

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПКМ

На примере изучения углепластика КМУ-11тр представлены результаты исследований кинетики влагопоглощения материала, влияния поглощенной влаги на область и температуру стеклования и прочность материала при изгибе в процессе ускоренных тепловлажностных и натуральных климатических испытаний. Установлено, что изгибающая нагрузка образцов приводит к повышению структурной однородности полимерной матрицы. Исследованиями при натуральных и ускоренных испытаниях показано, что температура стеклования связующего снижается с увеличением уровня нагружения образцов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, внешние воздействующие факторы, прочность, влагопоглощение, температура стеклования.

Обеспечение безопасности эксплуатации авиационной техники предъявляет крайне жесткие требования к надежности материалов, используемых в конструкциях изделий, в которых с целью удовлетворения современных требований повышения энерговооруженности, снижения массы изделий все шире применяются современные полимерные композиционные материалы (ПКМ).

Однако всестороннее применение этого класса материалов связано с решением целого круга сложных научно-технических проблем, в частности, с обеспечением гарантированного уровня основных служебных характеристик материалов при эксплуатации изделий в различных климатических районах.

На ПКМ 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 может достигать 30% и более, 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 на этапе проектирования изделий отражены в Авиационных Правилах (части 23, 25, §§603, 609), согласно которым одним из важнейших критериев, по которым проводится выбор материалов на этапе разработки эскизного проекта изделия, 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 (влияние воздействия 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 в напряженном состоянии. Полученные результаты работ в этом направлении носят противоречивый характер. Так, проведенное изучение влияния нагружения при атмосферной экспозиции ПКМ показало незначительное различие деформационно-прочностных показателей, измеренных при 20°C после старения в свободном и напряженном состояниях в течение 3–9 лет [3]. Полученные результаты объяснялись тем, что механические нагрузки замедляют процессы сорбции влаги в материал, в результате чего обеспечивается стабильность упруго-прочностных показателей при изгибе и сдвиге. В работе [4] показано, что на величину прочности стеклотекстолита оказывает существенное влия-

ние уровень растягивающего напряжения и длительность натурной экспозиции. В работе [5] показано, что при моделировании совместного влияния климата и механических нагрузок долговечность элементов конструкций из ПКМ при совместном воздействии этих факторов существенно зависит от уровня нагружения. В работе [6] показано, что совместное воздействие эксплуатационных и климатических факторов снижает прочностные свойства ПКМ.

Общим недостатком работ, проводимых в этом направлении, является определение прочностных свойств не при рабочих температурах эксплуатации материала в изделии, а только при комнатной температуре и не исследование изменения крайне важной характеристики, определяющей область работоспособности, – температурной области стеклования полимерной матрицы ПКМ. Изучение изменения последней крайне необходимо для каждого класса ПКМ, так как прочность материала зависит от температуры, и если рабочая температура находится внутри области стеклования, то величина прочности может существенно снижаться [3, 7]. Это объясняется процессами пластификации полимерной матрицы ПКМ под воздействием сорбированной влаги.

Для полной оценки поведения материала в конструкции необходима оценка стабильности уровня основных служебных свойств в заданных условиях эксплуатации. Установление взаимосвязи изменения прочностных свойств под воздействием внешних факторов (температуры, влажности, нагрузок) со структурными превращениями, происходящими в материале, позволяет получать как предварительную оценку свойств разрабатываемого материала, так и подтверждение его работоспособности в составе реальной конструкции. В данной работе на примере углепластика КМУ-11тр представлены результаты исследований кинетики влагопоглощения материала, влияние поглощенной влаги на область и температуру стеклования и прочность материала при изгибе в процессе ускоренных тепловлажностных и натуральных климатических испытаний. Исходные характеристики исследуемого материала – предел прочности при изгибе $\sigma_{в.и}=1020$ МПа, модуль упругости при изгибе $E_{и}=73$ ГПа, область стеклования – от 100 до 132°C, температура стеклования T_c , определенная методами динамического и термического механического анализа (ДМА и ТМА): 117°C. Нагружение образцов при статическом изгибе обеспечивали при их установке в специальные приспособления с заданным уровнем деформации, эквивалентным 0,4 и 0,6 от разрушающей нагрузки при изгибе ($\sigma_{разр}$). Расчет деформаций проводился по модулю упругости при изгибе, измеренному в области упругой деформации. Образцы в свободном и нагруженном состояниях были выставлены на воздействие климатических факторов при испытаниях в тепловлажностной камере фирмы «Climats» при 60°C и относительной влажности 85%, а также на открытой площадке в зоне умеренного климата (климатическая станция ФГУП «ВИАМ», г. Москва).

Лабораторные тепловлажностные испытания проводили до достижения образцами равновесного влагосодержания (~60 сут). В процессе экспозиции определяли влагопоглощение образцов, которое составило: 0,51% – для образцов в свободном состоянии, 0,55% – для нагруженных до $0,4\sigma_{разр}$ и 0,58% – для нагруженных до $0,6\sigma_{разр}$. Кинетика влагопоглощения образцами представлена на рис. 1, показано, что нагружение образцов увеличивает их влагосодержание.

Определение температуры стеклования испытываемых образцов, проведенное по методу ДМА, показало снижение температуры стеклования связующего в увлажненных образцах со 117°C – в исходном состоянии до 101°C – для образцов после экспозиции в свободном состоянии, до 97°C – для нагруженных до $0,4\sigma_{разр}$ и до 93°C – для нагруженных до $0,6\sigma_{разр}$. Аналогичные результаты получены при исследовании методом термического механического анализа (ТМА): температура стеклования снизилась от исходного значения 117°C до 98°C – для образцов в свободном состоянии и до 94°C – под нагрузкой $0,6\sigma_{разр}$.

Исследованиями изменения прочности при изгибе было показано, что при воздействии повышенной температуры, влажности и статического нагружения с увеличением влагопоглощения и нагрузки прочность и температура стеклования материала снижаются. Падение прочности (до 66% от исходного уровня) насыщенного влагой материала объясняется процессами пластификации, протекающими в полимерной матри-

це. Изменение прочности при изгибе в процессе лабораторных тепловлажностных испытаний приведено на рис. 2.

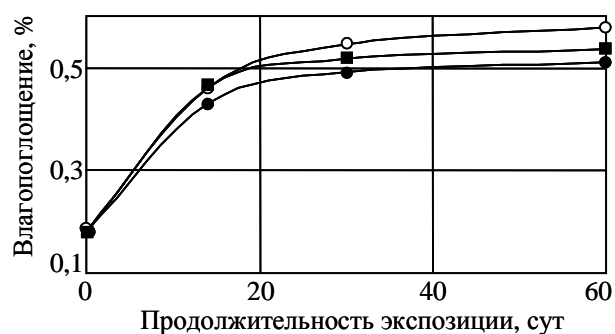


Рис. 1. Кинетика влагопоглощения углепластика КМУ-11тр при ускоренных испытаниях образцов в свободном состоянии (●) и при нагружении 0,4 (■) и 0,6 (○) от разрушающей нагрузки при изгибе

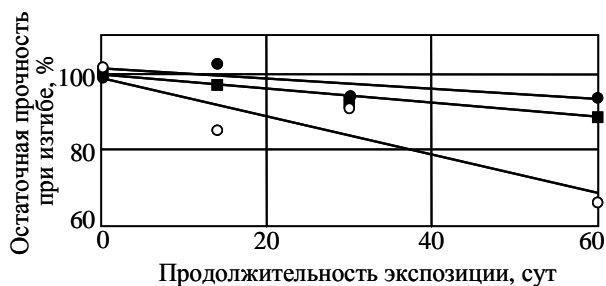


Рис. 2. Изменение прочности при изгибе углепластика КМУ-11тр при тепловлажностных испытаниях образцов в свободном состоянии (●) и при нагружении 0,4 (■) и 0,6 (○) от разрушающей нагрузки при изгибе

Можно также предположить, что полученная зависимость снижения прочности с ростом уровня статического нагружения обусловлена диффузией влаги в межфазную зону и ослаблением взаимодействия на границе раздела «связующее–наполнитель».

Для изучения необратимости процессов, протекающих при сорбции материалом влаги, образцы, увлажненные в свободном состоянии, сушились при 60°C до постоянной массы. Установлено, что прочность при изгибе практически восстанавливается до исходного значения. При этом температура стеклования после сушки повысилась до 106°C (интервал стеклования 98–126°C), но не достигла исходного значения 117°C (интервал стеклования 100–132°C). Незначительное сужение интервала стеклования высушенного материала свидетельствует об упорядочении полимерной матрицы вследствие сорбции влаги, а отличие температур стеклования – о протекании необратимых процессов в полимерной матрице при тепловлажностном воздействии на материал.

Изменение свойств углепластика КМУ-11тр после лабораторных тепловлажностных испытаний в свободном состоянии и под нагрузкой показано в табл. 1.

Таблица 1

Изменение свойств углепластика КМУ-11тр при предельном влагонасыщении после лабораторных тепловлажностных испытаний при повышенной температуре и влажности

Характеристика	Приложенная нагрузка		
	свободное состояние	0,4 $\sigma_{\text{разр}}$	0,6 $\sigma_{\text{разр}}$
Влагопоглощение, %	0,45	0,51	0,58
Прочность при изгибе, % от исходного уровня	94	86	66
Температура стеклования, °C	101	97	94
Интервал области стеклования, °C	88–134	89–105	81–103

Анализ результатов, представленных в таблице, показывает, что величина статической нагрузки, действующей на образец, оказывает влияние на величину влагопоглощения, прочность при изгибе, температуру и интервал области стеклования. Можно предположить, что во насыщенного влагой образцах, находящихся под нагрузкой, происходит разрушение части напряженных связей, ограничивающих молекулярную подвижность. Вследствие этого повышается структурная однородность полимерной матрицы, что подтверждается сужением температурного интервала области стеклования. Увеличение влагопоглощения нагруженных образцов приводит соответственно к снижению прочностных показателей и температуры стеклования.

Углепластик КМУ-11тр был выставлен на натурную экспозицию на климатической станции ВИАМ в г. Москве сроком на 0,5 года (апрель–сентябрь). Результаты изменения свойств образцов после натурной экспозиции в свободном состоянии и под нагрузками 0,4 и 0,6 от $\sigma_{\text{разр}}$ при изгибе представлены в табл. 2.

Таблица 2

Изменение свойств углепластика КМУ-11тр при одновременном воздействии климатических факторов и статической механической нагрузки

Состояние образцов	Влажностное содержание, %	$\sigma_{\text{в.из}}$, МПа, при 20°C	Температура стеклования	Интервал области стеклования
			°C	
Без экспозиции (исходное состояние)	0,18	1020	117	100–130
После экспозиции в свободном состоянии	0,30	980	125	103–134
После экспозиции под нагрузкой:				
0,4 $\sigma_{\text{разр}}$	0,30	1010	118	102–128
0,6 $\sigma_{\text{разр}}$	0,30	1020	108	102–132

Исследования показали, что после натурной экспозиции в течение 0,5 года влажностное содержание как свободных, так и нагруженных образцов составило 0,3% (эквивалентно 7 суткам тепловлажностных испытаний) – это хорошо коррелирует с результатами, представленными на рис. 1. Значение остаточной прочности при изгибе образцов, экспонировавшихся как в свободном состоянии, так и под нагрузками 0,4 $\sigma_{\text{разр}}$ и 0,6 $\sigma_{\text{разр}}$, сохранилось практически на исходном уровне. Это связано с тем, что вследствие низкого значения коэффициента диффузии проникновение влаги в материал в процессе сорбции и десорбции происходит только в поверхностных слоях, что не оказывает влияния на величину прочности. Повышение температуры стеклования со 117°C – у исходного материала до 125°C – для материала, прошедшего экспозицию в свободном состоянии, можно объяснить релаксационными процессами, которые протекали в полимерной матрице за время экспозиции (летний период, повышенная температура, пониженная влажность). Следует отметить, что с увеличением нагрузки на образец температура стеклования снижается, а ширина температурного интервала области стеклования остается стабильной (~30–32°C).

По результатам проведенных исследований могут быть сделаны следующие обобщающие выводы.

– Исследования свойств углепластика КМУ-11тр при тепловлажностных испытаниях в условиях одновременного воздействия повышенной температуры, влажности показали, что изгибающая нагрузка образцов приводит к повышению структурной однородности полимерной матрицы.

– Методами ТМА и ДМА установлено, что температура стеклования углепластика КМУ-11тр при тепловлажностных испытаниях снижается с увеличением влажностного содержания и уровня нагружения. Сушка образцов, увлажненных в свободном состоянии, приводит к восстановлению прочности до исходного уровня, температура стеклования после сушки материала повышается, но не достигает исходного значения.

– Исследования изменения свойств углепластика КМУ-11тр после натуральных климатических испытаний длительностью 0,5 года при воздействии статической деформации при изгибе показали, что влагопоглощение образцов составляет не более 0,3%, не зависит от степени нагружения и не вызывает необратимого изменения прочности.

– Исследованиями при натуральных и ускоренных испытаниях показано, что температура стеклования связующего снижается с увеличением уровня нагружения образцов.

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». М. 2006. Ч. II. С. 103–108.
3. Старцев О.В. Старение полимерных авиационных материалов в теплом влажном климате: Автореф. дис. д-ра техн. наук. М. 1990. 80 с.
4. Панферов К.В., Романенков И.Г., Абашидзе Г.С., Никитин В.Н., Львов Б.С., Шпаловская Б.И. Атмосферостойкость стеклопластиков, находящихся под нагрузкой //Пластмассы. 1968. №6. С. 32–33.
5. Булманис В.Н., Ярцев В.А., Кривонос В.В. Работоспособность конструкций из полимерных композитов при воздействии статических нагрузок и климатических факторов //МКМ. 1987. №5. С. 915–920.
6. 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 V научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2004». М. 2004. С. 155–158.
7. 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 VII научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2008». М. 2008. Ч. 1. С. 327–335.