-15ТЛ, испытания которого проводили в соответствии с ГОСТ на данные виды испытаний.

Препрег углепластика ВКУ-25 можно разрезать на ленты шириной: 150 мм – для автоматизированной выкладки на станках типа ATL; 6,35 мм – для укладки на роботах и станках типа AFP. На рис. 2 представлена установка для укладки лент препрега шириной 6,35 мм.

Таблица 1

**Сравнительные свойства углепластиков**

Свойства	Средние значения свойств для материала марки		
	ВКУ-25	КМУ-15ТЛ	HexPly 8552/40%/AS4-12k
Толщина монослоя, мм	0,13	0,24	–
Предел прочности при растяжении, МПа	2180	1370	2205**
Модуль упругости при растяжении, ГПа	135	130	141**
Предел прочности при сжатии, МПа	1190	980	1530**
Модуль упругости при сжатии, ГПа	115	118	128**
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	88	91	128
Предел прочности при сдвиге в плоскости листа*, МПа	89	46	–
Модуль упругости при сдвиге в плоскости листа*, ГПа	5,1	4,7	–

\* При укладке  $\pm 45$  град.

\*\* Значения нормализованы на содержание волокна в углепластике 60%.

Углепластик марки ВКУ-28 разработан на основе импортного жгутового углеродного среднемодульного наполнителя марки Torayca T800NB-12K-50B 400tex фирмы Torayca Industries. Углепластики серии ВКУ-28 разработаны во ФГУП «ВИАМ» для импортозамещения углепластика

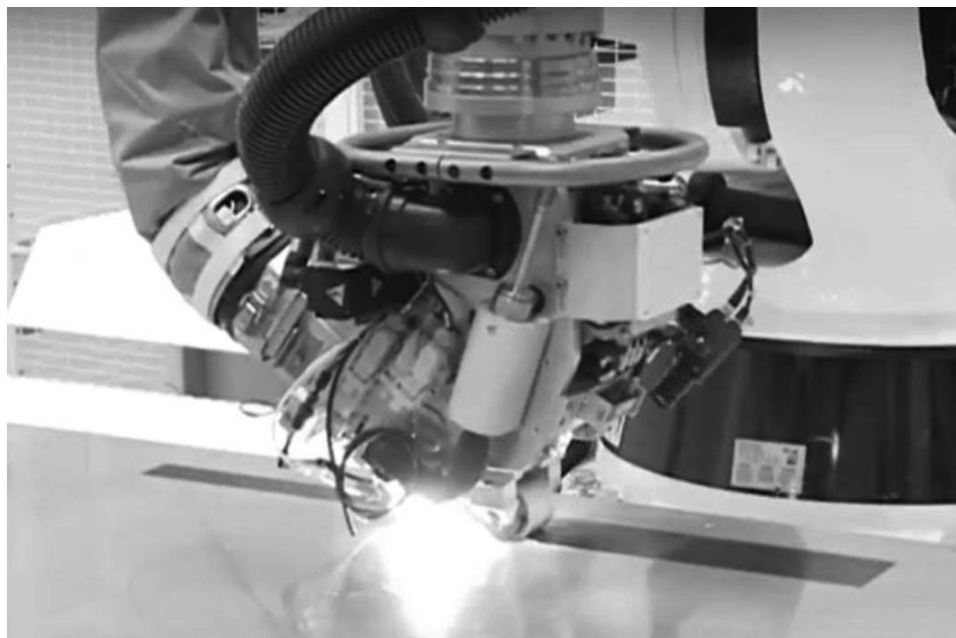


Рис. 2. Укладка препрега углепластика марки ВКУ-25 лентами шириной 6,35 мм с помощью робототехнического комплекса

фирмы Hexcel марки HexPly M21/IMA, который в настоящее время применен в конструкции хвостового оперения самолета МС-21. Последующие модификации углепластика выполнены на углеродных жгутовых наполнителях марок T800SC-24K 1030tex фирмы Toray и IMS65-24K E23 830tex фирмы Toho Tenex, которые имеют близкие к импортному аналогу характеристики.

В табл. 2 представлены сравнительные свойства углепластиков серии ВКУ-28 в сравнении с аналогом марки HexPly M21/IMA фирмы Hexcel, испытания которых проводили в соответствии со стандартами ASTM.

Таблица 2

**Сравнительные свойства однонаправленных углепластиков на основе жгутов**

Свойства	Значения свойств			
	для углепластиков серии ВКУ-28 с наполнителем марки			для аналога марки HexPly M21/IMA
	T800HB-12K	T800SC-24K	IMS65-24K	
Толщина монослоя, мм	0,13–0,15	0,18–0,20	0,18–0,20	0,18–0,19
Пористость, %	1,5			<1
Предел прочности при растяжении, МПа	2410	2750	2585	2688**
Модуль упругости при растяжении, ГПа	157	165	158	160**
Предел прочности при сжатии, МПа	1210	1390	1265	1352**
Модуль упругости при сжатии, ГПа	140	145	130	132**
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	91	90	105	90
Предел прочности при сдвиге в плоскости листа*, МПа	81	81	85	88
Модуль упругости при сдвиге в плоскости листа*, ГПа	3,7	4,3	5,2	4,8

\* При укладке  $\pm 45$  град.

\*\* Значения нормализованы на содержание волокна в углепластике 60%.

Углепластик марки ВКУ-29 выполнен с применением однонаправленной ткани фирмы Porcher Ind. (арт. 4510) – полотняного плетения с соотношением нитей основы и утка 96,5/3,5 (по основе – углеродный жгут HTS40(45) 12K, по утку – стеклонить). Поверхностная плотность ткани составляет  $205 \pm 10$  г/м<sup>2</sup>, что обеспечивает толщину монослоя 0,2 мм. В табл. 3 приведены основные характеристики углепластика ВКУ-29 в сравнении с характеристиками углепластиков КМУ-7т, испытания которого проводили в соответствии с ГОСТ на данные виды испытаний, и HexPly 8552/40%/AS4-12k фирмы Hexcel (из однонаправленного жгута) с результатами, полученными в соответствии со стандартами ASTM.

Таблица 3

**Сравнительные свойства однонаправленных углепластиков**

Свойства	Средние значения свойств для материала марки		
	ВКУ-29	КМУ-7т	HexPly 8552/40%/AS4-12k
Толщина монослоя, мм	0,2	0,2	–
Предел прочности при растяжении, МПа:	по основе	1940	2205**
	по утку	58	–
Модуль упругости при растяжении по основе, ГПа	123	130	141**
Предел прочности при сжатии по основе, МПа	1040	1185	1530**
Модуль упругости при сжатии по основе, ГПа	112	115	128**
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	73	76	128
Предел прочности при сдвиге в плоскости листа*, МПа	88	59	–
Модуль упругости при сдвиге в плоскости листа*, ГПа	4,0	5,8	–

\* При укладке  $\pm 45$  град.

\*\* Значения нормализованы на содержание волокна в углепластике 60%.

Если сравнивать по упруго-прочностным характеристикам углепластик ВКУ-29 с его ближайшим аналогом – углепластиком КМУ-7т, то разработанный углепластик ВКУ-29 превосходит его по прочности при растяжении вдоль волокна и значительно – поперек волокна; при сравнении модуля упругости углепластики находятся приблизительно на одном уровне, так как все сравниваемые углепластики изготавливают с применением углеродных нитей со стандартным модулем упругости (220–240 ГПа).

Углепластик марки ВКУ-29 рекомендуется для изготовления узлов из ПКМ для силовой установки двигателя ПД-14, в том числе силовых панелей, шпангоутов, деталей корпуса, створок, перегородок, наружного обтекателя распределительного устройства, обтекателей пилона и др., для применения при температурах в диапазоне от  $-60$  до  $+120^{\circ}\text{C}$ . Испытания показали, что в этом температурном интервале сохранение свойств при повышенной температуре испытания составляет не менее 60% при различных видах нагружения.

Углепластик марки ВКУ-39 в отличие от углепластика марки ВКУ-29 изготавливают с применением ткани фирмы Porcher Ind. (арт. 3692), которая имеет равнопрочную структуру плетения в направлении основы и утка из углеродного жгута фирмы Toho Tenax марки HTS40 3K 200tex. Поверхностная плотность ткани составляет  $200 \text{ г/м}^2$ , что обеспечивает толщину монослоя 0,2 мм. В табл. 4 представлены основные свойства углепластика ВКУ-39 в сравнении с углепластиковыми на основе

растворного эпоксидного связующего ЭДТ-69Н(М) – марок КМУ-11тр и КМУ-11-3692. На рис. 3 показана первая опытная деталь из препрега ВКУ-39, испытания которой проводили в соответствии с ГОСТ на данные виды испытаний.

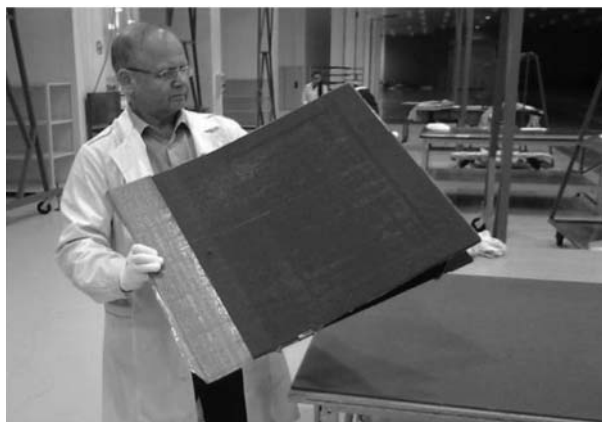


Рис. 3. Первая опытная деталь из препрега углепластика марки ВКУ-39

Таблица 4

**Сравнительные свойства углепластиков на основе наполнителей с равнопрочной структурой**

Свойства	Средние значения свойств для материала марки		
	ВКУ-39	КМУ-11тр	КМУ-11-3692
Толщина монослоя, мм	0,2	0,22	0,2
Предел прочности при растяжении, МПа:			
по основе	945	490	920
по утку	710	470	685
Модуль упругости при растяжении, ГПа:			
по основе	69	63,7	65,5
по утку	60	64,2	62,7
Предел прочности при сжатии, МПа:			
по основе	610	470	790
по утку	610	450	700
Модуль упругости при сжатии по основе, ГПа	54	54	–
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	82	–	63
Предел прочности при сдвиге в плоскости листа*, МПа	104	83	100
Модуль упругости при сдвиге в плоскости листа*, ГПа	4,7	5,3	5,0

\* При укладке  $\pm 45$  град.

Для совместного формования с углепластиками ВКУ-29 и ВКУ-39 разработаны *стеклопластики ВПС-48/7781 и ВПС-48/120*, которые в некоторых случаях выполняют электроизолирующую функцию при контакте углепластиков с металлами. Свойства стеклопластиков представлены в табл. 5.



Таблица 5

**Физико-механические свойства стеклопластиков  
ВПС-48/120 и ВПС-48/7781**

Свойства	Средние значения свойств для материала марки	
	ВПС-48/120	ВПС-48/7781
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,80	1,89
Предел прочности при растяжении, МПа	400	450
Модуль упругости при растяжении, ГПа	24	29
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	66	71
Предел прочности при изгибе, МПа	450	640
Предел прочности при сжатии, МПа	540	630

**ПКМ на основе эпоксидной полимерной матрицы  
расплавного типа ВСЭ-34**

В 2014 г. разработано эпоксидное связующее марки ВСЭ-34 с энергоэффективным режимом отверждения (последняя ступень отверждения при температуре – не более 140°С). Безрастворное связующее ВСЭ-34 обеспечивает повышенную технологичность – в процессе его отверждения формируется прочная полимерная матрица с максимальной реализацией в ПКМ прочности армирующих волокон при рабочих температурах не выше 80°С. В 2015 г. завершены работы по паспортизации углепластиков на основе связующего ВСЭ-34:

– ВКУ-45/3692 – на основе углеродной равнопрочной ткани фирмы Porcher Ind. (арт. 3692);

– ВКУ-45Ж – на основе углеродного высокопрочного жгутового наполнителя марки HTS40(45) 12К.

Свойства материалов приведены в табл. 6.

Таблица 6

**Свойства углепластиков серии ВКУ-45**

Свойства	Средние значения свойств для материала марки	
	ВКУ-45/3692	ВКУ-45Ж
Толщина монослоя, мм	0,19-0,25	0,12-0,13
Предел прочности при растяжении, МПа:		
по основе	855	2360
по утку	–	50
Модуль упругости при растяжении, ГПа:		
по основе	67	136
по утку	–	8,0
Относительное удлинение при растяжении, %	1,1	1,7
Коэффициент Пуассона	0,06	0,36
Предел прочности при сжатии, МПа:		
по основе	610	1090
по утку	615	235
Модуль упругости при сжатии, ГПа	60	105
Предел прочности при сдвиге в плоскости листа*, МПа	83	70
Модуль упругости при сдвиге в плоскости листа*, ГПа	4,3	3,8
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	74	86

\* При укладке ±45 град.

## ПКМ на основе цианэфирных полимерных матриц расплавного типа

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны новые полимерные цианэфирные связующие марок ВСТ-1208, ВСТ-32 и ВСК-1208 (клеевое) для обеспечения рабочих температур эксплуатации ПКМ в диапазоне 160–200°С. Изготовление препрегов и углепластиков на основе данных связующих происходит по экологически чистой расплавной технологии.

Так, на основе связующего ВСТ-1208 разработаны следующие марки углепластиков: ВКУ-27ЛР – на основе однонаправленной ленты UDO CS 200/300 из жгута марки T700SC фирмы Torayca; ВКУ-27 – на основе жгутового наполнителя HTS40 12К фирмы Toho Tenax; ВКУ-27л – на основе однонаправленной ткани арт. 14535 и ВКУ-27тр – на основе равнопрочной ткани арт. 3105 фирмы Porcher Ind.; ВКУ-33 – на основе равнопрочной ткани УТР-1000 из жгута марки T800НВ; ВКУ-36 – на основе углеродного жгута ГЖ-240; ВКУ-37 – на основе углеродного высокомолекулярного жгута ЖГВ-430-12к.

В табл. 7 приведены характеристики углепластиков серии ВКУ-27.

Таблица 7

### Основные характеристики углепластиков на основе связующего ВСТ-1208

Свойства	Средние значения свойств для материала марки			
	ВКУ-27	ВКУ-27ЛР	ВКУ-27л	ВКУ-27тр
Толщина монослоя, мм	0,13-0,15	0,13-0,15	0,13-0,14	0,26
Предел прочности при растяжении, МПа:				
по основе	1915–2390	2310–2480	1920	800
по утку	52–59	29–43	65	800
Модуль упругости при растяжении, ГПа:				
по основе	121–137	130–140	135	60
по утку	8–9	8–9	8	60
Предел прочности при сжатии, МПа:				
по основе	1010–1270	970–1200	1380	600
по утку	210–250	210–245	200	600
Модуль упругости при сжатии по основе, ГПа	–	–	130	–
Предел прочности при сдвиге в плоскости листа, МПа	84–87	–	90	60
Модуль упругости при сдвиге в плоскости листа, ГПа	3,2–3,7	–	11,7	3–4
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	97–104	84–95	80	80
Теплостойкость, °С	160	170	160	160

Углепластики на основе связующего ВСТ-1208 разработаны для применения в конструкциях планера, работающих при температурах до 180°С. Для углепластика ВКУ-27л армирующий наполнитель выбирали исходя из требований по упруго-прочностным показателям и технологичности. При этом было необходимо максимально сохранить упруго-прочностные характеристики материала на уровне углепластика

ВКУ-27, изготовленного на основе жгутового наполнителя HTS45. Поскольку препрег разрабатываемого углепластика должен быть предназначен для ручной выкладки, необходимо, чтобы углеродный однонаправленный наполнитель был изготовлен в виде ткани с поверхностной плотностью 130 г/м<sup>2</sup>, которая соответствует аналогу российской разработки – углеродной ленте УОЛ-300Р и обеспечивает аналогичную толщину монослоя углепластика, что позволяет унифицировать часть технологической оснастки при производстве однотипных деталей. Для удовлетворения этих требований фирма Porcher Ind. по заказу ФГУП «ВИАМ» разработала углеродный наполнитель арт. 14535 на основе углеродного жгутового наполнителя марки HTS45 12К E23, полотняного плетения с поверхностной плотностью 130 г/м<sup>2</sup> и шириной 300 и 1000 мм.

На основе связующего ВСТ-1208 и клеевого связующего ВСК-1208 разработаны следующие марки стеклопластиков: ВПС-47 – на стеклянной ткани Т-10-14; ВПС-47/7781 – на стеклянной ткани арт. 7781 фирмы Porcher Ind.; ВПС-43К – на ткани Т-64(ВМП) из высокомодульного волокна и ее аналоге стеклоткани арт. 120 фирмы Porcher Ind.

В табл. 8 и 9 приведены свойства стеклопластиков, разработанных на альтернативных тканых наполнителях, в сравнении с зарубежными аналогами.

Таблица 8

**Характеристики стеклопластиков серии ВПС-47 в сравнении с зарубежным аналогом фирмы Hexcel**

Свойства	Температура испытания, °С	Средние значения свойств для материала марки		
		ВПС-47	ВПС-47/7781	M21/37%/7581
Предел прочности при растяжении, МПа	20	708–740	475	445
	160	671–690	415	–
Модуль упругости при растяжении, ГПа	20	27–30	27	26
Предел прочности при сжатии, МПа	20	776–937	650	690
	160	511–572	455	–
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	20	64–76	55	–
	160	43–46	38	–
Плотность, г/см <sup>3</sup>	–	–	1,95	1,92

Стеклопластики на основе тканых материалов имеют следующие физико-механические свойства: высокую ударную вязкость, температуростойкость, большое сопротивление растяжению, коррозионную стойкость, антимагнитные свойства, локальность разрушения пораженного участка, высокие диэлектрические свойства; они применяются при изготовлении ответственных деталей и конструкций авиационной техники.

Таблица 9

**Сравнительные характеристики стеклопластиков на основе российского и зарубежного стеклонаполнителя и российского связующего ВСК-1208**

Свойства	Температура испытания, °С	Средние значения свойств для стеклопластика марки ВПС-43К на основе ткани	
		Т-64(ВМП)	арт. 120 фирмы Porcher Ind.
Предел прочности при растяжении, МПа	20	860–1030	510–610
	160	711–811	431–460
Модуль упругости при растяжении, ГПа	20	32–34	24–30
	160	28–32	23–25
Предел прочности при сжатии, МПа	20	794–868	611–698
	160	513–564	383–469
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	20	70–74	57–61
	160	39–43	30–44
Предел прочности при изгибе, МПа	20	1190–1230	877–916
	160	744–772	531–563
Модуль упругости при изгибе, ГПа	20	35–37	26–30
	160	32–35	23–27

Для пылезащитного устройства (ПЗУ) перспективного вертолетного двигателя с рабочей температурой эксплуатации до 200°С разработан гибридный материал на основе цианэфирного связующего ВСТ-32. Снижение массы пылезащитных устройств – необходимое условие для обеспечения высокой весовой эффективности вертолетов. Это может быть достигнуто благодаря применению ПКМ взамен алюминиевых сплавов, используемых для изготовления ПЗУ в настоящее время. Гибридный материал состоит из углепластика ВКУ-42 на основе равнопрочной ткани марки УТР-1000 с плакирующим слоем органопластика на основе ткани арт. 86-153-04Н из арамидного волокна Русар.

Сохранение уровня механических свойств углепластика ВКУ-42 с плакирующим слоем органопластика при рабочей температуре 200°С составляет: 95–97% – по пределу прочности при растяжении, 70–75% – по пределу прочности при сжатии и сдвиге, 75% – по пределу прочности при изгибе.

Основные свойства углепластика ВКУ-42 в сравнении с зарубежным аналогом – углепластиком для средненагруженных конструкций на основе равнопрочной ткани из жгута AS4 фирмы Hexcel – представлены в табл. 10.

Таблица 10

**Основные свойства углепластика ВКУ-42 в сравнении с зарубежным аналогом фирмы Hexcel**

Свойства	Средние значения свойств для материала марки	
	ВКУ-42	HexPly 954-3
Толщина монослоя, мм	0,161	–
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,56	–
Предел прочности при растяжении, МПа	895	650
Модуль упругости при растяжении, ГПа	65	60
Остаточная прочность при сжатии после удара, МПа	280	–
Удельная ударная вязкость при изгибе, кДж/м <sup>2</sup>	118	–
Рабочая температура, °С	От -60 до +200	До 200

Углепластик ВКУ-42 по значениям модуля упругости при растяжении находится на уровне свойств зарубежного аналога, а по пределу прочности при растяжении превосходит аналог на 27%. Плотность углепластика ВКУ-42 составляет 1,56 г/см<sup>3</sup>, что в 1,7 раза ниже плотности алюминиевого сплава типа Д16 (2,7 г/см<sup>3</sup>), из которого в настоящее время изготавливают элементы ПЗУ и переходного канала.

Углепластик ВКУ-42 с системой эрозионностойкой защиты, включающей плакирующий слой органопластика и систему ЛКП, рекомендуется для изготовления деталей летательных аппаратов, в том числе ПЗУ (рис. 4) и переходного канала перспективного вертолетного двигателя. Материал может эксплуатироваться в интервале температур от -60 до +200°С, в том числе при температуре +200°С в течение 500 ч при обеспечении защиты от влагонасыщения.



Рис. 4. Элементы пылезащитного устройства, изготовленного из углепластика марки ВКУ-42 с плакирующим слоем из органопластика

## Получение ПКМ безавтоклавными способами формования

В настоящее время расширение объемов применения ПКМ в конструкциях летательных аппаратов с целью снижения их массы, повышения надежности и ресурса заставило производителей искать пути снижения себестоимости изделий путем внедрения новых материалов и энергосберегающих технологий.

Метод пропитки под давлением разработан в ВИАМ в 50-х годах прошлого века, нашел широкое применение и первоначально носил название «Способ нагнетания связующего в форму» [14]. Новых расплавных связующих до начала XXI века в ВИАМ создано не было.

В 2010–2012 гг. для изготовления ПКМ методом вакуумной инфузии разработано связующее ВСЭ-21, а для формования углепластиков из препрега методом вакуумного давления – связующее ВСЭ-22. В качестве армирующих наполнителей фирмы Porcher Ind. (арт. 3673) выбрали углеродную однонаправленную ткань и углеродный жгут марки HTS40 12K E23. Отработана технология и изготовлен препрег на основе жгутового наполнителя и связующего ВСЭ-22 и исследованы его физические и реакционные свойства. С помощью отработанных безавтоклавных технологий изготовлены углепластики вакуумной инфузией на связующем ВСЭ-21 и вакуумным формованием препрегов на связующем ВСЭ-22, показаны их основные свойства: предел прочности при растяжении – до 1850 МПа и пористость – не более 1,5%.

В последние годы разработаны технологии изготовления угле- и стеклопластика марок ВКУ-50Пл и ВПС-62Пл на основе плетеных преформ методом вакуумной инфузии с использованием нового расплавного эпоксидного связующего марки ВСЭ-33 – для применения при изготовлении корпусных деталей авиационной техники, элементов трансмиссий и топливных баков. При угле армирования  $[\pm 45^\circ]$  материалы показали значения остаточного сжатия после удара – до 240 МПа, предела прочности при растяжении – до 350 МПа, предела прочности при изгибе – до 630 МПа, пористости – не более 2%.

Новым направлением стала разработка стеклопластика марки ВПС-60Р для применения в строительной отрасли, в том числе при изготовлении элементов шпунтовых ограждений и водоотбойных систем, лотков водослива, а также в мостостроении. Для этого стеклопластика разработано новое эпоксивинилэфирное связующее марки ВСЭ-33, а в качестве наполнителя – как плетеные преформы из стекловолокна, так и стеклоткань. Полученный стеклопластик характеризуется повышенной влаго- и хемостойкостью и может использоваться для изготовления конструкций, работающих в условиях высокой влажности и повышенной

агрессивности окружающей среды. На основе стеклопластика марки ВПС-60Р разработано два типа композитного шпунта: круглого сечения (диаметром – до 300 мм) на основе плетеного рукава (с различными углами армирования) и корытного типа (шпунт Ларсена) на основе равнопрочной стеклоткани (рис. 5).



Рис. 5. Шпунтовые ограждения из стеклопластика марки ВПС-60Р круглого сечения диаметром до 300 мм и корытного типа (шпунт Ларсена)

Разработка российского двигателя нового поколения, отличающегося от предыдущих двигателей большими скоростями вращения, увеличенной тягой, весовой эффективностью и надежностью, является перспективной задачей. Так, для изготовления элементов двигателя применяют новые материалы, в том числе ПКМ.

В АО «Климов» совместно с ФГУП «ВИАМ» и ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» проведена работа по изготовлению рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК) из ПКМ взамен рабочего колеса, выполненного из титанового сплава, с целью снижения массы. Для этого потребовалось разработать термостойкие углепластики с рабочей температурой  $>300^{\circ}\text{C}$  [9].

В качестве полимерной матрицы для изготовления термостойких углепластиков выбрано разработанное во ФГУП «ВИАМ» термостойкое термореактивное фталонитрильное связующее марки ВСН-31 с температурой начала деструкции  $>450^{\circ}\text{C}$  и температурой стеклования  $>420^{\circ}\text{C}$ .

Разработанное во ФГУП «ЦИАМ» рабочее колесо центробежного компрессора имеет сложную сочлененную поверхность, кроме того, к различным элементам РКЦК (силовым кольцам и лопаткам) предъявлялись различные требования. Силовые кольца для соединения лопаток РКЦК являются самыми нагруженными и ответственными элементами в конструкции РКЦК из ПКМ. В деталях кольцевой формы необходимо получить максимально приближенные к теоретическим упруго-прочностные характеристики композиционного материала, армированного однонаправленными волокнами, с максимальным объемным содержанием волокна вдоль направления армирования и повышенную жесткость в радиальном направлении. Поэтому для силовых колец в качестве углерод-

ного армирующего наполнителя выбран высокомодульный жгут марки ЖГВ-430-12к, который обладает плотностью волокна  $1,84 \pm 0,03$  г/см<sup>3</sup>, линейной плотностью 445 текс, разрушающим напряжением при растяжении – не менее 4200 МПа и модулем упругости – не менее 430 ГПа. Лопатка РКЦК имеет сложную рельефную структуру (от утолщенной комлевой части до пера лопатки сложной кривизны) и должна воспринимать нагрузки под различными углами. Для изготовления такого элемента наиболее подходит тканая структура, позволяющая обеспечить армирование в различных направлениях и под разными углами, а также способная удерживать нити от смещения при пропитке связующим. Равнопрочная ткань обладает также хорошей драпируемостью и позволяет выкладывать элементы сложной кривизны в технологической оснастке. Для изготовления лопатки выбрана равнопрочная ткань УТ-900-И на основе углеродного жгута марки Т800НВ, обладающая шириной 900 мм, поверхностной плотностью 240 г/см<sup>2</sup>, пределом прочности при растяжении по основе и по утку – не менее 700 МПа.

Термостойкое термореактивное связующее ВСН-31 позволяет получать препреги методом напыления с последующим оплавлением связующего, однако при этом препрег получается жесткий и не подходит для выкладки изделий сложной кривизны, каким является лопатка РКЦК. Расплавы фталонитрилов имеют низкую вязкость, что позволяет применять технологии RTM или VARTM при изготовлении изделий из ПКМ [15]. Наиболее подходящей в данном случае может быть технология вакуумной пропитки расплавом порошкового связующего сухой заготовки кольца или лопатки, собранной в технологической оснастке.

В табл. 11 приведены свойства углепластиков ВКУ-38ТР и ВКУ-38ЖН на основе фталонитрильного связующего ВСН-31.

Сохранение прочностных характеристик углепластика ВКУ-38ЖН в направлении основы при температуре 300°С относительно исходных значений (при 20°С) составляет 80–97% в зависимости от вида испытаний, а при температуре 350°С сохранение значений составляет: предела прочности при растяжении 96%, модуля упругости при растяжении 78%, предела прочности при сжатии 76%, предела прочности при межслойном сдвиге 75%. Полученные результаты подтверждают, что углепластик ВКУ-38ЖН работоспособен при температуре до 350°С.

Углепластик марки ВКУ-38ЖН может быть использован не только для изготовления силовых колец РКЦК, но и для теплонагруженных высоко- и средненагруженных авиационных конструкций, а также в деталях самолетных и вертолетных двигателей, изготавливаемых методом намотки, – втулки, каналы, трубопроводы топлива и смазок, баллоны высокого давления и другие тела вращения.



Таблица 11

**Сравнительные свойства углепластиков  
на основе фталонитрильного связующего**

Свойства	Средние значения свойств для материала марки	
	ВКУ-38ТР	ВКУ-38ЖН
Предел прочности при растяжении, МПа: по основе по утку	740 630	1300 45
Модуль упругости при растяжении, ГПа: по основе по утку	88 88	280 5,2
Относительная деформация при растяжении, %: по основе по утку	0,8 0,7	0,6 0,9
Коэффициент Пуассона: по основе по утку	0,06 0,04	0,34 0,02
Предел прочности при сжатии, МПа: по основе по утку	654 433	670 69
Модуль упругости при сжатии, ГПа: по основе по утку	79 73	206 5,9
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	40	39
Предел прочности при сдвиге в плоскости листа*, МПа	85	–
Модуль упругости при сдвиге в плоскости листа*, ГПа	6,3	–
Удельная ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	128	62

\* При укладке  $\pm 45$  град.

Сохранение прочностных характеристик углепластика ВКУ-38ТР в направлении основы при температуре 300°С относительно исходных значений (при 20°С) составляет 79–94% в зависимости от вида испытаний, а при температуре 350°С сохранение значений составляет: предела прочности при растяжении 90%, модуля упругости при растяжении 84%, предела прочности при межслойном сдвиге 69%. Высокое сохранение значений характеристик подтверждает работоспособность углепластика ВКУ-38ТР при температурах до 350°С.

Разработанный углепластик марки ВКУ-38ТР может быть использован не только для изготовления лопаток РКЦК, но и для теплонагруженных деталей и агрегатов в средненагруженных конструкциях планера в зоне двигателя (внешняя оболочка первого и второго контура обшивки), а также в деталях самолетных и вертолетных двигателей (спрямляющие лопатки первой и второй ступеней ГТД, панели шумоглушения газогенератора).

### Заключения

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны полимерные связующие на основе эпоксидных и цианэфирных смол, которые перерабатывают по расплавной технологии, позволяющей получать полуфабрикаты и изделия из ПКМ с повышенными стабильными характеристиками.

Создание ПКМ нового поколения проводится на основе принципа единства «конструкция—технология—материал», т. е. материал разрабатывается непосредственно с учетом требований, предъявляемых к конструкции, и технологических особенностей ее производства [16, 17].

Разработана серия угле- и стеклопластиков на основе высокодеформативного эпоксидного связующего ВСЭ-1212, по своим физико-механическим характеристикам не уступающих передовым материалам фирм Hexcel и Cytec. Разработанные углепластики ВКУ-25, ВКУ-29, ВКУ-39 и стеклопластик ВПС-48/7781 применены в конструкции мотогондолы двигателя ПД-14.

Для применения в конструкциях планера, работающих при температурах до 180°C, разработана серия углепластиков марки ВКУ-27 на основе цианэфирного связующего ВСТ-1208. ПКМ нового поколения, перерабатываемые по расплавной технологии, позволяют существенно снизить нагрузку на окружающую среду.

Во ФГУП «ВИАМ» разработана технология изготовления пылезащитного устройства и переходного канала перспективного вертолетного двигателя из углепластика ВКУ-42 на основе цианэфирного связующего ВСТ-32 с лакирующим слоем органопластика на рабочую температуру до 200°C.

Разработаны также термостойкие углепластики для рабочего колеса центробежного компрессора на рабочую температуру 300°C: углепластик ВКУ-38ТР — для лопаток и углепластик ВКУ-38ЖН — для кольцевых элементов.

Разработаны угле- и стеклопластики марок ВКУ-50Пл и ВПС-62Пл на основе эпоксидного связующего марки ВСЭ-33, перерабатываемого методом вакуумной инфузии, и стеклопластик марки ВПС-60Р на основе эпоксицианэфирного связующего марки ВСЭ-33 для применения в строительной отрасли, в том числе при изготовлении элементов шпунтовых ограждений и водоотбойных систем, лотков водослива, а также в мостостроении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы — основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения — основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект & Технологии. 2016. №2. С. 41–46.
5. 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.
6. 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.
  7. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
  8. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 231–242.
  9. Гуляев И.Н., Власенко Ф.С., Зеленина И.В., Раскутин А.Е. Направления развития термостойких углепластиков на основе полиимидных и гетероциклических полимеров // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №1. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-4-4.
  10. Полимерное связующее и препреги на его основе: пат. 2510408 Рос. Федерация; опубл. 27.03.2014.
  11. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигатель» // Пермские авиационные двигатели: информ. бюл. 2014. №31. С. 43–47.
  12. Каблов Е.Н. О настоящем и будущем ВИАМ и отечественного материаловедения: интервью // Российская академия наук. 2015. 19 января. С. 10–15.
  13. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
  14. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–301.
  15. Железняк В.Г., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Исследование возможности создания терморезистивного связующего на рабочую температуру до 400°C // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 58–61.
  16. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2012. С. 349–380.
  17. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.