

Научная статья

УДК 620.193.21

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-34-44

## ИССЛЕДОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ГИБРИДНЫХ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И АРАМИДНОГО ОРГАНОПЛАСТИКА

Г.Ф. Железина<sup>1</sup>, Г.С. Кулагина<sup>1</sup>, А.Ч. Кан<sup>1</sup>, В.О. Старцев<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.** Исследована климатическая стойкость гибридных слоистых металлополимерных материалов класса «алюминий–органопластик» в различных природно-климатических и лабораторных условиях (теплый влажный и морской климат, камера солевого тумана и др.). Установлено, что при экспозиции листов материалов Alor D16/41 и Alor D16/41H в теплом влажном климате не наблюдается снижения упруго-прочностных свойств образцов. При экспозиции образцов шириной 10 мм с незащищенными торцами уровень сохранения прочности при растяжении составляет 82–94 %.

**Ключевые слова:** металлополимерные композиты, сплавы, арамидный органопластик, климатическая стойкость, влагопоглощение

**Для цитирования:** Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Кан А.Ч., Старцев В.О. Исследование климатической стойкости гибридных слоистых металлополимерных материалов на основе алюминия и арамидного органопластика // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-34-44.

Scientific article

## RESEARCH OF THE CLIMATE STABILITY OF HYBRID LAYERED METAL POLYMER MATERIALS BASED ON ALUMINIUM AND ARAMID ORGANOPLASTICS

G.F. Zhelezina<sup>1</sup>, G.S. Kulagina<sup>1</sup>, A.Ch. Kan<sup>1</sup>, V.O. Startsev<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.** Climatic stability of hybrid layered metal polymer materials of the «aluminum–organoplastics» class in different climatic and laboratory conditions (warm humid climate, sea climate, salt spray chamber, etc.) is investigated. It is established that properties of materials Alor D16/41 (sheet) and Alor D16/41H (sheet) exposed in warm humid climate does not show reducing the elastic-strength properties of the samples. When exposed to narrow samples with a width of 10 mm with unprotected ends the level of preservation of tensile strength is 82–94 % from the initial value.

**Keywords:** layered metal polymer composite material, alloys, aramid organoplastics, climate stability, moisture absorption

**For citation:** Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Kan A.Ch., Startsev V.O. Research of the climate stability of hybrid layered metal polymer materials based on aluminium and aramid organoplastics. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-34-44.

## Введение

Обеспечение надежной работы элементов конструкций при эксплуатации в различных природно-климатических условиях – одно из основных требований, предъявляемых к современным материалам авиационного назначения. Это особенно важно для материалов внешнего контура летательных аппаратов, постоянно подвергающихся воздействию внешней среды: нагреву, охлаждению, атмосферным осадкам, солнечной радиации и т. д. [1, 2].

Для внешних обшивок планера и оперения самолетов в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан новый класс конструкционных материалов – гибридные слоистые металлополимерные композиты. Разработаны слоистые материалы класса АЛОП, состоящие из тонких листов алюминиевого сплава и слоев высокопрочного органопластика на основе арамидных волокон [3], а также слоистые материалы класса СИАЛ, состоящие из листов алюминиевого сплава и слоев стеклопластика [4–7].

Материалы АЛОП и СИАЛ по уровню свойств не уступают зарубежным аналогам – слоистым композитам ARALL и GLAR на основе алюминиевых сплавов в сочетании с органопластиком и стеклопластиком соответственно. Проводятся экспериментальные работы по созданию и исследованию слоистых материалов на основе титановых, магниевых сплавов в сочетании с угле-, стекло- и органопластичками [8, 9].

Опыт конструкторско-технологического освоения слоистых металлополимерных материалов в авиационной технике показал, что обшивки из материалов АЛОП, СИАЛ имеют высокую усталостную долговечность и стойкость к распространению усталостных трещин, что является важным преимуществом перед типовыми алюминиевыми обшивками. Рост усталостных трещин в обшивках из материала АЛОП происходит в 5 раз медленнее, чем в типовых алюминиевых обшивках, акустическая выносливость возрастает в 10 раз [10].

Необходимым условием надежной эксплуатации обшивок из гибридных слоистых материалов в составе авиационных конструкций является сохранение высокого уровня их механических характеристик при воздействии неблагоприятных факторов внешней среды.

Поведение гибридных слоистых металлополимерных материалов и типовых металлических сплавов под влиянием природно-климатических факторов может существенно различаться. К основным причинам, вызывающим эти различия, относятся слоистость структуры, наличие внутренних поверхностей раздела «металл–полимер» и «полимер–армирующие волокна», а также остаточных термических напряжений, возникающих при формовании из-за существенной разницы коэффициентов линейного теплового расширения слоев металла и полимерного композита и т. д. [11–13].

Процессы, приводящие к изменению свойств гибридных металлополимерных материалов под действием факторов внешней среды, являются сложными и многоступенчатыми, протекают в листах алюминиевого сплава, слоях полимерного композита, на границах раздела компонентов. В результате этих процессов возможны появление коррозионных поражений в слоях металла, снижение уровня свойств полимерных слоев, нарушение адгезионного взаимодействия между слоями металла и полимерного композита. Эти процессы могут происходить как независимо друг от друга, так и взаимосвязано. Например, нарушение адгезионного взаимодействия на границе «металл–полимер» может быть следствием поглощения и переноса влаги полимерными слоями с последующим образованием очагов коррозии на внутренних поверхностях металла.

Цель данной работы – изучение климатической стойкости гибридных слоистых материалов класса «алюминий–органопластик» в естественных природных и лабораторных условиях. В данной статье приведены сведения о влиянии состава, особенностей технологии изготовления и условий экспонирования на климатическую стойкость материалов класса «алюминий–органопластик».

### Материалы и методы

Объектом исследования являются гибридные слоистые материалы класса «алюминий–органопластик», состоящие из чередующихся тонких листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ и высокопрочного органопластика на основе арамидных волокон СВМ. Свойства армирующих волокон СВМ:

|                               |         |
|-------------------------------|---------|
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>  | 1400    |
| Прочность при растяжении, ГПа | 4,0–4,5 |
| Модуль упругости, ГПа         | 130     |

Исследованы равнопрочный материал марки Алор Д16/41, в котором слои органопластика армированы тканью из арамидных нитей СВМ линейной плотности 14,3 текс, и однонаправленный материал марки Алор Д16/41Н, армированный жгутом СВМ линейной плотности 58,0 текс. Листы материала Алор Д16/41 содержат три листа алюминиевого сплава Д16ч.-АТ толщиной 0,47–0,48 мм и два внутренних слоя органопластика толщиной 0,15 мм; листы материала Алор Д16/41Н – два листа алюминиевого сплава Д16ч.-АТ толщиной 0,47–0,48 мм и один внутренний слой органопластика толщиной 0,20 мм. В табл. 1 представлены свойства изученных материалов.

Таблица 1

#### Характеристики исследуемых материалов

| Характеристики  | Значения характеристик для материала |              |                 |
|---|--------------------------------------|--------------|-----------------|
|   | Алор Д16/41                          | Алор Д16/41Н | сплава Д16ч.-АТ |
| Плотность, кг/м <sup>3</sup>  | 2350                                 | 2250         | 2780            |
| Предел прочности при растяжении, МПа  | 410                                  | 650          | 415             |
| Предел текучести, МПа   | 240                                  | 340          | 275             |
| Модуль упругости при растяжении, ГПа  | 58                                   | 69           | 68              |
| Малоцикловая усталость при $\sigma_{\max} = 160$ МПа, кцикл                   | 120                                  | Более 2000   | 80              |
| Скорость роста трещины усталости, мм/кцикл ( $\Delta K = 30$ МПа $\sqrt{м}$ ) | 0,2                                  | 0,1          | 5               |

Листы материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н изготавливали методом автоклавного формования пакета, собранного из листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ, арамидной ткани и пленочного эпоксикаучукового связующего. Укладку жгутового наполнителя осуществляли методом намотки на плоскую оправку. Листы алюминиевого сплава Д16ч.-АТ предварительно подвергали анодному оксидированию в хромово-кислотном или сернокислотном электролите для повышения коррозионной стойкости и прочности адгезионного соединения с полимерным слоем [14, 15].

В ряде случаев отформованные листы материала класса «алюминий–органопластик» подвергали предварительному растяжению до уровня относительной деформации 1,8 % (остаточная деформация 0,5 %) для оптимизации остаточных термических напряжений. Такая технологическая операция позволяет существенно увеличить предел текучести и усталостную долговечность гибридного слоистого материала. Кроме того, операция пластического деформирования применяется при формообразовании обшивок одинарной и двойной кривизны. Поэтому исследование влияния пластического деформирования на климатическую стойкость материала класса «алюминий–органопластик» необходимо для обоснования технологий производства элементов конструкций.

Образцы для проведения физико-механических испытаний изготавливали из листов материала класса «алюминий–органопластик» методом механической обработки.

Климатическую стойкость материалов изучали в естественных и лабораторных условиях. На экспозицию в натуральных климатических условиях выставляли листы материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н размером 500×500 мм, а также образцы шириной 10 мм с незащищенными лакокрасочным покрытием торцами для имитации наиболее опасных условий при воздействии внешних факторов.

Для анализа влияния отдельных климатических факторов (влажности, температуры, хлоридов) на свойства материалов класса «алюминий–органопластик» образцы экспонировали в лабораторных условиях в соответствующих испытательных камерах:

– тропического климата (циклический режим испытаний: 8 ч при температуре  $50\pm 5$  °С и влажности 100 %; 12 ч при температуре  $20\pm 5$  °С и влажности 100 %; 8 ч при температуре  $20\pm 5$  °С и влажности 65 %);

– солевого тумана (распыление 5%-ного раствора NaCl в течение 3 мин, периодичность распыления 20 мин, температура в камере 35 °С).

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

### Результаты и обсуждение

Климатическую стойкость гибридных слоистых металлополимерных материалов на основе алюминия и арамидного органопластика оценивали методами, применяемыми для полимерных композиционных материалов и металлов [16–18]. Исследовали стабильность физико-механических характеристик материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н после выдержки в климатических условиях, оценивали изменения внешнего вида листов, появление короблений, расслоений и т. д.

В табл. 2 представлены результаты климатических испытаний листов материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н после экспозиции в течение 5 лет в естественных условиях в зоне теплого влажного климата. Экспозицию проводили на открытой атмосферной площадке и под навесом. На экспозицию выставлены незащищенные лакокрасочным покрытием листы материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н в двух состояниях: подвергнутые и не подвергнутые предварительному растяжению (пластическому деформированию). В производстве метод пластического деформирования используется при формообразовании деталей из плоских листов [19].

Материалы Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н обладают высокой климатической стойкостью в условиях теплого влажного климата. После 5 лет экспозиции на открытой атмосферной площадке не наблюдается снижения свойств этих материалов. Следует отметить, что предварительное пластическое деформирование листов, а также наличие изгибной нагрузки при экспозиции не снизили климатическую стойкость материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н. После пятилетней экспозиции в теплом влажном климате листы не имели расслоений, вспучиваний и короблений.

Наблюдение за изменением внешнего вида листов материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н показало, что коррозия металлической поверхности при климатических испытаниях протекает без особенностей, аналогично коррозии листов алюминиевых сплавов. После 2 лет климатического старения появляются коррозионные поражения металлической поверхности листов в виде точек и пятен размером до 20 мм. Листы, подвергнутые предварительному пластическому деформированию, проявили меньшую стойкость к коррозии, чем листы нерастянутые. После экспозиции в течение 5 лет площадь коррозионных поражений составила 25–30 и 18–20 % поверхности для листов материала Алор Д16/41, подвергнутых и не подвергнутых пластическому деформированию соответственно. Основываясь на работе [20], авторы данной статьи предполагают, что причиной этого могут быть микротрещины на поверхности металла, образовавшиеся при пластическом деформировании листов материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н.

**Климатическая стойкость материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н  
в условиях теплого влажного климата**

| Материал  | Условия экспозиции                                | Прочность при растяжении, МПа | Предел текучести при растяжении, МПа | Модуль упругости, ГПа | Прочность при межслойном сдвиге, МПа |
|---|---|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Алор Д16/41   | В исходном состоянии                              | 405                           | 240                                  | 58                    | 21                                   |
|   | 5 лет под навесом                                 | 407                           | 240                                  | 58                    | 21                                   |
|   | 5 лет на открытой площадке                        | 407                           | 240                                  | 58                    | 21                                   |
| Алор Д16/41<br>(подвергнутый<br>пластическому<br>деформированию)  | В исходном состоянии                              | 425                           | 320                                  | 58                    | 21                                   |
|   | 5 лет под навесом                                 | 415                           | 320                                  | 58                    | 20                                   |
|   | 5 лет на открытой площадке                        | 415                           | 320                                  | 58                    | 20                                   |
|   | 5 лет на открытой площадке под изгибной нагрузкой | 415                           | 320                                  | 58                    | 21                                   |
| Алор Д16/41Н<br>(подвергнутый<br>пластическому<br>деформированию) | В исходном состоянии                              | 655                           | 340                                  | 69                    | 14                                   |
|   | 5 лет под навесом                                 | 610                           | 340                                  | 69                    | 14                                   |
|   | 5 лет на открытой площадке                        | 655                           | 340                                  | 69                    | 14                                   |

Показано, что листы слоистого гибридного металлополимерного материала проявляют большую устойчивость к климатическому старению, чем листы полимерного композиционного материала. В аналогичных условиях прочность стекло- и органо-пластиков снижается до уровня 75–80 % от исходных значений, в то время как свойства материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н сохраняются на исходном уровне. В отличие от полимерных композитов, образцы гибридного слоистого металлополимерного композита, вырезанные из экспонированных листов, имели стабильные свойства в течение всего периода исследований. Слои органопластика в листах материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н защищены поверхностными слоями алюминиевого сплава, что предотвращает проникновение влаги и их тепловлажностное старение. Благодаря этому обеспечивается высокая стабильность свойств металлополимерного слоистого материала.

Полученные данные свидетельствуют о высокой климатической стойкости листов материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н. Однако необходимо учитывать, что образцы для механических испытаний вырезали из листов без учета краевого эффекта. Такой подход не позволяет оценить влияние на климатическую стойкость кромок (торцов), по которым возможно проникновение влаги и электролитов из внешней среды в слои органопластика, а также их перенос на внутренние поверхности металлических листов.

В реальных конструкциях, выполненных из слоистых материалов, наиболее опасными являются зоны, расположенные вблизи открытых торцов. Такие зоны находятся в местах конструктивных отверстий, соединений и стыков деталей. Для имитации таких зон и определения влияния незащищенных торцов на климатическую стойкость материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н проводили испытания узких образцов (шириной 10 мм) без защиты лакокрасочными покрытиями.

Хотя в реальных конструкциях обязательно присутствует защита от внешних факторов в виде лакокрасочных покрытий, паст, герметиков [20–23], испытание узких образцов с открытыми торцами проводили с целью имитации наиболее жестких условий, которые могут возникнуть при эксплуатации (например, при случайном нарушении защитного покрытия). Кроме того, при использовании таких образцов появляется возможность провести ускоренные сравнительные испытания, позволяющие оценить степень влияния отдельных климатических факторов (влажности, присутствия электролитов и др.) на стойкость слоистого материала к климатическому старению.

На рис. 1 показано, как изменяется прочность при растяжении узких незащищенных лакокрасочным покрытием образцов материала Алор Д16/41 после экспозиции в различных условиях.

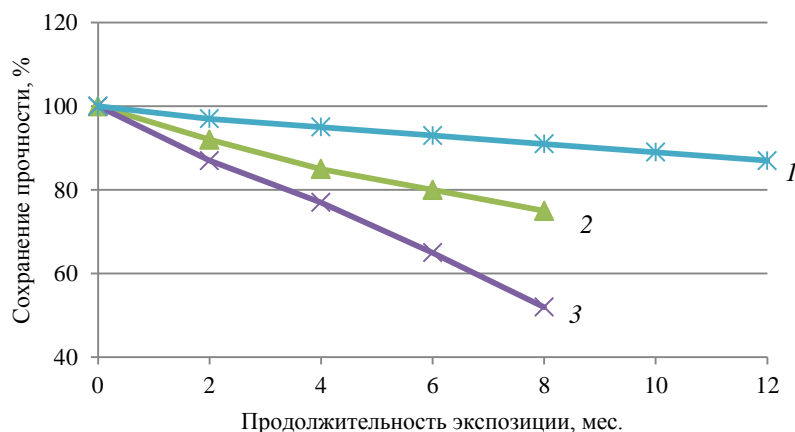


Рис. 1. Сохранение прочности при растяжении узких образцов материала Алор Д16/41 с незащищенными торцами после экспозиции в теплом влажном климате (1), камерах тропического климата (2) и солевого тумана (3). Подготовка поверхности металлических листов – анодное окислирование в сернокислотном электролите

Наибольшие потери прочности образцов наблюдали после выдержки в камере солевого тумана, наименьшие – после естественного старения в условиях теплого влажного климата. Эти результаты свидетельствуют о существенном влиянии находящейся во внешней среде влаги и электролитов на климатическую стойкость образцов материала Алор Д16/41. Присутствие влаги и электролитов, проникающих к внутренним поверхностям раздела металла и органоупластика, способствует снижению их адгезии, возникновению коррозии поверхностей металлических слоев, нарушению сплошности материала и, как результат, снижению прочности при растяжении узких незащищенных лакокрасочным покрытием образцов слоистого материала.

Стабильность механических характеристик слоистых материалов класса «алюминий–органопластик» при воздействии природно-климатических факторов зависит не только от коррозионной стойкости листов алюминиевого сплава, но и от адгезионной прочности соединения металлических листов. Важно, чтобы адгезионное соединение было устойчиво к проникновению влаги, электролитов и обеспечивало защиту внутренних поверхностей металлических листов от возникновения коррозии.

Условия природно-климатической среды (влажность, температура, концентрация солей и т. д.) проявляют различную степень активности по отношению к компонентам слоистого материала – металлу и органоупластику. В органоупластике процессы сорбции воды в камере тропического климата протекают более интенсивно, чем в камере солевого тумана [25–28]. Для слоев металла наиболее агрессивными являются условия камеры солевого тумана, где наиболее интенсивно проходят процессы коррозии.

На рис. 2 показано, что прочность при межслойном сдвиге материала Алор Д16/41 в значительной степени зависит от коррозионной активности среды, способствующей развитию коррозии на внутренних поверхностях металла, граничащих со слоем органопластика. Из этого следует, что важным фактором, определяющим климатическую стойкость слоистого гибридного материала класса «алюминий–органопластик», являются коррозионно-защитные свойства оксидного покрытия на поверхности алюминиевых листов.

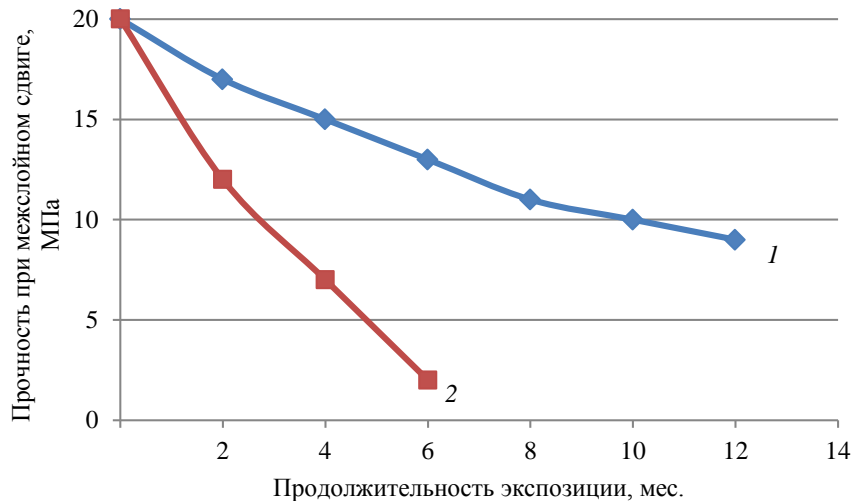


Рис. 2. Изменение прочности при межслойном сдвиге образцов материала Алор Д16/41 при экспозиции в камерах тропического климата (1) и солевого тумана (2). Подготовка поверхности металла – анодное оксидирование в хромовокислотном электролите

Типовые серноокислотные анодно-оксидные покрытия толщиной 7–12 мкм, используемые при подготовке поверхности под лакокрасочные покрытия, хорошо защищают алюминиевые сплавы от коррозии, но не обладает достаточной прочностью. Хромовокислотные оксидные покрытия при толщине 2–4 мкм имеют высокую прочность, но уступают серноокислотным анодно-оксидным покрытиям по коррозионно-защитным свойствам.

При разработке слоистых гибридных материалов класса «алюминий–органопластик» исследовали возможность повышения их коррозионной стойкости до уровня, достаточного для эксплуатации при наиболее коррозионно-опасных природно-климатических воздействиях, например в морском климате. Для решения этой задачи использовано анодное оксидирование, позволяющее получать более тонкие (толщиной 5–6 мкм) серноокислотные оксидные покрытия на поверхности листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ.

На рис. 3 представлены данные о климатической стойкости материала Алор Д16/41, экспонированного в различных условиях. Испытаниям подвергали незащищенные лакокрасочным покрытием узкие образцы (шириной 10 мм), чтобы не исключить влияния открытых торцов. Серноокислотное оксидное покрытие толщиной 5–6 мкм на листах алюминиевого сплава Д16ч.-АТ позволяет увеличить климатическую стойкость материала Алор Д16/41 по сравнению с хромовокислотным оксидным покрытием.

Уровень сохранения прочности при растяжении незащищенных лакокрасочным покрытием образцов материала Алор Д16/41 шириной 10 мм составляет 82–94 % от исходного значения при экспозиции в различных климатических зонах, включая морской климат. Это достигается путем подготовки поверхности листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ анодным оксидированием в серноокислотном электролите с образованием оксидного покрытия толщиной не более 5–6 мм.

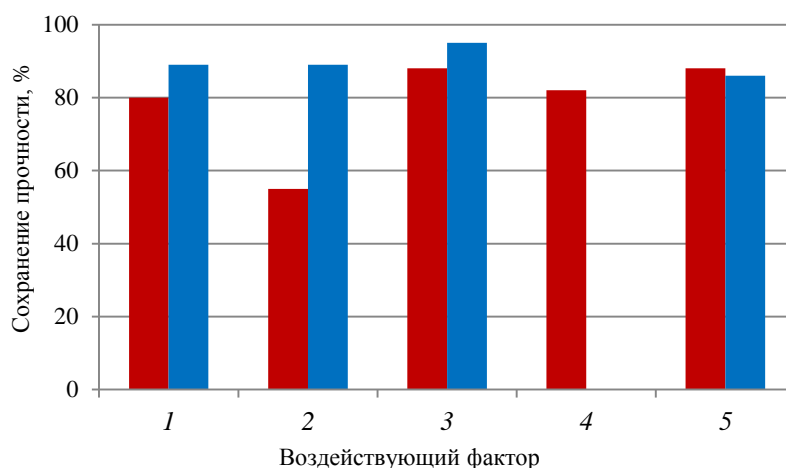


Рис. 3. Сохранение прочности при растяжении незащищенных лакокрасочным покрытием узких образцов материала Алор Д16/41 с анодно-окислительным хромовокислотным (■) и серноокислительным (■) покрытием после воздействия различных климатических условий: 1 – камера тропического климата (7 мес.); 2 – камера солевого тумана (8 мес.); 3 – теплый влажный климат, г. Батуми (10 мес.); 4 – морской климат, г. Гавана (12 мес.); 5 – морской климат, научно-исследовательское судно «Изумруд» (6 мес.)

### Заключения

Исследована климатическая стойкость гибридных слоистых металлополимерных материалов типа «алюминий–органопластик» в различных природно-климатических и лабораторных условиях (теплый влажный и морской климат, камера солевого тумана и др.).

Установлено, что при экспозиции листов материала Алор Д16/41 в теплом влажном климате на открытой атмосферной площадке и под навесом не наблюдается снижения прочности, предела текучести и модуля упругости образцов. Предварительное пластическое деформирование, используемое для оптимизации остаточных термических напряжений или формообразования детали, не влияет на климатическую стойкость материала Алор Д16/41.

При экспозиции в различных климатических зонах уровень сохранения прочности при растяжении образцов материала Алор Д16/41 шириной 10 мм, не защищенных лакокрасочным покрытием, составляет 82–94 %. Для достижения такого эффекта поверхности листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ подвергали анодному окислению в серноокислительном электролите с образованием оксидного покрытия толщиной не более 5–6 мм.

Для защиты от климатических воздействий конструкций из материалов типа Алор Д16/41 применимы типовые защитные лакокрасочные покрытия, пасты, герметики. Защитные покрытия предотвращают коррозию поверхности металлических листов, проникновение влаги и электролитов в слои органопластика. Учитывая особенности структуры гибридных слоистых металлополимерных материалов, особое внимание при нанесении защитных покрытий необходимо уделять местам расположения отверстий, соединений и стыков листов. Кроме того, при разработке конструкций из гибридных слоистых материалов необходимо предусматривать конструктивные мероприятия, исключающие накопление влаги в элементах конструкции (отсутствие «карманов», дренаж и т. п.). При выполнении этих мер климатическая стойкость и надежность деталей из слоистых материалов типа Алор Д16/41 в процессе эксплуатации и хранения такие же, как и у деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС; ВИАМ, 2002. С. 23–47.

2. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
3. Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F., Senatorova O.G. Laminated Fibrous Metal – Polymer Composites // *Metal Matrix Composites. Soviet Advanced Composites Technology Series* / eds. J.N. Fridleander, I.H. Marshall. 1995. Vol. 03. P. 487–570.
4. 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.
5. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Шестов В.В., Сидельников В.В. Слоистые гибридные материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 212–224. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-212-224.
6. 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.
7. Антипов В.В., Серебренникова 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.
8. 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: 23.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-10-19.
9. 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.
10. Машинская Г.П., Железина Г.Ф. Алюр // *Большая Российская энциклопедия*. М.: Большая российская энциклопедия, 2015. С. 518.
11. 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.
12. Дуюнова В.А., Кутырев А.Е., Серебренникова Н.Ю., Вдовин А.И., Сомов А.В. Исследование воздействия агрессивных факторов внешней среды на развитие коррозионных поражений на образцах слоистого металлокластопластика класса СИАЛ // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.
13. 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.
14. Войтович В.А. Способы подготовки поверхности изделий из металлов и сплавов // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2005. № 9. С. 19–23.
15. 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: 23.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89.
16. 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. 19–27.
17. 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.
18. Гладких А.В., Курс И.С., Курс М.Г. Анализ данных натурных климатических испытаний, совмещенных с приложением эксплуатационных факторов, неметаллических материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 10 (70). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-74-82.

19. Дуонова В.А., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Сидельников В.В., Сомов А.В. Методы формообразования металлополимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
20. Антипов В.В., Чесноков Д.В., Козлов И.А., Волков И.А., Петрова А.П. Подготовка поверхности алюминиевого сплава В-1469 перед применением в составе слоистого гибридного материала // *Труды ВИАМ*. 2018. № 4 (24). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-59-65.
21. Нефедов Н.И., Семенова Л.В., Кузнецова В.А., Веренинова Н.П. Лакокрасочные покрытия для защиты металлических и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждения // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-393-404.
22. Кузнецова В.А., Семенова Л.В., Шаповалов Г.Г. Тенденции развития в области антикоррозионных полимерных составов для защиты от коррозии крепежных соединений контактных пар комбинированных конструкций (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 1 (46). С. 25–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-25-31.
23. 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: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.

### References

1. Kablov E.N. Aviation materials science in the 21st century. Prospects and objectives. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISIS; VIAM, 2002, pp. 23–47.
2. Kablov E.N., Startsev O.V. The basic and applied research in the field of corrosion and ageing of materials in natural environments (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
3. Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F., Senatorova O.G. Laminated Fibrous Metal – Polymer Composites. *Metal Matrix Composites. Soviet Advanced Composites Technology Series*. Eds. J.N. Fridlander, I.H. Marshall. 1995, vol. 3, pp. 487–570.
4. 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.
5. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Shestov V.V., Sidelnikov V.V. Laminated hybrid materials on basis of Al–Li alloy sheets. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 212–224. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-212-224.
6. 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.
7. 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.
8. 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: November 23, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-10-19.
9. 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.
10. Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F. Alor. *Great Russian Encyclopedia*. Moscow: Great Russian Encyclopedia, 2015, p. 518.
11. 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.
12. Duyunova V.A., Kut'yev A.E., Serebrennikova N.Yu., Vdovin A.I., Somov A.V. Examination of the impact of aggressive environmental factors on the development of corrosion damage on samples of laminated glass-reinforced plastic of SIAL class. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 08, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.

13. 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.
14. Voitovich V.A. Methods for preparing the surface of products made of metals and alloys. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2005, no. 9, pp. 19–23.
15. 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: November 23, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89.
16. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite materials for aviation purposes. I. Aging mechanisms. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2010, no. 11, pp. 19–27.
17. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite materials for aviation purposes. III. Significant aging factors. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2011, no. 1, pp. 34–40.
18. Gladkikh A.V., Kurs I.S., Kurs M.G. Analysis of the data of full-scale climatic tests combined with the application of operational factors of nonmetallic materials (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 21, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-74-82.
19. Duyunova V.A., Serebrennikova N.Yu., Nefedova Yu.N., Sidelnikov V.V., Somov A.V. Methods of forming metal-polymer composite materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 18, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
20. Antipov V.V., Chesnokov D.V., Kozlov I.A., Volkov I.A., Petrova A.P. Surface preparation aluminum alloy V-1469 before use in the composition of layered hybrid material. *Trudy VIAM*, 2018, no. 4 (64), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 23, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-59-65.
21. Nefedov N.I., Semenova L.V., Kuznecova V.A., Vereninova N.P. Paint coatings for protection of metallic and polymer composite materials against aging, corrosion and biodeterioration. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-393-404.
22. Kuznetsova V.A., Semenova L.V., Shapovalov G.G. Development trends in the field of anticorrosive polymeric systems for corrosion protection of fixing connections of contact couples of combined structures (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 1 (46), pp. 25–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-25-31.
23. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.

**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)

**Старцев Валерий Олегович**, начальник лаборатории, д.т.н., 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)

**Valeriy O. Startsev**, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 05.04.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.04.2024.

The article was submitted 05.04.2024; approved and accepted for publication after reviewing 10.04.2024.