

УДК 678.8

К.Е. Куцевич¹, Л.А. Дементьева¹, Н.Ф. Лукина¹**СВОЙСТВА И НАЗНАЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КЛЕЕВЫХ ПРЕПРЕГОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7

Приведены свойства композиционных материалов клеевых (КМК) на основе широкого ассортимента клеевых препрегов на стекло- и угленаполнителях. Приведены сведения о преимуществах и особенностях технологического процесса изготовления элементов ПКМ из клеевых препрегов. Указано назначение КМК – для изготовления деталей из ПКМ, в том числе сотовой конструкции одинарной и двойной кривизны, предназначенных для эксплуатации при температурах 80–175°C.

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») [1].

Ключевые слова: композиционные материалы, клеевые препреги, клеевое связующее, угле- и стеклонаполнители, прочностные характеристики, сотовая конструкция.

The properties of composite adhesive materials (CAM) based on wide range of adhesive prepregs on glass- and carbon fillers are presented. The information about benefits and features of PCM elements manufacturing process from adhesive prepregs is presented. The CAM application for manufacturing parts from PCM including the honeycomb structure, single or double curvature designed for operation at temperatures 80–175°C is shown.

The research work is executed within implementation of the complex scientific direction 13.2. «Constructional polymer composite materials» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period up to 2030») [1].

Keywords: composite materials, adhesive prepregs, adhesive matrix, carbon and glass fillers, strength characteristics, the honeycomb structure.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Совершенствование аэродинамических характеристик планера летательных аппаратов с одновременным обеспечением весовой эффективности во многом решается путем применения в конструкциях авиационной техники полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1]. Благодаря своим уникальным свойствам они нашли широкое применение в силовых конструкциях авиакосмической и других видов техники, в конструкции планера, объем их применения в настоящее время достиг 50%, что позволило снизить массу на 20–25% [2].

В последнее время интенсивно развиваются работы по созданию нового класса конструкционных материалов на основе долгоживущих клеевых препрегов (материалы КМК), в которых в качестве связующего расплавного типа для пропитки стекло- и угленаполнителей широко используются модифицированные высокопрочные пленочные клеевые композиции с регулируемыми характеристиками (вязкоупругими, прочностными, деформационными и т. д.) [3].

Отличительной особенностью клеевых препрегов является возможность изготовления за одну технологическую операцию высоконагруженных сотовых (слоистых) конструкций из неметаллических материалов одинарной и сложной кривизны [4].

Технология имеет существенные преимущества перед традиционными технологиями формования деталей такого типа. Основное преимущество разработанной технологии – достижение герметичности и весовой эффективности деталей и агрегатов из ПКМ и, как следствие, повышение живучести и ресурса работы клееных конструкций, что отвечает стратегическим направлениям развития авиационных материалов и технологий [5, 6]. В результате применения клеевых препрегов также достигается значительное повышение трещиностойкости конструкций, уменьшение количества выбросов вредных веществ в атмосферу благодаря использованию безрастворной технологии изготовления клеевых препрегов и изделий из них. В процессе изготовления деталей обеспечивается существенное сокращение количества технологических операций и за счет этого – снижение трудоемкости работ [7, 8].

Композиционные материалы на основе клеевых препрегов марок КМКС (на основе стеклонеполнителей) и КМКУ (на основе угленеполнителей) обладают широким спектром свойств в зависимости от физико-механических характеристик клеевых связующих и наполнителей, используемых в их составе [9].

Среди номенклатуры клеевых препрегов марок КМКС особо следует отметить препреги марок КМКС-2м.120 и КМКС-4.175 (табл. 1) на стеклонеполнителях марок Т-10 и Т-15, с использованием которых ведущими КБ (филиал ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого», АО «РСК «МиГ») разработаны новые конструкции радиопрозрачных обтекателей [10, 11].

Таблица 1

Основные свойства стеклопластиков на основе клеевых препрегов марок КМКС-2м.120

Свойства	Значения свойств для клеевого препрега марки КМКС			
	2м.120.Т10	2м.120.Т15	2м.120.Т60	2м.120.Т64
Рабочие температуры, °С	-60÷+120	-60÷+120	-60÷+120	-60÷+120
Плотность стеклопластика, г/см ³	1,8–1,9	1,5–1,6	1,7–1,8	1,74–1,84
Предел прочности при растяжении, МПа:				
– по основе	570	385	1500	750
– по утку	245	240	75	410
Модуль упругости при растяжении, ГПа:				
– по основе	27,5	19,0	42,0	31,0
– по утку	17,5	17,0	11,5	22,0
Предел прочности при сжатии, МПа:				
– по основе	555	560	900	720
– по утку	380	390	210	440
Предел прочности при статическом изгибе, МПа:				
– по основе	760	440	1400	940
– по утку	480	380	130	565
Ударная вязкость, кДж/м ²	240	160	210	230
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	69	55	80	77
Диэлектрическая проницаемость при 10 ⁶ Гц	4,76	4,19	4,46	4,82
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 ⁶ Гц	0,015	0,017	0,024	0,027

Благодаря применению в составе клеевых препрегов стеклоткани марки Т-64 (ВМП) на основе высокомодульных волокон и кварцевой ткани марки ТС-8/3-К-ТО взамен тканей Т-10 и Т-15, а также теплостойкого до 175°С клеевого связующего разработаны композиционные материалы с повышенным уровнем диэлектрических и теплофизических свойств (табл. 2), что позволило применить их в конструкции обтекателей новых изделий авиационной техники [12].

Таблица 2

**Основные свойства стеклопластиков радиотехнического назначения
на основе клеевых препрегов марок КМКС-4.175**

Свойства	Значения свойств для клеевого препрега марки КМКС			
	4.175.T10	4.175.T15	4м.175.T64	4к.175.TC8/3
Плотность стеклопластика, г/см ³	1,8–1,9	1,5	1,65	1,62
Предел прочности при растяжении, МПа:				
– по основе	605	450	730	720
– по утку	315	230	410	425
Модуль упругости при растяжении по основе, ГПа	29	21,8	30	28
Предел прочности при сжатии, МПа:				
– по основе	630	560	720	600
– по утку	390	390	450	275
Предел прочности при статическом изгибе, МПа:				
– по основе	760	435	950	840
– по утку	470	375	600	590
Ударная вязкость, кДж/м ²	210	170	270	233
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	75	50	80	75
Диэлектрическая проницаемость при 10 ⁶ Гц	4,2	3,7	4,82	3,6
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 ⁶ Гц	0,015	0,014	0,027	0,008–0,013

Стеклопластики на основе стеклоткани Т-10 обладают высокими физико-механическими характеристиками, однако наполнитель часто характеризуется наличием поверхностных дефектов (складок, гофров), которые образуются при изготовлении препрегов на современном оборудовании. Дефекты на поверхности вызывают разброс значений по содержанию связующего в препреге и соответственно – значительный разброс величины физико-механических характеристик отформованных деталей и агрегатов из ПКМ (в том числе разброс значений радиотехнических характеристик обтекателя сотовой конструкции) [13]. Во ФГУП «ВИАМ» разработан композиционный материал на основе клеевого связующего с теплостойкостью 120°С и стеклоткани марки Ст-62005 фирмы «ХК Композит» специальной текстильной формы (аналог ткани Т-10), обеспечивающий сохранение прочности при растяжении (σ_B) при температуре 120°С на уровне 90% от исходной прочности (вместо 70% – для материала КМКС-2м.120.T10 на основе стеклоткани Т-10-14) [14]. Прочностные характеристики разработанного материала представлены в табл. 3.

Таблица 3

Прочностные характеристики* композиционных материалов клеевых

Свойства	Значения свойств для материала марки	
	КМКС-2м.120.Ст-62005 (разработанный)	КМКС-2м.120.T10 (аналог)
Предел прочности, МПа:		
– при растяжении, МПа	<u>590–670</u> 636	<u>545–645</u> 570
– при сжатии	<u>535–660</u> 600	<u>535–600</u> 555
– при межслойном сдвиге	<u>74–82</u> 78	<u>63,5–73,5</u> 69,0
– при изгибе	<u>855–895</u> 873	<u>740–765</u> 760
Модуль упругости при изгибе, ГПа	<u>27–29</u> 28	<u>24,0–25,0</u> 24,5
Прочность при отрыве обшивки от сот, МПа	<u>4,8–5,5</u> 4,9	<u>4,5–5,5</u> 4,8

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Видно, что стеклопластик на основе отечественной стеклоткани Ст-62005 превосходит по своим прочностным характеристикам стеклопластик на основе стеклоткани Т-10-14. При этом стеклоткань марки Ст-62005 обладает хорошей драпируемостью и не образует поверхностных дефектов (складок, гофров) при изготовлении препрега.

Среди композиционных материалов на основе угленаполнителей, рекомендованных для длительной работы при температуре 150°C, наиболее высоким уровнем свойств по этому показателю обладает углепластик из клеевого препрега КМКУ-3м.150.УОЛ(У) на основе отечественной углеродной однонаправленной ленты УОЛ-300Р улучшенной текстильной формы и клеевого препрега марки КМКУ-3м.150.P14535, изготовленного из однонаправленной ленты фирмы Porcher арт. 14535, Франция (табл. 4). Следует отметить, что эти материалы рекомендованы к применению в конструкции истребителя пятого поколения Т-50 и обеспечивают создание агрегатов, сочетающих сотовые и монолитные элементы [15, 16].

Таблица 4

Сравнительные показатели* свойств материалов

Свойства	Значения свойств для материала марки	
	КМКУ-3м.150.УОЛ(У)	КМКУ-3м.150.P14535
Предел прочности при растяжении, МПа:		
– по основе	<u>1430–1780</u> 1600	<u>1600–1840</u> 1700
– по утку	<u>26–46</u> 36	<u>40–70</u> 52
Модуль упругости при растяжении, ГПа:		
– по основе	<u>123–133</u> 128	<u>120–123</u> 121
– по утку	<u>9,2–11,0</u> 9,8	<u>8–10</u> 9,2
Предел прочности при сжатии, МПа:		
– по основе	<u>965–1410</u> 1115	<u>1050–1240</u> 1130
– по утку	<u>195–275</u> 230	<u>274–315</u> 301
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	<u>85–100</u> 97	<u>90–97</u> 95
Толщина монослоя, мм	0,14	0,14

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

В настоящее время одним из перспективных направлений является разработка энергосберегающих технологий. В связи с этим в институте проведены работы по снижению температуры отверждения клеевых препрегов [17].

Так, разработаны стеклопластики марок ВПС-44К.Т60 и ВПС-45К.ТС8/3-К на основе клеевых препрегов КМКС-1с.80.Т60 и КМКС-1с.80.ТС8/3-К с использованием высокомодульных и кварцевых стеклонеполнителей с температурой отверждения 140±5°C (вместо 175±5°C), которые предназначены для изготовления агрегатов из ПКМ сотовой конструкции за одну технологическую операцию, в том числе радиотехнического назначения (обтекатели), работоспособных при температурах от -60 до +80°C [18]. Прочностные свойства стеклопластиков марок ВПС-44К.Т60 и ВПС-45К.ТС8/3-К приведены в табл. 5.

Таблица 5

Прочностные свойства стеклопластиков марок ВПС-44К.Т60 и ВПС-45К.ТС8/3-К

Свойства	Значения свойств для материала марки	
	ВПС-44К.Т60	ВПС-45К.ТС8/3-К
Предел прочности при растяжении, МПа:		
– по основе	1395	670
– по утку	34	350
Модуль упругости при растяжении, ГПа:		
– по основе	40	23
– по утку	6,1	10
Предел прочности при сжатии, МПа:		
– по основе	805	580
– по утку	150	360
Модуль упругости при сжатии, ГПа	45	22
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	1135	1010
Модуль упругости при статическом изгибе, ГПа	36	21
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	62	60
Диэлектрическая проницаемость при 10 ⁶ Гц	4,38	3,62
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 ⁶ Гц	0,016	0,013

Разработан также углепластик марки ВКУ-34КУОЛ(У) на основе клеевого препрега КМКУ-5м.150.УОЛ(У) с пониженной температурой отверждения 150–160°C (вместо 180±5°C) и нового углеродного наполнителя улучшенной текстильной формы марки УОЛ-300Р, свойства которого представлены в табл. 6.

Таблица 6

Физико-механические характеристики* композиционного материала марки ВКУ-34КУОЛ(У)

Свойства	Значения свойств для материала марки ВКУ-34КУОЛ(У)
Предел прочности при растяжении, МПа:	
– по основе	<u>1580–1900</u> 1700
– по утку	<u>38–44</u> 42
Модуль упругости при растяжении, ГПа:	
– по основе	<u>120–130</u> 125
– по утку	<u>8,0–8,8</u> 8,4
Предел прочности при сжатии, МПа:	
– по основе	<u>950–1050</u> 1020
– по утку	<u>215–230</u> 220
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	<u>1940–2260</u> 2030
Модуль упругости при статическом изгибе, ГПа	<u>125–140</u> 130
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	<u>83–87</u> 85
Толщина монослоя, мм	0,14

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Проведены испытания образцов углепластика марки ВКУ-34КУОЛ(У) на основе клеевого препрега марки КМКУ-5м.150.УОЛ(У).45 на прочность при сжатии после

длительного воздействия климатических факторов: влагостойкость (при влажности $\varphi=98\%$), тропикостойкость, термостарение при 150°C в течение 500 и 1000 ч, грибоустойкость.

Установлено, что сохранение прочности при сжатии после длительного воздействия различных факторов ($\varphi=98\%$, тропическая камера, грибоустойкость, термостарение) при 20°C составило 87–97%, при 150°C : 68–74%.

Проведены исследования прочности клеевых соединений при сдвиге и равномерном отрыве обшивки от сот с использованием клеевого препрега марки КМКУ-5м.150.УОЛ(У).65 в исходном состоянии и после выдержки в камере тропиков, а также после воздействия влажности ($\varphi=98\%$) в течение 1 и 3 мес.

Установлено, что после 3 мес выдержки образцов в камере тропиков процент сохранения прочности при сдвиге при температуре испытания 20°C составил 82%, при температуре испытания 150°C : 68%, что свидетельствует о тропикостойкости материала. Сохранение прочности клеевых соединений при сдвиге после воздействия влаги в течение 3 мес при температуре испытания 20°C составило 84%, а при 150°C : 70%, в результате чего можно сделать вывод о влагостойкости материала.

Проведены испытания клеевых соединений на основе клеевого препрега марки КМКУ-5м.150.УОЛ(У).65 на прочность при сдвиге и равномерном отрыве обшивки от сотового заполнителя после их выдержки при температуре 150°C в течение 500 и 1000 ч.

Значения прочности при сдвиге и равномерном отрыве обшивки от сот клеевых соединений после термостарения в течение 1000 ч при 150°C остались на уровне исходных значений. Таким образом, проведя анализ полученных результатов, можно сделать вывод, что клеевые соединения на основе клеевого препрега марки КМКУ-5м.150.УОЛ(У).65 устойчивы к длительному воздействию температуры до 150°C .

Композиционные материалы клеевые марок КМКС и КМКУ нашли широкое применение в конструкции изделий авиационной техники. Однако они относятся к классу полимерных горючих материалов, что делает невозможным их применение в интерьере самолета (в частности, для изготовления панелей пола). В связи с этим одним из ключевых направлений на данный момент является создание новых КМК на основе связующего пониженной горючести с теплостойкостью 80°C и отечественных стекло- и угленополнителей. Разработка позволит использовать эти материалы для изготовления деталей и агрегатов из ПКМ монолитной и сотовой конструкции и применить их не только в салоне самолета (панели пола), но и для агрегатов наружного контура, что обеспечит снижение пожароопасности изделия [19]. Работы во ФГУП «ВИАМ» в данном направлении уже проводятся.

Композиционные материалы клеевые на основе клеевых препрегов внедрены в конструкцию многих изделий авиакосмической техники ведущих КБ [20, 21]. Они широко применяются в конструкциях изделий авиакосмического комплекса: ПАО «Компания «Сухой» (самолет «Сухой Суперджет 100»), АО «РСК МиГ» (самолеты серии МиГ всех модификаций), в самолетах ОАО «АК им. С.В. Ильюшина», ПАО «Туполев», ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева», вертолетах АО «Камов», ракетной технике ОАО «ЭМЗ им. В.М. Мясищева», ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева» и других [22].

К деталям и агрегатам, в которых применены композиционные материалы на основе клеевых препрегов, относятся: панели фюзеляжа, створки шасси, обтекатели, отдельные детали механизации крыла и оперения, воздухозаборный канал сотовой конструкции и т. д. [23, 24].

Имеющийся в настоящее время опыт длительной эксплуатации (более 25 лет) клееных конструкций в составе изделий авиационной техники подтверждает высокий уровень свойств ПКМ на основе клеевых препрегов [25].

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2012. 520 с.
3. Батизат В.П., Аниховская Л.И., Дементьева Л.А. Клеи для склеивания конструкций из металлов и композиционных материалов // *Авиационная промышленность*. 1983. №11. С. 15–17.
4. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Применение адгезионных грунтов и систем модификации поверхности при склеивании // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2013. №9. С. 24–28.
5. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Влияние адгезионных грунтов на ресурсные характеристики клеевых соединений // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2015. №11. С. 20–23.
6. Препрег и изделие, выполненное из него: пат. 2427594 Рос. Федерация; опубли. 23.07.13.
7. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
8. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 231–242.
9. Петрова А.П., Донской А.А., Чалых А.Е., Щербина А.А. Клеящие материалы. Герметики: справочник / под ред. А.П. Петровой. СПб.: Профессионал, 2008. С. 589.
10. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и термостойкие клеи // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 328–335.
11. Антифеева Н.В., Журавлева П.Л., Алексашин В.М., Куцевич К.Е. Влияние степени отверждения связующего на физико-механические свойства углепластика и микроструктуру межфазного слоя углеродное волокно/матрица // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2014. №12. С. 26–30.
12. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Авдоница И.А., Тюменева Т.Ю., Жадова Н.С. Клеи для авиационной техники // *РЖХ*. 2010. Т. LIV. №1. С. 46–52.
13. Каблов Е.Н., Минаков В.Т., Аниховская Л.И. Клеи и материалы на их основе для ремонта конструкций авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. №1. С. 61–65.
14. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Бочарова Л.И., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е., Петрова А.П. Свойства композиционных материалов на основе клеевых препрегов // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2012. №6. С. 19–24.
15. Аниховская Л.И., Минаков В.Т. Клеи и клеевые препреги для перспективных изделий авиакосмической техники // *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: юбилейный науч.-технич. сб. М.: МИСиС–ВИАМ, 2002. С. 315–326.*
16. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Тюменева Т.Ю. Свойства клеев и клеящих материалов для изделий авиационной техники // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2009. №1. С. 14–24.
17. Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Сереженков А.А., Куцевич К.Е. Основные свойства и назначение ПКМ на основе клеевых препрегов // *Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов: тез. докл. XIX Междунар. науч.-технич. конф. Обнинск: ОНПП «Технология», 2010. С. 11–12.*
18. Морозов Б.Б. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях разработки ОКБ Сухого // *Клеящие материалы авиационного назначения: сб. докл. конф. М.: ВИАМ, 2013. С. 31–36.*
19. Хрычев Ю.И., Шкодинова Е.П., Дементьева Л.А. Разработка технологического процесса изготовления радиопрозрачного обтекателя из клеевых препрегов типа КМКС-2м.120 // *Клеящие материалы авиационного назначения: сб. докл. конф. М.: ВИАМ, 2013. С. 43–47.*

-
20. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Кириенко Т.А., Чурсова Л.В. Клеевые связующие для деталей из ПКМ сотовой конструкции // Клеи. Герметики. Технологии. 2016 (в печати).
 21. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е. Клеевые препреги и слоистые материалы на их основе // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 19–21.
 22. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Бочарова Л.И., Аниховская Л.И., Лукина Н.Ф. Композиционные материалы клеевые на основе стеклянных и углеродных наполнителей // Клеи. Герметики. Технологии. 2009. №1. С. 24–27.
 23. Лукина Н.Ф., Чурсова Л.В. Лаборатория «Клеи и клеевые препреги» – достижения и перспективы // Клеящие материалы авиационного назначения: сб. докл. конф. М.: ВИАМ, 2013. С. 1–5.
 24. Lukina N.F., Dementeva L.A., Serezhenkov A.A., Kotova E.V., Senatorova O.G., Sidelnikov V.V., Kutsevich K.E. Adhesive prepregs and composite materials on their basis // Russian Journal of General Chemistry. 2011. V. 81. №5. С. 1022–1024.
 25. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Чурсова Л.В. Влияние полисульфонов различного строения на свойства клеевых материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №4. С. 6–8.