

Научная статья

УДК 532.72:539.4:541.68:665.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-98-112

ВЛИЯНИЕ АГРЕССИВНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)

В.О. Старцев¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрено влияние авиационных топлив, масел и технических жидкостей на механические свойства полимерных композиционных материалов. Проанализированы закономерности старения в воде и водных растворах кислот, оснований, солей. Показано, что причинами изменения свойств являются процессы пластификации, деструкции и доотверждения полимерных матриц, химическое разрушение армирующих наполнителей и адгезионное взаимодействие на границе раздела «матрица–наполнитель», формирование микротрещин под действием внутренних напряжений, усиленных действием воды и водных растворов кислот, солей и оснований.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, армирующие волокна, реактивное топливо, авиационные жидкости, вода, кислота, щелочь, соль, старение, сорбция, прочность

Для цитирования: Старцев В.О. Влияние агрессивных жидкостей на свойства полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-98-112.

Scientific article

EFFECT OF AGGRESSIVE LIQUIDS ON PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS (review)

V.O. Startsev¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The influence of aviation fuels, oils and technical fluids on the mechanical properties of polymer composite materials is considered. Regularities of aging in water and aqueous solutions of acids, bases, salts are analyzed. It is shown that the reasons for the change in properties are the processes of plasticization, destruction and post-curing of polymer matrices, chemical destruction of reinforcing fillers and adhesive interaction at the «matrix–filler» interface, the formation of microcracks under the action of internal stresses, enhanced by the action of water and aqueous solutions of acids, salts and bases.

Keywords: polymer composite materials, reinforcing fibers, jet fuel, aviation fluids, water, acid, alkali, salt, aging, sorption, strength

For citation: Startsev V.O. Effect of aggressive liquids on properties of polymer composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-98-112.

Введение

Детали из полимерных композиционных материалов (ПКМ), используемые в авиастроении, автомобилестроении, строительстве и других отраслях промышленности, в реальных условиях эксплуатации часто подвергаются воздействию топлив, масел и различных технических жидкостей. В результате такого воздействия изменяются деформационно-прочностные показатели материалов, т. е. происходит их старение. Физико-химические превращения в ПКМ под воздействием агрессивных жидкостей являются разновидностью старения, которое находится в стадии серьезного изучения.

Теоретические основы старения полимерных материалов в таких жидких агрессивных средах, как растворы кислот, оснований и солей, рассмотрены в монографии [1]. В настоящее время накапливается информация для расширенного обобщения разрозненных результатов. Предстоит установить закономерности действия кислот и оснований на полимерные матрицы различных классов, дать оценку реакционной способности химически нестойких связей к деструкции в процессе диффузии агрессивных жидкостей. Необходимо выявить закономерности влияния традиционных реагентов (кислот, щелочей, спиртов, топлив, масел, присадок, антиобледенительных жидкостей, растворителей, смывок) и условий их применения на обратимые и необратимые превращения в связующих и армирующих наполнителях, чтобы моделировать изменение механических показателей ПКМ.

Цель данной работы – рассмотрение методических особенностей испытаний ПКМ на стойкость к агрессивным жидкостям и результатов, раскрывающих сущность механизмов физико-химических превращений в ПКМ.

Старение ПКМ под воздействием топлив, масел и технических жидкостей

Методической основой испытаний ПКМ в агрессивных жидкостях является ГОСТ 12020–2018 [2]. Этот руководящий материал был принят в 1973 г. для пластмасс и слоистых материалов и остается практически неизменным по настоящее время. Положительной стороной этого стандарта [2] является возможность испытаний образцов разной толщины в самых разнообразных рекомендованных средах (кислоты, спирты, щелочи, растворы солей и др.) при любых температурах, заданных условиями эксплуатации. Продолжительность испытаний может варьироваться от 24 ч (краткосрочные испытания), 7 сут (стандартные испытания), 16 недель (длительные испытания) до 5 лет. Рекомендуется выбирать такой срок испытаний, чтобы в тестируемых образцах установилось сорбционное равновесие или произошло явное растворение или химическая деструкция. Обязательными критериями химической стойкости являются изменение массы и линейных размеров образцов, но предполагается также определение разнообразных показателей свойств по методикам, изложенным в соответствующих стандартах на методы испытаний. Допускаемыми реагентами являются также растворы твердых химических веществ, технические жидкие среды (топлива, масла), но их состав не регламентируется.

Из широких возможностей стандарта [2] на практике часто ограничиваются оценкой механических показателей R : пределов прочности и модулей упругости при растяжении (σ_t , E_t), сжатии (σ_c , E_c), изгибе (σ_b , E_b), сдвиге (τ), измеренных при комнатной и рабочей температурах после 1–3 мес выдержки в комнатных условиях [3–7].

Зарубежные исследователи руководствуются рекомендациями стандарта ASTM D 543-21 [8], разделы которого согласованы со стандартами ISO 175:2010 [9] и ISO 4599:1986 [10]. В стандарте [8] используются 50 стандартных реагентов, но допускается использование и других химических составов. На практике для ПКМ пользуются рекомендациями раздела А (выдержка в жидких средах и определение свойств после испытаний). Раздел В соответствующего ему стандарта [10] применяется для оценки трещиностойкости пластмасс в жидких агрессивных средах.

В табл. 1 приведены примеры влияния авиационных топлив и технических жидкостей на механические свойства ПКМ. Представлены коэффициенты сохранения механических показателей $k_R = R/R_0$, где R – пределы прочности и модули упругости при растяжении (σ_t , E_t), сжатии (σ_c , E_c), изгибе (σ_b , E_b), предел прочности при сдвиге (τ), измеренные в исходном состоянии (0) и после воздействия одинаковых температур и продолжительности выдержки в агрессивных жидкостях (t).

По данным табл. 1 после 1–3 мес пребывания углепластиков [3, 4], стеклопластиков [5] и органопластиков [6, 7] в агрессивных жидкостях при комнатной температуре (RT) значения k_R изменяются с 1,06 до 0,54. Зарубежные авторы [11–15] также сообщают об уменьшении показателей R до 60 %. Такое разнообразие результатов демонстрирует как высокую стойкость ПКМ к авиационным жидкостям, так и способность этих материалов подвергаться значительному старению.

Значения показателя k_R в табл. 1 недостаточны для заключений о стойкости ПКМ к жидким средам. В каждом конкретном случае необходимы дополнительные сведения о влиянии температуры и продолжительности воздействия, чтобы знать предельные уровни изменения механических показателей и механизмы физико-химических превращений в материалах.

Рассмотрим несколько конкретных примеров. Причиной высокой стойкости органопластика на основе волокна Kevlar к действию воды, реактивного топлива, масла авторы работы [11] считают стабильность арамидных волокон при относительно невысокой сорбции (до 2 %). Гидравлическая жидкость, состав которой указан в источнике [16], способна повлиять на адгезионную связь между матрицей и волокном и тем самым снизить величину σ_t на 13 % (табл. 1). Эффект старения в жидкостях зависит от измеряемого показателя ПКМ [4, 12–15]. Например, после 66 сут воздействия топлив на эпоксидный стеклопластик [12] показатель σ_t , зависящий от свойств стекловолокон, снизился всего на 5 %, тогда как показатель σ_c , чувствительный к свойствам полимерной матрицы, уменьшился на 12–13 %. Подобное различие выявлено для эпоксидного арамидного органопластика [14]. Состав авиационных топлив существенно влияет на старение ПКМ: показатель σ_b стеклопластика на основе эпоксидной матрицы Araldite [15] после 15 сут выдержки в авиационном бензине уменьшается всего на 7 %, а после действия реактивного топлива ATF ухудшается на 25 % (табл. 1).

Выдержка ПКМ в агрессивных жидкостях при повышенных температурах закономерно увеличивает эффекты старения. После 1 мес действия антиобледенительной жидкости Skydrol при комнатной температуре показатель σ_t органопластика снижается на 13 % [11]. Если испытания органопластика провести при температуре 60 °С, то снижение показателя σ_t увеличивается до 21 % [14]. Подобным образом повышение температуры смазочного масла с 25 до 60 °С увеличивает снижение показателя E_t пултрузионного стеклопластика на основе полиэфира с 25 до 38 %, а ползучесть – более чем на порядок после 14 мес испытаний [17].

Таблица 1

Влияние агрессивных жидкостей на механические показатели полимерных композиционных материалов (ПКМ)

ПКМ*	Агрессивная жидкость, режим испытаний**	Срок старения, мес	Прирост массы, %	Показатель R^{***}			Источник
				обозначение R	исходное значение R_0 , МПа	$k_R = R_t / R_0$ после воздействия жидкости	
УП ВКУ-39	Вода	3	0,3	σ_b/τ	1000/73	1,0/1,0	[3]
	Топливо ТС-1		0,05			1,02/1,01	
	Масло ИПМ-10		0,05			1,04/0,99	
	Масло МС-8П		0,05			1,01/1,0	
	ПОЖ**** Арктика ДГ		0,09			1,02/0,98	
УП ВКУ-27Л	Вода	3	0,6	σ_b/τ	1185/80	0,95/0,88	[4]
	Топливо ТС-1		0,1			0,95/1,06	
	Масло ИПМ-10		0,1			0,97/1,13	
	Масло МС-8П		0,1			0,97/1,06	
	ПОЖ Арктика ДГ		0,1			1,0/1,06	
	Спирт		0,2			0,82/1,0	
СП ВПС-48/7781	Вода	3	-	T	95	0,82	[5]
	Топливо ТС-1					0,86	
	Масло ИПМ-10					0,91	
	Масло МС-8П					0,90	
	ПОЖ Арктика ДГ					0,88	
	Спирт					0,8	
	Нефрас					0,91	
	Жидкость НГЖ-5Н					0,54	
ОП ВКО-21	Вода	3	1,8	σ_b	530	1,0	[6]
	Топливо ТС-1	1	0,12			0,92	
	Масло ИПМ-10		0,12			0,91	
ОП Оргалон АФ-1М	Вода	3	-	τ	100	0,60	[7]
	Бензин					0,80	
	Топливо ТС-1					0,60	
	Масло ИПМ-10					0,78	
	Масло МС-8П					0,72	
ОП АХ6201FR	Топливо JET-A	1	0,86	σ_t	788	0,99	[11]
	Масло Mobile jet II engine		1,9			0,91	
	Жидкость Skydrol-LD4		1,3			0,87	
	Вода		1,5			0,97	
СП эпоксид-Е-glass	Топливо JET-A	2,2	0,2	σ_t/σ_c	370/143	0,94/0,94	[12]
	Биотопливо		0,1			0,95/0,87	
	JET-A/биотопливо (4:1)		0,07			0,95/0,88	
ОП Resol/Nomex	Реактивное топливо	0,033	0,83	σ_t/τ	33,4/13,6	0,99/0,96	[13]
	Гидравлическая жидкость		1,1			0,97/0,93	
ОП Aramid 49/895	Вода при 82 °С	1	-	σ_t/σ_c	188/97	0,94/0,64	[14]
	Дихлорметан					0,90/0,76	
	Реактивное топливо					0,93/0,76	
	Skydrol при 60 °С					0,79/0,60	
СП E-glass/Araldite	Бензин Avgas 100LL	0,5	0,15	σ_b/E_b	42,8/620	0,93/0,76	[15]
	Реактивное топливо ATF		1,8			0,75/0,72	

* ПКМ: УП – углепластик, СП – стеклопластик, ОП – органопластик.
** Во всех примерах, кроме [14], образцы ПКМ выдержаны при комнатной температуре (RT).
*** R – пределы прочности при растяжении (σ_t), сжатии (σ_c), изгибе (σ_b), межслойном сдвиге (τ) и модуль упругости при изгибе (E_b), измеренные при комнатной температуре.
**** Противообледенительная жидкость.

Проведенные испытания показали [3, 4, 18, 19], что среди различных классов ПКМ углепластики наиболее стойки к воздействию авиационных жидкостей. По данным работы [18] эпоксидные углепластики, выдержанные 73 сут в солевом растворе и в керосине, при увеличении массы на 0,1–0,16 % повысили предел прочности при растяжении на 3–6 %. После 10 сут пребывания в воде, реактивном топливе, гидравлической жидкости и противобледенительной присадке к топливу механические показатели эпоксидного углепластика изменяются незначительно [19]. Присадка и гидравлическая жидкость несущественно повреждают клеевое соединение, но катастрофически снижают его твердость и прочность при растяжении при температурах, превышающих комнатную. В клеевом соединении Cytek FM-73 в системе алюминиевого сплава 2024-T3 и боропластика через 42–50 сут воздействия топлива с антикоррозионной присадкой DCI-4A незначительно изменяется показатель вязкости разрушения G_{Ic} , но он снижается на 34–60 % после контакта соединения со смесью воды и антистарителя топлива DGME [20].

Как показывают результаты работы [21], действие бензина и керосина существенно изменяет усталостные показатели эпоксидного полимера. Для разрушения сухих образцов требуется 3700 циклов при напряжении 33 МПа. После 50 сут выдержки в керосине при напряжении 32 МПа разрушение происходит через 1600 циклов. Влияние бензина еще более значительно: образцы разрушаются через 1400 циклов при нагрузке 22 МПа.

Рассмотренные примеры показывают, что для обоснованных заключений о топливостойкости, стойкости к маслам и техническим авиационным жидкостям ПКМ необходимо исследовать кинетику сорбции жидкостей при разных температурах и проводить измерение показателей R после достижения сорбционного равновесия с учетом влияния армирующих наполнителей и полимерных матриц при варьировании показателей σ_t , E_t , σ_c , E_c , σ_b , E_b , τ . Пока недостаточно изучено влияние этих жидких сред на механические показатели ПКМ при низких и повышенных температурах. Можно ожидать, что при приближении температуры измерений к температуре стеклования полимерных матриц действие топлив окажется более значительным, чем при комнатной температуре. По данным работы [5] средний коэффициент сохранения показателя τ стеклопластика, измеренного при комнатной температуре после 3 мес насыщения в восьми авиационных жидкостях, составил $k_\tau = 0,83$. При температуре измерений 120 °С этот показатель уменьшился до $k_\tau = 0,71$. Причины такой повышенной чувствительности ПКМ рассмотрены в работе [22] на примере пластифицирующего влияния влаги на ПКМ. Можно ожидать, что с помощью термомеханического и динамического механического анализов, фрактографии, профилометрии [23–25], циклических воздействий [26] и других подходов [27, 28], разработанных для исследований ранних стадий старения материалов, в ближайшие годы возможно изучить закономерности влияния авиационных жидкостей на свойства ПКМ.

Старение ПКМ под воздействием водных растворов солей, кислот и щелочей

Водные растворы солей, кислот и щелочей также могут ухудшать свойства ПКМ, т. е. приводить к их значительному старению. Индикаторами такого старения являются показатели k_R , представленные в табл. 2.

Общей закономерностью результатов, полученных авторами работ [29–37], является повышенная активность растворов кислот и щелочей по сравнению с действием дистиллированной и морской воды как при комнатной [29–35], так и при повышенных температурах [31, 32, 36, 37]. При одинаковых концентрациях растворов NaOH более агрессивен для стеклопластика TEXIPREG ET443, чем растворы HCl и H₂SO₄ [29, 30].

Таблица 2

Влияние растворов кислот и щелочей на механические показатели полимерных композиционных материалов (ПКМ)

ПКМ*	Агрессивная жидкость, режим испытаний**	Срок старения, сут	Прирост массы, %	Показатель R^{***}			Источник	
				обозначение R	исходное значение R_0 , МПа	$k_R = R/R_0$ после воздействия жидкости		
СП ТЕХI-PREG ET443	10%-ный NaOH в воде (RT)	36	4,2	σ_b/E_b	416/20500	0,78/0,73	[29]	
	10%-ный HCl в воде (RT)		4,7			0,84/0,78		
	10%-ный H ₂ SO ₄ в воде (RT)		5,2			1,02/0,98	[30]	
УП для армирования бетона	Вода (RT)	83	0,1	σ_b	2300	1,04	[31]	
	Морская вода (RT)		0,1			0,98		
	Ca(OH) ₂ + KOH + NaOH (RT)		0,5			0,54		
Эпоксидный полимер DGEBA	Вода (RT)	80	–	σ_c	95	0,96	[32]	
	5%-ный HCl в воде (RT)		–			0,86		
	10%-ный NaOH в воде (RT)		–			0,93		
УП на основе DGEBA	Вода (RT)	80	–	σ_c	1276	1,0		
	5%-ный HCl в воде (RT)		–			0,98		
	10%-ный NaOH в воде (RT)		–			0,99		
СП на основе DGEBA	Морская вода (RT)	3	0,67	σ_b	330	0,88	[33]	
	Водный раствор HNO ₃ (RT)		1,0			0,93		
	Водный раствор KOH (RT)		0,8			0,43		
Эпоксид	5%-ный H ₂ SO ₄ в воде (RT)	42	–	σ_t	48	0,39	[34]	
Эпоксидный УП					4400	0,69		
СП эпоксид-E-glass	Морская вода (RT)	2,2	0,2	P_b^{****}	6760^{****}	0,94/0,94	[35]	
	Ca(OH) ₂ + KOH + NaOH (RT)		0,1			0,95/0,87		
	Водный раствор HCl (RT)		0,07			0,95/0,88		
Виниловый БП	Ca(OH) ₂ + KOH + NaOH (60 °C)	208	0,26	σ_b/τ	1265/39	0,63/0,78	[36]	
Виниловый СП			0,57			1555/50		0,93/0,95
Эпоксидный БП			0,79			1501/46		0,61/0,86
Эпоксидный БП (пултрузия)	Вода (RT)	4320	0,1	σ_t/E_t	899/50300	1,04/0,96	[37]	
	Вода (80 °C)		0,56			0,51/0,90		
	Раствор щелочи (RT)		0,14			0,87/0,94		
	Раствор щелочи (80 °C)		0,63			0,41/0,64		

* ПКМ: УП – углепластик, СП – стеклопластик, БП – базальтопластик.
 ** В скобках указана температура выдержки (RT – комнатная температура).
 *** R – пределы прочности при растяжении (σ_t), сжатии (σ_c), изгибе (σ_b), межслойном сдвиге (τ) и модули упругости при растяжении (E_t) и изгибе (E_b), измеренные при комнатной температуре.
 **** P_b – предельная нагрузка при изгибе, Н.

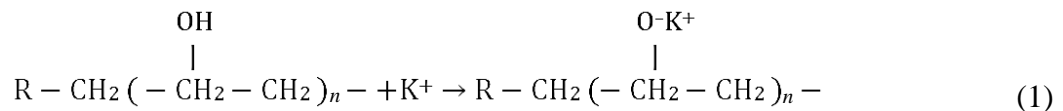
После 36 сут выдержки образцов толщиной 2,1 мм сорбировалось 4,2–5,2 % растворов, но предельное насыщение не достигнуто. Поэтому при увеличении продолжительности испытаний значения k_R могли бы еще понизиться, по сравнению с указанными в табл. 2. Микроскопические исследования показали преобразование начальной гладкой поверхности стеклопластика в шероховатую и появление микротрещин в эпоксидной матрице [30].

Авторы работы [31] исследовали три варианта углепластика в чистой воде, искусственной морской воде и щелочном растворе, моделирующем среду бетона (118 г/л Ca(OH)₂ + 4 г/л KOH + 0,9 г/л NaOH). По приросту массы и изменению предела прочности при изгибе для всех вариантов углепластика существенное влияние оказал щелочной раствор даже при комнатной температуре воздействия (табл. 2). Дистиллированная и морская вода при комнатной температуре не изменила значений σ_b , но понизила этот показатель на 30–45 %, будучи нагретой до 50 °C. По мнению авторов работы

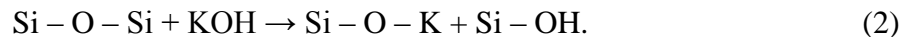
[31], обнаруженные изменения свойств вызваны пластификацией полимерной матрицы. Эффекты от воздействия щелочи также значительны и катастрофически снижают показатель σ_b при любых температурах старения, что позволяет предположить доминирующую роль деструкции полимерной матрицы химическими реагентами.

Активизацию пластификации при повышении температуры воды и водных растворов HCl и NaOH исследовали в работе [32] при погружении образцов эпоксидного углепластика и его отдельно отвержденной матрицы DGEBA в жидкости при температурах 20, 40 и 60 °C в течение 20, 40 и 80 сут. Температура стеклования, измеренная методом динамического механического анализа, в исходном состоянии эпоксидного полимера составила 139 °C и на разных этапах старения изменялась в пределах от 127 до 147 °C, демонстрируя конкуренцию процессов пластификации и доотверждения [22, 25].

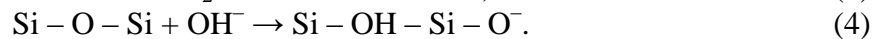
Образцы стеклопластика на основе эпоксидного связующего DGEBA находились при комнатной температуре в растворах искусственной морской воды (pH = 8,2), кислоты HNO₃ (pH = 1) и щелочи KOH (pH = 13). За 150 сут образцы сорбировали соответственно 0,67; 1,0 и 0,8 % жидкостей [33]. В табл. 2 отмечено существенное снижение показателя σ_b в растворе щелочи. Такой значительный эффект старения вызван не только пластификацией, но и химическими реакциями. Анион K в KOH разрушает полярные связи в полимере. Атом водорода в полимерной цепи заменяется атомом калия, что является причиной снижения прочности стеклопластика:



Кроме того, щелочь разрушает стеклянные волокна [33]:



Молекулы воды также участвуют в химическом взаимодействии со стекловолокном посредством реакций [38, 39]:



Низкомолекулярные продукты, образованные реакциями (2)–(4), в процессе длительной выдержки в растворах могут удаляться из стеклопластика, уменьшая массу образцов. Это подтверждено в работе [40], в которой выявлено уменьшение массы стеклянных волокон на 2 % после 3 ч выдержки в водном растворе NaOH и на 1–4 % после 28 сут пребывания в 5%-ном растворе NaOH (pH = 14) [41].

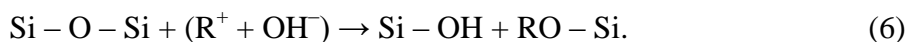
Аналогичным образом водные растворы щелочей вызывают травление поверхности и уменьшение прочности базальтовых волокон [36, 37, 39, 42], особенно при повышении температуры раствора. По данным работы [43], после 2 недель действия щелочного раствора при 20 °C показатель σ_t уменьшается с 2,4 до 1,0 ГПа, а при температуре 60 °C – до 0,7 ГПа. Модуль упругости также уменьшается с 80,5 до 63 и 56 ГПа соответственно. В работе [44] сравнивалось действие растворов NaOH и HCl на стекловолокна и базальтовые волокна. После 3 ч кипячения в растворе HCl массовое количество Si на поверхности волокон увеличилось с 31 до 69 %, но снизилось до 25 % после воздействия NaOH. При этом после воздействия кислоты возросло содержание элементов металлов Na, Mg, Al, K, Ca, Fe (всего на ~39 % (по массе)) из-за того, что атомы металлов менялись местами с H⁺ в кислоте. Разрушение структуры решетки на поверхности волокон является причиной снижения прочности пластика. После аналогичного

кипячения в щелочи структура решетки волокон на поверхности разрушается под воздействием OH^- в соответствии с реакцией (4). Из-за этого на поверхности волокон наблюдается увеличение содержания Na с 4,5 до 10,8 % [44].

Элементный анализ, проведенный авторами работы [45], показал, что после 3 ч кипячения базальтовых волокон в воде обнаруживается несущественное присутствие атомов Na, Ca, K, Si (0,02–0,04 % (по массе)). При таком же воздействии в растворе NaOH количество атомов K и Si возрастает на 2–4 % (по массе). В растворе HCl содержание Na возросло на 0,7 % (по массе), Al – на 1,6 % (по массе), Fe – на 1,5 % (по массе), Mg – на 0,63 % (по массе). Таким образом, доказано, что ионы металлов переходят в кислотный раствор, а щелочной раствор обогащается калием, кремнием и алюминием. На микрофотографиях показаны гладкие поверхности базальтовых волокон, выдержанных в воде и кислоте, но шероховатые после выдержки в щелочи. Сделан вывод, что стойкость к воздействию воды высокая. Поскольку щелочные ионы R более подвижны в объеме базальтового стекла, то на поверхности происходит реакция

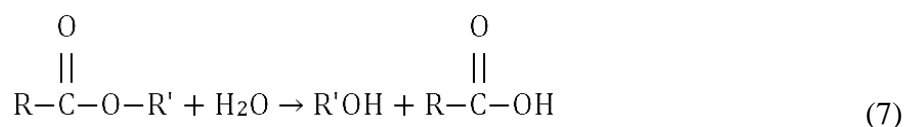


Такая реакция характерна для воды и щелочного раствора. Структура решетки на поверхности волокон разрушается OH-группами по уравнению

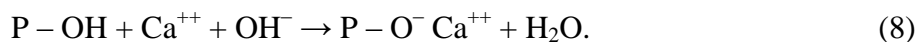


Мостиковые кислородные связи разрушаются OH-группами, что вызывает превращение решетки на поверхности в гелеподобную структуру, видимую на снимках на структурном и микроструктурном уровнях. Элементный анализ показал, что содержание кремния уменьшается с 51 до 48 % (по массе), тогда как содержание Na вырастает с 3,8 до 7,7 % (по массе). В результате выдержка в воде практически не изменяет прочность базальтового волокна, выдержка в кислоте уменьшает разрывную нагрузку на 23 %, а выдержка в щелочном растворе снижает нагрузку на 90 % [45].

В работе [46] методом инфракрасной спектроскопии исследован водный гидролиз ненасыщенного полиэфира $\text{R} - \text{C} = \text{O} - \text{R}'$, где R – алкильная группа, R' – арильная группа. В результате реакции



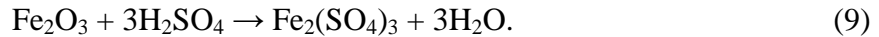
образуются спирт и кислота, которые снижают механические показатели полимера. Эпоксидный полимер гидролизуется в растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по схеме [46]



В эпоксидных полимерах на основе бисфенола А в макроцепях содержится большое количество четвертичных атомов углерода, расположенных в основных цепях, которые под воздействием кислот способны образовывать третичные положительные углеродные ионы, разрывать макромолекулы и терять органические элементы. Такой тип реакций, приводящий к образованию карбониллов, рассмотрен в работе [47].

Результаты сравнительных испытаний двух типов углеродных волокон, четырех составов базальтовых волокон и 10 составов стекловолокон на стойкость к воде и водным растворам NaCl, HCl, NaOH рассмотрены в работе [48]. После 7 сут пребывания волокон в этих жидкостях сравнивали потери массы, микрофотографии поверхности образцов, состав элементов в поверхностном слое волокон. Углеродные волокна продемонстрировали несущественные изменения. Базальтовые волокна оказались стойкими к кислоте, но склонны к реакциям со щелочью типа (2)–(6), что соответствует выводам

работ [44, 46]. Стекловолокна имеют низкую стойкость к кислоте и наибольшие потери массы – от 22 до 35 %. Все волокна стойки к воде. Стекловолокна, содержащие бор, весьма подвержены коррозии. Они теряют от 20 до 30 % (по массе) из-за выщелачивания оксидов, особенно Al_2O_3 , что показано в работе [49]. Подобные результаты получены и в работе [50]: реакции стекловолокон и базальтовых волокон в щелочи соответствуют типам (5) и (6). В базальтовых волокнах под действием кислоты происходит реакция



В результате после обработки в кислоте базальтовых волокон создается две группы связей: ковалентные связи между поверхностными –ОН-группами и сложного эфира с карбоновой кислотой; водородные связи между карбонильными группами эфира и ОН-группами волокна [50].

Таким образом, водные растворы солей, кислот и щелочей являются весьма агрессивными жидкими средами как для полимерных матриц, так и для армирующих волокон ПКМ, особенно при повышенных температурах. Химические реакции полимерных матриц в этих средах протекают при одновременной пластификации. Для получения обоснованных заключений о стойкости ПКМ к воздействию агрессивных жидкостей большое значение имеет выбор правильной методики и последовательности операций при проведении исследований. Примером такого удачного методического решения является работа [51]. Долговечность и разрушение базальтопластиков в этой работе сравниваются с аналогичными показателями для углепластиков и стеклопластиков после пребывания в воде и водных растворах солей (смесь $NaCl$, $MgCl_2$, Na_2SO_4 , $CaCl_2$), кислот, смеси щелочей ($Ca(OH)_2 + KOH + NaOH$) в течение 7, 18, 34 и 66 сут при температурах 25 и 55 °С. Сравнивается действие выбранных жидкостей на волокна, отдельно отвержденную эпоксидную матрицу и ПКМ. В обязательном порядке сопоставляются элементный состав и структура поверхности волокон в исходном состоянии и после воздействия воды и растворов. Основными критериями старения являются механические показатели σ_t и E_t , измеренные для волокон, полимерной матрицы и композитов. Дополнительные сведения о механизме старения можно получить при анализе инфракрасных спектров эпоксидной матрицы. Оценку обратимого пластифицирующего воздействия можно получить после измерения σ_t и E_t высушенных образцов [22, 23] и анализа кинетики сорбции, как показано в работах [52, 53].

Заключения

Представленный анализ показывает, что старение ПКМ в химически агрессивных жидкостях представляет собой сложный комплекс физико-химических превращений в полимерных матрицах, армирующих волокнах и на границе «полимер–наполнитель», выявление которых требует тщательно проработанного методического обеспечения. Рассмотренные примеры показывают возможность нахождения доминирующих процессов, в результате которых изменяются механические свойства ПКМ. Необходимые сведения для понимания сущности и закономерностей старения требуют таких методов контроля, как динамический механический и термомеханический анализ, микроскопия, профилометрия, элементный анализ, инфракрасная спектроскопия, массоперенос в сочетании с измерениями традиционных прочностных показателей.

Для получения обоснованных заключений о стойкости авиационных ПКМ к топливам, маслам и техническим жидкостям целесообразно усовершенствовать методику испытаний, чтобы с их помощью выявлять химические реакции деструкции и до отверждения на фоне физических эффектов набухания, пластификации, релаксации внутренних напряжений во всем интервале температур эксплуатации.

Перспективными путями повышения стойкости ПКМ к химически активным жидкостям являются наномодифицирование полимерных матриц [33], обработка волокон в кислотах и щелочах для повышения адгезии [50, 54, 55], нанесение защитных слоев на волокно [49, 56], оптимизация составов, схем армирования и режимов прессования. Проведенный анализ позволяет существенно дополнить сведения о стойкости ПКМ, рассмотренные в работе [57].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ННФИ в рамках научного проекта № 20-53-56009.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Моисеев Ю.В., Заиков Г.Е. Химическая стойкость полимеров в агрессивных средах. М.: Химия, 1979. 288 с.
2. ГОСТ 12020–2018. Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред. М.: Стандартинформ, 2018. 21 с.
3. Мишуров К.С., Мишкин С.И. Влияние внешней среды на свойства углепластика ВКУ-39 // Труды ВИАМ. 2016. № 12 (48). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-8-8.
4. Мишуров К.С., Павловский К.А., Имамединов Э.Ш. Влияние внешней среды на свойства углепластика ВКУ-27Л // Труды ВИАМ. 2018. № 3 (63). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-60-67.
5. Курносов А.О., Мельников Д.А., Соколов И.И. Стеклопластики конструкционного назначения для авиастроения // Труды ВИАМ. 2015. № 8. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.
6. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Ямщикова Г.А. Влияние внешней среды на свойства органопластика, полученного методом пропитки под давлением (RTM) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4 (37). С. 72–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-72-78.
7. Кан А.Ч., Кулагина Г.С., Аюпов Т.Р., Железина Г.Ф. Влияние факторов внешней среды на характеристики антифрикционного органопластика Оргалон АФ-1М // Труды ВИАМ. 2022. № 3 (109). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-91-101.
8. ASTM D 543-21. Standard practices for evaluating the resistance of plastics to chemical reagents. ASTM International, 2021. 8 p.
9. ISO 175:2010. Plastics – Methods of test for the determination of the effects of immersion in liquid chemicals. International Organization for Standardizations, 2021. 20 p.
10. ISO 4599:1986. Plastics – Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) – Bent strip method. International Organization for Standardizations. 1986. 6 p.
11. Kim G., He Y., Kulkarni S., Sterkenburg R. The influence of aircraft fluid ingress on tensile properties of aramid fiber composites // Advanced Composite Materials. 2021. Vol. 30. No. 4. P. 365–379.
12. Kumarasamy S., Mazlan N.M., Abidin M.S.Z., Anjang A. Influence of Fuel Absorption on the Mechanical Properties of Glass-Fiber-Reinforced Epoxy Laminates // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 2020. Vol. 32. No. 8. P. 548–554.
13. Ren G., Zhu X., Men X. et al. The effect of oil fouling on the mechanical and tribological properties of nomex fabric/phenolic composite // Journal of Composite Materials. 2016. Vol. 50. No. 3. P. 427–432.
14. Sala G. Composite degradation due to fluid absorption // Composites. Part B: Engineering. 2000. Vol. 31. No. 5. P. 357–373.
15. Khagendra K., Yadav S., Lohchab D. Influence of Aviation Fuel on Mechanical properties of Glass Fiber-Reinforced Plastic Composite // International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. 2016. Vol. 3. No. 4. P. 58–65.

16. Kim G., Sterkenburg R. Investigating the effects aviation fluids have on the flatwise compressive strength of Nomex® honeycomb core material // *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2021. Vol. 23. No. 1. P. 365–382.
17. De Souza L.R., Marques A.T., D’Almeida J.R.M. Effects of aging on water and lubricating oil on the creep behavior of a GFRP matrix composite // *Composite Structures*. 2017. Vol. 168. P. 285–291.
18. Condruz M., Paraschiv A., Pușcașu C., Sebastian Vintilă I. Tensile behavior of humid aged advanced composites for helicopter external fuel tank development // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 145. Art. 02004.
19. Sugita Y., Winkelmann C., La Saponara V. Environmental and chemical degradation of carbon/epoxy lap joints for aerospace applications, and effects on their mechanical performance // *Composites Science and Technology*. 2010. Vol. 70. No. 5. P. 829–839.
20. Rider A., Yeo E. *The Chemical Resistance of Epoxy Adhesive Joints Exposed to Aviation Fuel and its Additives*. New York: Sciences, 2005. 29 p.
21. Genanu M.H.B.H. Study the Effect of Immersion in Gasoline and Kerosene on Fatigue Behavior for Epoxy Composites Reinforcement with Glass Fiber // *The Fifth Scientific Conference of University of Wasit (October 18–19, 2011)*. 2011. P. 1–10.
22. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic Aging of Aviation Polymer Composite Materials: I. Influence of Significant Factors // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. Vol. 2020. No. 4. P. 364–372.
23. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic Aging of Aviation Polymer Composite Materials: II. Development of Methods for Studying the Early Stages of Aging // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. Vol. 2020. No. 10. P. 1088–1094.
24. Startsev V.O., Lebedev M.P., Frolov A.S., Nizina T.A. Relationship between the deformability and fractographic characteristics of fracture surfaces of epoxy polymers // *Doklady Physical Chemistry*. 2017. Vol. 476. No. 1. P. 149–152.
25. Startsev O.V., Vapirov Y.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of Glass-Transition Temperatures for Epoxy Polymers Obtained by Methods of Thermal Analysis // *Mechanics of Composite Materials*. 2020. Vol. 56. No. 2. P. 227–240.
26. Petrov M.G., Lebedev M.P., Startsev O.V., Kopyrin M.M. Effect of Low Temperatures and Moisture on the Strength Performance of Carbon Fiber Reinforced Plastic // *Doklady Physical Chemistry*. 2021. Vol. 500. No. 1. P. 85–91.
27. Kablov E.N., Startsev V.O. The Influence of Internal Stresses on the Aging of Polymer Composite Materials: a Review // *Mechanics of Composite Materials*. 2021. Vol. 57. No. 5. P. 565–576.
28. Николаев Е.В., Славин А.В., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы (к 120-летию Г.В. Акимова) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 9 (103). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-117-130.
29. Amaro A.M., Reis P.N.B., Neto M.A., Louro C. Effects of alkaline and acid solutions on glass/epoxy composites // *Polymer Degradation and Stability*. 2013. Vol. 98. No. 4. P. 853–862.
30. Amaro A.M., Reis P.N.B., Neto M.A., Louro C. Effect of different acid solutions on glass/epoxy composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2013. Vol. 32. No. 14. P. 1018–1029.
31. Cabral-Fonseca S., Nunes J.P., Rodrigues M.P., Eusébio M.I. Durability of carbon fibre reinforced polymer laminates used to reinforced concrete structures // *Science and Engineering of Composite Materials*. 2011. Vol. 18. No. 4. P. 201–207.
32. Uthaman A., Xian G., Thomas S. et al. Durability of an epoxy resin and its carbon fiber-reinforced polymer composite upon immersion in water, acidic, and alkaline solutions // *Polymers*. 2020. Vol. 12. No. 3. Art. 614.
33. Kattaguri R., Fulmali A.O., Prusty R.K., Ray B.C. Effects of acid, alkaline, and seawater aging on the mechanical and thermomechanical properties of glass fiber/epoxy composites filled with carbon nanofibers // *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. Vol. 137. No. 10. Art. 48434.
34. Ji Y., Kim Y.J. Effects of Sulfuric Acid on Durability Characteristics of CFRP Composite Sheets // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. Vol. 29. No. 10. Art. 04017159.

35. Bazli M., Ashrafi H., Oskouei A.V. Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles // *Composites. Part B: Engineering*. 2016. Vol. 99. P. 203–215.
36. Benmokrane B., Elgabbas F., Ahmed E.A., Cousin P. Characterization and Comparative Durability Study of Glass/Vinylester, Basalt/Vinylester, and Basalt/Epoxy FRP Bars // *Journal of Composites for Construction*. 2015. Vol. 19. No. 6. Art. 04015008.
37. Li H., Xian G., Wu J. Durability and Fatigue Performances of Basalt Fiber/Epoxy Reinforcing Bars // *Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. 2012. P. 1–8.
38. Garg M., Sharma S., Mehta R. Carbon nanotube-reinforced glass fiber epoxy composite laminates exposed to hygrothermal conditioning // *Journal of Materials Science*. 2016. Vol. 51. No. 18. P. 8562–8578.
39. Jain N., Singh V.K., Chauhan S. Review on effect of chemical, thermal, additive treatment on mechanical properties of basalt fiber and their composites // *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2017. Vol. 26. No. 5–6. P. 205–211.
40. Wei B., Cao H., Song S. Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment // *Materials and Design*. 2010. Vol. 31. No. 9. P. 4244–4250.
41. Coricciati A., Corvaglia P., Mosheyev G. Durability of fibers in aggressive alkaline environment // *ICCM International Conferences on Composite Materials*. 2009. P. 1–10.
42. Dhand V., Mittal G., Rhee K.Y. et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites // *Composites. Part B: Engineering*. 2015. Vol. 73. P. 166–180.
43. Lu Z., Xian G. Resistance of basalt fibers to elevated temperatures and water or alkaline solution immersion // *Polymer Composites*. 2018. Vol. 39. No. 7. P. 2385–2393.
44. Wang M., Zhang Z., Li Y. et al. Chemical durability and mechanical properties of alkali-proof basalt fiber and its reinforced epoxy composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2008. Vol. 27. No. 4. P. 393–407.
45. Quagliarini E., Monni F., Bondioli F., Lenci S. Basalt fiber ropes and rods: Durability tests for their use in building engineering // *Journal of Building Engineering*. 2016. Vol. 5. P. 142–150.
46. Arias J.P.M., Bernal C., Vázquez A., Escobar M.M. Aging in Water and in an Alkaline Medium of Unsaturated Polyester and Epoxy Resins: Experimental Study and Modeling // *Advances in Polymer Technology*. 2018. Vol. 37. No. 2. P. 450–460.
47. Pan W., Zhang D., Lu M. et al. Study on the Morphology Characteristics of Epoxy Resin of Composite Insulator under Acid-heat Condition // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2213. No. 1. Art. 012010.
48. Cousin P., Hassan M., Vijay P.V. et al. Chemical resistance of carbon, basalt, and glass fibers used in FRP reinforcing bars // *Journal of Composite Materials*. 2019. Vol. 53. No. 26–27. P. 3651–3670.
49. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K. The effects of aggressive environments on the mechanical properties of basalt plastics // *Heliyon*. 2020. Vol. 6. No. 3. Art. e03481.
50. Manikandan V., Winowlin Jappes J.T., Suresh Kumar S.M., Amuthakkannan P. Investigation of the effect of surface modifications on the mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer composites // *Composites. Part B: Engineering*. 2012. Vol. 43. No. 2. P. 812–818.
51. Wu G., Wang X., Wu Z. et al. Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments // *Journal of Composite Materials*. 2015. Vol. 49. No. 7. P. 873–887.
52. Славин А.В., Старцев О.В. Свойства авиационных стеклопластиков и углепластиков на ранней стадии климатического воздействия // *Труды ВИАМ*. 2018. № 9 (69). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-71-82.
53. Kablov E.N., Startsev O.V., Panin S.V. Moisture transfer in carbon-fiber-reinforced plastic with degraded surface // *Doklady Physical Chemistry*. 2015. Vol. 461. No. 2. P. 80–83.
54. Сидорина А.И. Модификация поверхности углеродных армирующих наполнителей для полимерных композиционных материалов электрохимической обработкой (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 4 (110). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-61-74.

55. Pandian A., Vairavan M., Jebbas Thangaiah W.J., Uthayakumar M. Effect of Moisture Absorption Behavior on Mechanical Properties of Basalt Fibre Reinforced Polymer Matrix Composites // *Journal of Composites*. 2014. Vol. 2014. Art. ID 587980.
56. Lipatov Y.V., Gutnikov S.I., Manylov M.S. et al. High alkali-resistant basalt fiber for reinforcing concrete // *Materials and Design*. 2015. Vol. 73. P. 60–66.
57. 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.

References

1. Moiseev Yu.V., Zaikov G.E. *Chemical resistance of polymers in aggressive environments*. Moscow: Khimiya, 1979, 288 p.
2. State Standard 12020–2018. *Plastics. Methods for determining the resistance to the action of chemical media*. Moscow: Standartinform, 2018, 21 p.
3. Mishurov K.S., Mishkin S.I. Environmental effect on properties of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) VKU-39. *Trudy VIAM*, 2016, no. 12 (48), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 31, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-8-8.
4. Mishurov K.S., Pavlovskiy K.A., Imametdinov E.Sh. fiber reinforced plastic VKU-27L. *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (63), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 31, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-60-67.
5. Kurnosov A.O., Melnikov D.A., Sokolov I.I. Structural glass-reinforced plastics purposed for aviation industry. *Trudy VIAM*, 2015, no. 8, paper no. 08. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: May 31, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.
6. Voynov S.I., Zhelezina G.F., Solovyeva N.A., Yamshchikova G.A. Environmental effects on properties of aramid fiber reinforced plastic manufactured by RTM method. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 72–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-72-78.
7. Kan A.Ch., Kulagina G.S., Ayupov T.R., Zhelezina G.F. The influence of environmental factors on the characteristics of antifriction organoplasty Orgalon AF-1M. *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (109), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 5, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-91-101.
8. ASTM D 543-21. *Standard practices for evaluating the resistance of plastics to chemical reagents*. ASTM International, 2021, 8 p.
9. ISO 175:2010. *Plastics – Methods of test for the determination of the effects of immersion in liquid chemicals*. International Organization for Standardization, 2021, 20 p.
10. ISO 4599:1986. *Plastics – Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) – Bent strip method*. International Organization for Standardization, 1986, 6 pp.
11. Kim G., He Y., Kulkarni S., Sterkenburg R. The influence of aircraft fluid ingestion on tensile properties of aramid fiber composites. *Advanced Composite Materials*, 2021, vol. 30, no. 4, pp. 365–379.
12. Kumarasamy S., Mazlan N.M., Abidin M.S.Z., Anjang A. Influence of Fuel Absorption on the Mechanical Properties of Glass-Fiber-Reinforced Epoxy Laminates. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2020, vol. 32, no. 8, pp. 548–554.
13. Ren G., Zhu X., Men X. et al. The effect of oil fouling on the mechanical and tribological properties of nomex fabric/phenolic composite. *Journal of Composite Materials*, 2016, vol. 50, no. 3, pp. 427–432.
14. Sala G. Composite degradation due to fluid absorption. *Composites. Part B: Engineering*, 2000, vol. 31, no. 5, pp. 357–373.
15. Khagendra K., Yadav S., Lohchab D. Influence of Aviation Fuel on Mechanical properties of Glass Fiber-Reinforced Plastic Composite. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 2016, vol. 3, no. 4, pp. 58–65.
16. Kim G., Sterkenburg R. Investigating the effects aviation fluids have on the flatwise compressive strength of Nomex® honeycomb core material. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 365–382.
17. De Souza L.R., Marques A.T., D’Almeida J.R.M. Effects of aging on water and lubricating oil on the creep behavior of a GFRP matrix composite. *Composite Structures*, 2017, vol. 168, pp. 285–291.

18. Condruz M., Paraschiv A., Pușcașu C., Sebastian Vintilă I. Tensile behavior of humid aged advanced composites for helicopter external fuel tank development. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 145, art. 02004.
19. Sugita Y., Winkelmann C., La Saponara V. Environmental and chemical degradation of carbon/epoxy lap joints for aerospace applications, and effects on their mechanical performance. *Composites Science and Technology*, 2010, vol. 70, no. 5, pp. 829–839.
20. Rider A., Yeo E. *The Chemical Resistance of Epoxy Adhesive Joints Exposed to Aviation Fuel and its Additives*. New York: Sciences, 2005, 29 p.
21. Genanu M.H.B.H. Study the Effect of Immersion in Gasoline and Kerosene on Fatigue Behavior for Epoxy Composites Reinforcement with Glass Fiber. *The Fifth Scientific Conference of University of Wasit*, October 18–19, 2011, pp. 1–10.
22. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic Aging of Aviation Polymer Composite Materials: I. Influence of Significant Factors. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2020, vol. 2020, no. 4, pp. 364–372.
23. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic Aging of Aviation Polymer Composite Materials: II. Development of Methods for Studying the Early Stages of Aging. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2020, vol. 2020, no. 10, pp. 1088–1094.
24. Startsev V.O., Lebedev M.P., Frolov A.S., Nizina T.A. Relationship between the deformability and fractographic characteristics of fracture surfaces of epoxy polymers. *Doklady Physical Chemistry*, 2017, vol. 476, no. 1, pp. 149–152.
25. Startsev O.V., Vapirov Y.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of Glass-Transition Temperatures for Epoxy Polymers Obtained by Methods of Thermal Analysis. *Mechanics of Composite Materials*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 227–240.
26. Petrov M.G., Lebedev M.P., Startsev O.V., Kopyrin M.M. Effect of Low Temperatures and Moisture on the Strength Performance of Carbon Fiber Reinforced Plastic. *Doklady Physical Chemistry*, 2021, vol. 500, no. 1, pp. 85–91.
27. Kablov E.N., Startsev V.O. The Influence of Internal Stresses on the Aging of Polymer Composite Materials: a Review. *Mechanics of Composite Materials*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 565–576.
28. Nikolaev E.V., Slavin A.V., Startsev V.O., Laptev A.B. Modern approaches to assessing the impact of external factors on materials and complex technical systems (to the 120th anniversary of G.V. Akimov). *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 31, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-117-130.
29. Amaro A.M., Reis P.N.B., Neto M.A., Louro C. Effects of alkaline and acid solutions on glass/epoxy composites. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, vol. 98, no. 4, pp. 853–862.
30. Amaro A.M., Reis P.N.B., Neto M.A., Louro C. Effect of different acid solutions on glass/epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2013, vol. 32, no. 14, pp. 1018–1029.
31. Cabral-Fonseca S., Nunes J.P., Rodrigues M.P., Eusébio M.I. Durability of carbon fibre reinforced polymer laminates used to reinforced concrete structures. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2011, vol. 18, no. 4, pp. 201–207.
32. Uthaman A., Xian G., Thomas S. et al. Durability of an epoxy resin and its carbon fiber-reinforced polymer composite upon immersion in water, acidic, and alkaline solutions. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 3, art. 614.
33. Kattaguri R., Fulmali A.O., Prusty R.K., Ray B.C. Effects of acid, alkaline, and seawater aging on the mechanical and thermomechanical properties of glass fiber/epoxy composites filled with carbon nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, vol. 137, no. 10, art. 48434.
34. Ji Y., Kim Y.J. Effects of Sulfuric Acid on Durability Characteristics of CFRP Composite Sheets. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, vol. 29, no. 10, art. 04017159.
35. Bazli M., Ashrafi H., Oskouei A.V. Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles. *Composites. Part B: Engineering*, 2016, vol. 99, pp. 203–215.
36. Benmokrane B., Elgabbas F., Ahmed E.A., Cousin P. Characterization and Comparative Durability Study of Glass/Vinylester, Basalt/Vinylester, and Basalt/Epoxy FRP Bars. *Journal of Composites for Construction*, 2015, vol. 19, no. 6, art. 04015008.
37. Li H., Xian G., Wu J. Durability and Fatigue Performances of Basalt Fiber/Epoxy Reinforcing Bars. *Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, 2012, pp. 1–8.
38. Garg M., Sharma S., Mehta R. Carbon nanotube-reinforced glass fiber epoxy composite laminates exposed to hygrothermal conditioning. *Journal of Materials Science*, 2016, vol. 51, no. 18, pp. 8562–8578.

39. Jain N., Singh V.K., Chauhan S. Review on effect of chemical, thermal, additive treatment on mechanical properties of basalt fiber and their composites. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 2017, vol. 26, no. 5–6, pp. 205–211.
40. Wei B., Cao H., Song S. Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. *Materials and Design*, 2010, vol. 31, no. 9, pp. 4244–4250.
41. Coricciati A., Corvaglia P., Mosheyev G. Durability of fibers in aggressive alkaline environment. *ICCM International Conferences on Composite Materials*, 2009, pp. 1–10.
42. Dhand V., Mittal G., Rhee K.Y. et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites. Part B: Engineering*, 2015, vol. 73, pp. 166–180.
43. Lu Z., Xian G. Resistance of basalt fibers to elevated temperatures and water or alkaline solution immersion. *Polymer Composites*, 2018, vol. 39, no. 7, pp. 2385–2393.
44. Wang M., Zhang Z., Li Y. et al. Chemical durability and mechanical properties of alkali-proof basalt fiber and its reinforced epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2008, vol. 27, no. 4, pp. 393–407.
45. Quagliarini E., Monni F., Bondioli F., Lenci S. Basalt fiber ropes and rods: Durability tests for their use in building engineering. *Journal of Building Engineering*, 2016, vol. 5, pp. 142–150.
46. Arias J.P.M., Bernal C., Vázquez A., Escobar M.M. Aging in Water and in an Alkaline Medium of Unsaturated Polyester and Epoxy Resins: Experimental Study and Modeling. *Advances in Polymer Technology*, 2018, vol. 37, no. 2, pp. 450–460.
47. Pan W., Zhang D., Lu M. et al. Study on the Morphology Characteristics of Epoxy Resin of Composite Insulator under Acid-heat Condition. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2213, no. 1, art. 012010.
48. Cousin P., Hassan M., Vijay P.V. et al. Chemical resistance of carbon, basalt, and glass fibers used in FRP reinforcing bars. *Journal of Composite Materials*, 2019, vol. 53, no. 26–27, pp. 3651–3670.
49. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K. The effects of aggressive environments on the mechanical properties of basalt plastics. *Heliyon*, 2020, vol. 6, no. 3, art. e03481.
50. Manikandan V., Winowlin Jappes J.T., Suresh Kumar S.M., Amuthakkannan P. Investigation of the effect of surface modifications on the mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer composites. *Composites. Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, no. 2, pp. 812–818.
51. Wu G., Wang X., Wu Z. et al. Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments. *Journal of Composite Materials*, 2015, vol. 49, no. 7, pp. 873–887.
52. Slavin A.V., Startsev O.V. Properties of aircraft glass- and carbonfibers reinforced plastics at the early stage of natural weathering. *Trudy VIAM*, 2018, no. 9 (69), paper no. 8. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 31, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-71-82.
53. Kablov E.N., Startsev O.V., Panin S.V. Moisture transfer in carbon-fiber-reinforced plastic with degraded surface. *Doklady Physical Chemistry*, 2015, vol. 461, no. 2, pp. 80–83.
54. Sidorina A.I. Modification of the surface of carbon reinforcing fillers for polymer composite materials by electrochemical treatment (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 31, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-61-74.
55. Pandian A., Vairavan M., Jebbas Thangaiah W.J., Uthayakumar M. Effect of Moisture Absorption Behavior on Mechanical Properties of Basalt Fibre Reinforced Polymer Matrix Composites. *Journal of Composites*, 2014, vol. 2014, art. ID 587980.
56. Lipatov Y.V., Gutnikov S.I., Manylov M.S. et al. High alkali-resistant basalt fiber for reinforcing concrete. *Materials and Design*, 2015, vol. 73, pp. 60–66.
57. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.

Информация об авторах

Старцев Валерий Олегович, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Valery O. Startsev, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 10.06.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.06.2022.
The article was submitted 10.06.2022; approved and accepted for publication after reviewing 15.06.2022.