

Научная статья

УДК 539.4:620.197

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-96-106

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКА С ПОКРЫТИЯМИ ПОСЛЕ 8 И 13 ЛЕТ СТАРЕНИЯ В УМЕРЕННО ТЕПЛОМ КЛИМАТЕ* Часть 3. Состояние полимерной матрицы композита

О.В. Старцев^{1, 2}, Т.В. Коваль¹, Е.В. Двирная¹, Г.В. Корниенко¹, И.М. Велигодский¹

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия; administration@iptpn.ysn.ru

Аннотация. Исследованы физико-химические превращения в полимерной матрице углепластика КМКУ-2м.120 методом динамического механического анализа. При климатических испытаниях в течение 8 и 13 лет пластины углепластика были защищены лакокрасочными покрытиями ВЭ-46 и АС-1115 девяти цветов. После снятия с экспозиции с поверхности пластин удалены покрытия, измерены температурные зависимости динамического модуля упругости и динамического модуля потерь образцов в двух состояниях: после сушки и после увлажнения при температуре 60 °С.

Ключевые слова: углепластик, лакокрасочное покрытие, климатическое старение, динамический механический анализ, температура стеклования, деструкция, пластификация

Для цитирования: Старцев О.В., Коваль Т.В., Двирная Е.В., Корниенко Г.В., Велигодский И.М. Исследование свойств углепластика с покрытиями после 8 и 13 лет старения в умеренно теплом климате. Часть 3. Состояние полимерной матрицы композита // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-96-106.

Scientific article

RESEARCH OF THE PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC WITH COATINGS AFTER 8 AND 13 YEARS OF AGING IN A MODERATELY WARM CLIMATE Part 3. Condition of the polymer matrix of a composite

O.V. Startsev^{1, 2}, T.V. Koval¹, E.V. Dvirnaya¹, G.V. Kornienko¹, I.M. Veligodsky¹

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

²V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences Federal state Budgetary Institution of Science, Yakutsk, Russia; administration@iptpn.ysn.ru

Abstract. The third part of the article studies physicochemical transformations in the polymer matrix of carbon fiber reinforced plastic КМКУ-2м.120 by means of dynamic mechanical analysis. During 8- and 13-year climatic exposure, carbon fiber reinforced plastic plates were protected with paint and varnish coatings VE-46 and AC-1115 of nine colors. After removal from the exposure, the coatings were removed from the surface of the plates, and the temperature dependences of the dynamic storage modulus and the dynamic loss modulus were measured in two states: after drying and after moistening the samples at 60 °С.

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 10 (140), 2024; часть 2 – см. «Труды ВИАМ», № 11 (141), 2024.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic, paint and varnish coating, climatic aging, dynamic mechanical analysis, glass transition temperature, destruction, plasticization

For citation: Startsev O.V., Koval T.V., Dvirnaya E.V., Kornienko G.V., Veligodsky I.M. Research of the properties of carbon fiber reinforced plastic with coatings after 8 and 13 years of aging in a moderately warm climate. Part 3. Condition of the polymer matrix of a composite. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-96-106.

Введение

Для выяснения причин ухудшения механических показателей R (пределов прочности при растяжении, сжатии, изгибе, сдвиге) полимерных композиционных материалов (ПКМ) при старении в лабораторных или натуральных условиях [1] используются микроскопия [2], инфракрасная спектроскопия [3, 4], профилометрия [5], гравиметрия [6] и другие методы, среди которых широкое распространение получил метод динамического механического анализа (ДМА) [7].

Метод DMA основан на измерении динамических модулей упругости E' , динамических модулей потерь E'' , тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ при растяжении, изгибе и сдвиге при частоте от 0,5 до 10 Гц в широком интервале температур, включающем α -переход (переход из стеклообразного в высокоэластическое состояние полимерных матриц ПКМ). Измерения проводятся при малых механических нагрузках, обеспечивающих линейную вязкоупругость в границах закона Гука [8]. Достоинством метода DMA является возможность температурных измерений на одном образце без его разрушения, что повышает точность и достоверность получаемых результатов. Методические основы определения температуры стеклования полимерных матриц T_g (одного из наиболее востребованных показателей ПКМ) и границ α -перехода рассмотрены в работе [9].

Возможности метода DMA для интерпретации результатов термовлажностного старения ПКМ представлены в работе [10], посвященной исследованию состояния эпоксидного полимера DGEBA и углепластика на его основе после выдержки в течение 4 и 8 недель в дистиллированной воде при температурах 30 и 70 °С. Вода и температура обеспечивают синергетический эффект пластификации, молекулярной дегградации (гидролиза), реакции доотверждения и образования псевдопоперечных водородных связей, изменяя степень сшивки. Вода ослабляет межмолекулярное взаимодействие на границе волокна с матрицей. Кроме того, обнаружены эффекты сшивки и деструкции полимерной матрицы после выдержки углепластика при температурах 70 и 30 °С по изменению E' в высокоэластическом состоянии. Пик $\text{tg}\delta$ сместился к более низкой температуре из-за пластификации влагой гидрофильных участков макромолекул и разделился на два или три отдельных максимума, демонстрируя гетерогенность связующего, вызванную старением. Подобную гетерогенность пика $\text{tg}\delta$ наблюдали во многих исследованиях, например в работах [11–13]. Она связана с десорбцией влаги из образцов при нагреве в измерительной камере. Форма и расположение соседних α -пиков на температурной зависимости $\text{tg}\delta(T)$ определяются количеством накопленной влаги и скоростью нагрева [9], влияющей на ее удаление.

Таким образом, зависимости $E'(T)$ и $\text{tg}\delta(T)$ отражают обратимые и необратимые изменения свойств и структуры ПКМ, расширяют возможности обоснования молекулярного механизма старения [14].

Авторы работ [10, 15] предположили вероятность структурообразования в сетчатых полимерных матрицах при DMA вследствие активирующего влияния влаги при α -переходе. Поэтому особый интерес представляют примеры необратимых изменений структуры полимерных матриц [16, 17], когда вода, как значимый фактор старения [18],

перед началом измерений методом ДМА удалена из объема тестируемых образцов для предотвращения возможных дополнительных превращений, активируемых влагой, при нагреве в измерительной камере прибора.

В предыдущей части данной статьи рассмотрено состояние лакокрасочных покрытий (ЛКП), нанесенных на углепластик КМКУ-2м.120, после 8 и 13 лет экспозиции в умеренно теплом климате. Выявлена стабильность покрытия ВЭ-46 темно-зеленого, светло-серого и изумрудного цветов. Наиболее уязвимыми к процессам фотохимической активности оказались красная эмаль ВЭ-46 и желтая эмаль АС-1115, у которых шероховатость поверхности возросла в 1,5–2 раза. В результате длительного климатического воздействия температура стеклования T_g уменьшилась в покрытии ВЭ-46 и возросла в покрытии АС-1115. По данным работы [19], методом ДМА обнаружены признаки микрофазового расслоения расплавленного связующего ВСК-14-2м стеклопластика ВПС-53К после 12 мес. климатического воздействия.

Можно ожидать, что ЛКП препятствуют старению углепластика. Для оценки эффективности их защиты от климатического воздействия на свойства композита целесообразно использовать метод ДМА применительно к углепластику. Поэтому целью заключительной части данной статьи является исследование температуры стеклования и границ α -перехода эпоксидной матрицы углепластика КМКУ-2м.120 с учетом пластифицирующего влияния влаги.

Материалы и методы

В табл. 1 указаны основные сведения об углепластике КМКУ-2м.120 – конструкционном материале из класса клеевых препрегов [20]. Наполнителем этого материала является углеродная лента ЭЛУР-П, матрицей – эпоксидное связующее ВКС-14-2м [21, 22]. Пластины углепластика защищены фторэпоксидной (ВЭ-46) [23] и акриловой (АС-1115) [24] эмалями, нанесенными поверх слоя грунтовки ЭП-0104. Покрытия имели толщину 95 ± 5 мкм, не превосходящую 3 % от толщины пластин. Пластины Г1–Г9 отличались цветом использованных пигментов: светло-серый, серо-голубой, изумрудный, голубой, темно-зеленый, красный, оранжевый, желтый и синий соответственно. Пластины Г0 экспонировали в течение 8 лет без защитного покрытия.

Таблица 1

Характеристики пластин углепластика КМКУ-2м.120, исследованные методом динамического механического анализа

Шифр пластины	Продолжительность экспозиции, лет	Защитное лакокрасочное покрытие	Влагосодержание после экспозиции, %	Толщина пластины, мм	Коэффициент диффузии влаги, мм ² /сут
Г0	8	–	0,67	5,50	0,130
Г1	13	ВЭ-46	1,05	3,31	0,034
Г2	8		0,86	3,18	0,035
Г3	8		0,76	3,54	0,044
Г4	13		0,99	3,70	0,042
Г5	13		0,68	3,25	0,038
Г6	6		0,78	3,25	0,034
Г7	13		0,88	3,38	0,050
Г8	8	АС-1115	0,74	2,92	0,042
Г9	8		0,73	3,56	0,046

После экспонирования на открытом атмосферном стенде в условиях умеренно теплого климата в течение 8 и 13 лет определено влагосодержание пластин Г0–Г9 путем высушивания при температуре 60 °С с контролем массы при взвешивании на аналитических весах с точностью 10^{-4} г. Показано, что влагосодержание w изменяется от

0,67 до 1,05 %, причем меньше всего влаги накоплено в пластине Г0 из-за более высокой скорости транспорта воды (коэффициент диффузии влаги в этой пластине в 3 раза превосходит значения соответствующего показателя в пластинах, защищенных ЛКП).

Измерения динамического модуля упругости E' и динамического модуля потерь E'' проведены в интервале температур от 20 до 230 °С с помощью анализатора DMA 242D при частоте изгибных колебаний 1 Гц со скоростью нагрева 2 °С/мин. Использовали образцы размером 50×10 мм и толщиной 3,2±0,2 мм после удаления ЛКП. Исследовано два состояния углепластика: после сушки при температуре 60 °С и после влагонасыщения при относительной влажности 100 % и температуре 60 °С.

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

Результаты и обсуждение

Основное внимание в этой работе обращено на α -переход эпоксидной матрицы ВКС-14-2м, который исследован в соответствии с рекомендациями работы [9]. Для этого определены температурные зависимости $E'(T)$ и $E''(T)$, типичный вид которых представлен на рис. 1 для образцов, вырезанных из пластины Г1 с покрытием ВЭ-46 светлого цвета, экспонированной в течение 13 лет.

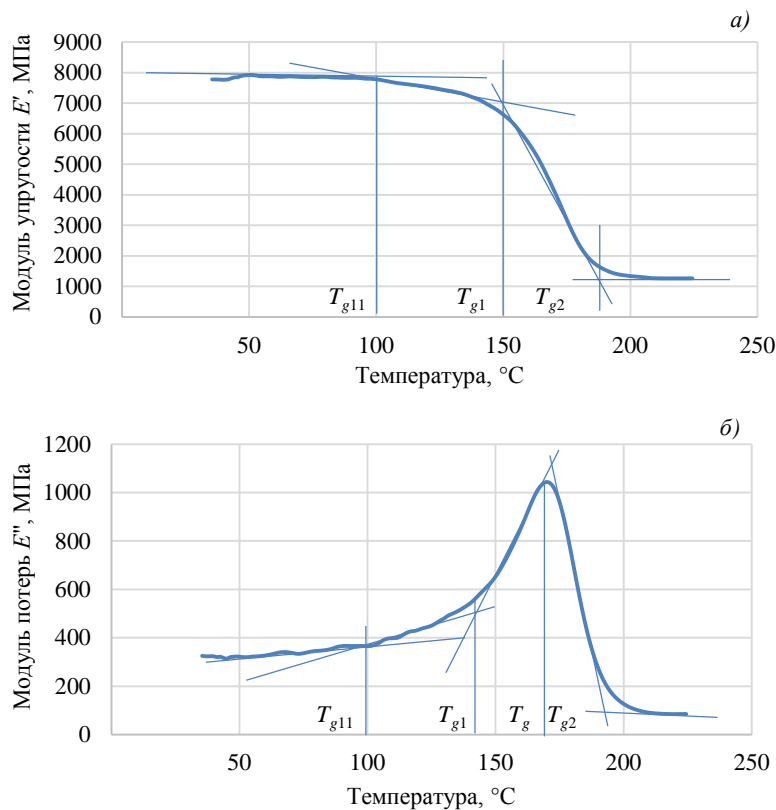


Рис. 1. Температурные зависимости динамического модуля упругости (а) и динамического модуля потерь (б) образцов углепластика, вырезанных из пластины Г1, после удаления покрытия ВЭ-46 и сушки

С учетом зависимости $E'(T)$, представленной на рис. 1, а, определяют нижняя (T_{g1}) и верхняя (T_{g2}) границы α -перехода как точки пересечения базовых линий и линий, экстраполирующих линейное изменение динамического модуля упругости в начале и конце перехода эпоксидной матрицы из стеклообразного в высокоэластическое состояние [9]. Подобным образом эти же температурные переходы можно определить по

зависимости $E''(T)$, представленной на рис. 1, б, причем в дополнение к T_{g1} и T_{g2} также выявляется температура стеклования T_g как температура максимального значения модуля динамических потерь. В идеальном случае эти характеристические температуры, определенные двумя способами, должны совпадать [9], однако на практике всегда возникают небольшие отличия из-за погрешностей эксперимента и экстраполяции. Поэтому в табл. 2 представлены значения температур α -перехода, определенные двумя указанными способами.

Таблица 2

Характеристические температурные переходы в области стеклования эпоксидной матрицы ВКС-14-2м, определенные методом динамического механического анализа, после удаления лакокрасочного покрытия с поверхности углепластика КМКУ-2м.120 и сушки образцов

Шифр пластины	Температуры переходов, °С						
	T_{g11} по зависимости		T_{g1} по зависимости		T_g по зависимости $E''(T)$	T_{g2} по зависимости	
	$E'(T)$	$E''(T)$	$E'(T)$	$E''(T)$		$E'(T)$	$E''(T)$
По данным работы [21]	–	–	160	160	174	185	–
Г0	95	107	147	150	172	192	195
Г1	100	102	152	145	170	186	193
Г2	138	–	165	155	177	194	203
Г3	117	–	160	157	177	193	201
Г4	98	–	158	154	174	191	200
Г5	125	–	163	161	179	196	204
Г6	103	95	147	146	173	193	201
Г7	93	101	153	156	171	186	194
Г8	95	105	156	153	176	195	201
Г9	95	–	160	157	178	194	204

Измерения, проведенные методом ДМА, выявили следующую общую закономерность. Температурному переходу T_{g1} предшествует еще один аналогичный переход T_{g11} , который отсутствует на температурной зависимости эпоксидной матрицы ВКС-14-2м в материале, не подвергнутом старению [21]. Причину появления температурного перехода T_{g11} можно понять, анализируя зависимость $E''(T)$ углепластика, экспонированного в течение 8 лет без ЛКП (рис. 2). Видно, что в результате климатического воздействия в дополнение к основному релаксационному α -максимуму при температуре 172 °С сформировался дополнительный, менее выраженный, α_1 -максимум при температуре 140 °С, который можно считать индикатором микрофазового расслоения полимерной матрицы.

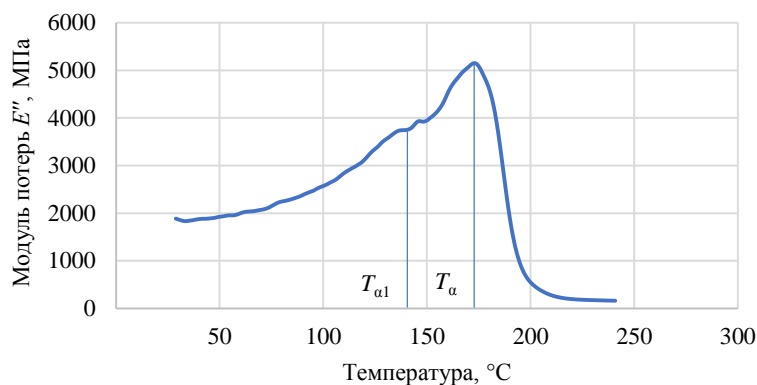


Рис. 2. Температурная зависимость динамического модуля потерь образца углепластика, вырезанного из пластины, экспонированной без покрытия, после сушки

По данным работы [25], при климатическом старении в полимерной матрице углепластика происходит частичная деструкция сшитых макромолекул, сопровождающаяся увеличением свободного объема. В результате этого ослабевает межмолекулярное взаимодействие и часть кинетических элементов сетчатого полимера выделяется в отдельную микрофазу, способную приобретать сегментальную подвижность при более низкой температуре. Дополнительный α_1 -максимум на зависимости $E''(T)$ наиболее отчетливо показан для углепластика, экспонированного без защиты ЛКП, т. е. для материала с наиболее выраженным старением (рис. 2). Для случаев ослабления старения с помощью защитных ЛКП α_1 -максимум выражен менее отчетливо в виде плеча на низкотемпературной ветви α -максимума (рис. 1, б). Однако температурный переход T_{g11} , соответствующий температуре начала α_1 -максимума, отчетливо проявляется на всех зависимостях $E'(T)$ и в половине случаев зависимостей $E''(T)$ (рис. 1, а; табл. 2).

Сравнение характеристических температур α -перехода позволяет оценить роль ЛКП в ослаблении деструкции полимерной матрицы. Деструкция макромолекул эпоксидной матрицы ВКС-14-2м пластины Г0 без ЛКП характеризуется понижением температур переходов T_{g11} до 95 °С и T_{g1} до 147 °С. Защитные покрытия частично препятствуют снижению T_{g11} и T_{g1} . Эффективность защиты зависит от полимерной основы покрытия и цвета пигмента. Вероятной причиной различий характеристических температур α -перехода является неодинаковый температурный режим пластин Г0–Г9, рассмотренный в работе [26], который зависит от цвета поверхности ПКМ.

За 8–13 лет старения акриловое покрытие АС-1115 не улучшило температуру T_{g11} в пластинах Г7–Г9 по сравнению с пластиной Г0, тогда как фторэпоксидное покрытие ВЭ-46 в пластинах Г2, Г3, Г5 повысило эту температуру до 117–138 °С. Из-за разрушения покрытия с пигментом красного цвета в пластине Г6 выявлена самая низкая температура перехода $T_{g1} = 147$ °С. Во всех пластинах температуры T_g и T_{g2} практически не изменились по сравнению с исходными значениями. Это является доказательством высокой климатической стойкости углепластика КМКУ-2м.120.

Метод ДМА позволил получить новую информацию о влиянии защитных ЛКП на эффект пластификации влагой эпоксидной матрицы углепластика. Основные результаты этого исследования представлены в табл. 3

Таблица 3

Влияние влаги на эпоксидную матрицу углепластика КМКУ-2м.120

Шифр пластины	E'_{30} / E'_{230}	G_{xy} , ГПа			$\Delta G_{xy} / \Delta w$, ГПа/%		T_g при увлажнении, °С	ΔT_g , °С
		без сушки	после сушки	после увлажнения	после сушки	после увлажнения		
Г1	6,1	4,35	4,94	4,04	0,56	0,19	118	52
Г2	6,3	5,60	6,17	4,93	0,66	0,30	123	54
Г3	6,1	4,27	4,45	3,85	0,24	0,20	134	43
Г4	6,9	3,58	3,71	3,17	0,13	0,22	134	40
Г5	6,6	4,41	4,78	4,09	0,55	0,23	129	50
Г6	8,3	5,30	5,85	5,03	0,71	0,32	106	67
Г7	8,0	4,92	5,30	4,48	0,43	0,20	120	51
Г8	6,0	4,98	5,47	4,52	0,67	0,21	120	56
Г9	6,3	4,12	4,32	3,74	0,28	0,15	129	49

Примечание. E'_{30} / E'_{230} – соотношение динамических модулей упругости при температурах 30 и 230 °С; G_{xy} – модуль сдвига в плоскости листа; $\Delta G_{xy} / \Delta w$ – соотношение изменений модуля упругости и влагосодержания.

По результатам измерений, выполненных методом ДМА, определен вклад эпоксидной матрицы в величину E' пластин с различными ЛКП. С учетом зависимостей $E'(T)$ сопоставлены соотношения динамических модулей упругости при температурах 30 и 230 °С (E'_{30}/E'_{230}). Такой прием позволяет оценить вклад эпоксидной матрицы в величину E' композита. Поскольку модуль упругости углеродного волокна стабилен [1, 20] и обеспечивает основной вклад в величину E' при температуре $T = 30$ °С, то его зависимость от эпоксидной матрицы будет заметна в ее высокоэластическом состоянии, т. е. при $T > T_{g2}$, например при 230 °С. Показано, что в пластинах Г6 и Г7 с покрытиями красного и оранжевого цветов величина соотношения E'_{30}/E'_{230} оказалась на 20 % больше, чем в пластинах Г8 и Г9, и приблизилась к значению 8,4 для пластины Г0, экспонированной без ЛКП. Следовательно, увеличение соотношения E'_{30}/E'_{230} обусловлено уменьшением E'_{230} из-за деструкции полимерной матрицы, которая оказалась больше в пластинах Г0, Г6, Г7.

Дополнительные ДМА-измерения увлажненных пластин углепластика позволили получить сведения о пластификации влагой эпоксидной матрицы ВКС-14-2м составленных образцов по температуре $T_g = T_\alpha$ на графиках зависимостей $E''(T)$. Из данных табл. 3 следует, что для большинства пластин температура этого максимума сместилась на 46 ± 6 °С. Только для пластины Г6 смещение увеличилось до 67 °С. По-видимому, повышенная деструкция матрицы в пластине Г6 привела к увеличению активности и количества гидрофильных групп, влияющих на температуру α -максимума пластифицированного полимера.

Для подтверждения роли ЛКП в ослаблении пластифицирующего влияния влаги на эпоксидную матрицу проведены измерения модуля сдвига в плоскости листа G_{xy} углепластика КМКУ-2м.120 по методике, рассмотренной в работе [27]. Показатель G_{xy} наиболее чувствителен к изменениям свойств полимерной компоненты композита. Для измерений использованы образцы без кондиционирования, а также после увлажнения и сушки. Мерой пластифицирующего действия выбран тангенс угла наклона $\psi = \Delta G_{xy}/\Delta w$ на линейной зависимости модуля сдвига $G_{xy}(w)$ [27]. Наибольшими значениями характеризуется эпоксидная матрица образца углепластика, вырезанного из пластины Г6, в режиме как сушки, так и увлажнения (табл. 3).

Заключения

Показатели температур α -перехода (перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние) эпоксидной матрицы, определенные методом ДМА, позволяют оценить способность ЛКП препятствовать деструкции полимерных цепей в эпоксидной матрице углепластика.

Из-за разрушения покрытия с пигментом красного цвета в пластине Г6 выявлена самая низкая температура α -перехода $T_{g1} = 147$ °С. Во всех других пластинах температуры практически не изменились по сравнению с исходными значениями, что подтверждает высокую климатическую стойкость углепластика КМКУ-2м.120.

Выявлено значительное различие показателей свойств ПКМ, содержащих накопленную влагу, и после ее удаления. Поэтому при исследовании влияния эксплуатационных факторов на свойства новых ПКМ необходимо сравнивать их показатели с учетом обратимых и необратимых изменений [28].

Метод ДМА перспективен для исследований микрофазового расслоения полимерных матриц ПКМ, вызванного деструкцией и пластификацией полимерных цепей, зависящей от условий старения и эффективности защиты ЛКП.

Данная работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00009, <https://rscf.ru/project/24-19-00009/>.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
2. Каблов Е.Н., Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
3. Андреева Н.П., Павлов М.Р., Николаев Е.В., Курносков А.О. Исследование влияния воздействия атмосферных факторов на свойства полимерного конструкционного стеклопластика на цианэфирной основе в естественных условиях холодного, умеренного и тропического климата // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (75). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-105-114.
4. Khajeh A., Mustapha F., Sultan M.T.H. et al. The effect of thermooxidative aging on the durability of glass fiber-reinforced epoxy // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 2015. Art. 372354. DOI: 10.1155/2015/372354.
5. Старцев В.О., Лебедев М.П., Фролов А.С. Измерение показателей рельефа поверхности при изучении старения и коррозии материалов. 1. Российские и зарубежные стандарты // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2018. № 6. С. 32–38.
6. Korkees F. Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2023. Vol. 62. P. 1789–1822. DOI: 10.1080/25740881.2023.2234461.
7. Menard K. *Dynamic mechanical analysis: a practical introduction*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 240 p.
8. Meyer F., Oldörp K., de Jong F. Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) on polymer nanocomposites // *Thermo Fisher Scientific*. 2021. Vol. 241. Art. 0621.
9. Startsev O.V., Vapirov Yu.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. P. 227–240. DOI: 10.1007/s11029-020-09875-5.
10. Alessi S., Pitarresi G., Spadaro G. Effect of hydrothermal ageing on the thermal and delamination fracture behaviour of CFRP composites // *Composites. Part B*. 2014. Vol. 67. P. 145–153. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.06.006.
11. Cruz R., Correia L., Dushimimana A. et al. Durability of epoxy adhesives and carbon fibre reinforced polymer laminates used in strengthening systems: accelerated ageing versus natural ageing // *Materials*. 2021. Vol. 14. Art. 1533. DOI: 10.3390/ma14061533.
12. Francis B. Water absorption studies in epoxy nanocomposites // *Epoxy Composites*. Weinheim: WILEY-VCH GmbH, 2021. P. 241–258. DOI: 10.1002/9783527824083.ch9.
13. Gibhardt D., Buggisch C., Meyer D., Fiedler B. Hygrothermal aging history of amine-epoxy resins: effects on thermo-mechanical properties // *Front Matter*. 2022. Vol. 9. Art. 826076. DOI: 10.3389/fmats.2022.826076.
14. Chateauminois A., Chabert B., Soulier J.P., Vincent L. Dynamic mechanical analysis of epoxy composites plasticized by water: artifact and reality // *Polymer Composites*. 1995. Vol. 16. No. 4. P. 288–296.
15. 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. Art. 614.
16. Belec L., Nguyen T.H., Nguyen D.L., Chailan J.F. Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano- to macro-scale // *Composites. Part A*. 2015. Vol. 68. No. 1. P. 235–241.
17. Bussu G., Lazzeri A. On the use of dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) for measuring glass transition temperature of polymer matrix fibre reinforced composites // *Journal Material Science*. 2006. Vol. 41. P. 6072–6076.
18. Kablov E.N., Kirillov V.N., Startsev O.V., Krotov A.S. Climatic aging of composite aviation materials: III. Significant aging factors // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012. Vol. 2012. Is. 4. P. 323–329. DOI: 10.1134/S0036029512040040.

19. Старцев В.О., Молоков М.В., Постнов В.И., Старостина И.В. Оценка влияния климатического воздействия на свойства стеклопластика марки ВПС-53К // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 4–2. С. 220–228.
20. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
21. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов // Труды ВИАМ. 2016. № 8 (44). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.
22. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Мельников Д.А., Беседнов К.Л., Павлюк Б.Ф. Исследование свойств отвержденных клеевых связующих // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-6-6.
23. Семенова Л.В., Нефедов Н.И., Белова М.В., Лаптев А.Б. Системы лакокрасочных покрытий для вертолетной техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
24. Старцев О.В., Болонин А.Б., Вапиров Ю.М., Кривов В.А., Владимирский В.Н., Офицерова М.Г. Улучшение вязкоупругих свойств акриловой эмали АС-1115 // Лакокрасочные материалы и их применение. 1986. № 4. С. 16–18.
25. Старцев В.О., Варданян А.М. Влияние внешних воздействий на коэффициент линейного теплового расширения углепластиков. Часть 3. Климатическое старение наномодифицированного цианэфирного углепластика // Труды ВИАМ. 2023. № 4 (122). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-99-117.
26. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
27. Старцев О.В., Корниенко Г.В., Гладких А.В., Горбовец М.А. Неразрушающие измерения модуля сдвига в плоскости листа при старении полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2024. № 3. С. 21–30. DOI: 10.31044/1813-7008-2024-0-3-21-30.
28. Иванов М.С., Морозова В.С., Павлюкович Н.Г. Влияние эксплуатационных факторов на свойства углепластика на основе полиэфирэфиркетона // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.06.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-99-108.

References

1. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
2. Kablov E.N., Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Lonskii S.L., Kurshev E.V. Microstructure research of the unidirectional organoplastic based on Rusar-NT aramid fibers and epoxy-polysulfone binder. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
3. Andreeva N.P., Pavlov M.R., Nikolaev E.V., Kurnosov A.O. Research of climatic factors influence of cold, temperate (moderate) and tropical climates on properties of construction fibreglass. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-105-114.
4. Khajeh A., Mustapha F., Sultan M.T.H. et al. The effect of thermooxidative aging on the durability of glass fiber-reinforced epoxy. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 2015, art. 372354. DOI: 10.1155/2015/372354.

5. Startsev V.O., Lebedev M.P., Frolov A.S. Measurement of surface relief indicators in the study of aging and corrosion of materials. 1. Russian and foreign standards. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2018, no. 6, pp. 32–38.
6. Korkees F. Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2023, vol. 62, pp. 1789–1822. DOI: 10.1080/25740881.2023.2234461.
7. Menard K. *Dynamic mechanical analysis: a practical introduction*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008, 240 p.
8. Meyer F., Oldörp K., de Jong F. Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) on polymer nanocomposites. *Thermo Fisher Scientific*, 2021, vol. 241, art. 0621.
9. Startsev O.V., Vapirov Yu.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, pp. 227–240. DOI: 10.1007/s11029-020-09875-5.
10. Alessi S., Pitarresi G., Spadaro G. Effect of hydrothermal ageing on the thermal and delamination fracture behaviour of CFRP composites. *Composites. Part B*, 2014, vol. 67, pp. 145–153. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.06.006.
11. Cruz R., Correia L., Dushimimana A. et al. Durability of epoxy adhesives and carbon fibre reinforced polymer laminates used in strengthening systems: accelerated ageing versus natural ageing. *Materials*, 2021, vol. 14, art. 1533. DOI: 10.3390/ma14061533.
12. Francis B. Water absorption studies in epoxy nanocomposites. *Epoxy Composites*. Weinheim: WILEY-VCH GmbH, 2021, pp. 241–258. DOI: 10.1002/9783527824083.ch9.
13. Gibhardt D., Buggisch C., Meyer D., Fiedler B. Hygrothermal aging history of amine-epoxy resins: effects on thermo-mechanical properties. *Front Matter*, 2022, vol. 9, art. 826076. DOI: 10.3389/fmats.2022.826076.
14. Chateauminois A., Chabert B., Soulier J.P., Vincent L. Dynamic mechanical analysis of epoxy composites plasticized by water: artifact and reality. *Polymer Composites*, 1995, vol. 16, no. 4, pp. 288–296.
15. 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, art. 614.
16. Belec L., Nguyen T.H., Nguyen D.L., Chailan J.F. Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano- to macro-scale. *Composites. Part A*, 2015, vol. 68, no. 1, pp. 235–241.
17. Bussu G., Lazzeri A. On the use of dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) for measuring glass transition temperature of polymer matrix fibre reinforced composites. *Journal Material Science*, 2006, vol. 41, pp. 6072–6076.
18. Kablov E.N., Kirillov V.N., Startsev O.V., Krotov A.S. Climatic aging of composite aviation materials: III. Significant aging factors. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, vol. 2012, is. 4, pp. 323–329. DOI: 10.1134/S0036029512040040.
19. Startsev V.O., Molokov M.V., Postnov V.I., Starostina I.V. Assessment of the influence of climatic impact on the properties of fiberglass grade VPS-53K. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2017, vol. 19, no. 4–2, pp. 220–228.
20. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
21. Kutsevich K.E., Dementeva L.A., Lukina N.F. Properties and application of polymer composite materials based on glue prepregs. *Trudy VIAM*, 2016, no. 8, paper no. 7. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 14, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.
22. Petrova A.P., Lukina N.F., Melnikov D.A., Besednov K.L., Pavlyuk B.F. Research of properties of cured adhesive binders. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10 (58), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 04, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-6-6.

23. Semenova L.V., Nefedov N.I., Belova M.V., Laptev A.B. Systems of paint coatings for helicopter equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
24. Startsev O.V., Bolonin A.B., Vapirov Yu.M., Krivov V.A., Vladimirsky V.N., Ofitserova M.G. Improving the viscoelastic properties of acrylic enamel AC-1115. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 1986, no. 4, p. 16–18.
25. Startsev V.O., Vardanyan A.M. Influence of external influences on the coefficient linear thermal expansion of carbon fiber plastics. Part 3. Climatic aging of nanomodified cyanester carbon plastic. *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 11, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-99-117.
26. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
27. Startsev O.V., Kornienko G.V., Gladkikh A.V., Gorbovets M.A. Non-destructive measurements of the shear modulus in the sheet plane during aging of polymer composite materials. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2024, no. 3, pp. 21–30. DOI: 10.31044/1813-7008-2024-0-3-21-30.
28. Ivanov M.S., Morozova V.S., Pavlukovich N.G. The influence of operational factors on the properties of carbon fiber based on polyetheretherketone. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 24, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-99-108.

Информация об авторах

Старцев Олег Владимирович, старший научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru; и. о. директора ИФТПС СО РАН, administration@iptpn.ysn.ru

Коваль Татьяна Васильевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Двирная Елена Вячеславовна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Корниенко Герман Викторович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Велигодский Илья Михайлович, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Oleg V. Startsev, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM; Acting Director, V.P. Laronov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS Federal state Budgetary Institution of Science, administration@iptpn.ysn.ru

Tatiana V. Koval, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Elena V. Dvirnaya, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

German V. Kornienko, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya M. Veligodsky, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 12.12.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.12.2024.
The article was submitted 12.12.2024; approved and accepted for publication after reviewing 13.12.2024.