



УДК 678.8:620.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ
ФАКТОРОВ И НАГРУЗОК В ЛАБОРАТОРНЫХ И
НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ**

В.А. Ефимов

кандидат технических наук

А.К. Шведкова

Т.Г. Коренькова

В.Н. Кириллов

кандидат технических наук

Январь 2013

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,
№1, 2013 г.

В.А. Ефимов, А.К. Шведкова, Т.Г. Коренькова, В.Н. Кириллов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И НАГРУЗОК В ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

На примере углепластика и стеклопластика на основе эпоксидного связующего ВСЭ-20 проведено исследование влияния климатических факторов в процессе лабораторных тепловлажностных и натуральных климатических испытаний при статическом нагружении и в свободном состоянии на изменение остаточной прочности материала при изгибе, влагосодержания и структурных превращений в материале (области и температуры стеклования).

Ключевые слова: *углепластик, тепловлажностные испытания, натурные климатические испытания, прочность при статическом нагружении, влагосодержание, область и температура стеклования.*

V.A. Efimov, A.K. Shvedkova, T.G. Koren'kova, V.N. Kirillov

INVESTIGATION OF POLYMER STRUCTURAL MATERIALS UNDER INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS AND LOADS IN LABORATORY AND FIELD CONDITIONS

Investigation of influence of climatic factors during laboratory heat and humidity-dependent tests and field climatic tests under static loading and in free condition on change of bending residual strength of material, moisture content and structural transformations in material (range and brittle point) were carried out using carbonplastic and glassplastic on the base of epoxy resin VSE-20 as an example.

Key words: *carbonplastic, heat and humidity-dependent tests, field climatic tests, static loading strength, moisture content, range and brittle point.*

Обеспечение безопасной эксплуатации авиационной техники предъявляет высокие требования к надежности материалов, используемых в конструкциях, в которых с

целью повышения энерговооруженности, снижения массы изделий все шире применяются современные полимерные композиционные материалы (ПКМ).

На полимерные композиционные материалы существенное влияние оказывают атмосферные факторы (температура, влажность, солнечная радиация, циклическое изменение температуры и др.), которые, являясь активаторами старения ПКМ, способствуют развитию физико-химических процессов в материалах и за время эксплуатации изделий (25–30 лет) могут существенно снизить их прочностные свойства.

В частности, снижение деформационно-прочностных показателей материалов, в том числе вследствие пластификации влагой связующего, может достигать 30% и более, снижение температуры стеклования связующих: 25°C. Особенно остро проблема сохраняемости характеристик стоит при эксплуатации техники в районах с воздействием жестких климатических условий (тропический и морской климат).

Требования по надежности авиационной техники и обеспечению ресурса работоспособности конструкций отражены в Авиационных правилах (АП, Части 23, 25, параграфы 603, 613), согласно которым одним из важнейших критериев, по которым проводится выбор материалов, является их стойкость к воздействию климатических факторов.

Длительная работа материалов в конструкциях связана с накоплением в материалах необратимых повреждений [1]. Эти повреждения бывают как механического (воздействие механических нагрузок, накопление пластических деформаций, нарушение адгезии между наполнителем и полимерной матрицей, процессы растрескивания связующего и др.), так и физико-химического происхождения (адсорбция влаги, процессы доотверждения и деструкции полимерной матрицы и др.) [2].

Особый интерес представляет изучение закономерностей климатического старения материалов [3], особенно в напряженном состоянии. Опубликованные результаты работ в этом направлении имеют эпизодические и порой противоречивые данные.

Согласно работам [4, 5], воздействие эксплуатационных и климатических факторов снижает прочностные свойства ПКМ. Показано [6], что влияние растягивающей нагрузки на остаточную прочность стеклопластиков зависит от уровня нагрузки, условий экспонирования и от толщины нагруженных образцов. Экспериментально установлено [7], что в процессе климатического старения в теплом влажном климате происходит снижение прочности стеклотекстолита КАСТ-В в зависимости от уровня растягивающего напряжения и продолжительности экспонирования.

Синергизм, проявляющийся при воздействии влажной среды и механических нагрузок, обнаружен в работах [8, 9]. При моделировании совместного влияния климата и механических нагрузок было показано [10], что долговечность элементов конструкции из ПКМ при совместном воздействии климата и механических нагрузок существенно зависит от уровня нагружения. При уровнях нагрузки $>80\%$ от предельной, долговечность определяется только величиной нагрузки. Диапазон нагрузок от 60 до 80% является переходным, а при нагрузках $<60\%$ долговечность обусловлена замедляющимся во времени процессом накопления повреждений от воздействия агрессивных климатических факторов.

В работе [11] при испытании углепластика в среде воды при температурах от 25 до 80°C в свободном состоянии и при растягивающей нагрузке 0,25 от разрушающей σ_b установлено, что вследствие возрастания свободного объема в напряженном состоянии возрастают предельное влагонасыщение и коэффициент диффузии.

Циклические растягивающие нагрузки в процессе термовлажностного воздействия на углепластики приводят к увеличению максимального влагопоглощения W_{max} и уменьшению коэффициента диффузии [12].

Во всех этих работах не проводилось исследование влияния нагружения на изменение температуры и области стеклования материалов – крайне важных характеристик, определяющих изменения структуры полимерной матрицы и области работоспособности материала. Известно, что если в процессе эксплуатации температура материала узла изделия попадает в температурную область стеклования, то величина прочности может существенно снижаться [13].

***Исследование совместного влияния климатических факторов и нагрузок
на температуру стеклования и механические свойства ПКМ
в лабораторных и натуральных условиях***

Объектами исследований служили ПКМ на основе эпоксидного связующего марки ВСЭ-20 с повышенной деформативностью и прочностью, армированного углеродной лентой ЭЛУР-П (углепластик) и стеклотканью Т-10-80 (стеклопластик), предназначенные для изготовления деталей авиационного назначения, эксплуатирующихся при температурах до 120°C. Экспозиция образцов ПКМ осуществлялась в лабораторных условиях в климатической камере при повышенной температуре и относительной влажности в течение 60 сут, а также на атмосферном стенде в течение 1,5 лет в натуральных условиях промышленной зоны умеренного климата в г. Москве. Образцы пред-

ставляли собой плоские образцы размером $10 \times 80 \times 2$ мм для испытаний на изгиб, которые экспонировались одновременно в свободном (ненагруженном) состоянии и под нагрузкой в приспособлении, реализующем нагрузку от трехточечного статического изгиба с уровнем нагружения, равным 50% от разрушающей нагрузки, а также стандартные образцы для определения прочности при сдвиге в свободном состоянии.

Предварительно были исследованы теплофизические свойства отвержденного связующего ВСЭ-20, температура стеклования (T_c) которого составила 169°C , область стеклования - в интервале $163-185^\circ\text{C}$ (по данным термического механического анализа - ТМА). Температура стеклования определялась по положению максимума на кривой температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) при нагревании образца в интервале температур $20-300^\circ\text{C}$ со скоростью нагрева $5^\circ\text{C}/\text{мин}$. Исследования методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГА) показали термическую устойчивость отвержденного связующего до температуры 308°C , потеря массы при которой составила 2,24%, интенсивная деструкция связующего начинается с температуры 368°C .

Проведены исследования механических и теплофизических свойств исследуемых ПКМ в исходном состоянии. Установлено, что у угле- и стеклопластика на связующем ВСЭ-20 прочность при статическом изгибе при комнатной (20°C) и рабочей температурах (120°C) практически не изменяется - сохранение свойств на уровне 95-98%; прочность при межслоевом сдвиге при 120°C у углепластика снижается на 23%, у стеклопластика - на 32% (по сравнению с прочностью при 20°C). У стеклопластика наблюдается более высокий разброс механических свойств. Методом ТМА показано, что для углепластика и стеклопластика $T_c=160^\circ\text{C}$, при этом область стеклования у углепластика составляет $137-178^\circ\text{C}$ (ширина интервала 41°C), у стеклопластика $128-178^\circ\text{C}$ (ширина интервала 50°C). При нагревании у обоих материалов наблюдается усадка в области температуры стеклования. Полученные результаты могут свидетельствовать о различном характере отверждения связующего на поверхности углеродного и стеклянного наполнителей и различиях в структуре отвержденного связующего в межфазном слое.

Лабораторные тепловлажностные испытания ПКМ*

Для исследования стабильности свойств как отвержденного связующего ВСЭ-20, так и угле- и стеклопластика на его основе, проведены лабораторные испытания при воздействии повышенной температуры, влажности и механической нагрузки (статиче-

ского изгиба). Объектами испытаний служили: для отвержденного связующего - отливка размером 5×5×40 мм, для ПКМ - стандартные образцы для испытаний на изгиб и межслоевой сдвиг.

Лабораторные испытания проводили в автоматической климатической камере при температуре (60±0,5)°С и относительной влажности (85±1)%. Отливки связующего ВСЭ-20 экспонировались в свободном состоянии, образцы ПКМ - в свободном состоянии и при изгибающей нагрузке. Нагружение образцов ПКМ осуществляли в специальных приспособлениях, реализующих трехточечный статический изгиб с заданным уровнем деформации, эквивалентным 50% разрушающей нагрузки при изгибе. Расчет деформаций проводился по величине модуля упругости при изгибе, измеренного в области упругой деформации.

Продолжительность лабораторных тепловлажностных испытаний устанавливалась в зависимости от времени достижения равновесного влагопоглощения образцами связующего и исследуемых ПКМ в свободном состоянии. Полученные результаты испытаний приведены в табл. 1-4.

Таблица 1

Изменение прочностных свойств* ПКМ после тепловлажностных испытаний образцов в свободном состоянии

Материал	Предельное влагопоглощение <i>W</i> , %	Прочность при изгибе		Прочность при сдвиге	
		МПа			
		в исходном состоянии	после увлажнения	в исходном состоянии	после увлажнения
Углепластик	$\frac{0,74}{0,74-0,76}$	$\frac{920}{884-953}$	$\frac{911(99\%)}{819-916}$	$\frac{64}{57-68}$	$\frac{61(95\%)}{60-68}$
Стеклопластик	$\frac{0,66}{0,61-0,68}$	$\frac{640}{520-756}$	$\frac{619(97\%)}{594-641}$	$\frac{44}{41-48}$	$\frac{41(93\%)}{40-43}$

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

Изменение температуры стеклования отвержденного связующего ВСЭ-20 и исследуемых ПКМ после тепловлажностных испытаний* образцов в свободном состоянии

Материал	Предельное влагопоглощение W , %	Температура стеклования T_c , °C**	
		в исходном состоянии	после увлажнения
Связующее ВСЭ-20	$\frac{2,01}{1,98-2,05}$	$\frac{169}{162-185(23)}$	$\frac{132}{113-152(39)}$
Углепластик	$\frac{0,74}{0,74-0,76}$	$\frac{160}{137-178(41)}$	$\frac{159}{128-172(44)}$
Стеклопластик	$\frac{0,66}{0,61-0,68}$	$\frac{160}{128-178(50)}$	$\frac{155}{123-165(42)}$

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

** В знаменателе указан интервал области стеклования, в скобках - ширина интервала, °C.

Установлено, что в условиях испытаний влагопоглощение стеклопластика на основе связующего ВСЭ-20 на 10% ниже, чем у углепластика, что связано с большим содержанием связующего в углепластике. После увлажнения образцов углепластика в свободном состоянии их прочность при статическом изгибе при комнатной (20°C) и рабочей температурах (120°C) практически не изменялась (сохранение свойств на уровне 95%), у стеклопластика прочность при изгибе при 120°C снизилась на 35%. У обоих материалов прочность при сдвиге при 20°C не изменилась, а при 120°C - снизилась на 35%.

Температура стеклования пластиков после увлажнения практически не изменяется (составляет 155-159°C) по сравнению с исходным значением (160°C). При этом ненаполненная отвержденная матрица ВСЭ-20 чувствительна к воздействию влаги, при равновесном влагопоглощении 2,01% ее температура стеклования снижается со 169 до 132°C и расширяется интервал области стеклования с 23 до 39°C. Полученные результаты исследований показали, что для увлажненных ПКМ на связующем ВСЭ-20 снижение прочности при сдвиге при повышенной температуре (120°C) может быть связано с повышением структурной неоднородности матрицы и дефектности пограничного слоя связующее/наполнитель.

В табл. 3 и 4 показано совместное воздействие климатических факторов и статического механического (изгибающего) нагружения на прочность и структуру исследуемых ПКМ на основе связующего ВСЭ-20.

* Испытания выполнялись при участии Д.В. Абрамова.

Таблица 3

Влияние нагрузки на влагопоглощение и прочность при изгибе стекло- и углепластика на связующем ВСЭ-20 после лабораторных тепловлажностных испытаний*

Материал	Предельное влагопоглощение W , %		Прочность при изгибе, МПа		
	в свободном состоянии	под нагрузкой	в исходном состоянии	после увлажнения	
				в свободном состоянии	под нагрузкой
Углепластик ВСЭ-20+ЭЛУР-П	$\frac{0,74}{0,74-0,76}$	$\frac{0,68}{0,63-0,69}$	$\frac{920}{884-953}$	$\frac{911(99\%)}{852-994}$	$\frac{914(99\%)}{904-930}$
Стеклопластик ВСЭ-20+Т-10-80	$\frac{0,66}{0,61-0,68}$	$\frac{0,57}{0,51-0,58}$	$\frac{640}{520-756}$	$\frac{619(97\%)}{594-641}$	$\frac{626(98\%)}{582-654}$

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

Таблица 4

Влияние нагрузки на влагопоглощение и температуру стеклования стекло- и углепластика на связующем ВСЭ-20 после лабораторных тепловлажностных испытаний*

Материал	Предельное влагопоглощение W , %		Температура стеклования T_c , °С**		
	в свободном состоянии	под нагрузкой	в исходном состоянии	после увлажнения	
				в свободном состоянии	под нагрузкой
Углепластик ВСЭ-20+ЭЛУР-П	$\frac{0,74}{0,74-0,76}$	$\frac{0,68}{0,63-0,69}$	$\frac{160}{137-178}$	$\frac{160}{128-172(44)}$	$\frac{160}{140-180(40)}$
Стеклопластик ВСЭ-20+Т-10-80	$\frac{0,66}{0,61-0,68}$	$\frac{0,57}{0,51-0,58}$	$\frac{160}{128-178}$	$\frac{155}{123-165(42)}$	$\frac{162}{140-177(37)}$

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

** В знаменателе указан интервал области стеклования, в скобках - ширина интервала, °С.

Как видно из данных табл. 3 и 4, приложение изгибающей нагрузки снижает влагопоглощение угле- и стеклопластика на величину ~10% (по сравнению с ненагруженными образцами) и не оказывает влияния на прочность при изгибе и температуру стеклования исследуемых ПКМ.

Натурные климатические испытания ПКМ

Исследования совместного влияния климатических факторов и нагрузок в натурных условиях промышленной зоны умеренного климата (г. Москва, атмосферный стенд) проводили при экспозиции образцов в свободном и нагруженном состоянии в течение 6 мес, 1 и 1,5 лет.

Через 6 мес экспозиции (весна-лето) наблюдались трещины и разрушение нагруженных образцов стеклопластика, температура стеклования при этом повысилась на 12°C и интервал области стеклования расширился на 12°C. Общий вид образцов стеклопластика представлен на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Трещинообразование и выветривание связующего на лицевой стороне образца стеклопластика на связующем ВСЭ-20

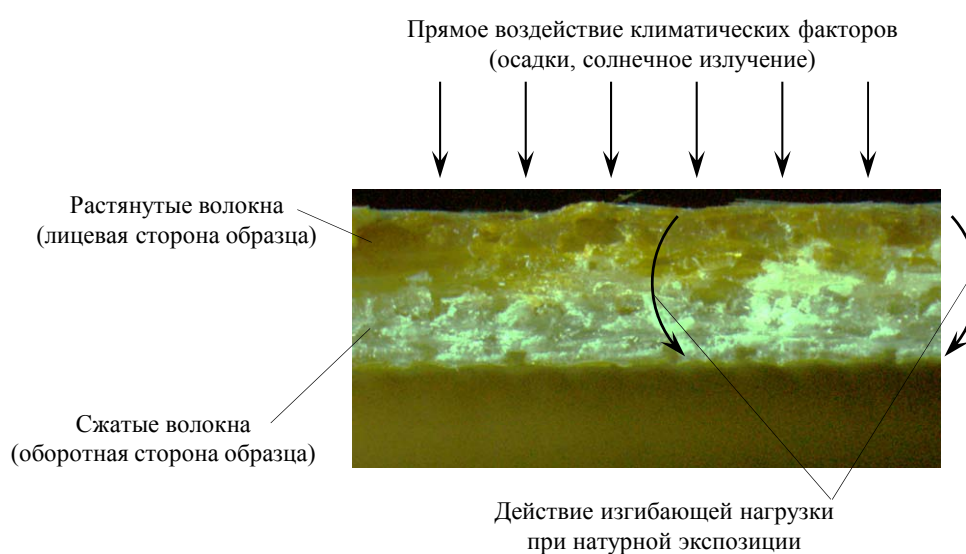


Рис. 2. Совместное воздействие факторов климата и нагрузки при экспозиции (показано поперечное сечение сломанного образца стеклопластика на связующем ВСЭ-20)

Повышение температуры стеклования стеклопластика с 160 до 172°C приводит к необратимому увеличению жесткости связующего и потере его деформационных свойств, что вызывает возникновение микротрещин и разрушение образцов стеклопластика под нагрузкой. По-видимому, в данном случае нагрузка в 50% от разрушающей является слишком большой.

Через 1 год экспозиции у углепластика произошло увеличение прочности при изгибе соответственно на 18% - для образцов в свободном состоянии и на 15% - под нагрузкой, увеличилась также прочность при межслоевом сдвиге; однако температура стеклования не изменилась по сравнению с исходной (160°C). Одной из причин этого эффекта может являться релаксация внутренних напряжений. Экспозиция образцов сопровождалась уносом массы и эрозией поверхности стекло- и углепластика.

После экспозиции исследуемых ПКМ в течение 1,5 лет установлено, что:

- для углепластика прочность при изгибе для образцов в *свободном* состоянии составила 116-120% (при 20 и 120°C) и *под нагрузкой* 108% (при 20°C) по сравнению с исходным значением. Прочность при сдвиге также выше исходной на 9-12% (при 20 и 120°C);

- для образцов стеклопластика в *свободном* состоянии прочность при изгибе составила 112-118% при комнатной и рабочей температурах (20 и 120°C), прочность при сдвиге повысилась на 14-17% (при 20 и 120°C).

Температура стеклования углепластика в свободном и нагруженном состоянии практически не изменилась по сравнению с исходным значением, температура начала и конца области стеклования составила 144-171°C, для образцов стеклопластика в свободном состоянии температура стеклования понизилась на 10°C, температура начала и конца области стеклования составила 142-162°C.

Обобщенные результаты изменения прочностных характеристик исследуемых ПКМ после лабораторных и натурных испытаний приведены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Изменение прочности при изгибе образцов исследуемых ПКМ после лабораторных и натуральных испытаний (в свободном состоянии)*

Материал	Прочность при изгибе, МПа				
	в исходном состоянии	после экспозиции (свободное состояние)			
		в лабораторных условиях при 60°C, φ=85% в течение 60 сут	на атмосферном стенде (г. Москва)		
			6 мес (весна-лето)	1 год (весна-зима)	1,5 года (весна-лето)
Углепластик ВСЭ-20+ЭЛУР-П	$\frac{920}{884-953}$	$\frac{911(99\%)}{819-916}$	$\frac{1116(118\%)}{1060-1120}$	$\frac{1100(120\%)}{1050-1120}$	$\frac{1090(119\%)}{927-1270}$
Стеклотекстолит ВСЭ-20+Т-10-80	$\frac{640}{520-756}$	$\frac{619(97\%)}{594-641}$	$\frac{715(108\%)}{703-729}$	$\frac{760(118\%)}{720-770}$	$\frac{739(116\%)}{706-781}$

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

Таблица 6

Совместное воздействие факторов климата и нагрузки на изменение прочности при изгибе образцов исследуемых ПКМ после лабораторных и натуральных испытаний (под нагрузкой)*

Материал	Прочность при изгибе, МПа				
	в исходном состоянии	после экспозиции (под нагрузкой)			
		в лабораторных условиях при 60°C, φ=85% в течение 60 сут	на атмосферном стенде (г. Москва)		
			6 мес (весна-лето)	1 год (весна-зима)	1,5 года (весна-лето)
Углепластик ВСЭ-20+ЭЛУР-П	$\frac{920}{884-953}$	$\frac{914(99\%)}{904-930}$	$\frac{1060(115\%)}{872-1120}$	$\frac{1100(120\%)}{905-1160}$	$\frac{990(106\%)}{955-1030}$
Стеклотекстолит ВСЭ-20+Т-10-80	$\frac{640}{520-756}$	$\frac{626(98\%)}{582-654}$	Разрушение образцов	□	□

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

Анализ и сопоставление результатов лабораторных тепловлажностных и натуральных испытаний позволяет сделать вывод о том, что в указанных условиях испытаний процессы, протекающие в исследуемых ПКМ, различны. Совместное воздействие повышенной температуры, влажности и нагрузки в лабораторных условиях не вызвало трещинообразования образцов, в то время как после экспозиции в натуральных условиях (на атмосферном стенде) наблюдались поверхностная эрозия и разрушение образцов стеклопластика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение. 1984. 312 с.
2. Вапиров Ю.М., Кириллов В.Н., Кривонос В.В. Закономерности изменения свойств полимерных композитов конструкционного назначения при длительном климатическом старении в свободном и нагруженном состояниях /В сб. докладов VI научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2006». Ч. II. М. 2006. С. 103-108.
3. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения /В сб.: Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 412-423.
4. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Матвеевкова Т.Е., Коренькова Т.Г. Влияние последовательного воздействия климатических и эксплуатационных факторов на свойства полимерных композиционных материалов /В сб. докладов 5-й научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2004». М. 2004. С. 155-158.
5. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 41-45.
6. Панферов К.В., Романенков И.Г., Абашидзе Г.С., Никитин В.Н., Львов Б.С., Шпаловская Б.И. Атмосферостойкость стеклопластиков, находящихся под нагрузкой //Пластические массы. 1968. №6. С. 32-33.
7. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения //Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34-40.
8. Helbling C., Karbhari V.M., Durability Assesment of Combined Enviromental Eposur and Bending /In.: Proc. of 7-th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polym. Reinf. Concrete Structures (FRPRCS-7). New Orlean, Loisiaana, USA. 2005. P. 1379-1418.
9. Roylance D., Roylance M. Weathering of Fiber-Reinforced Epoxy Composites //Polym. Eng. And Sci. 1978. V. 18. №4. P. 249-254.

10. Булманис В.Н., Ярцев В.А., Кривонос В.В. Работоспособность конструкций из полимерных композитов при воздействии статических нагрузок и климатических факторов //Механика композиционных материалов. 1987. №5. С. 915-920.
11. Kim R.H., Broutman L.J. Effect of Moisture and Stress on the Degradation of Graphite Fiber Reinforced Epoxies /In.: Deform. Yield and Fract. Polym., 4-th Int. Conf., Cambridge. London. 1979. P. 231-235.
12. Edward R., Long Jr. Moisture Diffusion Parameter Characteristics for Epoxy Composites and Neat Resins /In.: NASA Technical Paper 1474. 1979. 31 p.
13. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Вапиров Ю.М. Особенности влияния внешних факторов на свойства ПКМ при ускоренных и натуральных климатических испытаниях /В сб. докладов 7-й научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2008». Сентябрь 5-6, 2008 г. Ч. 1. М. 2008. С. 237-335.