

Научная статья

УДК 620.1:678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-113-124

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКА С ПОКРЫТИЯМИ ПОСЛЕ 8 И 13 ЛЕТ СТАРЕНИЯ В УМЕРЕННО ТЕПЛОМ КЛИМАТЕ* Часть 2. Состояние защитных лакокрасочных покрытий

О.В. Старцев^{1,2}, Т.В. Коваль¹, А.С. Кротов², Е.В. Двирная¹, 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. Представлены результаты исследования цветовых характеристик, профиля поверхности и температуры стеклования фторэпоксидного (ВЭ-46) и акрилстирольного (АС-1115) покрытий на лицевой и обратной поверхностях углепластика КМКУ-2м.120, экспонированного 8 и 13 лет в открытых условиях умеренно теплого климата. Для получения сведений о свойствах покрытий использованы методы колориметрии, профилометрии и динамического механического анализа. Наиболее уязвимыми к процессам фотохимической активности оказались красная эмаль ВЭ-46 и желтая эмаль АС-1115.

Ключевые слова: углепластик, фторэпоксидное покрытие, акрилстирольное покрытие, климатическое старение, профилометрия, колориметрия, температура стеклования, пластификация

Для цитирования: Старцев О.В., Коваль Т.В., Кротов А.С., Двирная Е.В., Велигодский И.М. Исследование свойств углепластика с покрытиями после 8 и 13 лет старения в умеренно теплом климате. Часть 2. Состояние защитных лакокрасочных покрытий // Труды ВИАМ. 2024. № 11 (141). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-113-124.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC WITH COATINGS AFTER 8 AND 13 YEARS OF AGING IN MODERATELY WARM CLIMATE Part 2. Condition of protective paint and vanish coatings

O.V. Startsev^{1,2}, T.V. Koval¹, A.S. Krotov², E.V. Dvirnaya¹, 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

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 10 (140), 2024.

Abstract. The results of the study of color characteristics, surface profile and glass transition temperature of fluorepoxy (VE-46) and acrylstirol (AS-1115) coatings on the front and back surfaces of KMKU-2m.120 carbon fiber plastic exposed for 8 and 13 years in open conditions of a moderately warm climate were presented. Methods of colorimetry, profilometry and dynamic mechanical analysis were used to obtain information about the properties of coatings. Red enamel VE-46 and yellow enamel AS-1115 tuned out to be the most vulnerable to photochemical activity processes.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic, fluorepoxy coating, acrylic coating, climatic aging, profilometry, colorimetry, glass transition temperature, plasticization

For citation: Startsev O.V., Koval T.V., Krotov A.S., Dvirnaya E.V., Veligodsky I.M. Investigation of the properties of carbon fiber reinforced plastic with coatings after 8 and 13 years of aging in moderately warm climate. Part 2. Condition of protective paint and vanish coatings. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-113-124.

Введение

Теория и практика исследований климатической стойкости полимерных композиционных материалов (ПКМ), разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [1, 2], доказали перспективность сочетания натуральных и лабораторных испытаний [1, 3, 4], выявления температурно-влажностных параметров образцов при суточных и сезонных колебаниях атмосферных режимов [5, 6], а также использования инструментальных методов, чувствительных к физико-химическим превращениям в армирующих наполнителях и полимерных матрицах [1, 7]. Например, методы динамического механического анализа (ДМА) [8] подтвердили возможность выявления дополимеризации, деструкции и пластификации влагой ПКМ на основе расплавных связующих [4], гидролиза и образования двухфазных структур в гетерогенных сетчатых полимерах [9], структурной релаксации в граничных слоях полимерных матриц и наполнителей [10], а также значимость действующих климатических факторов [11], эффективность добавок модификаторов [12] и наночастиц [13].

В первой части данной статьи показано, что при длительном старении в открытых климатических условиях лакокрасочные покрытия (ЛКП) затрудняют влагоперенос в углепластик на основе клеевого препрега КМКУ-2м.120 и снижают количество сорбированной влаги во внутренних слоях пластин. При этом значительный интерес представляет изменение свойств ЛКП. Проведенные ранее исследования [14] выявили зависимость изменения колориметрических показателей ЛКП от полимерной основы и цвета защитных покрытий. Под действием температуры, влаги и солнечного излучения происходит старение ЛКП, сопровождающееся изменениями прочности, деформативности, теплостойкости и целостности тонкого поверхностного полимерного защитного слоя. Понимание сущности изменений свойств ЛКП имеет особое значение для увеличения продолжительности эксплуатации защищенных ПКМ.

С помощью ДМА можно получить информацию о температуре стеклования, модуле упругости, эффективности стабилизирующих добавок и эффектах физического старения для покрытий в виде отдельных пленок или пленок на жесткой подложке [15–18]. Можно ожидать, что ДМА будет обладать достаточной чувствительностью к состоянию тонких полимерных слоев на поверхности металлических сплавов и ПКМ. Это доказано на примере углепластика AS4/8552 [19], для которого выявлен переход из стеклообразного в высокоэластическое состояние клеевой пленки, использованной для крепления зажимов.

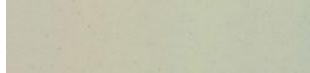
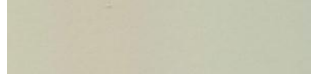


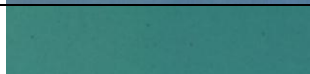
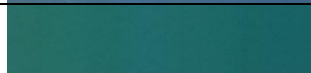


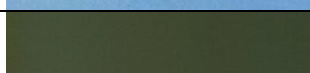
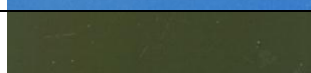

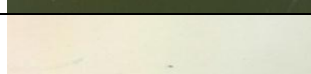






Поэтому исследования с применением ДМА для оценки состояния ЛКП, нанесенных на углепластик, входят в общую задачу сравнения свойств композита после длительных этапов климатического воздействия и являются целью второй части выполненной работы.

Материалы и методы

Исследованный углепластик КМКУ-2м.120 (наполнитель – углеродная лента ЭЛУР-П, матрица – эпоксидное связующее ВКС-14-2м [20]) защищен фторэпоксидной (ВЭ-46) [21] и акрилстирольной (АС-1115) [22] эмалями, нанесенными на поверхность композита поверх слоя грунтовки ЭП-0104. Толщина ЛКП составила 95 ± 5 мкм. Использовано девять вариантов ЛКП, состав и цвет которых представлен в табл. 1.

Таблица 1

Внешний вид лицевой и обратной сторон фторэпоксидного (ВЭ-46) и акрилстирольного (АС-1115) покрытий на поверхности углепластика КМКУ-2м.120

Покрытие	Обозначение пластины	Продолжительность экспозиции, лет	Цвет	Внешний вид стороны покрытия	
				лицевой	обратной
Фторэпоксидное (ВЭ-46)	Г1	13	Светло-серый		
	Г2	8	Серо-голубой		
	Г3		Изумрудный		
	Г4	13	Голубой		
	Г5		Темно-зеленый		
	Г6	6	Красный*		
Акрилстирольное (АС-1115)	Г7	13	Оранжевый		
	Г8	8	Желтый		
	Г9		Синий		

*Эмаль полностью разрушена на лицевой стороне, сохранился слой грунтовки на обратной стороне.

Цветовые характеристики ЛКП измеряли с помощью спектрофотометра согласно ГОСТ Р 71216–2024. Определяли полное цветовое различие ΔE^* в равноконтрастной колористической системе CIE $L^*a^*b^*$ после 1; 2; 3; 5; 8 и 13 лет экспозиции пластин Г1–Г9, как в работе [14].

Для проверки достоверности измерений ΔE^* поверхность пластин аккуратно промывали дистиллированной водой комнатной температуры. Изучена зависимость ΔE^* от продолжительности сушки. Выявлено, что при продолжительности сушки от 1 до 6 ч значения ΔE^* флуктуируют в пределах до $\pm 0,3$. Поскольку в результате мойки цветовое различие менялось незначительно, для предотвращения повреждений при измерении цветовых показателей поверхность пластин в дальнейшем не подвергали дополнительной обработке.

Пластины углепластика Г1–Г9 экспонировали в условиях приморской атмосферы умеренно теплого климата с мягкой зимой в Геленджикском центре климатических испытаний – филиале НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. При испытаниях

образцы располагали на атмосферном стенде под углом 45 градусов к горизонту, лицевой стороной к югу.

Динамический модуль упругости E' и динамический модуль потерь E'' измерены с помощью анализатора при частоте изгибных колебаний 1 Гц со скоростью нагрева 2 °С/мин в интервале температур от 20 до 230 °С. Результат определяли по данным измерений трех параллельных образцов. Предполагая, что ЛКП чувствительны к действию влаги, для проведения ДМА из пластин Г1–Г9 после экспозиции вырезали образцы (размером 50×10 мм и толщиной 3,2±0,2 мм) в трех состояниях: без предварительного кондиционирования, после сушки при температуре 60 °С, после влагонасыщения при относительной влажности 100 % и температуре 60 °С. Массу образцов измеряли с помощью аналитических весов с точностью 0,1 г.

Температуру стеклования ЛКП определяли по положению максимума на температурной зависимости $E''(T)$, как в работе [22].

Состояние поверхности ЛКП исследовано методом профилометрии с помощью 3D-сканирующего микроскопа по ГОСТ 2789–73. Следуя рекомендациям работы [23], на лицевых и обратных сторонах пластин Г1–Г9 выбирали типовые участки поверхности размером 640×490 мкм, на которых измеряли средние размахи (расстояния между наибольшими выступами и впадинами) R_z и средние арифметические отклонения профиля от базовой линии R_a . Для повышения точности характеристик шероховатости определены средние значения результатов 10 параллельных профилограмм соседних участков поверхности.

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

Результаты и обсуждение

Показатель ΔE^* демонстрирует стабильность внешнего вида фторэпоксидного покрытия после воздействия умеренно теплого климата г. Геленджика в течение 8–13 лет. Как видно из данных табл. 2 и 3, в течение 13 лет темно-зеленый цвет эмали ВЭ-46 остается практически неизменным на лицевой и обратной сторонах. Светло-серый и изумрудный цвета также стабильны в течение времени наблюдений. Результаты аналогичных измерений, приведенные в работе [14], укладываются во временные зависимости $\Delta E^*(t)$ (табл. 2 и 3).

Таблица 2

Цветовое различие лакокрасочных покрытий на лицевой стороне пластин после натурального экспонирования

Обозначение пластины	Цвет	Полное цветовое различие, усл. ед., после натурной экспозиции в течение, лет						
		1	2	3	4*	5	8	13
Г1	Светло-серый	3,5	5,6	5,5	5,0	5,4	4,9	4,9
Г2	Серо-голубой	19,0	6,6	13,0	5,0	8,4	8,9	–
Г3	Изумрудный	3,3	2,6	3,4	5,0	3,5	3,0	–
Г4	Голубой	5,4	4,8	5,1	6,0	5,9	12,0	20,0
Г5	Темно-зеленый	2,1	1,6	1,6	2,0	5,9	2,5	1,0
Г6	Красный	15,0	15,0	Разрушение и удаление эмали				
Г7	Оранжевый	19,0	19,0	20,0	24,0	19,0	18,0	15,0
Г8	Желтый	13,0	14,0	12,0	12,0	14,0	Частичное удаление эмали	
Г9	Синий	1,6	2,7	2,9	3,0	5,2	10,0	–

* По данным работы [14].

Таблица 3

**Цветовое различие лакокрасочных покрытий на обратной стороне
пластин после натурального экспонирования**

Обозначение пластины	Цвет	Полное цветовое различие, усл. ед., после натурной экспозиции в течение, лет			
		4*	5	8	13
Г1	Светло-серый	5,0	5,1	5,0	5,3
Г2	Серо-голубой	3,0	5,3	11,0	–
Г3	Изумрудный	3,0	2,7	3,4	–
Г4	Голубой	2,0	2,5	6,5	4,6
Г5	Темно-зеленый	2,0	1,8	2,8	1,5
Г6	Красный	7,0	Разрушение и удаление эмали		
Г7	Оранжевый	12,0	11,0	9,0	21,0
Г8	Желтый	16,0	16,0	Частичное удаление эмали	
Г9	Синий	3,0	52,3	11,0	–

* По данным работы [14].

Колориметрический анализ показал, что в процессе атмосферного воздействия наиболее уязвимыми к процессам фотохимической активности оказались образцы Г6 (красная эмаль ВЭ-46) и Г8 (желтая эмаль АС-1115). Ультрафиолетовая компонента солнечной радиации вызвала фотохимическую деструкцию этих покрытий, связанную с сильной фотохимической активностью пигмента, входящего в состав ЛКП. Под действием излучения с длиной волны 370 нм происходят возбуждение электронов и их переход на более высокий энергетический уровень. В процессе возвращения возбужденных электронов в прежнее состояние испускаются электромагнитные колебания (жесткие кванты с длиной волны <370 нм), которые разрушают пленкообразователь, находящийся в непосредственной близости к поверхности пигмента.

В процессе разрушения ЛКП под действием атмосферных осадков произошла потеря контакта между пленкообразователем и наполнителем. У всех исследуемых покрытий происходит выкрашивание пигментных частиц при незначительных истирающих воздействиях, т. е. наблюдается явление меления. Данный эффект вызывает изменение декоративно-защитных свойств, а также приводит к послойной эрозии полимерных покрытий.

Профилометрия подтвердила и расширила сведения о состоянии ЛКП после климатического старения. На рис. 1 и 2 показаны примеры 3D-изображений участков и профилей лицевой поверхности эмали ВЭ-46 светло-серого и красного цветов. После 13 лет климатического воздействия покрытие светло-серого цвета остается сравнительно гладким. Среднее расстояние между наибольшими выступами и впадинами R_z составляет 16 мкм, а среднее арифметическое отклонение профиля от базовой линии R_a не превышает 0,68 мкм (рис. 1). Эмаль красного цвета после 5 лет экспонирования разрушилась (табл. 1), показатели R_z и R_a увеличились в 2 раза из-за неровностей выступающих волокон на поверхности углепластика (рис. 2).

Обобщенные результаты анализа поверхности пластин Г1–Г9 представлены в табл. 4. Характеристики шероховатости поверхности ЛКП на лицевой и обратной сторонах пластин соизмеримы.

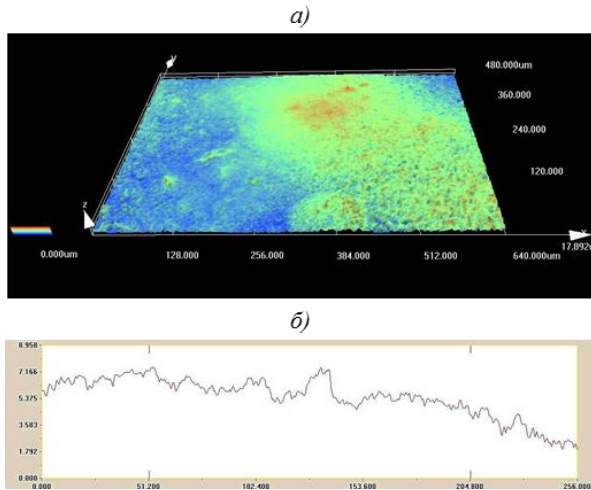


Рис. 1. 3D-изображение (а) и профиль участка поверхности (б) пластины Г1

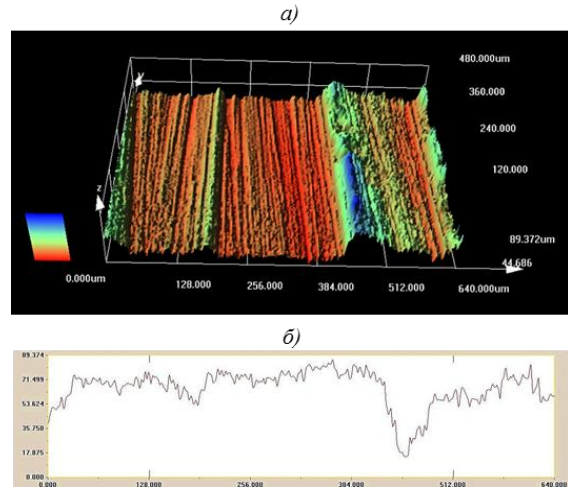


Рис. 2. 3D-изображение (а) и профиль участка поверхности (б) пластины Г6

Таблица 4

Характеристики рельефа поверхности пластин углепластика КМКУ-2м.120, защищенного покрытиями ВЭ-46 и АС-1115

Обозначение пластины	Покрытие	Продолжительность экспозиции, лет	Цвет	Характеристики рельефа, мкм			
				R_z	R_a	R_z	R_a
				на стороне пластины			
				лицевой		обратной	
Г1	ВЭ-46	13	Светло-серый	16,0	0,68	18,6	0,91
Г2		8	Серо-голубой	23,2	0,92	4,0	0,42
Г3		8	Изумрудный	20,0	0,93	20,8	1,10
Г4		13	Голубой	22,2	1,0	22,6	1,10
Г5		13	Темно-зеленый	22,2	1,1	22,2	1,10
Г6	АС-1115	8	Красный	41,2	2,3	19,5	0,78
Г7		13	Оранжевый	21,0	0,91	21,6	0,87
Г8		8	Желтый	33,6	1,37	25,9	1,38
Г9		8	Синий	26,4	1,26	16,6	0,79

Примечание. R_z – расстояния между наибольшими выступами и впадинами; R_a – средние арифметические отклонения профиля от базовой линии.

Активность ультрафиолетовой компоненты солнечной радиации, отраженной от земной поверхности, достаточно высока, чтобы обеспечить значительное воздействие на цвет и рельеф ЛКП на обратных сторонах пластин (табл. 3 и 4). Следует отметить выявленную чувствительность акрилстирольного покрытия желтого цвета к действию внешней среды. При высоких значениях цветового различия (табл. 2 и 3) и рельефа поверхности (табл. 4) после 8 лет экспозиции произошло частичное разрушение и удаление эмали на пластине Г8, хорошо видимое на микроскопическом снимке (рис. 3).

Исследования, проведенные методом ДМА, выявили общие закономерности старения ЛКП на поверхности углепластика. На рис. 4 приведен пример температурной зависимости динамического модуля потерь образцов, вырезанных из пластины Г7 после 13 лет климатического старения.

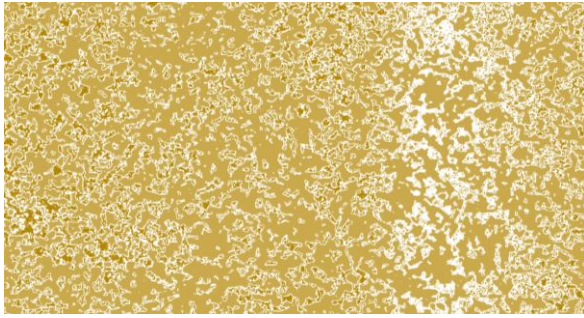


Рис. 3. Микроскопическое изображение участка поверхности на лицевой стороне покрытия АС-1115 после 8 лет экспонирования пластины Г8

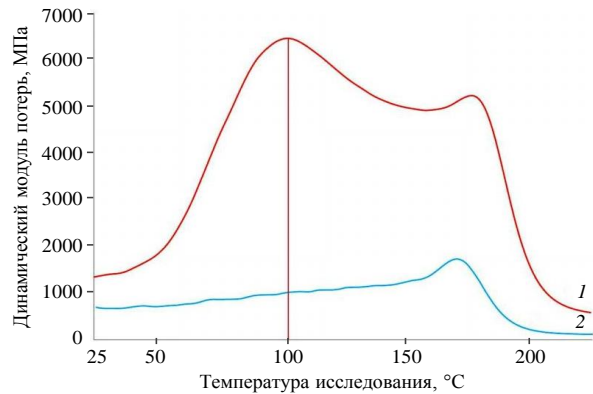


Рис. 4. Температурные зависимости динамического модуля потерь высушенных образцов, вырезанных из пластины Г7 с покрытием АС-1115 до (1) и после удаления лакокрасочного покрытия (2)

В интервале температур от 50 до 130 °С обнаружен релаксационный переход акрилстирольного полимера в покрытии АС-1115 из стеклообразного в высокоэластичное состояние (α -переход) в виде максимума $E''(T)$ при температуре 101 ± 2 °С, который отсутствует на аналогичной зависимости в случае удаления покрытия с поверхности углепластика. Ранее α -переход подробно охарактеризован в работе [22] методом ДМА тонких пленок покрытия АС-1115. В работе [24] показано, что температура максимума $E''(T)$ является температурой стеклования ЛКП.

В данной работе выявлена чувствительность ЛКП к пластифицирующему действию влаги. Например, температура стеклования покрытия ВЭ-46 изумрудного цвета после 8 лет экспозиции составляет 70 °С. Серия параллельных образцов пластины Г3 высушена в течение 17 сут при температуре 60 °С при периодическом контроле температуры стеклования методом ДМА. Результаты этих измерений (рис. 5) позволяют утверждать, что по мере десорбции влаги температура стеклования возрастает и достигает предельного значения ($84 \pm 0,5$ °С) после сушки в течение 14 сут. За это время из объема углепластика удаляется $0,7 \pm 0,1$ % влаги, вследствие чего температура стеклования увеличивается на 14 °С.

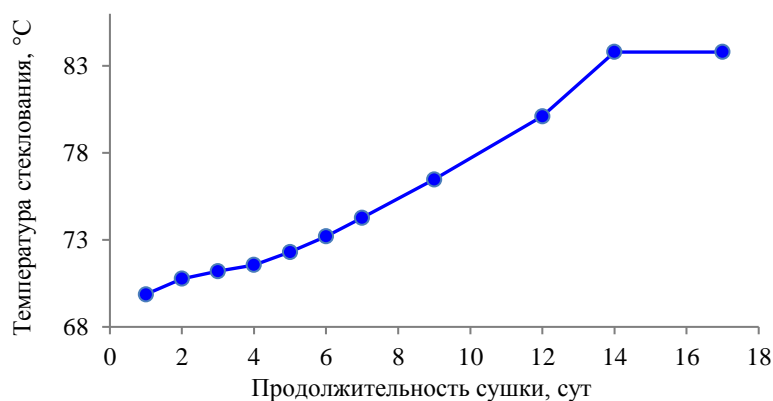


Рис. 5. Зависимость температуры стеклования покрытия ВЭ-46 от продолжительности сушки образца, вырезанного из пластины углепластика Г3 после 8 лет экспозиции

Влага оказывает еще большее пластифицирующее действие при увлажнении ЛКП. На рис. 6 приведен пример положения максимума $E''(T)$ образца пластины Г2 с покрытием ВЭ-46, высушенного и увлажненного при температуре 60 °С. Для данного примера пластифицирующее действие влаги по величине смещения температуры стеклования составило 50 °С.

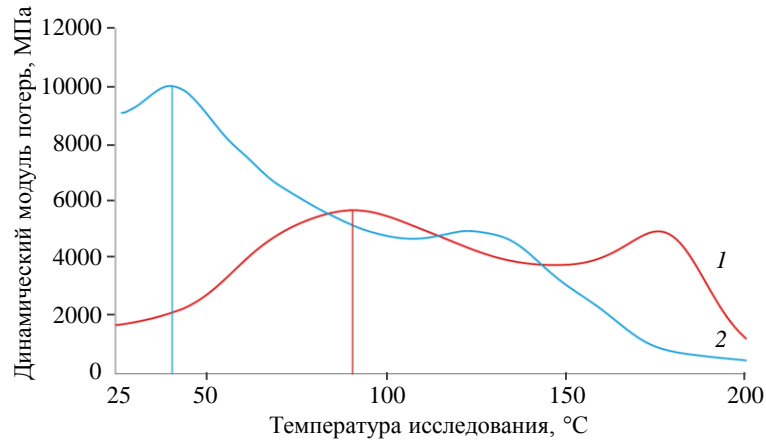


Рис. 6. Температурные зависимости динамического модуля потерь высушенных (1) и увлажненных (2) образцов, вырезанных из пластины Г2 с покрытием ВЭ-46

В табл. 5 представлены результаты измерений, выполненных с помощью ДМА, которые позволяют обосновать механизм старения ЛКП при длительном климатическом воздействии. Для сравнения также указаны значения температур стеклования для ЛКП в исходном состоянии (покрытия нанесены на поверхность металлических пластин).

Таблица 5

Температура стеклования лакокрасочных покрытий после старения

Продолжительность старения, лет	Покрытие	Цвет	Обозначение пластины	Температура стеклования, °С, покрытия		
				без кондиционирования	после сушки	после увлажнения
0	ВЭ-46	—	—	77	96	70
	АС-1115			77	97	46
13	ВЭ-46	Светло-серый	Г1	72	87	66
8		Серо-голубой	Г2	60	77	41
		Изумрудный	Г3	70	84	37
13		Голубой	Г4	57	79	46
		Темно-зеленый	Г5	51	85	55
8		Красный	Г6	55	82	49
13	АС-1115	Оранжевый	Г7	94	103	60
8		Желтый	Г8	101	105	58
		Синий	Г9	103	110	72

Необратимые изменения вязкоупругих свойств характеризуются температурой стеклования ЛКП в высушенном состоянии. Для покрытия ВЭ-46 с различными цветовыми пигментами после 8–13 лет экспозиции температура стеклования снижается на 9–19 °С, что можно объяснить следствием деструктивных процессов во фторэпоксидном сетчатом полимере. Для покрытия АС-1115 обнаружена другая закономерность: после старения температура стеклования возрастает на 17–23 °С из-за вероятных процессов сшивки или физического старения [25].

Согласно результатам ДМА, признаком высокой климатической стойкости исследованных ЛКП является способность снижать температуру стеклования при увлажнении на 30–50 °С и восстанавливать ее при сушке (табл. 5) из-за сохранения гибкости макромолекул полимерной основы эмалей.

Заключения

Методы колориметрии, профилометрии и ДМА обладают высокой чувствительностью и позволяют получить новую информацию о старении ЛКП, защищающих пластины углепластика в процессе длительного климатического воздействия.

Цветовое различие покрытий, измеренное на лицевой и обратной сторонах пластин углепластика, показало, что темно-зеленый цвет эмали ВЭ-46 остается стабильным после 13 лет экспозиции на открытом атмосферном стенде в условиях умеренно теплого климата. Высокая стабильность также характерна для эмали ВЭ-46 светлосерого и изумрудного цветов.

Наиболее уязвимыми к процессам фотохимической активности атмосферы оказались образцы красной эмали ВЭ-46 и желтой эмали АС-1115, что подтверждено результатами анализа профиля поверхности. Эмаль красного цвета после 5 лет экспонирования разрушилась, вследствие чего показатели R_z и R_a увеличились в 2 раза.

По данным ДМА, влага, сорбированная углепластиком при климатической экспозиции, оказывает пластифицирующее действие и снижает температуру стеклования ЛКП. Для получения сведений о необратимых физико-химических изменениях покрытий необходима сушка образцов при температуре 60 °С в течение 2 недель. Это позволило выявить признаки деструкции во фторэпоксидной эмали ВЭ-49 и сшивки в акрилстирольной эмали АС-1115.

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. 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: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.06.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
3. 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.
4. Старцев В.О., Славин А.В. Стойкость углепластиков и стеклопластиков на основе расплавных связующих к воздействию умеренно холодного и умеренно теплого климата // *Труды ВИАМ*. 2021. № 5 (99). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.

5. 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.
6. Сальников В.Г. Исследование влагопоглощения авиационных углепластиков в условиях теплого влажного климата // *Системы контроля окружающей среды*. 2021. № 2 (44). С. 46–53. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-2-46-53.
7. 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.
8. Menard K. *Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 240 p.
9. Xian G., Karbhari V.M. DMTA based investigation of hygrothermal ageing of an epoxy system used in rehabilitation // *Journal of Applied Polymer Science*. 2007. Vol. 104. P. 1084–1094. DOI: 10.1002/app.25576.
10. Bashir M.A. Use of dynamic mechanical analysis (DMA) for characterizing interfacial interactions in filled polymers // *Solids*. 2021. Vol. 2. P. 108–120. DOI: 10.3390/solids2010006.
11. 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. No. 4. P. 323–329. DOI: 10.1134/S0036029512040040.
12. Patti A., Acierno S., Cicala G., Acierno D. Aging effects on the viscoelastic behaviour of products by fused deposition modelling (FDM) made from recycled and wood-filled polymer resins // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2024. Vol. 82. P. 69–79. DOI: 10.1007/s00107-023-01994-9.
13. Wang Y., Zhu W., Wan B. et al. Hygrothermal ageing behavior and mechanism of carbon nanofibers modified flax fiber-reinforced epoxy laminates // *Composites. Part A*. 2021. Vol. 140. Art. 106142. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.106142.
14. Старцев В.О., Фролов А.С. Влияние климатического воздействия на цветовые характеристики лакокрасочных покрытий // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2015. № 3. С. 16–18.
15. Skrovanec D.J., Schoff C.K. Thermal mechanical analysis of organic coatings // *Progress in Organic Coatings*. 1988. Vol. 16. P. 135–163. DOI: 10.1016/0033-0655(88)80011-6.
16. Johnson B.W., McIntyre R. Analysis of test methods for UV durability predictions of polymer coatings // *Progress in Organic Coatings*. 1996. Vol. 27. P. 95–106. DOI: 10.1016/0300-9440(94)00525-7.
17. Perrin F.X., Merlatti C., Aragon E., Margaillan A. Degradation study of polymer coating: Improvement in coating weatherability testing and coating failure prediction // *Progress in Organic Coatings*. 2009. Vol. 64. P. 466–473.
18. Osterhold M., Glöckner P. Influence of weathering on physical properties of clear coats // *Progress in Organic Coatings*. 2001. Vol. 41. P. 177–182. DOI: 10.1016/S0300-9440(01)00152-7.
19. Barbosa A.P.C., Fulco A.P.P., Guerra E.S.S. et al. Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites // *Composites. Part B*. 2017. Vol. 110. P. 298–306. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.004.
20. 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: 07.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.
21. 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.
22. Старцев О.В., Болонин А.Б., Вапиров Ю.М. и др. Улучшение вязкоупругих свойств акриловой эмали АС-1115 // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 1986. № 4. С. 16–18.
23. 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.

24. 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.
25. Odegard G.M., Bandyopadhyay A. Physical aging of epoxy polymers and their composites // *Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics*. 2011. Vol. 49. P. 1695–1716. DOI: 10.1002/polb.22384.

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. 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: June 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
3. 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.
4. Startsev V.O., Slavin A.V. Carbon and glass reinforced polymer based on solventfree binders resistance to the impact of a moderate cold and moderate warm climate. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
5. 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.
6. Salnikov V.G. Study of moisture absorption of aircraft carbon fiber reinforced plastics in warm humid climate conditions. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2021, no. 2 (44), pp. 46–53. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-2-46-53.
7. 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.
8. Menard K. *Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008, 240 p.
9. Xian G., Karbhari V.M. DMTA based investigation of hygrothermal ageing of an epoxy system used in rehabilitation. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, vol. 104, pp. 1084–1094. DOI: 10.1002/app.25576.
10. Bashir M.A. Use of dynamic mechanical analysis (DMA) for characterizing interfacial interactions in filled polymers. *Solids*, 2021, vol. 2, pp. 108–120. DOI: 10.3390/solids2010006.
11. 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, no. 4, pp. 323–329. DOI: 10.1134/S0036029512040040.
12. Patti A., Acierno S., Cicala G., Acierno D. Aging effects on the viscoelastic behaviour of products by fused deposition modelling (FDM) made from recycled and wood-filled polymer resins. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2024, vol. 82, pp. 69–79. DOI: 10.1007/s00107-023-01994-9.
13. Wang Y., Zhu W., Wan B. et al. Hygrothermal ageing behavior and mechanism of carbon nanofibers modified flax fiber-reinforced epoxy laminates. *Composites, Part A*, 2021, vol. 140, art. 106142. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.106142.
14. Startsev V.O., Frolov A.S. Influence of climatic influence on color characteristics of paint and varnish coatings. *Lakokrasochnye materialy i ikh primenenie*, 2015, no. 3, pp. 16–18.
15. Skrovanec D.J., Schoff C.K. Thermal mechanical analysis of organic coatings. *Progress in Organic Coatings*, 1988, vol. 16, pp. 135–163. DOI: 10.1016/0033-0655(88)80011-6.

16. Johnson B.W., McIntyre R. Analysis of test methods for UV durability predictions of polymer coatings. *Progress in Organic Coatings*, 1996, vol. 27, pp. 95–106. DOI: 10.1016/0300-9440(94)00525-7.
17. Perrin F.X., Merlatti C., Aragon E., Margailan A. Degradation study of polymer coating: Improvement in coating weatherability testing and coating failure prediction. *Progress in Organic Coatings*, 2009, vol. 64, pp. 466–473.
18. Osterhold M., Glöckner P. Influence of weathering on physical properties of clear coats. *Progress in Organic Coatings*, 2001, vol. 41, pp. 177–182. DOI: 10.1016/S0300-9440(01)00152-7.
19. Barbosa A.P.C., Fulco A.P.P., Guerra E.S.S. et al. Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites. *Composites, Part B*, 2017, vol. 110, pp. 298–306. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.004.
20. 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: July 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.
21. 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.
22. Startsev O.V., Bolonin A.B., Vapirov Yu.M. et al. Improving the viscoelastic properties of acrylic enamel AC-1115. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 1986, no. 4, pp. 16–18.
23. Startsev V.O., Lebedev M.P., Frolov A.S. Measuring 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.
24. 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.
25. Odegard G.M., Bandyopadhyay A. Physical aging of epoxy polymers and their composites. *Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics*, 2011, vol. 49, pp. 1695–1716. DOI: 10.1002/polb.22384.

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

Кротов Анатолий Сергеевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., ИФТПС СО РАН, e-mail: administration@iptpn.ysn.ru

Двирная Елена Вячеславовна, 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

Anatoliy S. Krotov, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), V.P. Laronov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS Federal state Budgetary Institution of Science, administration@iptpn.ysn.ru

Elena V. Dvirnaya, 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 29.08.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.09.2024.
The article was submitted 29.08.2024; approved and accepted for publication after reviewing 11.09.2024.