

УДК 620.1:678

А.В. Гладких¹, И.С. Курс¹, М.Г. Курс¹

**АНАЛИЗ ДАННЫХ НАТУРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ,
СОВМЕЩЕННЫХ С ПРИЛОЖЕНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ФАКТОРОВ, НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-74-82

Старение полимерных композиционных материалов является многофакторным процессом, поэтому необходимо не только изучать влияние отдельных агрессивных факторов, но и учитывать их синергетическое воздействие на изменение служебных характеристик материала. К числу наиболее важных факторов воздействия относятся: влагонасыщение, повышенные температуры, термоциклирование и механические нагрузки. В работе рассматривается совместное влияние механических нагрузок и климатических факторов на изменение свойств полимерных композиционных материалов авиационного назначения.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, эксплуатационные факторы, натурное климатическое воздействие, лабораторные испытания, нагрузки.

A.V. Gladkikh¹, I.S. Kurs¹, M.G. Kurs¹

**ANALYSIS OF THE DATA OF FULL-SCALE CLIMATIC TESTS
COMBINED WITH THE APPLICATION OF OPERATIONAL FACTORS
OF NONMETALLIC MATERIALS (review)**

Aging of polymer composite materials is a multifactorial process, therefore it is necessary to study not only the influence of individual aggressive factors, but also to take into account their synergistic effect on changes in the performance characteristics of the material. The most important impact factors include: moisture saturation, elevated temperatures, thermal cycling, and mechanical loads. The paper discusses the combined effect of mechanical loads and climatic factors on changes in the properties of polymer composite materials for aviation purposes.

Keywords: polymer composite materials, operational factors, natural climatic influence, laboratory tests, loads.

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

Введение

В настоящее время увеличивается доля применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях изделий авиационной техники, так как их использование позволяет снизить массу и повысить ресурс воздушного судна (ВС). При жестких условиях эксплуатации ВС предъявляются высокие требования к надежности ПКМ авиационного назначения. Основным интерес представляют материалы, уровень прочностных свойств которых за период эксплуатации снижается не более чем на 10–20%. К таким ПКМ относятся углепластики, стеклопластики и органопластики [1–4].

В условиях реальной эксплуатации на материалы одновременно воздействуют как механические нагрузки (циклические и статические), так и климатические факторы. В исследованиях [5–8] показано, что существенное влияние на срок эксплуатации ПКМ оказывает не механическое воздействие, а процессы коррозии и старения, вызванные воздействием факторов внешней среды (температуры, влажности, солнечной радиации).

Проведение климатических испытаний, оценка сохраняемости механических характеристик материалов для обеспечения безопасной эксплуатации ВС и, в частности, проверка эффективности защиты изделий от старения и коррозии относятся к приоритетным стратегическим направлениям развития материалов и технологий [9, 10].

Для каждого типа ВС цикличность воздействия факторов внешней среды и нагрузок индивидуальна – гражданские большую часть времени проводят в полете, военные – в условиях стоянки на земле. Прогнозирование срока службы материала происходит в несколько этапов. Для изделий и образцов материалов существуют два основных вида климатических испытаний:

– натурные испытания на открытых атмосферных площадках климатических станций, находящихся в различных климатических поясах, позволяющие оценить поведение материалов в условиях хранения на земле;

– лабораторные испытания для оценки стойкости материалов при воздействии искусственно созданных эксплуатационных факторов – высокие (до +200°C) и пониженные (до -60°C) температуры, термоудар, воздействие солевого тумана и проч., в том числе механических нагрузок [11].

Испытания проводятся на образцах материалов, затем на конструктивно-подобных элементах, на макете конструкций и последний этап испытаний заключается в наблюдении, обследовании и проверке состояния материалов в составе эксплуатирующегося ВС [12].

В данной статье приведены примеры проведения климатических испытаний ПКМ в условиях, приближенных к условиям эксплуатации, показывающие значительное влияние совместного воздействия климатических факторов и механических напряжений на образцы материалов по сравнению с климатическим воздействием без приложения нагрузок.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 18. «Климатические испытания для обеспечения безопасности и защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов, конструкций и сложных технических систем в природных средах» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Факторы, влияющие на изменение свойств полимерных композиционных материалов

Проведение испытаний в лабораторных условиях обеспечивает получение сведений, необходимых для оценки изменения свойств материалов при воздействии климатических факторов. Но как было показано в работах [5, 7, 13], результаты, получаемые при лабораторных испытаниях, слабо коррелируют с результатами, полученными при натурных климатических испытаниях, и носят оценочный характер. Важным фактором, влияющим на свойства ПКМ, является статическое нагружение. В исследованиях [5, 7, 13], проведенных на углепластике КМУ-11ТР на основе эпоксидного связующего ЭДТ-69Н и углеродной ткани УТ 900-2.5, показано влияние статического нагружения в натурных климатических и лабораторных условиях на изменение свойств углепластика.

Согласно ГОСТ 9.707 процессы старения, протекающие в материале, должны быть идентичны как при испытаниях в лабораториях, так и в натуральных условиях, поэтому температура испытаний материалов в условиях хранения (открытая площадка) выбирается следующим образом: максимальная температура воздуха по ГОСТ 15150 плюс перегрев материала, в том числе вследствие действия солнечной радиации. Влажность определяется из эффективных значений температурно-влажностного комплекса для предполагаемых условий эксплуатации.

Условия проведения исследования: лабораторные испытания при температуре 60°C, $\varphi=85\%$ и натурные климатические испытания в течение 0,5 года на открытой площадке в условиях промышленной атмосферы умеренного климата (климатическая станция ВИАМ, г. Москва) в свободном состоянии и при статическом нагружении, сопоставимом с 0,4 и 0,6 от разрушающей нагрузки ($\sigma_{разр}$) (табл. 1).

Таблица 1

**Результаты исследований свойств углепластика КМУ-11ТР
после испытаний в лабораторных и натуральных климатических условиях**

Вид испытания	Уровень нагрузки	Влагосодержание, %	Температура стеклования, °С	Интервал стеклования, °С	Относительная прочность, %
Натурные климатические	Без нагрузки	0,3	130	103–134 (31)	96
	0,4 от $\sigma_{разр}$	0,3	123	102–128 (26)	99
	0,6 от $\sigma_{разр}$	0,3	110	102–132 (30)	100
Лабораторные ускоренные	Без нагрузки	0,51	101	88–134 (46)	94
	0,4 от $\sigma_{разр}$	0,55	97	89–105 (16)	86
	0,6 от $\sigma_{разр}$	0,58	93	81–103 (22)	66

Обоснованный выбор условий проведения испытаний в лабораториях является важной задачей при квалификационных испытаниях. Результаты многих исследований (как отечественных, так и зарубежных) показывают отсутствие корреляции результатов натуральных и лабораторных испытаний по оценке климатической стойкости материалов. Как видно из данных табл. 1, статические нагрузки оказывают существенное влияние на изменение свойств ПКМ. Отмечается также различие результатов испытаний в лабораторных и натуральных условиях.

Солнечная радиация оказывает существенное влияние на разрушение полимеров, но максимальный вред наносят лучи ультрафиолетовой (УФ) части спектра. Объяснение этому факту состоит в том, что УФ-лучи, приводящие к фотодеструкции поверхности материала, имеют достаточную энергию для разрушения межатомных связей в молекуле полимера, что приводит к повышению хрупкости изделий, их выгоранию и снижению механических свойств. Это обусловлено большими погрешностями при измерении механических характеристик, так как при этом толщина деградированного слоя учитывается при проведении испытаний на прочность.

В процессе деградации поверхностных слоев материала образуются дефекты и места-концентраторы напряжений. В работе [14] описана роль дефектов в формировании комплекса прочностных свойств материалов, а также описано понятие масштабного фактора – зависимости прочностных характеристик от размеров и формы образца. Чем толще образец, тем больше его поверхность и больше количество опасных дефектов, сосредоточенных на поверхности, и тем меньше относительная прочность образца. В тонком образце меньше поверхность и количество дефектов, поэтому прочность будет больше. Но каждый дефект на поверхности в тонком образце особенно опасен, в связи с этим у тонких образцов разброс показателей прочности увеличивается.

Кроме того, по мере диффузии влаги в полимерную матрицу образуется градиент ее концентрации по толщине материала и на границе раздела полимер-наполнитель, из-за чего возникают дополнительные внутренние напряжения в объеме композита и на границе раздела, что может приводить к деформации изделия из ПКМ [15]. В работе [15] также показано, что уровень напряжений в материале существенно влияет на кинетику диффузии влаги. При этом имеется граница некоторой зоны, в которой можно считать справедливым закон Фика. За пределами указанной зоны наблюдается резкое отклонение кинетической кривой от положения, предсказываемого на основании закона Фика. В связи с этим ставится под сомнение правильность стандартных методик оценки работоспособности ПКМ, находящихся в непосредственном контакте с влажной средой, на образцах в свободном, ненагруженном состоянии с последующим обобщением результатов исследований поведения материала в нагруженном состоянии. Подтверждение этому нашлось при испытаниях тормозных щитков изделия Ан-72, проведенных в условиях теплого влажного климата (г. Батуми) [16]. По результатам пятилетних натуральных климатических испытаний, включающих усталостно-климатическое воздействие с приложением повторно-статических нагрузок эксплуатационного уровня, было выявлено более существенное снижение прочности материалов конструкции по сравнению с материалами, прошедшими натурную экспозицию в ненагруженном состоянии.

Климатические испытания полимерных композиционных материалов с приложением механических напряжений

В настоящее время испытаниям ПКМ на стойкость к совместному воздействию механических нагрузок и климатических факторов уделяется недостаточно внимания ввиду отсутствия соответствующей нормативной документации. Практически не проводятся испытания и отсутствует информация о влиянии динамических механических (циклических) и других эксплуатационных нагрузок (тепловых, коррозионных и др.) на свойства ПКМ при старении в природных средах. В то же время, исходя из знаний о механизме деградации свойств эпоксикомпозитов при эксплуатации в климатических условиях, следует ожидать, что, например, циклические механические нагрузки по степени влияния являются более агрессивным фактором, нежели статические.

В течение 2004 г. также выполнялось исследование влияния совместного (последовательного) воздействия эксплуатационных климатических факторов с параметрами, характеризующими работу материала в конструкции, на изменение основных служебных характеристик, определяющих работоспособность композиционного пластика конструкционного назначения [17]. При проведении эксплуатационно-климатических испытаний очередность воздействий сочетала температурные испытания по наработке теплового ресурса и механические испытания циклическим нагружением. Критерием работоспособности ПКМ являлось изменение уровня основных служебных свойств. Изучение влияния эксплуатационно-климатических факторов в данной последовательности проводилось на двух конструкционных материалах – углепластике и стеклопластике.

Основными служебными характеристиками, позволяющими оценить влияние эксплуатационно-климатических факторов на материал, были выбраны механические характеристики – пределы прочности при изгибе и сжатии, которые определяли при комнатной и рабочих температурах.

Возможности испытательного оборудования при проведении эксперимента позволили осуществить последовательное воздействие эксплуатационно-климатических факторов на исследуемые материалы в виде следующих блоков:

- *тепловой ресурс* – при температуре 80°C в течение 1300 ч;
- *климатическое воздействие*
 - термовлажностное старение при температуре 50°C и $\phi=80\pm 3\%$ – до равновесного влагосодержания;
 - циклическое изменение температуры при $-60\rightleftharpoons +80^\circ\text{C}$ в течение 2 ч (30 циклов);
- *усталостное нагружение* при $\sigma_b=0,4\sigma_{\text{разр}}$ в течение 10^4 циклов с частотой $\sim(5-8)$ Гц;
- *УФ-облучение*.

Анализ результатов испытаний исследованных материалов показал, что из всех эксплуатационно-климатических воздействий наибольшее снижение прочностных свойств материалов происходит после термовлажностного старения.

В Батумском филиале ВИАМ в 1977–1991 гг. также проходили испытания ПКМ на стендах, размещенных в открытых климатических условиях, – создавались статические растягивающие или изгибающие нагрузки с уровнями нагружения 0,2–0,7 от разрушающих. В работе [18] приведены данные о том, что экспозиция образцов углепластика в натуральных климатических условиях в нагруженном состоянии в течение 3 лет привела к снижению прочности при изгибе – до 30%, по сравнению с экспозицией в тех же условиях, но без нагрузки.

Долговечность элементов конструкций из ПКМ при совместном воздействии климатических факторов и механических нагрузок зависит от уровня нагружения [19, 20]. Так, при нагрузке, составляющей $>80\%$ от предельной, долговечность определяется только величиной нагрузки, диапазон нагрузок 60–80% является переходным, а при нагрузках $<60\%$ от предельной долговечность зависит от замедляющегося во времени процесса накопления дефектов и воздействия агрессивных климатических факторов. Данные, приведенные в статьях [19, 20], показывают существенное влияние уровня растягивающего напряжения и продолжительности экспонирования в теплом влажном климате на изменение прочностных характеристик стеклотекстолита КАСТ-В.

При определении изменения состояния материалов в процессе длительной эксплуатации основное внимание уделяется контролю их механических свойств [18, 21]. При испытаниях на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг механические характеристики ПКМ определяют со значительными погрешностями. На величину измеряемого показателя заметное влияние оказывают форма и размеры образцов, степень анизотропии материала, локализация места разрушения образца, способ закрепления, качество захватов и т. д.

В тех случаях, когда требуется существенно увеличить точность и достоверность измеренного механического показателя ПКМ, целесообразно использовать метод продольного изгиба, предложенный в работе [22]. Этот метод был разработан для массовых испытаний стеклопластиковых стержней круглого сечения и подтвердил свои преимущества по сравнению с измерением прочности и деформативности плоских образцов углепластиков [23]. Достоинством метода является то, что места крепления в захватах не подвергаются перенапряжению, а разрушение всегда происходит в рабочей зоне образца. Проведенные экспериментальные исследования доказали [18, 21], что длительная прочность и долговечность при постоянных или циклических нагрузках более чувствительны к старению ПКМ, чем обычные стандартные показатели временной прочности при растяжении, сжатии и изгибе. Информативность испытаний возрастет,

если в климатических условиях нагружать не только образцы композитов, но и типовые конструктивные элементы из ПКМ [21, 24]. Важно выбрать такие параметры нагружения, чтобы циклические нагрузки локализовались в местах клеевых, клееклепаных и других соединений конструктивных элементов, изготовленных из ПКМ. Это требование легко достигается с помощью метода продольного изгиба [22].

Результаты испытаний по определению прочности и модулей упругости современных стеклопластиков и углепластиков на основе клеевых препрегов, вычисленных стандартными методами и методом продольного изгиба приводятся в табл. 2. Показатели прочности при продольном изгибе имеют наиболее высокие значения при незначительных разбросах определяемых величин. Сочетая выдержку ПКМ в натуральных климатических условиях с наложением статических или циклических нагрузок и термоциклов, характерных для условий полетов, с определением влагосодержания и механических показателей образцов, на которые оказывают влияние температура и влажность внешней окружающей среды, можно с большей точностью прогнозировать сроки эксплуатации этих материалов в элементах внешнего контура авиационной техники.

Таблица 2

Сравнение прочности и модуля упругости новых ПКМ на основе клеевых препрегов

Показатель	Значения свойств для	
	стеклопластика КМКС-4.175.Т10.37	углепластика КМКУ-3.150.Э0.1.45
Предел прочности при растяжении, МПа	548±114 573±571	774±197 –
Модуль упругости при растяжении, ГПа	27,7±4,2*	135±12
Предел прочности при сжатии, МПа	715±87	1080±197
Предел прочности при продольном изгибе, МПа	693±33 705±38*	1009±28 –
Модуль упругости при продольном изгибе, МПа	26,9±0,7 26,7±1,7*	133±2 –

* Стеклопластик КМКС-4.175.Т1С.8/3.

Для изучения поведения материалов в конструкции и установления связи между механическими потерями и прикладываемой изгибной нагрузкой в условиях умеренно теплого климата (г. Геленджик) проводили испытания конструктивно-подобных образцов сотовых конструкций из ПКМ при совместном воздействии климатических факторов и нагрузки по разработанной методике с определением модуля упругости.

Экспозицию образцов сотовых конструкций, состоящих из двух обшивок с промежуточным слоем из сотопласта, припрессованного к обшивкам, проводили в течение 12 мес на открытой площадке в натуральных условиях умеренно теплого климата Геленджикского центра климатических испытаний (ГЦКИ) в свободном и нагруженном состояниях (0,25; 0,5; 0,75 от $\sigma_{в.н}$) в специальных приспособлениях-струбцинах (см. рисунок). Размер образцов для механических испытаний обусловлен ОСТ1 90265–78 и составлял 400×75 мм. Каждая обшивка образца содержала два слоя клеевого препрега КМКС-4.175.Т10.55, один слой КМКС-2.120.Т10.55 на основе эпоксидного клея ВК-36Р и стеклянную конструкционную ткань Т-10-80. Материал сотового заполнителя – соты стеклянные ССП-1-35 Н-10. Заделку боковых граней осуществляли с помощью клеевого препрега КМКС-4.175.Т10.55 одновременно с изготовлением сотовой панели.

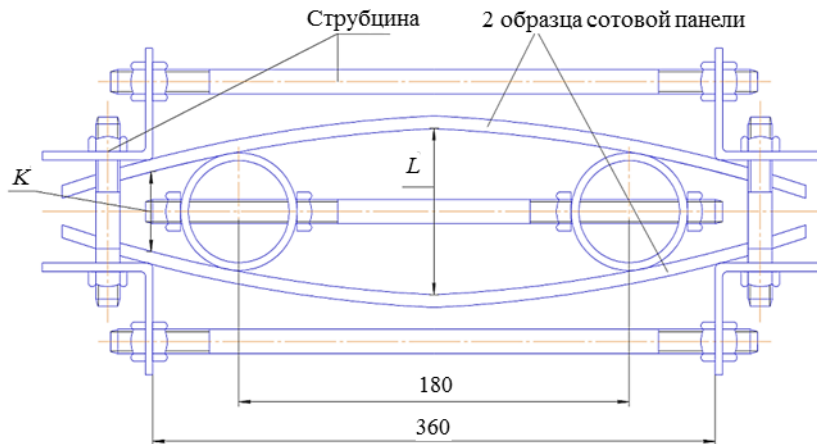


Схема нагружения панелей в приспособлениях-струбцинах (L – расстояние между центрами образцов (максимальный прогиб), мм; K – расстояние между образцами в месте приложения усилия, мм)

Проведены испытания по определению механических свойств при четырехточечном изгибе (предела прочности при изгибе $\sigma_{в.и}$ и модуля упругости E) образцов из сотовых конструкций (табл. 3).

Таблица 3

Результаты исследования механических свойств трехслойных сотовых панелей при четырехточечном изгибе после 12 мес экспозиции на открытой площадке ГЦКИ

Условия экспозиции	Предел прочности при продольном изгибе $\sigma_{в.и}$, МПа	Модуль упругости при продольном изгибе E , ГПа
В исходном состоянии	83,0	8,75
После экспозиции в свободном состоянии	75,0	9,09
После экспозиции под нагрузкой:		
$0,25\sigma_{в.и}$	72,4	8,9
$0,5\sigma_{в.и}$	69,8	8,36
$0,75\sigma_{в.и}$	Разрушились досрочно	

Результаты испытаний показывают, что нагрузка $0,75\sigma_{в.и}$ является критической для данного вида испытаний конструктивно-подобных образцов сотовых конструкций из ПКМ, а наибольшие потери механических свойств наблюдались на образцах при изгибе с нагрузкой $0,5\sigma_{в.и}$. Установлено, что при равновесном влагосодержании 0,41% от исходной массы образца прочность при изгибе снизилась на 9–15% (при 20°C), в зависимости от нагрузки, по сравнению с исходной (83 МПа). Модуль упругости практически не изменился для всех условий нагружения.

Заключения

1. Проведенный обзор научно-технической литературы показывает, что старение ПКМ является комплексным процессом, в связи с чем необходимы не только изучение влияния отдельных агрессивных факторов, но также учет их совместного ускоряющего воздействия на долговечность материалов. Наиболее важными факторами воздействия являются: УФ-воздействие, влагонасыщение, повышенные температуры, термоциклирование и механические нагрузки.

2. Длительная экспозиция ПКМ с различными уровнями нагружения в условиях статического изгиба приводит к ускорению процессов старения и разрушению

структуры композита, т. е. эффект старения при нагружении образцов больше, чем без приложения нагрузок.

3. На основании проведенных исследований можно выделить следующие приоритетные направления в области испытаний ПКМ в части оценки стойкости к воздействию внешних факторов:

– для достоверной оценки поведения ПКМ в предполагаемых условиях эксплуатации при проведении климатических испытаний необходим учет и воспроизведение характерных механических напряжений;

– при проведении испытаний нужен контроль изменения внутренних напряжений, необходимых для оценки деформационных характеристик материала;

– при проведении климатических испытаний, совмещенных с механическим нагружением, необходим контроль изменения свойств, происходящего в материале под воздействием климатических факторов и статических/динамических напряжений;

– необходима разработка и актуализация имеющейся нормативной документации по проведению климатических испытаний, совмещенных с механическими нагружениями, в том числе и испытаний крупногабаритных конструктивно-подобных образцов.

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. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // *Деформация и разрушение материалов*. 2010. №11. С. 19–27.
3. Каблов Е.Н. Всероссийскому институту авиационных материалов – 80 лет // *Деформация и разрушение материалов*. 2012. №6. С. 17–19.
4. 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.
5. Старцев О.В., Вапиров Ю.М., Деев И.С. и др. Влияние длительного атмосферного старения на свойства и структуру углепластика // *Механика композитных материалов*. 1986. №4. С. 637–642.
6. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
7. Вапиров Ю.М., Кривонос В.В., Старцев О.В. Интерпретация аномального изменения свойств углепластика КМУ-1у при старении в разных климатических зонах // *Механика композитных материалов*. 1994. №2. С. 266–273.
8. Startsev O.V., Krotov A.S., Golub P.D. Effect of Climatic and Radiation Ageing on Properties of Glass Fibre Reinforced Epoxy Laminates // *Polymers and Polymer Composites*. 1998. Vol. 6. No. 7. P. 481–488.
9. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине // *Деформация и разрушение материалов*. 2010. №12. С. 40–46.
10. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
11. *Морская коррозия: справочное издание*. Пер. с англ. / под ред. А.И. Степанова. М.: Металлургия, 1983. 512 с.

12. Авиационные материалы: справочник в 13 т. 7-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. Т. 13: Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов. М.: ВИАМ, 2015. 270 с.
13. Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натурных условиях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.06.2018).
14. Кулезнев В.Н., Ушакова О.Б. Структура и механические свойства полимеров: конспект курса лекций. М.: МИТХТ, 2006. Ч. 3. С. 28–31.
15. Степанов Р.Д., Шленский О.Ф. Расчет на прочность конструкций из пластмасс, работающих в жидких средах. М.: Машиностроение, 1981. 270 с.
16. Иванова И.В., Семенычева И.В., Старцев О.В. и др. Климатические испытания тормозных щитков изделия Ан-72 // Вопросы авиационной науки и техники // Климатическое старение полимерных композиционных материалов. М.: ВИАМ, 1990. С. 6–13.
17. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Матвеевкова Т.Е., Коренькова Т.Г. Влияние последовательного воздействия климатических и эксплуатационных факторов на свойства стеклопластиков // Авиационная промышленность. 2004. №1. С. 45–48.
18. Ткаченко В.Н., Гуняев Г.М. Климатическая стойкость углепластиков под нагрузкой // Авиационные материалы. Коррозия и старение материалов в морских субтропиках / под ред. Б.В. Перова, В.А. Засыпкина. М.: ВИАМ, 1983. С. 18–31.
19. Панферов К.В., Романенков И.Г., Абашидзе Г.С. и др. Атмосферостойкость стеклопластиков, находящихся под нагрузкой // Пластические массы. 1968. №6. С. 32–33.
20. 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.
21. Вопросы авиационной науки и техники. Сер.: Авиационные материалы. Вып.: Климатическое старение ПКМ / под ред. Б.В. Перова, О.В. Старцева. М.: ОНТИ ВИАМ, 1990. 100 с.
22. Испытания упругих стержней методом продольного изгиба / под ред. В.Ф. Савина, А.Н. Блазнова. Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2009. 221 с.
23. Рудольф А.Я., Савин В.Ф., Старцев О.В. и др. Продольный изгиб для определения прочности плит авиационных углепластиков // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: доклады IX Всерос. науч.-практич. конф. 17–19 июня 2009 г. Бийск: Изд-во БТИ АлтГТУ, 2009. С. 148–153.
24. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // Авиационная промышленность. 2009. №4. С. 36–46.