



Влияние последовательного воздействия климатических и эксплуатационных факторов на свойства стеклопластиков

В.Н. Кириллов
кандидат технических наук

В.А. Ефимов
кандидат технических наук

Т.Е. Матвееенкова

Т.Г. Коренькова

Август 2003

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – 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 30 научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4 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 *«Авиационная промышленность»*, № 1, 2004 г.

Электронная версия доступна по адресу: www.viam.ru/public

Влияние последовательного воздействия климатических и эксплуатационных факторов на свойства стеклопластиков

В.Н. Кириллов, В.А. Ефимов, Т.Е. Матвеевкова,
Т.Г. Коренькова

Всероссийский институт авиационных материалов

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

Однако применение материалов этого класса 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.

Как показывает опыт эксплуатации авиационной техники в различных климатических условиях, наиболее существенное влияние на ее техническое состояние оказывает не механический износ деталей, а процессы старения конструкционных материалов, «микроразрушение» под воздействием факторов окружающей среды, что зачастую приводит к невозможности обеспечения сроков эксплуатации изделий до их морального износа.

Различие атмосферных факторов в зависимости от климатических зон представлено в табл. 1.

Проводимые в ВИАМ многолетние широкомасштабные исследования неметаллических материалов в различных климатических зонах показали, что наиболее жестким условием для них по совокупности воздействия климатических факторов (температура, влажность, солнечная радиация) является теплый влажный климат (субтропики и тропики). Аналогичные результаты получены в работах [1, 2].

Таблица 1.

Факторы окружающей среды	Среднегодовые показатели в климатических зонах		
	умеренной	субтропической	тропической
Температура, °С	0,4	14,2	27
Относительная влажность, %	79	79	82
Осадки, мм	400	1600	1800
Число дней с осадками	72	140	154
Суммарная солнечная радиация, мДж/м ²	3400	4800	5700

В теплом влажном климате под воздействием атмосферной влаги, которая сорбируется на материалах из окружающей среды, УФ-составляющей солнечного спектра, процессов сорбции-десорбции, цикличности температур снижение деформационно-прочностных показателей материалов может достигать 30–40%.

В качестве примера в табл. 2 приведены обобщенные данные по климатической стойкости, полученные при натуральных испытаниях композиционных материалов на основе стеклянного наполнителя и различных эпоксидных связующих.

Таблица 2.

Марка материала	Характеристики	Исходная прочность, МПа	Сохраняемость σ_1/σ_0 , %, при экспозиции в течение, лет			Климатическая зона экспозиции
			1	3	5	
СК-2561С	$\sigma_{в.сж}$	<u>500</u>	<u>92</u>	<u>110</u>	<u>80</u>	Субтропическая (г. Сочи)
		430	88	86	82	
	$\sigma_{в.и}$	<u>1280</u>	<u>75</u>	<u>64</u>	<u>52</u>	
		940	90	70	73	
	W , %	0	0,22	0,32	0,3	
	Умеренная с промышленной атмосферой (г. Москва)	$\sigma_{в.сж}$	<u>500</u>	<u>105</u>	<u>99</u>	<u>82,5</u>
430			87	95	84	
$\sigma_{в.и}$		<u>1280</u>	<u>82</u>	<u>81</u>	<u>68</u>	
		940	95	84	80	
W , %	0	0,38	0,3	0,55		
СТ-69Н	$\sigma_{в.сж}$	550	76	73	57	Субтропическая (г. Сочи)
		<u>830</u>	<u>94</u>	<u>86</u>	<u>77</u>	
	680	88	83	55		
	W , %	0	0,2	0,24	0,3	
	Тропическая (Вьетнам)	$\sigma_{в.сж}$	550	63,5	53	55
			<u>830</u>	81	<u>99</u>	<u>70</u>
$\sigma_{в.и}$		680		90	59	
W , %	0	0,35	0,32	0,25		

Примечание. В знаменателе приведены механические свойства, измеренные при 80°С; W – влагосодержание на момент определения показателей прочности.

Как показали исследования, уровень изменения показателей прочности зависит от типа и содержания связующего и наполнителя, технологических режимов изготовления композита и т.д. Снижение прочности полимеркомпозиционных материалов происходит в результате процессов, протекающих в полимерной матрице и в межфазном слое полимер–наполнитель. В частности, при повышенных температурах, усталостных нагрузках вследствие различных коэффициентов линейного расширения матрицы и наполнителя происходит нарушение межфазного слоя и растрескивание матрицы. Указанные закономерности проявляются на всех этапах старения и даже в том случае, если эффект влияния влаги является обратимым.

Согласно принятой в ВИАМ системе управления качеством авиационных материалов при разработке и паспортизации нового материала проводится его всестороннее исследование и определяется весь спектр показателей с учетом реальных условий работы материала в составе изделий авиационной техники.

При паспортизации композиционных материалов оценка их работоспособности проводится по результатам отдельных, не связанных между собой испытаний на тепловое старение (ресурс работы материала в конструкции при рабочих и максимальных температурах эксплуатации), на циклические (усталостные) механические нагрузки, на воздействие климатических факторов (совместное воздействие температуры и влажности, циклическое изменение температур) и др.

В процессе эксплуатации на материал воздействуют одновременно как эксплуатационные факторы (циклические нагрузки, температура), так и условия окружающей среды. В связи с этим представляется целесообразным проведение исследования влияния совместного (последовательного) воздействия эксплуатационно-климатических факторов с параметрами, характеризующими работу материала в конструкции, на изменение основных служебных характеристик, определяющих работоспособность композиционного пластика конструкционного назначения.

Последовательность воздействий при проведении эксплуатационно-климатических испытаний должна включать в себя наработку ресурса при рабочей температуре, заданную выдержку в тепловлажностной атмосфере, циклическое механическое нагружение с определенным уровнем нагрузки, циклическое изменение температуры. Критерием является остаточный уровень основных служебных свойств, определяющих работоспособность композиционного материала.

Изучение последовательного воздействия климатических и эксплуатационных факторов проводилось на материале, относящемся к конструкционным стеклопластикам, широко используемым в авиационной и других отраслях промышленности. Этот класс материалов характеризуется низкой стоимостью, уникальными диэлектрическими свойствами и достаточно высокими физико-механическими характеристиками при комнатной и повышенной температурах. Благодаря этим достоинствам стеклопластики составляют около 50% от общего объема ПКМ, применяемых в конструкции современных самолетов.

Проведенный анализ обобщенных результатов отдельного влияния климатических и эксплуатационных факторов на механические свойства ряда стеклопластиков на различных эпоксидных связующих показывает, что при ускоренных тепловлажностных испытаниях ($t=50^{\circ}\text{C}$, $\varphi=98\%$, $\tau=3$ мес), при которых материал практически находится в состоянии равновесного влагонасыщения, прочностные характеристики уменьшаются на 10–30%, при этом наиболее сильно снижается прочность при сжатии. Ресурсное термостарение при выдержке 2000–4000 ч при рабочих температурах 70, 100, 130°C приводит к снижению прочностных характеристик на 5–10%.

В качестве объекта исследований выбран перспективный стеклотекстолит СТ-69Н на основе стеклоткани СТ-69Н, который рекомендован для изготовления средненагруженных элементов внешнего контура летательных аппаратов. Материал может эксплуатироваться в общеклиматических условиях в интервале температур от -60 до $+80^{\circ}\text{C}$, обладает улучшенными

технологическими параметрами в переработке и имеет пониженную энергоемкость формования.

В качестве основных служебных характеристик материала, позволяющих оценить влияние эксплуатационно-климатических воздействий, выбраны механические характеристики – прочность при изгибе и сжатии, определяемые при комнатной и рабочей температурах.

При разработке программы испытаний были сделаны допущения:

– при эксплуатации материал в конструкции изделия длительное время работает при повышенных температурах. В связи с этим тепловой ресурс работы материала моделировался выдержкой образцов при рабочей температуре 80°C в течение 1300 ч;

– одним из наиболее агрессивных факторов климата для полимерных композиционных материалов является влага [3, 4, 5]. Режим испытаний на тепловлажностное старение выбирался исходя из того, что конструкция находится на открытом воздухе. Согласно нормативной документации [6], для всеклиматического исполнения максимальная температура составляет 50°C, среднегодовая относительная влажность 80% при 27°C. В целях ускорения протекания процесса термовлажностного старения был выбран режим $t=50^{\circ}\text{C}$, $\varphi=80\%$, τ – до предельного равновесного влагонасыщения, который должен подходить для моделирования старения материалов в любых условиях окружающей среды;

– влияние сезонных климатических температурных перепадов реализовано в программе выдержкой образцов при температурах от -60 до +80°C по два часа в течение 30 циклов, что согласно ГОСТу [7] соответствует сезонным изменениям температуры при 30-летней эксплуатации изделия;

– режим механического усталостного нагружения выбирался с учетом того, что для гражданской авиации, при числе полетов в год 300, срок службы – 30 лет, таким образом, общее число полетов составляет 9000. Учитывая, что наибольшие нагрузки возникают при взлете и посадке, режим

циклических испытаний проводился при количестве циклов 10^4 на весь период эксплуатации при нагружении $0,4\sigma_{\text{разр}}$.

Реальные возможности экспериментального оборудования позволяют осуществить последовательное воздействие эксплуатационно-климатических факторов на исследуемый материал в виде следующих блоков:

1. Тепловой ресурс: $t=80^\circ\text{C}$, $\tau - 1300$ ч;

2. Климатическое воздействие:

– термовлажностное старение: $t=50^\circ\text{C}$, $\varphi=80\pm 3\%$; $\tau \sim$ до равновесного влагосодержания,

– циклическое изменение температуры: $-60^\circ\text{C} \div +80^\circ\text{C}$, $\tau - 2$ ч, 30 циклов;

3. Усталостное нагружение: $\sigma_{\text{в}}=0,4\sigma_{\text{разр}}$, 10^4 циклов, $f \sim 5-8$ Гц.

Обобщение экспериментальных результатов отдельных климатических и последовательных эксплуатационно-климатических воздействий на стеклопластик СТ-69Н представлено в табл. 3.

Таблица 3.

Эксплуатационно-климатические факторы	Сохраняемость свойств, %			
	$\sigma_{\text{в.и.и}}/\sigma_{\text{в.и.0}}$		$\sigma_{\text{в.сж.и}}/\sigma_{\text{в.сж.0}}$	
	при температуре испытаний, $^\circ\text{C}$			
	20	80	20	80
1. Тепловой ресурс $t=80^\circ\text{C}$, $\tau - 1300$ ч	89	95	108	111
2. Термовлажностное старение: $t=50^\circ\text{C}$, $\varphi=80\pm 3\%$, $\tau - 60$ сут	85	76	97	79
3. Термоциклирование: $t=(-60^\circ\text{C} \div +80^\circ\text{C})$, $\tau - 2$ ч, 30 циклов	90	91	97	107
4. Усталостное нагружение: $\sigma_{\text{в}}=0,4\sigma_{\text{разр}}$, $N=1 \cdot 10^4$ циклов, $f=5-8$ Гц	89	91	87	104
5. Последовательное воздействие эксплуатационно-климатических факторов	79	84	87	90

Анализ обобщенных результатов испытаний стеклопластика позволяет сделать следующие выводы:

– снижение прочностных свойств при температуре испытания 20°C в случае последовательного воздействия эксплуатационно-климатических факторов на $\sim 10\%$ ниже, чем при отдельном; более сильное падение свойств

при 80°C проходит после термовлажностного старения, что объясняется пластифицирующим воздействием влаги, приводящим к снижению температуры стеклования полимерной матрицы;

– для стеклопластиков с более чувствительной характеристикой структурных изменений в материале под воздействием эксплуатационно-климатических факторов является прочностью при изгибе, определяемая при комнатной температуре.

Список литературы:

1. АЕСТР300. Climatic Environmental Tests. NATO STANAG 4370.
2. Accelerated Aging of Materials and Structures. – National Academy Press. – 1996.
3. Перов Б.В., Старцев О.В. Основные направления развития методов климатических испытаний полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы: Климатическое старение полимерных материалов. – 1990. – С. 6–13.
4. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Кривонос В.В., Гребнева Т.В. Климатическая стойкость новых композиционных материалов / Сб. докладов III конференции по гидроавиации «Геленджик 2000». М., 2000. – С. 153–155.
5. Т.А. Старженецкая, И.Н. Черский. Воздействие влаги и низких температур на свойства полимерных композиционных материалов// Механика композиционных материалов. – 1986. – №6. – С. 1100–1104.
6. ГОСТ 15150–84. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнение для различных климатических районов, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.
7. ГОСТ 9.707–81. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение.