



УДК 539.24

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-12-12

**КОРРОЗИЯ И СТАРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ
3D МИКРОСКОПИИ**

С.В. Панин

О.В. Старцев

доктор технических наук

А.С. Кротов

кандидат физико-математических наук

И.М. Медведев

А.С. Фролов

Декабрь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 539.24

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-12-12

С.В. Панин¹, О.В. Старцев¹, А.С. Кротов², И.М. Медведев¹, А.С. Фролов¹

КОРРОЗИЯ И СТАРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ 3D МИКРОСКОПИИ

Обосновано применение 3D микроскопического контроля поверхности материалов для характеристики их старения и коррозии при экспонировании в открытых климатических условиях. Выявлены статистические характеристики поверхности образцов, определяемые видом материалов, условиями и продолжительностью их экспонирования. Рассмотрены эффекты увеличения деструкции связующего на поверхности полимерных композиционных материалов под воздействием прямой солнечной радиации.

Ключевые слова: *углепластик, алюминиевый сплав, климатическое старение, коррозия, деструкция связующего, профиль поверхности.*

S.V. Panin, O.V. Startsev, A.S. Krotov, I.M. Medvedev, A.S. Frolov

CORROSION AND AGING OF STRUCTURAL MATERIALS SURFACE STUDIED BY 3D MICROSCOPY

The 3D microscopic control of materials surface aimed to characterize their corrosion and aging while exposing in open air is hereby justified. The statistical parameters of the samples surface were identified for each individual type of material and the exposure conditions and duration. The binder degradation effect on the surface of polymer composite materials exposed to the direct sunlight is considered.

Keywords: *carbon plastic, aluminum alloy, climatic aging, binder degradation effect, surface profile.*

¹Геленджикский центр климатических испытаний им. Г.В. Акимова [Gelendjik climatic testing center]
E-mail: gcki.viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский Государственный университет» [Altai State University] E-mail: rector@asu.ru

Введение

Известно, что длительное пребывание конструкционных материалов в открытых климатических условиях вызывает их коррозию и старение – совокупность физико-химических и структурных процессов, происходящих в материалах, под воздействием внешней среды [1]. Разработка эффективных мероприятий по защите узлов и деталей авиационной техники от коррозии и старения затруднена тем, что современные материалы обладают достаточной коррозионной стойкостью и, как следствие, для получения достоверных сведений о прочностных характеристиках требуется длительная экспозиция. Например, для новых коррозионностойких сплавов [2] потери предела прочности за 12 мес экспозиции в районе с повышенной коррозионной агрессивностью атмосферы (9 баллов по ГОСТ 9.039) составляют не более 5% от исходных значений [3]. В связи с этим представляют интерес такие методы диагностики композиционных материалов, которые крайне чувствительны даже к незначительным изменениям свойств – например исследования рельефа поверхности. Ранее методики компьютерного анализа изображений микроснимков шлифов были применены для исследования межкристаллитной коррозии алюминиевого сплава В-1461 [4].

За рубежом в последние годы проведены многочисленные исследования, в которых методы фрактального анализа использовались для изучения коррозионных поражений. Одним из наиболее перспективных применений фрактальной размерности является неразрушающий контроль и обнаружение коррозионных поражений на поверхности алюминиевого сплава авиационного назначения [2]. Предложенная методика позволяет не только выявлять коррозионные поражения, но и классифицировать тип поражения [2]. Наиболее значимым применением фрактальной размерности в коррозионных исследованиях является строго математическое выявление и классификация типов коррозии. Неоднократно показано, что фрактальная размерность при межкристаллитной, общей и питтинговой коррозии существенно различна [5]. Для композиционных материалов подобные методики ранее не применялись. Целью данной работы является исследование применимости методов фрактального анализа к оценке изменения профиля поверхности углепластиков под действием умеренно теплого приморского климата.

Материалы и методы

В работе для изучения профилей поверхности использовался конфокальный сканирующий лазерный микроскоп Olympus LEXT. Измерительная система микроскопа предназначена для анализа структуры материалов и позволяет производить неразру-

шающие измерения 2D и 3D объекта с высокой точностью (разрешение по горизонтали – до 120 нм, по вертикали – до 10 нм), с возможностями измерения: глубины, объема и площади поверхности, линейных размеров, а также величины частиц с автоматической обработкой и анализом изображения.

Экспозицию композиционных материалов проводили в условиях умеренно теплого морского климата Геленджикского центра климатических испытаний им. Г.В. Акимова – филиала ВИАМ [5–7]. Категория коррозионной агрессивности атмосферы места климатических испытаний по ИСО 9223 характеризуется баллом «С3» [8, 9].

В качестве неметаллического материала для тестирования выбран углепластик КМУ-9 на основе углеродного жгута УКН-П/5000 марки «А» и эпоксидного связующего УНДФ-4А – соконденсата эпоксидных смол ЭН6, УП-631У, свойства и структура которых рассмотрены в работе [10]. Препрег получали пропиткой наполнителя расплавом связующего при удельном давлении 0,7–1,0 МПа. Прессование происходило при температуре 443 К в течение 5 ч.

Углепластик КМУ-9 испытывали на устойчивость к воздействию умеренно теплого климата в условиях г. Геленджик [6] в течение 11 лет. Образцы композита выдерживали на открытых атмосферных стендах под углом 45 град к горизонту, подвергая их непрерывному воздействию агрессивных климатических факторов, среднегодовые значения которых представлены в работе [6]. Одновременно часть образцов хранили в закрытом ангаре для имитации складского хранения в комнатных условиях.

В качестве металлического материала выбрали высокопрочный свариваемый сплав В-1461 системы Al–Cu–Li–Zn–Mg (Zr, Sc), относящийся к новому поколению алюминийлитиевых сплавов с повышенными технологичностью и характеристиками трещиностойкости [11, 12]. Образцы сплава экспонировали под навесом в течение 3 мес в свободном состоянии и с нанесением морской соли путем распыления солевого раствора с концентрацией 10 г/л с помощью пульверизатора один раз в сутки. Для увеличения продолжительности нахождения испытуемых образцов под пленкой раствора электролита при экспонировании применялось горизонтальное расположение образцов на стенде [3].

Результаты и обсуждение

С помощью снимков поверхности получена матрица высот на равномерной прямоугольной сетке h_{ij} , где $i=1, 2, \dots, 768$ – число ячеек с шагом 1 мкм в направлении оси x , совпадающей с направлением расположения углеродных волокон в поверхностном

слое углепластика; $j=1, 2, \dots, 1024$ – число ячеек с шагом 1 мкм в направлении оси y , перпендикулярной оси x . Из полученных множеств вычислены средние значения высоты поверхности в направлениях осей x и y для лицевых и оборотных сторон плит углепластика, хранившегося в ангаре и экспонированного в открытых климатических условиях. После этого определены средние размеры (размахи) неоднородностей поверхности в направлениях осей x и y с помощью соотношений:

$$Z(P_x) = \begin{cases} V(x) - M[V(x)], & P=0, \\ V(x) - (A_{10} + A_{11}x), & P=1, \\ V(x) - (A_{20} + A_{21}x + A_{22}x^2), & P=2, \end{cases} \quad (1)$$

$$Z(P_y) = \begin{cases} V(y) - M[V(y)], & P=0, \\ V(y) - (B_{10} + B_{11}y), & P=1, \\ V(y) - (B_{20} + B_{21}y + B_{22}y^2), & P=2, \end{cases} \quad (2)$$

где $V(r)$, $r=\{x, y\}$ – высота выбранной точки поверхности, зависящая от направления осей на поверхности образца (x – ось координат вдоль длины волокон; y – ось координат в направлении, перпендикулярном волокнам); $M[V(r)]$ – среднее значение высоты по всей поверхности; $(A_{10} + A_{11}x)$ и $(B_{10} + B_{11}y)$ – линейная аппроксимация профиля поверхности вдоль и поперек расположения волокон; $(A_{20} + A_{21}x + A_{22}x^2)$ и $(B_{20} + B_{21}y + B_{22}y^2)$ – аналогичные квадратичные аппроксимации; параметры A_{10} , A_{11} , A_{20} , A_{21} , A_{22} , B_{10} , B_{11} , B_{20} , B_{21} , B_{22} находятся методом наименьших квадратов; P – степень полинома.

Пример изображения фрагмента профиля поверхности углепластика КМУ-9, хранившегося в ангаре и экспонированного в течение 11 лет в условиях открытой атмосферы ГЦКИ, в направлении оси y (поперек расположения углеродных волокон в поверхностном слое) показан на рис. 1.

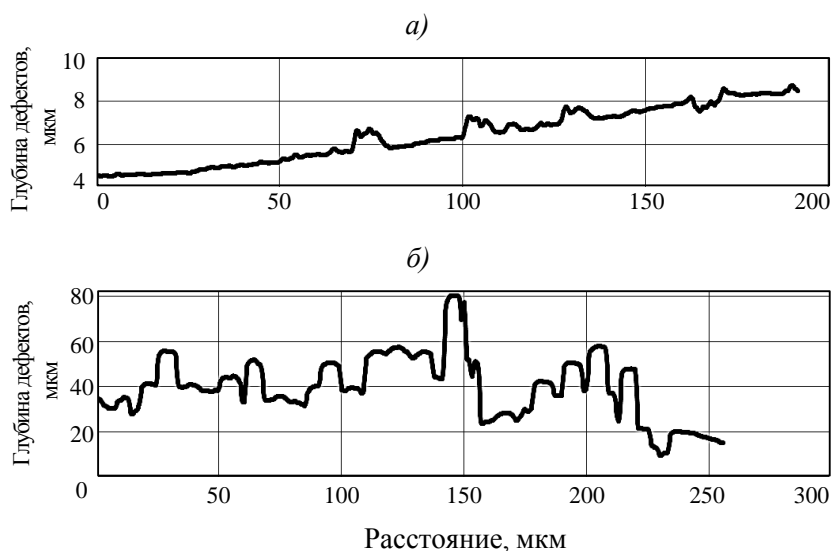


Рисунок 1. Профиль лицевой поверхности углепластика КМУ-9, хранившегося 11 лет в ангаре (а) и экспонированного в условиях открытой атмосферы (б), в направлении оси у (поперек волокон)

Результаты вычислений по соотношениям (1) и (2) для углепластика КМУ-9 после 11 лет хранения и экспонирования в открытых климатических условиях представлены в табл. 1. Оказалось, что размеры неоднородностей на лицевой и оборотной сторонах образцов углепластика, хранившихся в ангаре, практически подобны и составляют для лучшего варианта аппроксимации ($P=2$) около 1–4 мкм, причем флуктуации неоднородностей на поверхности в направлении оси у (перпендикулярно расположению волокон) в 3–4 раза выше, чем в направлении оси х.

Таблица 1

Средние размеры неоднородностей поверхности углепластика КМУ-9 после 11 лет хранения в ангаре и экспонирования в открытых климатических условиях, определенные по соотношениям (1) и (2)

Условия экспонирования	Направление осей	Средний размер неоднородностей поверхности, мкм, при степени полинома P		
		0	1	2
Ангар (лицевая сторона)	х	2,1	1,2	0,9
	у	7,2	5,3	4,4
Ангар (оборотная сторона)	х	2,0	1,4	1,2
	у	4,2	3,3	3,0
Открытая атмосфера (лицевая сторона)	х	11,2	9,6	9,1
	у	49,0	46,9	45,6
Открытая атмосфера (оборотная сторона)	х	11,8	10,6	10,0
	у	39,4	37,8	36,7

Можно считать, что при хранении углепластика в ангаре его свойства и структура не изменились по сравнению с исходным состоянием. Как показали исследования (см. рис. 1), углеродные волокна в исходном состоянии плотно и равномерно расположены на поверхности, а углубления поверхностного слоя не превышают 2–4 мкм. Экспонирование в открытых климатических условиях привело к (2–10)-кратному увеличению размеров неоднородностей в аналогичных направлениях, причем эффекты деструкции связующего на лицевой поверхности, облучаемой Солнцем, существенно выше, чем для оборотной стороны. Таким образом, установлено, что при длительном воздействии агрессивных климатических факторов на углепластик КМУ-9 в его поверхностном слое толщиной 40 ± 5 мкм происходит деструкция и выветривание эпоксидного связующего.

Обнаруженные эффекты подтверждаются анализом нормального распределения отклонения высоты поверхности от базовой линии по соотношению

$$d = A \cdot \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{k^2}\right), \quad (3)$$

где d – распределение частот попадания в интервал 1 мкм; x – отклонение от базовой линии, мкм; A – высота пика, мкм; x_0 – центр пика, мкм; k – полуширина пика, мкм.

Например, параметры модели (3) для оценки отклонений от базовой линии поперек расположения углеродных волокон в поверхностном слое углепластика КМУ-9 после 11 лет хранения в ангаре и экспонирования в открытых климатических условиях представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры модели (3) для оценки отклонений от базовой линии поперек расположения углеродных волокон в поверхностном слое углепластика КМУ-9

Параметры уравнения (3)	Значения параметров после 11 лет			
	хранения в ангаре		экспонирования в открытой атмосфере	
	лицевая сторона	оборотная сторона	лицевая сторона	оборотная сторона
A	0,409	0,652	0,051	0,072
x_0 , мкм	0,515	0,457	-0,913	0,472
k , мкм	1,35	0,857	10,4	7,39
Коэффициент детерминации R^2	0,998	0,999	0,980	0,985

Хорошее соответствие между частотами отклонений от базовой линии для измеренных и смоделированных по формуле (3) значений иллюстрирует рис. 2.

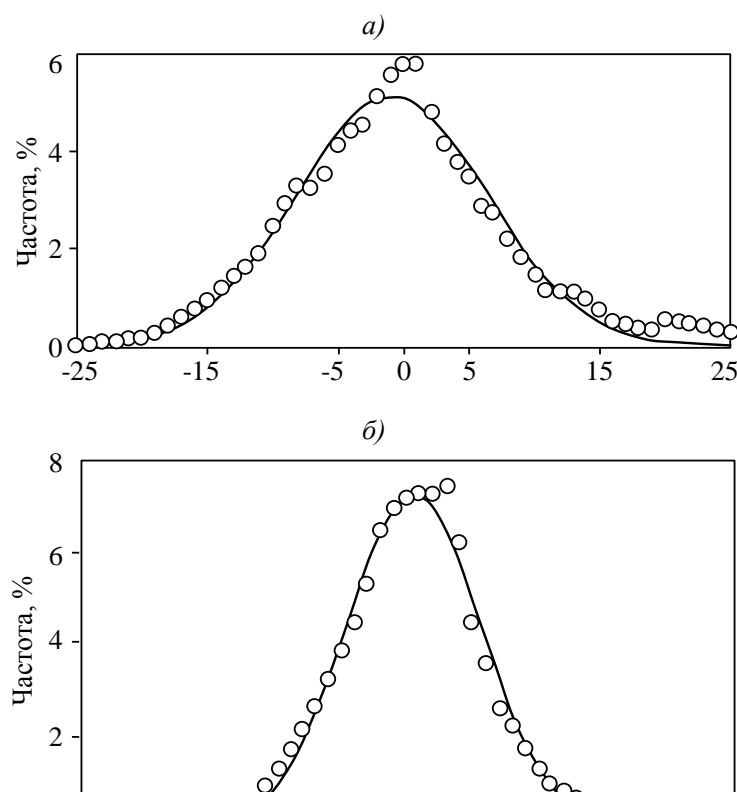


Рисунок 2. Сравнение частот отклонения от базовой линии (○) с моделью (3) нормального распределения (—) поперек направления углеродных волокон в поверхностном слое углепластика КМУ-9 после 11 лет экспонирования в открытых климатических условиях:

a – лицевая сторона; *b* – оборотная сторона

Для подтверждения существенных различий в средних размерах неоднородностей на лицевой и оборотной сторонах ПКМ, экспонированных в открытых климатических условиях, методом 3D микроскопии проведены аналогичные исследования стеклопластика КМКС-2М.120.Т10.37, углепластиков ВКУ-34К и ВКУ-39, органопластика ВКО-19 [13–16]. Продолжительность испытаний этих материалов в открытых климатических условиях ГЦКИ составила 1–7 лет. При анализе неоднородностей в этом случае вычисляли отклонения от моделируемых поверхностей нулевого, первого и второго порядка с помощью соотношений:

$$Z(P) = \begin{cases} V - M[V], & P=0, \\ V - (C_0 + C_1x + C_2y), & P=1, \\ V - (D_0 + D_1x + D_2y + D_3x^2 + D_4y^2 + D_5xy), & P=2, \end{cases} \quad (4)$$

где $V = V(x, y)$ – высота, зависящая от положения на поверхности образца (x – координата вдоль длины, y – координата вдоль ширины); $M[V]$ – среднее значение высоты по всей поверхности; $(C_0 + C_1x + C_2y)$ – аппроксимация поверхности плоскостью; $(D_0 + D_1x + D_2y + D_3x^2 + D_4y^2 + D_5xy)$ – аппроксимация поверхностью второго порядка; параметры C_i ($i=0, \dots, 2$) и D_i ($i=0, \dots, 5$) находятся методом наименьших квадратов.

Как и для случая аппроксимаций (1) и (2) увеличение степени полинома в соотношениях (4) незначительно уменьшает средний размер неоднородностей поверхностей ПКМ (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение средних размеров неоднородностей поверхностей ПКМ, вычисленных по соотношениям (4), после 1–7 лет экспонирования в открытых климатических условиях

Материал (продолжительность экспозиции)	Сторона панели	Средний размер неоднородностей поверхности ПКМ, мкм, в модели выравнивания поверхности (3) со степенью полинома P		
		0	1	2
Стеклопластик	Лицевая	230	212	197

КМКС-2М.120.Т10.37 (7 лет)	Оборотная	55,5	53,6	53,9
Органопластик ВКО-19 (5 лет)	Лицевая	75,0	65,2	60,3
	Оборотная	22,2	18,7	18,7
Углепластик ВКУ-34К (2 года)	Лицевая	42,9	38,6	36,4
	Оборотная	9,3	8,9	8,8
Углепластик ВКУ-39 (1 год)	Лицевая	22,7	21,7	21,8
	Оборотная	13,0	13,2	14,0

Микроскопический анализ металлических материалов позволяет получать информацию о влиянии атмосферной коррозии на характеристики профиля поверхности. Для иллюстрации рассмотрим образцы из сплава В-1461, подвергнутые трехмесячному коррозионному воздействию морской атмосферы под навесом без дополнительного воздействия (рис. 3, *а*) и с распылением 1 раз в сутки раствора морских солей с концентрацией 10 г/л (рис. 3, *б*). Видно, что образцы алюминиевого сплава, подвергнутые дополнительному воздействию раствора морских солей, имеют большее количество коррозионных микрповреждений, чем образцы, находившиеся в естественной атмосфере, вследствие чего их профиль поверхности более «изрезан».

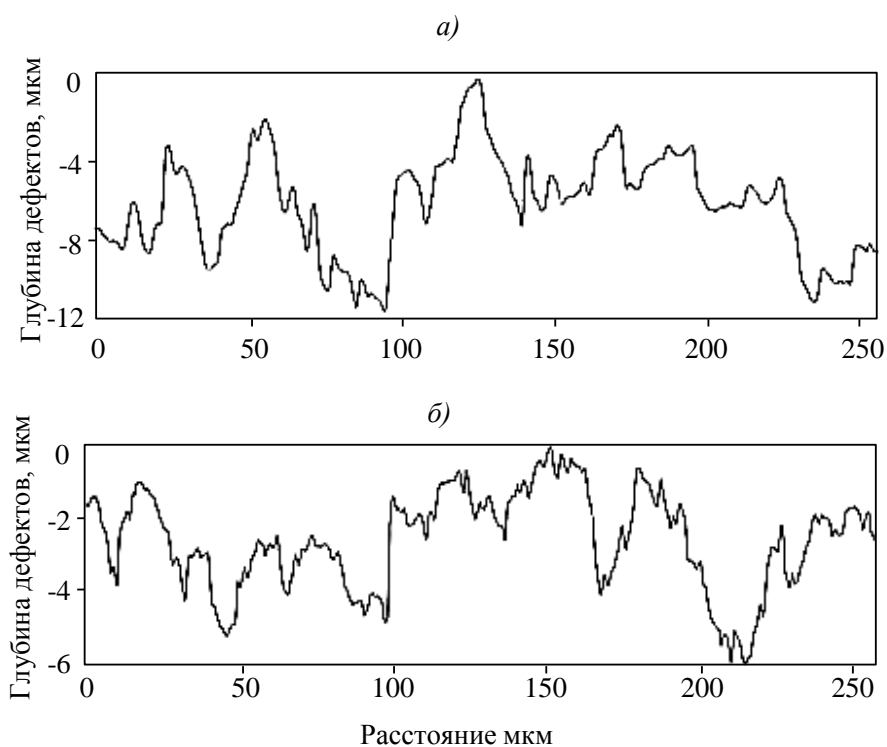


Рисунок 3. Профиль поверхности (—) образца алюминиевого сплава В-1461 после 3 мес экспозиции под навесом в морской атмосфере без дополнительного воздействия (а) и с распылением 1 раз в сутки раствора морских солей с концентрацией 10 г/л (б)

Для сравнения оценены стандартные показатели коррозионной стойкости алюминиевого сплава и твердость индентации. Результаты представлены в табл. 4. Подтверждается, что дополнительное периодическое распыление раствора морской соли усиливает коррозию, увеличивает фрактальную размерность поверхности алюминиевого сплава В-1461, рассчитанную как в работе [4]. При этом средний размер неоднородностей на поверхности сплава при дополнительном воздействии морской соли уменьшается.

Таблица 4

Характеристики коррозионного повреждения сплава В-1461 после коррозионных испытаний под навесом в морской атмосфере

Показатели	Значения показателей в условиях коррозионных испытаний при экспонировании под навесом в течение 3 мес	
	без дополнительного воздействия	с распылением 1 раз в сутки раствора морских солей с концентрацией 10 г/л
Средний размер неоднородностей на поверхности, мкм	12	6
Фрактальная размерность поверхности	1,34	1,45
Скорость коррозии, г/(м ² ·сут)	0,014	0,126
Максимальная глубина питтингов по данным металлографии, мкм	30	125
Среднее значение твердости индентации, МПа (исходное значение 2064 МПа)	1850	1590

Результаты проведенных исследований показывают, что с помощью 3D микроскопии выявляются закономерности состояния поверхности при экспонировании материалов в натуральных климатических условиях. Это позволяет расширить возможности методов, рассмотренных в работах [1, 4, 8, 9, 17–24], для изучения механизмов старения и коррозии материалов при воздействии факторов внешней среды.

Заключение

Показана возможность применения метода 3D микроскопического контроля поверхности материалов для характеристики их старения и коррозии при экспонировании в открытых климатических условиях.

Средние размеры неоднородностей поверхности, вычисленные с помощью моделей линейной и квадратичной аппроксимации профиля поверхности, для углепластика

КМУ-9 увеличиваются от 1–4 до 40 ± 5 мкм после 11 лет старения в условиях умеренно теплого климата ГЦКИ.

Средние размеры неоднородностей поверхности при климатическом старении зависят от типа полимерного композиционного материала, продолжительности испытаний и условий экспонирования. Для пяти марок ПКМ, экспонированных в условиях умеренно теплого климата ГЦКИ в течение 1–7 лет, средние размеры неоднородностей поверхности изменяются в пределах от 10 до 200 мкм.

По данным 3D микроскопии эффекты деструкции связующего на лицевой поверхности, облучаемой Солнцем, существенно выше, чем на оборотной стороне.

Микроскопический анализ металлических материалов позволяет получать информацию о влиянии атмосферной коррозии на характеристики их профиля поверхности. На примере алюминиевого сплава В-1461 показано, что периодическое распыление раствора морской соли усиливает коррозию, увеличивает фрактальную размерность и уменьшает средний размер неоднородностей на поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения //Деформация и разрушение материалов. 2010. №11. С. 40–46.
2. Старцев О.В., Кузнецов А.А., Кротов А.С. и др. Моделирование влагопереноса в слоистых пластиках и металлопластиках //Физическая мезомеханика. 2002. Т. 5. №2. С. 109–114.
3. Курс М.Г., Каримова С.А., Махсидов В.В. Сравнение коррозионной стойкости деформируемых алюминиевых сплавов по результатам натуральных и натурно-ускоренных испытаний под навесом //Вопросы материаловедения. 2013. №1. С. 182–190.
4. Старцев О.В., Медведев И.М., Поляков В.В., Беляев И.А. Оценка коррозионных поражений алюминиевого сплава методами фрактального анализа и микротвердости //Коррозия: материалы, защита. 2014. №6. Р. 43–48.
5. Колобнев Н.И., Махсидов В.В., Самохвалов С.В. и др. Влияние деформации после закалки и режимов старения на механические и коррозионные свойства сплава системы Al–Mg–Si–Cu–Zn //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 12–15.

6. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д. и др. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ //Авиационная промышленность. 2009. №4. С. 36–46.
7. Панин С.В., Курс М.Г. Натурные испытания настенных кондиционеров в эксплуатационных условиях атмосферы ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 59–61.
8. Старцев О.В., Медведев И.М., Курс М.Г. Твердость как индикатор коррозии алюминиевых сплавов в морских условиях //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 16–19.
9. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) //Коррозия: материалы, защита. 2013. №12. С. 6–18.
10. Деев И.С., Кобец Л.П., Новиков В.У., Козицкий Д.В. Влияние некоторых параметров технологии на структурообразование полимерной матрицы в композитах //Материаловедение. 2002. №9. С. 10–21.
11. Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И. и др. Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al–Cu–Mg–Li–Zn //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 7–11.
12. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–182.
13. Шульдешова П.М., Железина Г.Ф. Влияние атмосферных условий и запыленности среды на свойства конструкционных органопластиков //Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 64–68.
14. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
15. Субботин В.В., Гринев М.А. Опыт применения материалов производства ФГУП «ВИАМ» и Porsher в конструкциях узлов и деталей авиационных силовых установок из полимерных композиционных материалов //Новости материаловедения. Наука и техника 2013. №5 (materialsnes.ru).
16. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Бочарова Л.И. и др. Свойства композиционных материалов на основе клеевых препрегов //Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №6. С. 19–24.
17. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной

- структурной неравновесности и градиент свойств по толщине //Деформация и разрушение материалов. 2010. №12. С. 40–46.
18. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения //Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.
 19. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Свойства полимерных композиционных материалов после воздействия открытого космоса на околоземных орбитах //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №10. С. 2–9.
 20. Титарева А.С., Кириллов В.Н., Старцев О.В. Поведение материалов в элементах конструкций авиационной техники, изготовленных с применением ПКМ и систем ЛКП в условиях умеренно теплого климата //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 81–85.
 21. Старцев О.В., Кротов А.С., Сенаторова О.Г. и др. Сорбция и диффузия влаги в слоистых металлополимерных композиционных материалах типа «СИАЛ» //Материаловедение. 2011. №12. С. 38–44.
 22. Startsev O.V., Isupov V.V., Nikishin E.F. The Gradient of Mechanical Characteristics Across the Thickness of Composite Laminates After Exposure to a Low Earth Orbit Environment //Polymer Composites. 1998. V. 19. №1. P. 65–70.
 23. Startsev O.V., Krotov A.S., Golub P.D. Effect of Climatic and Radiation Ageing on Properties of Glass Fibre Reinforced Epoxy Laminates //Polymers and Polymer Composites. 1998. V. 6. №7. P. 481–488.
 24. Старцев О.В., Аниховская Л.И., Литвинов А.А., Кротов А.С. Повышение достоверности прогнозирования свойств полимерных композиционных материалов при термовлажностном старении //ДАН. 2009. Т. 428. №1. С. 56–60.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticheskoe starenie kompozitsionnyh materialov aviacionnogo naznachenija. I. Mehanizmy starenija [Climatic aging of composite materials aviation applications. I. Mechanisms of aging] //Deformacija i razrushenie materialov. 2010. №11. S. 40–46.
2. Starcev O.V., Kuznecov A.A., Krotov A.S. i dr. Modelirovanie vlagoperenosa v sloistyh plastikah i metalloplastikah [Modelling of moisture transfer in laminates and metal-plastic] //Fizicheskaja mezomehanika. 2002. T. 5. №2. S. 109–114.

3. Kurs M.G., Karimova S.A., Mahsidov V.V. Sravnenie korrozionnoj stojkosti deformirue-myh aljuminievyh splavov po rezul'tatam naturnyh i naturno-uskorenyh ispytanij pod navesom [Comparison of the corrosion resistance of aluminum alloy wrought by the results of field and field-accelerated tests under a canopy] //Voprosy materialovedenija. 2013. №1. S. 182–190.
4. Starcev O.V., Medvedev I.M., Poljakov V.V., Beljaev I.A. Ocenka korrozionnyh pora-zhenij aljuminievogo splava metodami fraktal'nogo analiza i mikrotverdosti [Evaluation of corrosion damages aluminum alloy methods of fractal analysis and microhardness] //Korrozija: materialy, zashhita. 2014. №6. P. 43–48.
5. Kolobnev N.I., Mahsidov V.V., Samohvalov S.V. i dr. Vlijanie deformacii posle zakalki i rezhimov starenija na mehanicheskie i korrozionnye svojstva splava sistemy Al–Mg–Si–Cu–Zn [Impact deformation after quenching and aging on mechanical modes and corrosion properties of the alloy Al-Mg-Si-Cu-Zn] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №1. S. 12–15.
6. Kablov E.N., Kirillov V.N., Zhirnov A.D. i dr. Centry dlja klimaticheskikh ispytanij avi-acionnyh PKM [The Centers for climatic test aircraft PCM] //Aviacionnaja promyshlen-nost'. 2009. №4. S. 36–46.
7. Panin S.V., Kurs M.G. Naturnye ispytaniya nastennyh kondicionerov v jekspluatacionnyh uslovijah atmosfery GCKI VIAM im. G.V. Akimova [Full-scale tests of wall air condi-tioners in the operating conditions of the atmosphere GTSKI VIAM them. G.V. Akimov] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 59–61.
8. Starcev O.V., Medvedev I.M., Kurs M.G. Tverдост' kak indikator korrozii aljuminievyh splavov v morskikh uslovijah [Hardness indicator aluminum alloy corrosion in marine envi-ronments] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №3. S. 16–19.
9. Kablov E.N., Starcev O.V., Medvedev I.M., Panin S.V. Korrozionnaja agressivnost' pri-mor-skoj atmosfery. Ch. 1. Faktory vlijanija (obzor) [Corrosiveness seaside atmosphere. Part 1. Factors of Influence (review)] //Korrozija: materialy, zashhita. 2013. №12. S. 6–18.
10. Deev I.S., Kobec L.P., Novikov V.U., Kozickij D.V. Vlijanie nekotoryh parametrov tehnologii na strukturoobrazovanie polimernoj matricy v kompozitah [Influence of some parameters of technology on structure of the polymer matrix in composites] //Materialovedenie. 2002. №9. S. 10–21.
11. Oglodkov M.S., Hohlatova L.B., Kolobnev N.I. i dr. Vlijanie termomehanicheskoj obrabotki na svojstva i strukturu splava sistemy Al–Cu–Mg–Li–Zn [Effect of thermome-

- chanical treatment on the properties and structure of the alloy of Al-Cu-Mg-Li-Zn] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №4. S. 7–11.
12. Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vahromov R.O. Aljuminievye deformiruemye splavy [Aluminium wrought alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 167–182.
 13. Shul'deshova P.M., Zhelezina G.F. Vlijanie atmosferyh uslovij i zapylennosti sredy na svojstva konstrukcionnyh organoplastikov [Effects of atmospheric conditions and dust environment on structural properties of organic plastics] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №1. S. 64–68.
 14. Sokolov I.I., Raskutin A.E. Ugleplastiki i stekloplastiki novogo pokolenija [Carbon and fiberglass new generation] //Trudy VI-AM. 2013. №4 (viam-works.ru).
 15. Subbotin V.V., Grinev M.A. Opyt primenenija materialov proizvodstva FGUP «VIAM» i Porsher v konstrukcijah uzlov i detalej aviacionnyh silovyh ustanovok iz polimernyh kompozicionnyh materialov [Experience in the use of materials produced by FSUE "VIAM" and Porsher in the construction of units and parts of aircraft powerplants from polymeric composite materials] //Novosti materialovedenija. Nauka i tehnika 2013. №5 (materialsnes.ru).
 16. Dement'eva L.A., Serezhenkov A.A., Bocharova L.I. i dr. Svojstva kompozicionnyh materialov na osnove kleevykh prepregov [Properties of composite materials based adhesive prepreg] //Klei. Germetiki. Tehnologii. 2012. №6. S. 19–24.
 17. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticeskoe starenie kompozicionnyh materialov aviacionnogo naznachenija. II. Relaksacija ishodnoj strukturnoj neravnovesnosti i gradient svojstv po tolshhine [Climatic aging of composite materials aviation applications. II. Relaxation of the original structural and non-equilibrium properties of gradient across the thickness] //Deformacija i razrushenie materialov. 2010. №12. S. 40–46.
 18. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticeskoe starenie kompozicionnyh materialov aviacionnogo naznachenija. III. Znachimye faktory starenija [Climatic aging of composite materials aviation applications. III. Significant factors of aging] //Deformacija i razrushenie materialov. 2011. №1. S. 34–40.
 19. Kablov E.N., Starcev O.V., Deev I.S., Nikishin E.F. Svojstva polimernyh kompozicionnyh materialov posle vozdejstvija otkrytogo kosmosa na okolozemnyh orbitah [Properties of polymer composite materials after exposure to the open space in Earth orbits] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2012. №10. S. 2–9.

20. Titareva A.S., Kirillov V.N., Starcev O.V. Povedenie materialov v jelementah konstrukcij aviacionnoj tehniki, izgotovlennyh s primeneniem PKM i sistem LKP v uslovijah umerenno teplogo klimata [The behavior of materials in structural elements of aircraft, manufactured using PCM systems and LCP in a moderately warm climate] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S2. S. 81–85.
21. Starcev O.V., Krotov A.S., Senatorova O.G. i dr. Sorbcija i diffuzija vlagi v sloistyh metalopolimernyh kompozicionnyh materialah tipa «SIAL» [Sorption and diffusion of moisture in layered metal-polymer composite materials such as "Sial"] //Materialovedenie. 2011. №12. S. 38–44.
22. Startsev O.V., Isupov V.V., Nikishin E.F. The Gradient of Mechanical Characteristics Across the Thickness of Composite Laminates After Exposure to a Low Earth Orbit Environment //Polymer Composites. 1998. V. 19. №1. P. 65–70.
23. Startsev O.V., Krotov A.S., Golub P.D. Effect of Climatic and Radiation Ageing on Properties of Glass Fibre Reinforced Epoxy Laminates //Polymers and Polymer Composites. 1998. V. 6. №7. P. 481–488.
24. Starcev O.V., Anihovskaja L.I., Litvinov A.A., Krotov A.S. Povyshenie dostovernosti prognozirovanija svojstv polimernyh kompozicionnyh materialov pri termovlazhnostnom starenii [Increasing the reliability of predicting the properties of polymer composites with hydrothermal aging] //DAN. 2009. T. 428. №1. S. 56–60.