

Научная статья

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-38-47

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ГИБРИДНЫХ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Г.Ф. Железина<sup>1</sup>, Г.С. Кулагина<sup>1</sup>, А.Ч. Кан<sup>1</sup>, Н.А. Соловьева<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Проведено комплексное исследование коррозионной стойкости гибридного слоистого металлополимерного материала класса «алюминий–органопластик» в соответствии с методиками, принятыми для различных классов материалов: металлов, полимерных композитов, клеевых соединений. Установлено, что для гибридного материала характерны общие с металлом закономерности в развитии коррозии на поверхности и торцах образцов, а также имеется ряд особенностей, которые обусловлены слоистой структурой металлокомпозита, проницаемостью слоев органопластика для влаги и электролитов.

**Ключевые слова:** металлополимерный материал, органопластик, алюминий, коррозия, окисление

**Для цитирования:** Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Кан А.Ч., Соловьева Н.А. Исследование коррозионной стойкости гибридных слоистых металлополимерных материалов // Труды ВИАМ. 2024. № 8 (138). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-38-47.

Scientific article

## RESEARCH OF CORROSION RESISTANCE OF THE HYBRID LAYERED METAL POLYMERIC MATERIALS

G.F. Zhelezina<sup>1</sup>, G.S. Kulagina<sup>1</sup>, A.Ch. Kan<sup>1</sup>, N.A. Solovyova<sup>1</sup>

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

**Abstract.** Complex research of corrosion resistance of the hybrid layered metal polymer material «aluminum–organoplastic» has been conducted according to the techniques accepted for different classes of materials: metals, polymer composites, adhesive compounds. It is established that the hybrid material has corrosion on surface and at the ends of the samples such as a metal alloy has. An there is also a number of features which are caused by layered structure of the metal composite, the permeability of layers of organoplastic to moisture and electrolytes.

**Keywords:** metal polymer material, organoplastic, aluminum, corrosion, anodic oxidation

**For citation:** Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Kan A.Ch., Solovyova N.A. Research of corrosion resistance of the hybrid layered metal polymeric materials. *Trudy VIAM*, 2024, no. 8 (138), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-38-47.

## Введение

Одно из направлений современного авиационного материаловедения – разработка гибридных (комбинированных) слоистых материалов, в которых тонкие металлические листы сочетаются с высокопрочными армированными полимерными композитами. Создание таких материалов позволяет решить важную задачу, не решаемую за счет модификации металлов, а именно – обеспечить одновременное увеличение прочности и вязкости разрушения [1–4].

Для безопасно повреждаемых обшивок планера самолетов в России созданы трещиностойкие алюмополимерные материалы марок АЛОП (класса «алюминий–органопластик») и СИАЛ (класса «алюминий–стеклопластик»). Эти материалы, а также их зарубежные аналоги ARALL и GLARE обеспечивают торможение и остановку усталостных трещин в обшивках, повышают их устойчивость к локальным повреждениям, поверхностным дефектам и другим концентраторам напряжений [5–8].

Для изготовления облегченных и стойких к механическому удару деталей летательных аппаратов предложен комбинированный материал класса «магний–органопластик» [9]. Для элементов планера, подверженных при эксплуатации критическим акустическим воздействиям и вибрациям, эффективен материал класса «титан–органопластик» [10]. Для силовых конструкций с повышенными требованиями к конструкционной жесткости рекомендованы комбинированные материалы, содержащие слои высокомодульного углепластика (материалы классов «алюминий–углепластик» и «титан–углепластик») [11–13].

Важным требованием к материалам авиационного назначения является сохранение характеристик в условиях эксплуатации или длительного хранения, в том числе при воздействии неблагоприятных факторов внешней среды. Коррозионные процессы, протекающие в комбинированных материалах, имеют чрезвычайно сложную природу. Слоистость структуры, наличие нескольких поверхностей раздела («волокно–полимер», «металл–полимер»), проницаемость слоев пластика для электролитов – все это определяет специфику взаимодействия комбинированных материалов с внешней средой и обуславливает потенциальную опасность возникновения коррозии. Процессы, приводящие к ухудшению служебных характеристик комбинированных материалов при неблагоприятных условиях, можно условно разделить на следующие группы [14–19]:

- коррозия внешних металлических поверхностей;
- коррозия на границе раздела «металл–полимер»;
- нарушение адгезионных связей между слоями металла и полимерного композита;
- снижение уровня механических характеристик слоев полимерного композита в результате тепловлажностного старения;
- изменение эпюры остаточных напряжений в металлических и полимерных слоях вследствие их релаксации;
- физико-химические процессы, вызывающие коррозию вследствие особенностей контактирующих материалов (например, электрохимическая коррозия алюминиевого сплава при контакте с углепластиком за счет различия электрических потенциалов).

Для изучения коррозионных процессов, происходящих в комбинированных слоистых материалах под влиянием внешней среды, необходим комплексный подход, включающий методологии, используемые для исследования различных групп материалов: металлов, покрытий, клеевых соединений и полимерных композитов.

В данной статье приведены сведения о коррозионной стойкости комбинированных материалов класса «алюминий–органопластик», а также результаты исследования

процессов, протекающих в слоях комбинированного материала, на внутренних поверхностях раздела и влияющих на коррозию материала в целом.

### Материалы и методы

Исследованы комбинированные слоистые материалы класса «алюминий–органопластик». В составе слоев органопластика использовали наполнитель из арамидных волокон (ткань или жгут) и эпоксикаучуковое пленочное связующее с температурой отверждения 120 °С. Типовая структура материала класса «алюминий–органопластик»: сплав Д16ч.-АТ (3 слоя толщиной 0,5 мм) и органопластик (2 слоя толщиной 0,15 мм).

Материал класса «алюминий–органопластик» изготовлен методом автоклавного формования. Листы из сплава Д16ч.-АТ предварительно подвергали анодному оксидированию (в хромовокислотном, сернокислотном или фосфорнокислотном электролите) для защиты от коррозии и повышения прочности адгезионного соединения с полимером. Укладку жгутового наполнителя осуществляли методом намотки на плоскую оправку.

После автоклавного формования листы из материала класса «алюминий–органопластик» подвергали пластическому деформированию для оптимизации остаточных термических напряжений.

Образцы для проведения испытаний изготовлены методом механической обработки.

Коррозионную стойкость материала класса «алюминий–органопластик» исследовали в соответствии с методологическими подходами, используемыми для металлов [20–22]. Проводили испытания материала класса «алюминий–органопластик» на общую коррозию и коррозию под напряжением. Образцы выдерживали в коррозионно-активных средах в свободном состоянии (общая коррозия) и под действием изгибающих напряжений, уровень которых составлял 70 % от предела текучести (коррозия под напряжением). Для коррозионных испытаний использовали камеры солевого тумана, тропического климата, а также тепла и влаги. В камерах создали следующие условия:

- камера тропического климата (циклический режим испытаний): 8 ч при температуре 50±5 °С и влажности 100 %, 12 ч при температуре 20±5 °С и влажности 100 %, 8 ч при температуре 20±5 °С и влажности 65 %;

- камера тепла и влаги: температура 70 °С, относительная влажность 98 % (образцы устанавливали в эксикаторе над поверхностью воды);

- камера солевого тумана: распыление 5%-ного раствора NaCl в течение 3 мин с периодичностью 20 мин при температуре 35 °С.

Для исследования изменений, происходящих под воздействием агрессивных сред в структуре слоистого материала класса «алюминий–органопластик», в слоях металла и органопластика, на границах их раздела, использовали методологические подходы, принятые при изучении полимерных композиционных материалов [23–25]. Методом крутильных колебаний определяли динамический модуль сдвига и тангенс угла механических потерь слоистого композита [26].

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

### Результаты и обсуждение

#### *Общая коррозия и коррозия под напряжением*

Результаты испытаний образцов материала класса «алюминий–органопластик» на общую коррозию (в свободном состоянии) и коррозию под напряжением с использованием методологии, принятой для алюминиевых сплавов, приведены в таблице.

Коррозионную стойкость оценивали по изменению внешнего вида образцов, характеру и глубине коррозионных поражений. В процессе выдержки в коррозионно-активной среде наблюдали появление очагов коррозии на поверхности и торцах образцов. Видимые расслоения по границе металлических и полимерных слоев отсутствовали. Степень коррозионных поражений образцов зависит от ряда факторов: коррозионной активности среды, типа подготовки поверхности алюминиевых листов, входящих в состав слоистого материала, присутствия изгибающих нагрузок.

**Коррозионная стойкость образцов слоистого материала класса «алюминий–органопластик» после 6 мес. испытаний**

Условия испытания	Коррозия	Электролит для подготовки поверхности алюминиевых листов	Площадь поверхности/торца, занятая продуктами коррозии, %	Максимальная глубина коррозии, мкм	Время до появления коррозии, сут
Камера солевого тумана	Под напряжением	Хромовокислотный	90/80	102	30
	Общая		28/25	54	36
	Под напряжением	Сернокислотный	20/60	48	28
	Общая		15/40	31	46
	Под напряжением	Фосфорнокислотный	100/80	204	10
	Общая		100/100	276	25
Камера тропического климата	Под напряжением	Хромовокислотный	10/30	24	50
	Общая		5/15	18	170
	Под напряжением	Сернокислотный	5/20	10	85
	Общая		Нет/нет	Нет	–
	Под напряжением	Фосфорнокислотный	40/30	51	40
	Общая		25/10	35	76
Камера тепла и влаги	Общая	Хромовокислотный	Нет/нет	Нет	–
	Под напряжением	Сернокислотный	Нет/нет	Нет	–
	Общая		Нет/нет	Нет	–
	Общая	Фосфорнокислотный	15/20	12	167

При испытаниях на общую коррозию и коррозию под напряжением комбинированного материала класса «алюминий–органопластик» проявляются закономерности, типичные для монолитных листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ. Наибольшая коррозионная стойкость получена для материала класса «алюминий–органопластик», в котором листы алюминиевого сплава предварительно подвергали анодному оксидированию в сернокислотном электролите с образованием анодно-оксидного покрытия с высоким уровнем защитных свойств. В работах [27, 28] показано, что современные технологии анодного оксидирования позволяют обеспечить коррозионную стойкость алюминиевых сплавов при воздействии агрессивных факторов внешней среды, включая морские условия.

Коррозионная стойкость образцов материала класса «алюминий–органопластик» при испытаниях на общую коррозию и коррозию под напряжением снижается с увеличением активности среды. Наименьшая коррозионная стойкость слоистого материала наблюдается в камере солевого тумана. Присутствие изгибающей нагрузки (коррозия под напряжением) усиливает коррозионные поражения поверхности и торцов образцов материала класса «алюминий–органопластик».

***Влияние коррозионных сред на состояние внутренних слоев материала класса «алюминий–органопластик»***

Типовые испытания комбинированного материала позволяют судить о коррозии металла на поверхности и торцах образцов, но не дают представления о процессах, протекающих в слоях органопластика и металла, на границе их раздела, внутренних металлических поверхностях, контактирующих со слоями органопластика. Для оценки влияния коррозионных сред на изменение внутреннего состояния слоистого материала класса «алюминий–органопластик» использован метод крутильных колебаний, позволяющий определить динамический модуль сдвига – характеристику, чувствительную к изменению структуры полимерного композита и адгезионных связей на границах слоев металла и органопластика.

Исследовали узкие (шириной 10 мм) образцы с незащищенными торцами. В процессе выдержки в коррозионных средах наблюдали уменьшение модуля сдвига образцов материала класса «алюминий–органопластик» (рис. 1), что свидетельствует об изменении состояния слоев металла и органопластика, а также внутренних поверхностей раздела.

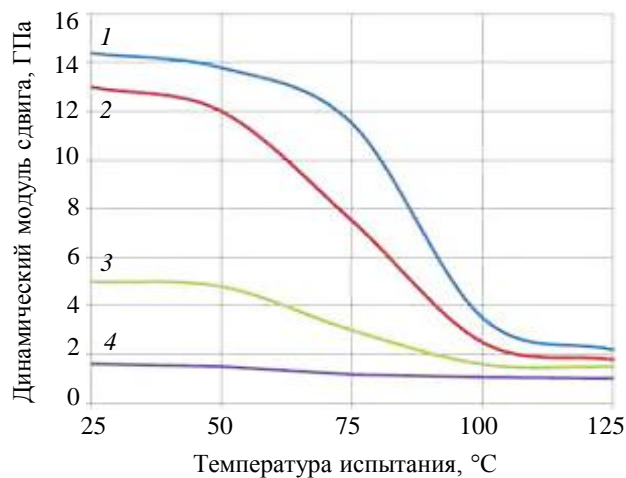


Рис. 1. Зависимость динамического модуля сдвига образцов материала класса «алюминий–органопластик» с незащищенными торцами в исходном состоянии (1) и после выдержки в 3%-ном растворе NaCl в течение 60 (2), 90 (3) и 120 сут (4) от температуры

На рис. 2 показано, что в процессе выдержки в агрессивной среде увеличиваются масса образцов и их толщина вблизи незащищенных торцов. По-видимому, увеличение массы и толщины является совместным результатом поглощения влаги и электролитов слоями органопластика, а также появления продуктов коррозии на внутренних поверхностях металла вблизи незащищенных торцов. В реальных конструкциях, чтобы исключить возможность появления коррозии на внутренних поверхностях металлических листов вблизи отверстий, крепежа, стыков, необходимо использовать защитные лакокрасочные покрытия, герметики для предотвращения сорбции влаги и электролитов в слоях полимерного композита.

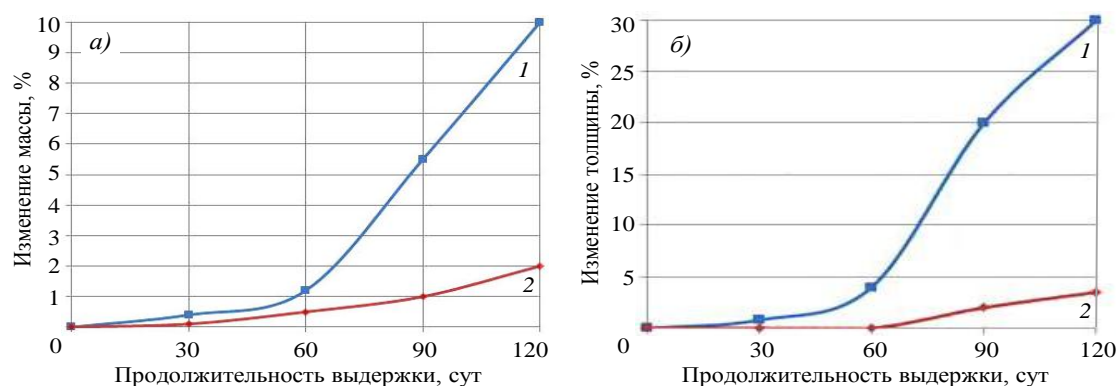


Рис. 2. Изменение массы (а) и толщины (б) образцов материала класса «алюминий–органопластик» без защиты (1) и с защитой (2) торцов после выдержки в 3%-ном растворе NaCl

Методом крутильных колебаний также выявлены особенности поведения слоистого материала класса «алюминий–органопластик» при коррозионных испытаниях под действием изгибающих нагрузок. На рис. 3 показаны зависимости динамического модуля сдвига материала класса «алюминий–органопластик» от продолжительности выдержки в коррозионной среде при наличии изгибающей нагрузки различных уровней. Испытаны образцы, подвергнутые пластическому деформированию до уровня остаточной деформации 0,5 % для оптимизации остаточных термических напряжений.

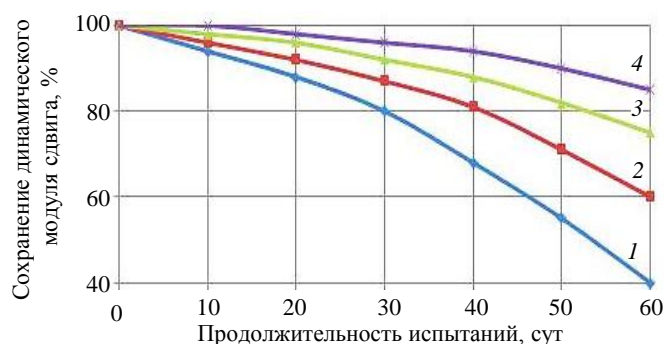


Рис. 3. Зависимость динамического модуля сдвига образцов материала класса «алюминий–органопластик» в свободном состоянии (1) и при постоянном воздействии изгибающих напряжений 80 (2), 100 (3) и 130 МПа (4) от продолжительности коррозионных испытаний

Установлено, что значение динамического модуля образцов, экспонированных без нагрузки, уменьшается в большей степени, чем у образцов под изгибающей нагрузкой в диапазоне напряжений 80–130 МПа. Наибольшую коррозионную стойкость имели образцы, экспонированные при максимальном уровне изгибающих напряжений 130 МПа. Полученные результаты подтверждают, что механические напряжения существенно замедляют отрицательное воздействие коррозионно-активной среды на состояние внутренних поверхностей слоистого материала класса «алюминий–органопластик». Можно предположить, что напряжения, возникающие в слое органопластика, способствуют замедлению процессов переноса влаги и электролитов на внутренние металлические поверхности, вследствие чего сопротивление коррозии увеличивается.

### Заключения

Исследована коррозионная стойкость гибридного материала класса «алюминий–органопластик». В соответствии с методиками, принятыми для металлов, проведены испытания на общую коррозию и коррозию под напряжением. Показано, что для материала

класса «алюминий–органопластик» характерны общие с металлом закономерности развития коррозии на поверхности и торцах образцов. Коррозионная стойкость металлокомпозита, так же как и алюминиевого сплава, зависит от агрессивности коррозионной среды, защитных свойств анодно-оксидного покрытия, предыстории материала (в частности, предварительного пластического деформирования с целью оптимизации остаточных напряжений или при формообразовании деталей требуемой конфигурации).

В то же время отмечены особенности протекания коррозионных процессов в материале класса «алюминий–органопластик», которые обусловлены слоистостью структуры, проницаемостью слоев органопластика для влаги и электролитов. Методом крутильных колебаний выявлено снижение модуля сдвига узких (шириной 10 мм) образцов с незащищенными лакокрасочным покрытием торцами при длительном воздействии агрессивной среды. В процессе выдержки в растворе NaCl наблюдали также увеличение массы и толщины образцов, что, по-видимому, является результатом поглощения влаги и появления продуктов коррозии на внутренних поверхностях металла.

Обнаружено, что изгибающие напряжения замедляют отрицательное воздействие коррозионно-активной среды на состояние внутренних поверхностей материала класса «алюминий–органопластик» (снижение динамического модуля сдвига проявляется в меньшей степени). Сделано предположение, что наличие изгибающих напряжений в слоях органопластика, «заневоленного» между листами алюминиевого сплава, способствует замедлению процессов переноса влаги и электролитов на внутренние металлические поверхности, вследствие чего сопротивление коррозии увеличивается.

Для обеспечения коррозионной стойкости элементов конструкций из комбинированного материала класса «алюминий–органопластик» при длительной эксплуатации в обще- и всеклиматических условиях применимы типовые методы защиты: анодно-оксидные покрытия листов алюминиевого сплава, лакокрасочные покрытия, герметики для усиления защиты в местах отверстий, стыков, крепежа и т. д.

#### Список источников

1. Kablov E.N., Antipov V.V., Girsh R.I., Serebrennikova N.Y., Konovalov A.N. Fiber Metal Laminates Based on Aluminum–Lithium Alloy Sheets in New-generation Aircraft // *Russian Engineering Research*. 2021. Vol. 41. No. 3. P. 215–221.
2. Podzhivotov N.Y., Kablov E.N., Antipov V.V. et al. Laminated Metal-Polymeric Materials in Structural Elements of Aircraft // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Vol. 8. No. 2. P. 211–221.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // *Цветные металлы*. 2016. № 8 (884). С. 86–91. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.13.
4. Машинская Г.П., Железина Г.Ф. Алюминий // *Большая Российская энциклопедия: в 35 т. М.: Большая российская энциклопедия*, 2005. Т. 1. С. 518.
5. Антипов В.В., Серебрянникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
6. Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F., Senatorova O.G. Laminated Fibrous Metal – Polymer Composites // *Soviet Advanced Composites Technology Series / eds. J.N. Fridleander, I.H. Marshall*. 1995. No. 3: Metal Matrix Composites. P. 487–570.
7. Gunnink J.W., Vlot A., De Vries T.J., Van Der Hoeven W. Glare technology development 1997–2000 // *Applied Composite Materials*. 2002. No. 9. P. 201–219.
8. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Гирш Р.И., Серебрянникова Н.Ю., Коновалов А.Н. Конструируемые слоистые материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов и композитов в конструкциях летательных аппаратов нового поколения // *Вестник машиностроения*. 2020. № 12. С. 46–52.
9. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Соловьева Н.А., Кулагина Г.С. Арамидные органотекстолиты для ударостойких авиационных конструкций // *Журнал прикладной химии*. 2019. Т. 92. № 3. С. 358–364. DOI: 10.1134/S0044461819030101.

10. Железина Г.Ф., Колобков А.С., Кулагина Г.С., Кан А.Ч. Демпфирующие свойства гибридных слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых, титановых сплавов и слоев органопластика // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-10-19.
11. Акмеев А.Р., Гуляев И.Н., Ильичев А.В., Иванов Н.В. Исследование механического поведения металлокомпозита (алюминий–углепластик) с адаптивной схемой армирования // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 3 (48). С. 43–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-43-49.
12. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Путырский С.В., Крохина В.А. Титанополимерные слоистые материалы // Авиационные материалы и технологии. 2016. № S2 (44). С. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-56-62.
13. Арисланов А.А., Гончарова Л.Ю., Ночовная Н.А., Гончаров В.А. Перспективы использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах // Труды ВИАМ. 2015. № 10. Ст. 04 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.
14. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Влияние внутренних напряжений на старение полимерных композиционных материалов. Обзор // Механика композитных материалов. 2021. Т. 57. № 5. С. 805–822.
15. Старцев О.В., Кротов А.С., Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И., Антипов В.В., Гращенков Д.В. Сорбция и диффузия влаги в слоистых металлополимерных композиционных материалах типа «СИАЛ» // Материаловедение. 2011. № 12. С. 38–44.
16. Старцев В.О., Плотников В.И., Антипов Ю.В. Обратимые эффекты влияния влаги при определении механических свойств ПКМ при климатических воздействиях // Труды ВИАМ. 2018. № 5 (65). Ст. 12 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-110-118.
17. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., доп. и перераб. М.: ВИАМ, 2015. Т. 13: Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов. 270 с.
18. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
19. Антипов В.В., Курс М.Г., Гирш Р.И., Серебренникова Н.Ю. Натурные климатические испытания металлополимерных композиционных материалов типа СИАЛ в морском климате // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-56-64.
20. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2. С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-02-76-87.
21. 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.
22. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 2. Новые подходы к оценке коррозивности приморских атмосфер // Коррозия: материалы, защита. 2016. № 1. С. 1–15.
23. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. I. Оценка влияния значимых факторов воздействия // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 12. С. 7–16.
24. 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: 10.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
25. Старцев В.О. Старение полимерных композиционных материалов в морской воде (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-148-170.

26. Способ измерения параметров свободно затухающих колебаний крутильного маятника: пат. RU 2258912 Рос. Федерация; заявл. 14.05.03; опубл. 20.08.05.
27. Дуюнова В.А., Козлов И.А., Оглодков М.С., Козлова А.А. Современные тенденции анодного оксидирования алюминий-литиевых и алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 8 (80). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89.
28. Фомина М.А., Волков И.А., Вдовин А.И., Ямщиков Е.И. Исследование защитной способности анодно-оксидного покрытия с экологически улучшенной технологией наполнения // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-101-110.

### References

1. Kablov E.N., Antipov V.V., Girsh R.I., Serebrennikova N.Y., Konovalov A.N. Fiber Metal Laminates Based on Aluminum–Lithium Alloy Sheets in New-generation Aircraft. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 3, pp. 215–221.
2. Podzhivotov N.Y., Kablov E.N., Antipov V.V. et al. Laminated Metal-Polymeric Materials in Structural Elements of Aircraft. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 211–221.
3. Kablov E.N., Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu. New-generation aluminum-lithium alloys and layered aluminum-glass plastics based on them. *Tsvetnyye metally*, 2016, no. 8 (884), pp. 86–91. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.13.
4. Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F. Alor. *The Great Russian Encyclopedia*: in 35 vols. Moscow, 2005, vol. 1, p. 518.
5. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N., Nefedova Yu.N. Perspectives of application of fiber metal laminate materials based on aluminum alloys in aircraft design. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
6. Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F., Senatorova O.G. Laminated Fibrous Metal – Polymer Composites. *Soviet Advanced Composites Technology Series*. Eds. J.N. Fridleander, I.H. Marshall. 1995, no. 3: Metal Matrix Composites, pp. 487–570.
7. Gunnink J.W., Vlot A., De Vries T.J., Van Der Hoeven W. Glare technology development 1997–2000. *Applied Composite Materials*, 2002, no. 9, pp. 201–219.
8. Kablov E.N., Antipov V.V., Girsh R.I., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N. Engineered layered materials based on sheets of aluminum-lithium alloys and fiberglass in the structures of new-generation aircraft. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2020, no. 12, pp. 46–52.
9. Zhelezina G.F., Voynov S.I., Solovieva N.A., Kulagina G.S. Aramid organo-textolites for impact-resistant aircraft structures. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2019, vol. 92, no. 3, pp. 358–364. DOI: 10.1134/S0044461819030101.
10. Zhelezina G.F., Kolobkov A.S., Kulagina G.S., Kan A.Ch. Damping properties of hybrid layered metal-polymer materials based on aluminum, titanium alloys and organoplastics layers. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 25, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-10-19.
11. Akmееv A.R., Gulyaev I.N., Ilyichev A.V., Ivanov N.V. Research of mechanical behavior of metal composite (aluminum and carbon fiber-reinforced polymer) with an adaptive reinforcement scheme. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 3 (48), pp. 43–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-43-49.
12. Yakovlev A.L., Nochovnaya N.A., Putyrskij S.V., Krohina V.A. Titanium-polymer laminated materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. S2, pp. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-56-62.
13. Arislanov A.A., Goncharova L.J., Nochovnaya N.A., Goncharov V.A. Prospects for the use of titanium alloys in laminated composite materials. *Trudy VIAM*, 2015, no. 10, paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 12, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.
14. Kablov E.N., Startsev V.O. Effect of Internal Stresses on Aging of Polymer Composite Materials. Review. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 805–822.
15. Startsev O.V., Krotov A.S., Senatorova O.G., Anikhovskaya L.I., Antipov V.V., Grashchenkov D.V. Sorption and Diffusion of Moisture in Layered Metal-Polymer Composite Materials of the SIAL Type. *Materialovedenie*, 2011, no. 12, pp. 38–44.

16. Startsev V.O., Plotnikov V.I., Antipov Yu.V. Reversible influence of moisture on the mechanical properties of PCM after weathering. *Trudy VIAM*, 2018, no. 5 (65), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 12, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-110-118.
17. *Aviation materials: a reference book in 13 vols.* Ed. E.N. Kablov. 7th ed., add. and rev. Moscow: VIAM, 2015, vol. 13: Climatic and microbiological resistance of non-metallic materials, 270 p.
18. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
19. Antipov V.V., Kurs M.G., Girsh R.I., Serebrennikova N.Yu. Climatic field tests of SIAL type metal-polymer composition materials in marine climate. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-56-64.
20. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87.
21. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M., Panin S.V. Corrosive aggressiveness of the coastal atmosphere. Part 1. Influencing factors (review). *Korroziya: materialy, zashchita*, 2013, no. 12, pp. 6–18.
22. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Corrosive aggressiveness of the coastal atmosphere. Part 2. New approaches to assessing the corrosivity of coastal atmospheres. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2016, no. 1, pp. 1–15.
23. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic aging of polymer composite materials for aviation purposes. I. Assessment of the influence of significant influencing factors. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2019, no. 12, pp. 7–16.
24. 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: February 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
25. Startsev V.O. The degradation of polymer composite materials in seawater (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 12. (accessed: March 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-148-170.
26. *Method for measuring parameters of freely damped oscillations of a torsional pendulum*: pat. RU 2258912 Rus. Federation; appl. 14.05.03; publ. 20.08.05.
27. Duyunova V.A., Kozlov I.A., Oglodkov M.S., Kozlova A.A. Modern trends in the anodic oxidation of aluminum-lithium and aluminum alloys (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 8 (80), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89.
28. Fomina M.A., Volkov I.A., Vdovin A.I., Yamshchikov E.I. Study of protective capacity anodic oxide coating with environmental friendly improved filling technology. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 12, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-101-110.

#### Информация об авторах

**Железина Галина Федоровна**, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Кулагина Галина Серафимовна**, начальник сектора, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Кан Алексей Чангирович**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Соловьева Наталия Александровна**, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Galina F. Zhelezina**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Galina S. Kulagina**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Alexey Ch. Kan**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Natalia A. Solovyova**, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 20.06.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 26.06.2024.  
The article was submitted 20.06.2024; approved and accepted for publication after reviewing 26.06.2024.