

УДК 678.83

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-64-68

П.М. Шульцешова, Г.Ф. Железина

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ И ЗАПЫЛЕННОСТИ СРЕДЫ НА СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ ОРГАНОПЛАСТИКОВ

Герметичные конструкционные органические пластики нового поколения ВКО-19, ВКО-19Л на основе арамидного волокна Русар и расплавленного связующего обладают повышенной устойчивостью к поглощению влаги и атмосферным условиям, сохраняют высокий уровень конструкционной прочности и выносливости после эрозионного воздействия твердыми частицами при эксплуатации в условиях запыленности.

Ключевые слова: органический пластик, арамидные волокна, полимерные композиционные материалы, эрозия.

Pressure-tight structural organic plastics VKO-19 and VKO-19L of the new generation are based on Ruser aramid fibers and melted matrix and possess an increased resistance to absorption of moisture and atmosphere impacts. They keep a high level of structural strength and endurance after erosive attacks by solids at operation under dust loading.

Key words: organic plastics, aramid fibers, polymer composites, erosion.

Сохранение работоспособности при воздействии факторов внешней среды – необходимое условие для применения полимерных композиционных материалов в составе авиационных конструкций [1]. Конструкционные органические пластики используются для изготовления деталей внешнего контура самолетов и вертолетов, а также в качестве обшивки лопастей несущего винта вертолетов. В процессе эксплуатации эти конструкции могут подвергаться воздействию жестких атмосферных условий (высокой влажности, перепадам температур), а также ударному и эрозионному воздействию различных частиц: капель дождя, града, песка и мелких камней [2–4].

В данной работе рассмотрены вопросы повышения стойкости арамидных органических пластиков к атмосферным условиям, а также приведены результаты исследований работоспособности этого класса материалов в условиях повышенной запыленности внешней среды.

Органические пластики с повышенной атмосферной стойкостью

Опыт эксплуатации органических пластиков в составе авиационных конструкций показывает, что эти материалы имеют достаточно высокую эксплуатационную надежность в различных климатических зонах – календарный срок эксплуатации составляет 10–15 лет. Однако в сравнении с композициями на основе стеклянных и углеродных волокон органические пластики на основе арамидного волокна в большей степени сорбируют атмосферную влагу. Несмотря на то, что по уровню сохранения конструктивных свойств при влагонасыщении органические пластики не уступают угле- и стеклопластикам, повышенное водопоглощение традиционно считается основным недостатком этих материалов [5–7].

Работы последних лет были направлены на повышение влагостойкости органических пласти-

ков оптимизации их состава и технологии изготовления. С этой целью разработаны атмосферостойкие органические пластики ВКО-19 и ВКО-19Л на основе арамидного волокна второго поколения Русар (взамен волокна СВМ) и безрастворного связующего, используемого в виде пленки или расплава [8, 9]. Органические пластики ВКО-19 и ВКО-19Л отличаются типом армирующей ткани. В составе органического пластика ВКО-19 использована ткань сатинового переплетения, обладающая высокой подвижностью текстильной структуры, что позволяет изготавливать детали сложной кривизны. Органический пластик ВКО-19Л – листовый материал, армированный тканью саржевого переплетения с равновесной текстильной структурой. Использование такой ткани в качестве армирующего наполнителя позволяет исключить коробление тонколистовых обшивок из органического пластика ВКО-19Л.

Необходимость использования безрастворного связующего обусловлена тем, что органические пластики, изготавливаемые по типовой растворной технологии (Органит 12Т, Органит 16Т/Рус и др.), имеют повышенную пористость из-за невозможности полного удаления растворителя. Использование безрастворного связующего позволило обеспечить минимальную пористость органического пластика и его герметичность, а также применить для его изготовления экологически безопасную (безрастворную) технологию, что отвечает современным требованиям охраны окружающей среды [10, 11].

При разработке технологии изготовления органических пластиков ВКО-19 и ВКО-19Л особое внимание уделяли процессу совмещения высоковязкого связующего, содержащего полисульфоновый каучук, с тканью из арамидного волокна Русар. Для обеспечения равномерного распределения полимерной матрицы в объеме композита проводили пропитку ткани связующим под вакуумом при повышенной температуре, изготовление органи-

ческого пластика проводили методом автоклавного формования [12, 13].

Известно, что стабильность механических свойств полимерных композитов в тепловлажностных условиях зависит от стойкости к поглощению влаги, что, в свою очередь, зависит от сорбционной активности компонентов (волокна и полимерной матрицы), их объемного соотношения, плотности и других факторов [14–17]. Для оценки эксплуатационной надежности и атмосферной стойкости органических пластиков ВКО-19 и ВКО-19Л проведены исследования свойств материалов после длительного воздействия теплового и термовлажностного старения, а также после экспозиции в различных климатических зонах (умеренно теплый климат в г. Геленджик, умеренно холодный климат в г. Москва). Условия проведения испытаний и свойства органических пластиков ВКО-19 и ВКО-19Л после воздействия факторов внешней среды представлены в табл. 1.

Как показали результаты исследований, органические пластики ВКО-19, ВКО-19Л имеют повышенную устойчивость к поглощению влаги (водопоглощение – не более 2%) и высокий уровень сохранения прочности после воздействия факторов внешней среды (не менее 83%). После климатического старения на поверхности органического пластика наблюдается частичное выкрашивание связующего (см. рисунок), при этом арамидные волокна остаются неразрушенными.

Отличительной особенностью органических пластиков ВКО-19 и ВКО-19Л по сравнению с типовыми органическими пластиками является их герметичность (нулевая воздухопроницаемость) при малой толщине (табл. 2).

Определение воздухопроницаемости органических пластиков проводили с помощью вакуумной камеры путем замера падения разряжения воздуха за определенное время. Расчет проводили по формуле:

$$V = K \cdot (1 - P_{cp}), \quad (1)$$

где V – воздухопроницаемость, л/(ч·м²); K – коэффициент, учитывающий параметры прибора; P_{cp} – среднее арифметическое значение давления по вакуумметру, кН/м².

Герметичность органических пластиков особенно важна при изготовлении тонколистовых обшивок трехслойных сотовых панелей, используемых в конструкции вертолетов. Герметичные органические пластики ВКО-19 и ВКО-19Л существенно превосходят по механическим свойствам применяемый в настоящее время для аналогичных целей органический пластик Органит 11ТЛ: повышение удельной ударной вязкости на 70%, прочности при межслойном сдвиге – на 28%, длительной прочности – на 40% и т. д. Поэтому применение герметичных органических пластиков ВКО-19 и ВКО-19Л позволит обеспечить надежность трехслойных сотовых конструкций и, в частности, хвостовых отсеков

лопастей несущего винта вертолетов в условиях теплого влажного климата.

Эрозионная стойкость конструкционных органических пластиков

При взлете и посадке летательных аппаратов, особенно на грунтовых аэродромах, их обшивки подвергаются абразивно-ударному воздействию твердых частиц пыли, песка, мелких камней, поднимающихся со взлетно-посадочных полос и травмирующих внешние поверхности изделия. Известно, что органические пластики обладают высокой ударостойкостью [18, 19], поэтому одно из перспективных направлений их применения – пылезащитные устройства для вертолетных двигателей. Изучение поведения органических пластиков при эрозионных воздействиях – важная задача, связанная с созданием подобных конструкций.

В данной работе эрозионную стойкость органических пластиков оценивали путем измерения потери массы или уменьшения толщины материала после эрозионного воздействия. Кроме того, принимая во внимание, что эрозионные повреждения поверхности, являясь концентратами напряжений, могут снижать прочностные и ресурсные характеристики изделия, определяли уровень сохранения свойств органического пластика после эрозионных воздействий.

Испытания на эрозионную стойкость проводили на газодинамической установке. Органический пластик подвергался воздействию потока частиц оксида алюминия размером 50 мкм со скоростью 190 м/с. Критерием эрозионной стойкости служила интенсивность массовой эрозии (I_m) – отношение массы унесенного с единицы площади материала к массе падающих частиц. Для сравнения аналогичным испытаниям подвергали образцы стеклопластика.

Показатели эрозионной стойкости органических и стеклопластиков различного состава приведены в табл. 3.

Известно, что процесс разрушения полимерных композиционных материалов является энергозатратным, поскольку сопровождается множественными разрушениями армирующих волокон и полимерной матрицы [20]. Эрозионная стойкость арамидных органических пластиков зависит от химической природы и деформативных свойств связующего. Так, с увеличением относительного удлинения δ эпоксидного связующего с 4 до 9% эрозионная стойкость органического пластика возрастает на 27%. В зависимости от типа связующего значительно меняется характер разрушения арамидного волокна в зоне, подвергавшейся эрозионному воздействию. Как показали микроструктурные исследования, при использовании хрупкого анилиноформальдегидного связующего эрозионное разрушение органического пластика сопровождается сильным продольным расщеплением волокна СВМ, а в случае эпоксидных связующих наряду с расщеп-

Таблица 1

Влияние факторов внешней среды на свойства органопластиков ВКО-19 и ВКО-19Л

Условия экспозиции	Продолжительность экспозиции	Предел прочности при растяжении		
		МПа		
		ВКО-19Л	ВКО-19	ВКО-19Л
В исходном состоянии	–	750	505	510
Тепловое старение при температуре, °С:	80	2000 ч	690	510
		4000 ч	–	495
	100	2000 ч	655	520
		4000 ч	–	505
Термовлажностное старение (при 60°С, φ=85%)	2 мес	660	520	–
Тропическая камера*	3 мес	625	500	–
	6 мес	–	–	485
Естественное старение в умеренно теплом климате (г. Геленджик)	1 год	670	–	500

* Режим тропической камеры: 8 ч при 50°С и φ=100% + 12 ч при 20±5°С и φ=100% + 8 ч при 20±5°С и φ=65%.

Таблица 2

Воздухопроницаемость тонколистовых обшивок из органопластиков различных марок

Тип связующего	Марка органопластика	Толщина, мм	Продолжительность испытания, ч	Воздухопроницаемость л/(ч·м²)
Расплавное	ВКО-19Л	0,44	360	0
Растворное	Органит 7Т	0,45	120	130
	Органит 16Т-Рус	0,48	240	145
	Органит 18Т-Рус	0,44	160	150

Таблица 3

Эрозионная стойкость полимерных композиционных материалов

Тип материала	Состав материала		Интенсивность массовой эрозии $I_m \cdot 10^2$	Характер разрушения армирующих волокон
	Армирующий наполнитель	Связующее		
Органопластик	Ткань из арамидного волокна СВМ	Эпоксидно-фенолформальдегидное (δ=2,5%)	0,413	Расщепление волокон
		Эпоксидное (δ=4,0%)	0,614	Расщепление и смятие волокон
		Эпоксидное (δ=7,0%)	0,557	
		Эпоксидное (δ=9,0%)	0,487	Преобладающее смятие волокон
		Полиуретановый каучук	0,174	Смятие волокон
Стеклопластик	Кремнеземная ткань	Фенолформальдегидное (δ=2,5%)	1,05	Хрупкий излом волокна

Таблица 4

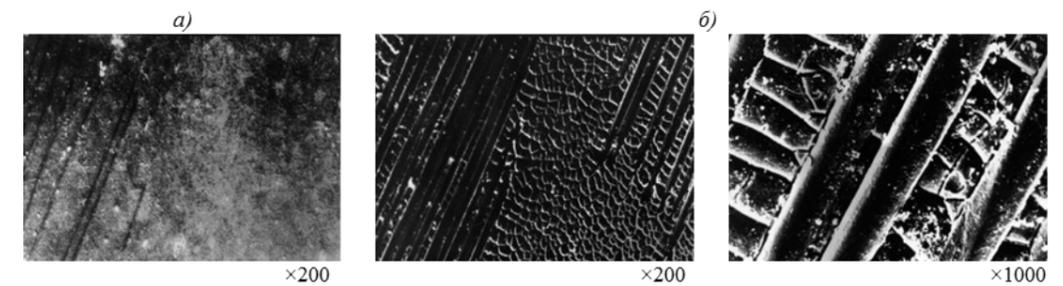
Влияние глубины эрозии на несущую способность и выносливость органопластика

Глубина эрозии, мкм	Разрушающая нагрузка, Н	Число циклов до разрушения при пульсирующем растяжении
0	125	38000
400	100	10000
600	86	3600
800	75	700
1000	65	90

Таблица 5

Потеря выносливости органо- и стеклопластиков в зависимости от глубины эрозии

Относительная глубина эрозии (глубина эрозии/толщина образца)	Потеря выносливости $N_{неэ}/N_0$	
	стеклопластик	органопластик
0,14	10	4
0,24	22	7
0,20	40	10
0,30	–	14
0,38	–	20



Структура поверхности органопластика ВКО-19Л в исходном состоянии (а) и после старения (б)

лением наблюдается пластическое деформирование волокна СВМ в поперечном направлении. При испытаниях стеклопластика наблюдали более интенсивное разрушение стекловолокна по сравнению с арамидным и меньшую эрозионную стойкость стеклопластиков.

Влияние условий эрозионного воздействия (скорости, размеров частиц, угла соударения, продолжительности эрозионного воздействия) на эрозионную стойкость органопластиков исследовали на установке аэродинамического типа. В качестве абразива использовали шлиф-порошки М10 и 10Н с размером частиц в основной фракции 44 и 108 мкм соответственно. Удельный расход частиц составлял 4,4 и 7,8 кг/(м²·с) при скоростях воздушного потока 100 и 200 м/с, при этом скорость частиц в потоке соответственно была равна 97 и 160 м/с. Эрозионные испытания проводили при углах соударения частиц с материалом 15, 45, 60 и 90 град. Испытаниям подвергали органопластик Органит 7Т и стеклопластик ВФТ-С.

Интенсивность линейной эрозии рассчитывали по формуле:

$$I = \frac{l_3}{t \cdot Q}, \quad (2)$$

где l_3 – глубина эрозии, мкм; t – продолжительность эрозионного воздействия, с; Q – удельный расход твердых частиц, кг/(м²·с).

Установлено, что влияние на эрозионную стойкость полимерных композиционных материалов оказывают скорость и размер частиц. С увеличением скорости частиц с 97 до 160 м/с интенсивность линейной эрозии возрастает в степенной зависимости (при углах соударения, близких к 90 град) и аппроксимируется уравнением степенного вида:

- для органопластика Органит 7Т: $I = 1 \cdot 10^{-4} \cdot v^2$;
- для стеклопластика ВФТ-С: $I = 3 \cdot 10^{-4} \cdot v^2$.

С уменьшением угла соударения влияние скорости на эрозионную стойкость органо- и стеклопластика уменьшается. С уменьшением размера

частиц от 108 до 44 мкм интенсивность линейной эрозии органопластика снижается в 2–3 раза при углах соударения от 45 до 90 град. Если углы соударения невелики, размер частиц значительно меньше влияет на эрозионную стойкость материала. С увеличением угла соударения интенсивность эрозии органопластика и стеклопластика увеличивается, и максимальное разрушение наблюдается при углах, близких к 90 град.

Очаги эрозионного разрушения представляют потенциальную опасность для несущей способности и ресурса конструкций. С целью исследования чувствительности органопластиков к эрозионному воздействию определяли их механические свойства до и после эрозионного воздействия. Установлено, что с увеличением глубины эрозии происходит уменьшение разрушающей нагрузки и выносливости органопластика (табл. 4). При этом выносливость снижается значительно интенсивнее, чем разрывная нагрузка. Однако при одинаковой относительной глубине эрозии потеря выносливости органопластика Органит 7Т значительно меньше, чем стеклопластика ВФТ-С (табл. 5).

Таким образом, конструкционные органопластики на основе арамидных волокон имеют высокую стойкость к пылевой эрозии. По сравнению со стеклопластиком органопластики имеют в 3 раза меньшую глубину эрозии при одинаковой скорости эродирующего потока (100 м/с), на 30% более высокую несущую способность в поврежденном состоянии и в 10 раз более высокую выносливость при одинаковой степени эрозионного поражения.

Стойкость конструкционных органопластиков к эрозионному воздействию твердыми частицами и их способность сохранять высокую прочность и ресурс после значительных эрозионных повреждений позволяет рассматривать эти материалы как перспективные для изготовления деталей, работающих в условиях повышенной запыленности и, в частности, для изготовления элементов пылезащитного устройства вертолетного двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Гуняев Г.М., Кривонос В.В., Румянцев А.Ф., Железина Г.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов //Конверсия в машиностроении. 2004. №4 (65). С. 65–69.
3. Гуняев Г.М., Железина Г.Ф., Кривонос В.В., Румянцев А.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. Полимерные композиционные материалы. 2002. С. 12–20.
4. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Плетинь И.И., Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А. Разработка и производство конструктивных органопластиков для авиационной техники //Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. №4–2. С. 411–416.
5. Гуняев Г.М., Железина Г.Ф., Зеленина И.В., Кривонос В.В., Кувшинов Н.П., Орлова Л.Г., Сидорова В.В. Авиационные органопластики на основе арамидного волокна Русар /Труды 4-й Международной конф. Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ). Корпоративные нано- и CALS-технологии в наукоемких отраслях промышленности. М. 2005. С. 739–743.
6. Препрег герметичного органопластика и изделие, выполненное из него: пат. 2395535 Рос. Федерация; опубл. 31.03.2009.
7. Препрег антифрикционного органопластика и изделие, выполненное из него: пат. 2404202 Рос. Федерация; опубл. 31.03.2009.
8. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Полимерные композиционные материалы, полученные путем пропитки пленочным связующим //Все материалы. Энциклопедический справочник. Композиционные материалы. 2011. №11. С. 2–6.
9. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Технология изготовления ПКМ способом пропитки пленочным связующим //Клеи. Герметики. Технологии. 2011. №6. С. 25–29.
10. 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.
11. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструктивных волокнистых ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.
12. Способ получения конструкционного композиционного материала: пат. 2405675 Рос. Федерация; опубл. 15.07.2009.
13. 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.
14. Ефимов В.А., Кирилов В.Н., Добрянская О.А., Николаев Е.В., Шведкова А.К. Методические вопросы проведения натурных климатических испытаний полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 25–31.
15. Старцева Л.Т., Меркулова В.М., Машинская Г.П., Старцев О.В. Закономерности влияния теплого влажного климата на свойства органопластиков /В сб. Авиационные материалы. Вып. «Климатическое старение композиционных материалов». М.: ОНТИ-ВИАМ. 1990. С. 14–22.
16. Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F., Senatorova O.G. Laminated Fibrous Metal – Polymer Composites Soviet Advanced Composites Technology Series //Chapman & Hall. 1995. P. 487–570.
17. Деев И.С., Куршев Е.В., Лонский С.Л., Чурсова Л.В. Влияние длительных климатических испытаний на микроструктуру и характер разрушения полимерных композиционных материалов при силовых воздействиях /Тезисы докладов IX научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2012». М. 2012. С. 64–65.
18. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Орлова Л.Г., Войнов С.И. Баллистически стойкие арамидные слоисто-тканые композиты для авиационных конструкций //Все материалы. Энциклопедический справочник. Композиционные материалы. 2012. №12. С. 23–26.
19. Железина Г.Ф. Особенности разрушения органопластиков при ударных воздействиях //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 272–277.
20. Деев И.С., Кобец Л.П. Исследование микроструктуры и особенностей разрушения эпоксидных полимеров и композиционных материалов на их основе //Материаловедение. 2010. №5. С. 8–16; №6. С. 13–18.