

УДК 678.067.5

Ю.О. Попов¹, Т.В. Колокольцева¹, А.А. Громова¹, Ю.А. Гусев¹

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЯ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА ВПС-31

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-82-90

Приведены результаты работ, выполненных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках исследования влияния эксплуатационных факторов (повышенной влажности и температуры) на основные физико-механические свойства стеклопластика ВПС-31 (в том числе на температуру стеклования, прочность и модуль упругости при растяжении, удлинение при разрыве при различных температурах испытания в исходном состоянии и после воздействия влаги). Исследованы фрагменты лонжерона, успешно выдержавшего в составе конструкции лопасти термоциклические испытания (день/ночь). Результаты исследований подтвердили возможность эксплуатации изделий из стеклопластика ВПС-31 в условиях влажного тропического климата.

Ключевые слова: *стеклопластик, препрег, связующее, лонжерон лопасти, спиральная намотка, угол намотки, температура стеклования, физико-механические свойства.*

Yu.O. Popov¹, T.V. Kolokoltseva¹, A.A. Gromova¹, Yu.A. Gusev¹

INFLUENCE OF OPERATIONAL FACTORS ON THE MAIN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF A FIBERGLASS PRODUCT VPS-31

The results of the work performed at NRC «Kurchatov Institute» – VIAM in research on aspects of the influence of operational factors (high humidity and temperature) on the physico-mechanical properties of glass fiber composite VPS-31. The main physical and mechanical properties of samples obtained from the spar of the helicopter's main blade are presented (including the glass transition temperature, strength and modulus of elasticity in tension, elongation at break at various test temperatures in the initial state and after exposure to moisture). We studied the fragments of the spar, successfully passed thermocyclic tests («day/night»). The results of the research confirmed the possibility of exploitation of glass fiber composite VPS-31 in a humid tropical climate.

Keywords: *fiberglass, prepreg, binder, blade spar, spiral winding, winding angle, glass transition temperature, physical and mechanical properties.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время ведущие российские и зарубежные производители вертолетной техники в своих разработках используют широкий спектр полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных конструкциях: лопастях несущих и рулевых винтов, деталях фюзеляжа. Изделия из ПКМ в процессе эксплуатации подвергаются воздействию различных агрессивных факторов окружающей среды, которые влияют на физико-механические свойства материалов и конструкций из них, вызывая

преждевременное старение. Основными факторами, оказывающими негативное влияние на ПКМ, являются высокая влажность, широкий диапазон температурных перепадов, интенсивная солнечная радиация с повышенной долей ультрафиолета и т. п. [1–5].

Опыт эксплуатации вертолетов с лонжеронами несущих лопастей, изготовленных из стеклопластика ВПС-18, в странах с тропическим климатом показал наличие такого явления, как значительный «стояночный свес» лопастей при хранении на воздухе (вне ангаров), вызываемый изменением упруго-прочностных свойств материала при естественном нагреве. По-видимому, это связано с недостаточной тепло- и влагостойкостью эпоксидного связующего ЭДТ-10П в стеклопластике ВПС-18 [6, 7].

При учете этой и других проблем для лопастей вертолетов нового поколения и модернизации уже выпускаемых разработаны новые материалы и технологии [8], в том числе препрег и однонаправленный стеклопластик конструкционного назначения марки ВПС-31 (на основе стеклянного ровинга РВМПН-1200-14 и расплавленного эпоксидного связующего ВСП-3М), работающий в диапазоне температур от -60 до $+80$ °С, включая условия эксплуатации при повышенных температуре и влажности (тропические условия).

Внедрение стеклопластика ВПС-31 в конструкцию лопасти сопровождалось проведением ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в рамках которых выполнено это исследование.

В данной работе представлены результаты исследования основных физических и механических свойств стеклопластика ВПС-31, образцы которого вырезаны из реального изделия – лонжерона несущей лопасти вертолета, успешно выдержавшей термоциклические испытания, имитирующие многократный нагрев лопасти от солнечного излучения в течение дня и охлаждение в течение ночи в условиях стоянки (120 циклов: «день» – нагрев и выдержка при температуре 75 ± 5 °С, «ночь» – естественное охлаждение до температуры цеха при выключенных нагревателях): величина прогиба не превысила 40 мм (при аналогичных испытаниях величина прогиба лопастей с лонжероном из стеклопластика ВПС-18 превышала 500 мм).

В рамках работы оценивали следующие основные физико-механические свойства образцов из стеклопластика ВПС-31, вырезанных из фрагментов лонжерона: температуры стеклования $T_{g\text{сух}}$ в исходном состоянии (сразу после испытаний на термоциклирование) и после влагопоглощения $T_{g\text{вл}}$ (при температуре 80 °С и относительной влажности 98 %), массовое содержание связующего, объемное содержание наполнителя, пористость и плотность, а также характеристики растяжения: прочность и модуль упругости при растяжении и удлинение при разрыве при температурах испытания 20 и 80 °С в исходном состоянии (после испытаний на термоциклирование) и после воздействия влаги.

Материалы и методы

Опытный вариант лонжерона несущей лопасти изготовлен из препрега стеклопластика ВПС-31 с однонаправленной структурой методом спиральной намотки под углом ± 30 градусов с последующим формованием пресс-камерным методом и подвергнут термоциклическим испытаниям в условиях и по программе разработчика конструкции.

Для проведения исследований выбраны пять фрагментов лонжерона: фрагмент 1 прилегает к комлевой части лонжерона, фрагменты 2–5 вырезаны по длине пиковой части.

Образцы для проведения исследований вырезали из верхней, задней и нижней стенок лонжерона на станке с ЧПУ при постоянном водяном охлаждении в процессе

резки. Такое оборудование исключает перегрев образцов при воздействии на них режущего инструмента, а также позволяет получить необходимые геометрическую точность и качество поверхностей обрабатываемых материалов. Изображения фрагментов лонжерона с указанием расположения стенок приведены на рис. 1.

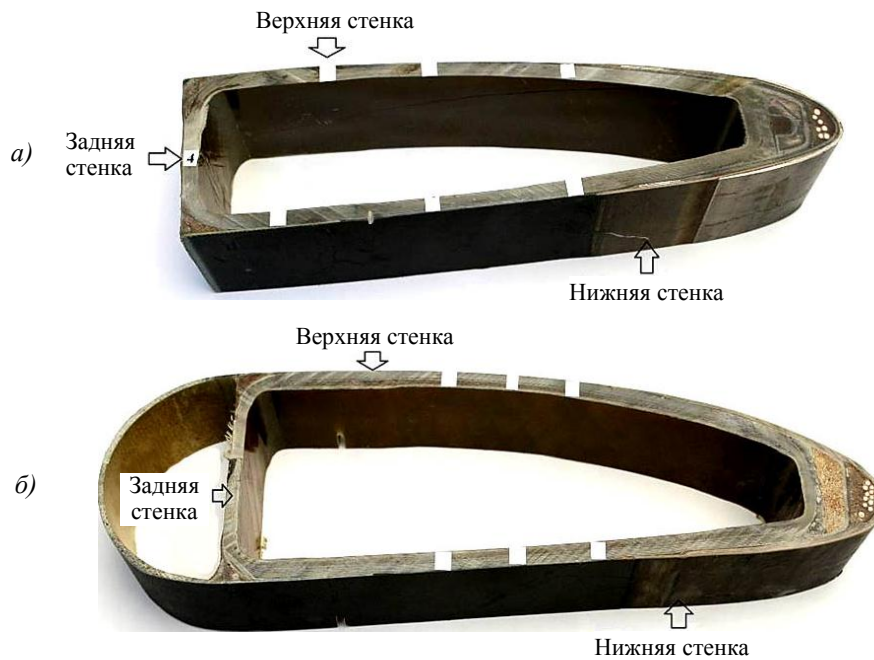


Рис. 1. Фрагменты первой (а) и комлевой (б) частей лонжерона лопасти несущего винта вертолета

Температуру стеклования материала лонжерона в исходном состоянии (состоянии поставки после испытаний на термоциклирование) и после процедуры влагопоглощения при относительной влажности $\varphi = 98\%$ определяли методом динамического механического анализа на динамическом механическом анализаторе ДМА 242С фирмы Netzsch (Германия) по стандартам ASTM E 1640-94 и DIN 53545 в режиме трехточечного изгиба при частоте изгибающей нагрузки 1 Гц и скорости нагрева $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Температуру стеклования определяли как температуру начала падения динамического модуля упругости на кривой температурной зависимости. С целью сокращения срока достижения равновесного состояния процедуру влагопоглощения проводили при повышенной температуре ($80\text{ }^\circ\text{C}$), при этом $\varphi = 98\%$. На образцах, подвергнутых влагопоглощению, отсутствовали лакокрасочные покрытия.

Образцы для определения температуры стеклования (размером $50\times 10\times 2\text{ мм}$), показанные на рис. 2, изготавливали из фрагментов лонжерона 1, 2, 3, причем из фрагмента 1 вырезаны образцы однонаправленной структуры.



Рис. 2. Образцы для определения температуры стеклования стеклопластика

Физические характеристики стеклопластика – плотность, пористость, массовое содержание связующего, объемное содержание наполнителя, поверхностную плотность наполнителя и влагопоглощение в стенках лонжерона, определяли на лабораторном оборудовании в соответствии с ГОСТ 15139–69, ГОСТ Р56682–2015 и ГОСТ 4650–80. При этом образцы (размером 50×25 мм), показанные на рис. 3, изготавливали из фрагмента лонжерона 1 (включающего слой пластика с однонаправленной структурой) и фрагмента 2.



Рис. 3. Образцы для определения физических свойств стеклопластика

Механические свойства – прочность σ_{11} и модуль упругости при растяжении E_{11} и удлинение при разрыве ε_{11} – определяли на испытательной машине Zwick/Roell Z100 в соответствии с ГОСТ 25.602–80. Образцы (размером 200×25 мм), показанные на рис. 4, изготавливали из фрагментов лонжерона 4 и 5. Образцы разделили на две группы: одну группу подвергали испытанию в состоянии поставки после термоциклирования («сухое» состояние) при температурах 20 и 80 °С, другую – после воздействия влаги (равновесное влагопоглощение при температуре 80 °С и $\varphi = 98\%$). Образцы, подвергнутые насыщению влагой, не были защищены лакокрасочным покрытием.



Рис. 4. Образцы для определения механических свойств стеклопластика

Результаты и обсуждение

В табл. 1 показаны результаты определения влагопоглощения и температуры стеклования исследуемого материала, при достижении которых полимерная матрица переходит в высокоэластичное состояние при нагревании и теряет возможность эффективно передавать нагрузку между волокнами, что может привести к потере устойчивости и резкому снижению уровня упруго-прочностных свойств ПКМ.

Температура стеклования позволяет в первом приближении определить предельную температуру эксплуатации ΔT с учетом интервала запаса. Особо следует отметить, что в условиях высокой влажности полимерная матрица поглощает влагу из окружающей среды и пластифицируется. При этом существенно снижаются температура стеклования и, соответственно, предельная температура эксплуатации изделия из данного ПКМ [9, 10].

Таблица 1

Температура стеклования и влагопоглощение образцов из стеклопластика ВПС-31

Условный номер фрагмента	Структура армирования образца, градус	Температура стеклования, °С		Влагопоглощение, %
		в исходном состоянии	после процедуры влагопоглощения (при температуре 80 °С и $\phi = 98\%$)	
1	0	158	112,5	1,36
2	±30	143	104	1,14
3	±30	143	105	1,26
Стеклопластик ВПС-31*		158	–	–

* Результаты испытаний стеклопластика получены при проведении выходного контроля качества партии препрега, предназначенного для изготовления лонжерона (до термоциклирования).

Анализ полученных данных показал, что температура стеклования стеклопластика ВПС-31 в исходном состоянии (до влагопоглощения, но после термоциклирования) в образце со структурой армирования 0 градусов составила 158 °С, как и в образце стеклопластика, испытанном при выходном контроле качества партии исходного препрега, который использовали при изготовлении лонжерона, что подтверждает положительные результаты испытания на термоциклирование. Следует отметить, что температуры стеклования $T_{гсух}$ и $T_{гвл}$ в образце со структурой армирования 0 градусов, полученном из стенки фрагмента 1, больше, чем в образцах со структурой армирования ±30 градусов (фрагменты 2 и 3), что можно объяснить с позиции утверждения, что ПКМ с перекрестной структурой армирования более «чувствительны» к воздействию окружающей среды (нагрев, повышенная влажность), чем материалы с однонаправленной структурой [11].

Для более точных выводов необходимо собрать статистические данные [12] по большому количеству изготовленных опытных образцов. Температуры стеклования в образцах, вырезанных по длине лонжерона, колебались в следующих пределах: $T_{гсух}$ – от 142 до 158 °С, $T_{гвл}$ – от 104 до 113 °С. Анализ этих значений показал, что присутствует необходимый запас предельной температуры эксплуатации ($\Delta T = 25\text{--}30$ °С) для надежной работы в условиях влажных тропиков (при $\phi = 98\%$ и нагреве при воздействии прямых солнечных лучей).

В табл. 2 показаны результаты определения физических свойств стеклопластика ВПС-31 – массовое содержание связующего $P_{св}$, плотность γ , объемное содержание наполнителя V_n , поверхностная плотность наполнителя ρ_n , пористость V_p и толщина стенки образца t .

Таблица 2

Физические свойства образцов из стеклопластика ВПС-31

Условный номер фрагмента образца	Расположение фрагмента	$P_{св}$, %	γ , г/см ³	ρ_n , г/м ²	V_n , %	V_p , %	t , мм
1	Верхняя стенка	34,3	1,86	10153	47,5	0,5	8,3*
	Задняя стенка	32,0	1,90	7501	50,0	0,5	5,8
	Нижняя стенка	34,0	1,87	9712	47,8	0,6	7,9*
2	Верхняя стенка	35,4	1,84	7852	46,0	1,0	6,6
	Задняя стенка	28,0	1,96	7474	54,8	0,5	5,3
	Нижняя стенка	36,9	1,82	7250	44,4	1,0	6,3
3	Верхняя стенка	34,3	1,84	8163	46,8	1,8	6,8
	Задняя стенка	24,5	2,00	7366	59,0	1,0	4,8
	Нижняя стенка	36,7	1,82	7366	44,6	0,9	6,5

* Включает дополнительно толщину однонаправленного слоя стеклопластика.

Из данных, представленных в табл. 2, видно, что разброс значений физических параметров стеклопластика в лонжероне довольно существенный. Применение метода намотки для изготовления оболочек асимметричной конструкции из ПКМ, а также конструктивные особенности формующей оснастки не обеспечивают получение стеклопластика со стабильным уровнем физических и, как следствие, механических свойств материала стенок лонжерона [13, 14]. Такая неоднородность значений (например, показателей объемного содержания армирующего стеклонаполнителя ($V_n = 44\text{--}59\%$) и связанного с ним температурного коэффициента линейного расширения) может приводить к образованию значительных внутренних напряжений в изделии [15], которые под воздействием тепла и влаги вызывают существенное коробление лонжерона и т. п.

В табл. 3 представлены обобщенные данные физических свойств образцов из стеклопластика ВПС-31 (фрагменты 2 и 3, расположенные по верхней, задней и нижней стенкам).

Таблица 3

**Физические свойства (обобщенные данные) образцов
(со структурой армирования ± 30 градусов) из стеклопластика ВПС-31 (фрагменты 2 и 3)**

Расположение фрагмента	$P_{св}$, %	γ , г/см ³	ρ_n , г/м ²	V_n , %	$V_{п}$, %	t , мм
Верхняя стенка	34,3–35,4	1,84–1,86	7852–8163	46,0–46,8	1,0–1,8	6,6–6,8
Задняя стенка	24,5–28,0	1,96–2,00	7366–7474	54,8–59,0	0,5–1,0	4,8–5,3
Нижняя стенка	36,7–36,9	1,82–1,87	7250–7366	44,4–44,6	0,9–1,0	6,3–6,5

Показатель поверхностной плотности наполнителя (т. е. масса (в граммах) стенки площадью 1 м² после выжигания связующего), полученный в рамках исследования, позволяет определить фактическое количество армирующего стеклонаполнителя в составе препрега, укладываемого на оправку в соответствии с программой намотки. Анализ значений поверхностной плотности наполнителя в образцах исследуемого лонжерона свидетельствует о неравномерности распределения волокнистого наполнителя по верхней, нижней и задней стенкам, что является основной причиной колебаний значений толщины. Причем поверхностная плотность наполнителя в верхней стенке стабильно больше, чем в нижней, поэтому даже при меньшем (в данном случае) содержании связующего в ней толщина верхней стенки стабильно больше, чем толщина нижней.

В табл. 4 и 5 приведены результаты испытаний образцов на растяжение при температурах 20 и 80 °С, а также после процедуры влагопоглощения (при температуре 80 °С и $\phi = 98\%$).

Анализ полученных данных свидетельствует, что разбросы значений упругопрочностных свойств образцов довольно существенные, что можно объяснить неоднородностью структуры стенок (разброс значений показателей $P_{св}$ и ρ_n). В зависимости от температуры испытания $T_{исп}$ и при разбросе значений массового содержания связующего по образцам от 26,9 до 36,5 % показатели прочности σ_{11} и модуля упругости при растяжении E_{11} варьируются в пределах, указанных в табл. 6. Здесь же приведены показатели сохранения исходного уровня указанных свойств образцов (испытанных при температуре 20 °С) после воздействия повышенных температуры и влажности.

Таблица 4

**Результаты испытаний образцов (со структурой армирования ± 30 градусов)
из стеклопластика ВПС-31 на растяжение**

Условный номер фрагмента	Условный номер образца*	$T_{исп}$, °С	t , мм	σ_{11} , МПа	E_{11} , ГПа	ε_{11} , %	$P_{св}$, %	$\rho_{н2}$, г/м ²
4	в-4/1	20	6,37	430	24,0	2,15	33,80	6936
	н-4/1		6,20	450	23,5	2,50	32,50	7824
	в-4/2		6,58	415	23,5	2,15	34,40	7891
	н-4/2		5,95	400	22,0	2,40	31,90	7718
5	z-5/1		5,25	444	25,5	1,90	27,00	7660
	н-5/1		6,51	430	24,5	2,05	33,40	8005
	в-5/1		6,75	390	22,5	2,10	34,00	7984
	н-5/2		6,61	415	24,5	2,10	33,73	7999
4	в-4/3	80	6,60	325	23,0	1,95	34,80	7917
	z-4/1		5,15	345	25,5	2,35	27,30	7422
	н-4/3		6,55	295	16,5	1,80	36,50	7530
	в-4/4		6,75	340	22,5	1,25	35,70	7803
5	н-4/2		6,25	315	18,5	1,95	34,50	7489
	в-5/2		6,62	325	21,0	1,85	33,80	7829
	z-5/2		5,23	345	25,0	1,45	26,90	7657
	н-5/3		5,90	266	23,7	2,05	33,10	7378
5	в-5/3	6,50	310	20,5	1,70	34,00	7719	
	н-5/4	5,80	280	24,0	1,95	33,20	7338	

* Буквы в, z, н обозначают верхнюю, заднюю и нижнюю стенки лонжерона соответственно.

Таблица 5

**Результаты испытаний образцов (со структурой армирования ± 30 градусов)
из стеклопластика ВПС-31 на растяжение после процедуры влагопоглощения
(при температуре 80 °С и $\phi = 98$ %)**

Условный номер фрагмента	Условный номер образца*	t , мм	σ_{11} , МПа	E_{11} , ГПа	ε_{11} , %	$P_{св}$, %	$\rho_{н2}$, г/м ²
4	в-4/5	6,65	320	23,6	1,55	34,3	8460
	н-4/5	6,25	270	14,5	2,85	36,1	7347
	в-4/6	6,55	345	23,3	1,50	33,6	8511
	z-4/2	5,20	260	17,3	2,00	27,9	7544
	н-4/6	5,85	330	18,3	2,80	33,0	7440
5	в-5/4	7,05	360	24,7	1,60	33,7	8682
	в-5/5	6,99	330	23,9	1,65	33,2	8520
	z-5/3	5,27	283	19,0	2,25	26,9	7590
	н-5/5	6,10	286	19,3	2,25	32,5	7554

* Буквы в, z, н обозначают верхнюю, заднюю и нижнюю стенки лонжерона соответственно.

Таблица 6

Сохранение механических свойств стеклопластика ВПС-31

Условия испытания	σ_{11} , МПа	$\bar{\sigma}_{11}$, МПа (среднее значение)	Уровень сохранения, % от исходного значения	E_{11} , ГПа	\bar{E}_{11} , ГПа (среднее значение)	Уровень сохранения, % от исходного значения
$T_{исп} = 20$ °С	390–450	420,0*	–	22,0–25,5	23,8*	–
$T_{исп} = 80$ °С	266–345	305,5	72,7	16,5–25,5	21,0	88,2
$T_{исп} = 80$ °С и $\phi = 98$ %	260–345	302,5	72,0	14,5–24,9	19,7	82,8

* Исходные значения для расчета величины сохранения свойств после воздействия температуры и влажности.

Из данных, представленных в табл. 6, видно, что, несмотря на существенный разброс значений механических свойств, материал стенок лонжерона (стеклопластик ВПС-31) сохраняет показатель прочности на уровне $>72\%$, а жесткости – на уровне $>82\%$ в условиях повышенной влажности (при температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\varphi = 98\%$).

Заключения

Результаты работ, выполненных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, в рамках исследования влияния эксплуатационных факторов (повышенной влажности и температуры) на основные физико-механические свойства стеклопластика ВПС-31, из которого изготовлен исследуемый лонжерон, показали, что данный материал успешно выдержал в составе конструкции лопасти термоциклические испытания (день/ночь): во влагонасыщенном состоянии уровень сохранения упруго-механических свойств составил не менее $70\text{--}80\%$, значение температуры стеклования $T_{\text{гсyx}}$ – не ниже $104\text{ }^{\circ}\text{C}$, что подтверждает возможность эксплуатации изделий из стеклопластика ВПС-31 в условиях влажного тропического климата.

Разброс значений свойств стеклопластика (как по длине, так и по каждому из исследованных сечений) довольно существенный: по показателю массового содержания связующего – от $24,5$ до $36,9\%$, по поверхностной плотности наполнителя в стенке лонжерона – от 7250 до 8163 г/м^2 , что, в свою очередь, обусловило разброс значений толщины стенки – от $4,8$ до $6,8\text{ мм}$. По-видимому, применение метода намотки для изготовления асимметричных оболочек, таких как лонжерон, конструктивные особенности формирующей оснастки и принятый способ формования лонжеронов влияют на стабильность свойств стеклопластика в составе лонжерона.

Результаты выполненной работы являются основанием для использования автоклавного метода формования лонжерона (вместо пресс-камерного метода) с целью получения более стабильных характеристик.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
2. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. I. Оценка влияния значимых факторов воздействия // *Деформация и разрушение материалов*. 2019. № 12. С. 7–16.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. II. Развитие методов исследования ранних стадий старения // *Деформация и разрушение материалов*. 2020. № 1. С. 15–21.
4. 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.
5. Liew Y.S., Tan K.H. Durability of GFRP composites under tropical climate // *Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. Singapore, 2003. P. 769–778. DOI: 10.1142/9789812704863_0072.
6. Абрамова М.Г., Луценко А.Н., Варченко Е.А. Об особенностях подтверждения соответствия климатической стойкости материалов авиационного назначения на всех этапах жизненного цикла (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.
7. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Основные направления исследований сохраняемости свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561.

8. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Хрульков А.В. Новое поколение материалов и технологий для изготовления лонжеронов лопастей вертолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S2. С. 5–9.
9. Хасков М.А. О специфике определения температуры стеклования влагонасыщенных полимерных композиционных материалов методом динамического механического анализа // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2016. Т. 82. № 1. С. 25–31.
10. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Колпачков Е.Д. Термодинамические характеристики старения полимерных композиционных материалов в условиях реальной эксплуатации // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 80–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-80-88.
11. Composite materials handbook. Vol. 1. Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials. SAE International, 2012. Ch. 6. P. 29–33.
12. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В., Скирта А.А. Статистическая обработка результатов климатических испытаний стеклопластиков // *Пластические массы*. 2016. № 3–4. С. 58–64.
13. Ивчин В.А., Никифоров В.А., Самсонов К.Ю. Влияние различных вариантов лопастей несущего винта на Х-образный рулевой винт вертолета // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2018. Т. 21. № 1. С. 114–123. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-1-114-123.
14. Слюсарь Б.Н., Флек М.Б., Гольдберг Е.С. Технология вертолетостроения. Технология производства лопастей вертолетов и авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2013. С. 153–199.
15. Potter K., Langer C., Hodgkiss B., Lamb S. Sources of variability in uncured aerospace grade unidirectional carbon fiber epoxy prepregmate // *Composites. Part A*. 2007. Vol. 38. Is. 3. P. 905–916. DOI: 10.1016/j.compositesa.2006.07.010.