 © Авторы статьи / Authors of the article

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ/MATERIALS SCIENCE

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.25 EDN: UZYCBU

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛО- И УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ, ЭКСПОНИРОВАННЫХ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Научная статья

Стручков Н.Ф.[1,*], Копырин М.М.[2], Аммосова А.Е.[3], Дьяконов А.А.[4], Плотников А.С.[5]
[1] ORCID : 0000-0003-3078-0709;
[2] ORCID : 0000-0002-6018-6391;
[4] ORCID : 0000-0002-6959-368X;
[1] Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Российская Федерация
[2, 3, 4, 5] Якутский научный центр СО РАН, Якутск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (struchkov_n[at]rambler.ru)

Предложена: 22.09.2026; Принята: 12.11.2026; Опубликована: 17.11.2026

Аннотация

В данной статье приведены результаты исследований деградации стекло- и углепластиковых, а также гибридных композитов, экспонированных в течение 4 лет в открытых низкотемпературных климатических условиях Севера (г. Якутск, Республика Саха (Якутия)). Проведены измерения открытой пористости, шероховатости и изучены поверхности и профили композитов в исходном состоянии, после 1 года, 2 и 4 лет экспонирования. Показана динамика деградации поверхности композитов по годам, которая оказывает определенные изменения на исследуемые параметры. Выявлено, что при экспонировании в открытых условиях в гибридных композитах определяющую роль несет армирующая ткань (стеклоткань или углеткань) на поверхностных слоях.

Ключевые слова: стеклопластик, углепластик, гибридный композит, экспонирование, климат Севера, открытая пористость, поверхность, шероховатость, профиль.

STUDY OF THE SURFACE OF GLASS-FIBRE AND CARBON-FIBRE REINFORCED PLASTIC COMPOSITES USED IN NORTHERN CONDITIONS

Research article

Struchkov N.F.[1,*], Kopyrin M.M.[2], Ammosova A.E.[3], Dyakonov A.A.[4], Plotnikov A.S.[5]
[1] ORCID : 0000-0003-3078-0709;
[2] ORCID : 0000-0002-6018-6391;
[4] ORCID : 0000-0002-6959-368X;
[1] V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
[2, 3, 4, 5] The Yakut Scientific Centre of the SB RAS, Yakutsk, Russian Federation

* Corresponding author (struchkov_n[at]rambler.ru)

Suggested: 22.09.2026; Accepted: 12.11.2026; Published: 17.11.2026

Abstract

The article presents the results of studies of the degradation of glass-fibre and carbon-fibre reinforced plastics, as well as hybrid composites, exposed for four years to the open, low-temperature climatic conditions of the North (Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia)). Measurements of open porosity and surface roughness were carried out, and the surfaces and profiles of the composites were examined in their initial state, and after 1 year, 2 years and 4 years of exposure. The dynamics of surface degradation of the composites over the years are shown, which has a definite effect on the studied parameters. It was found that, when exposed to the open air, the reinforcing fabric (glass or carbon fibre) in the surface layers plays a decisive role in hybrid composites.

Keywords: glass fibre reinforced plastic, carbon fibre reinforced plastic, hybrid composite, exposure, northern climate, open porosity, surface, roughness, profile.

Введение

Благодаря своим высоким прочностным характеристикам, а также небольшой удельной массе с каждым годом полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все более широкое применение в различных отраслях (в самолетостроении, в производстве автомобилей, машиностроении, космической отрасли, медицине и др.) [1], [2], [3]. Однако ПКМ в ходе эксплуатации под воздействием различных внешних факторов склонны демонстрировать непостоянство физико-химического состояния [4], [6], [7], [8]. Основными климатическиим факторами, оказывающих значение на свойства углепластиков (УП) и стеклопластиков (СП), являются ультрафиолетовое излучение (солнечный свет), атмосферные осадки, переход между положительной и отрицательной температурой и т.д. [9], [10], [11]. Первые признаки деструкции наблюдаются на поверхностях экспонированных ПКМ, поэтому после определенного цикла испытаний следует исследовать поверхностные изменения.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Методы и принципы исследования

В качестве объектов исследования использовали композитные пластины с размерами 950×450 мм, изготовленные методом вакуумной инфузии. Стекло- и углепластиковые композиты были экспонированы на открытом полигоне ИФТПС (г. Якутск) в течение 4 лет в условиях Севера. Были определены уровни открытой пористости ($П_о$) и измерены параметры шероховатости поверхности композитов. Для этого были изготовлены образцы с размерами 40×40×5 мм, и торцевые стороны были закрыты гидрофобным лаком для исключения проникновения пропитывающей жидкости вдоль волокон ткани композитов.

Фотографии поверхностей со стороны оснастки (лицевой) и стороны вакуумного мешка (тыльной) стороны исследуемых композитов получены на микроскопе High Cloud (Shenzhen Ksl Electronic Equipment Co., Китай) при увеличении до ×20. Для определения открытой пористости использовался известный апробированный метод гидростатического взвешивания согласно ПНСТ 532-2021. В качестве рабочей пропитывающей жидкости был использован керосин. Применение керосина, обладающего высокой проникающей способностью, позволяет исключить дополнительные операции пропитки, необходимые при использовании других жидкостей. Образцы предварительно высушивались в вакуумном сушильном шкафу при температуре 333К (60°С) в течение 24 ч. Взвешивание осуществлялось на электронных аналитических весах с точностью 0,0001 г. Открытая пористость определялась по следующей формуле:

$$П_o = \frac{(m_2 - m)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100\%,$$

где, m_2 — масса насыщенного жидкостью для испытаний образца на воздухе, г;

m — масса сухого образца, г;

m_1 — масса насыщенного жидкостью для испытаний образца в емкости, г.

Параметры шероховатости были определены профилометром Surftest SJ-201P (Mitutoyo, Япония) на 60 случайно выбранных участках на каждом образце с лицевой и тыльной сторон.

Результаты и их обсуждения

На рисунках 1 и 2 показаны фотографии поверхностей лицевой стороны стекло- и углепластиков до, после первого и второго года экспонирования на открытом полигоне в условиях Севера.

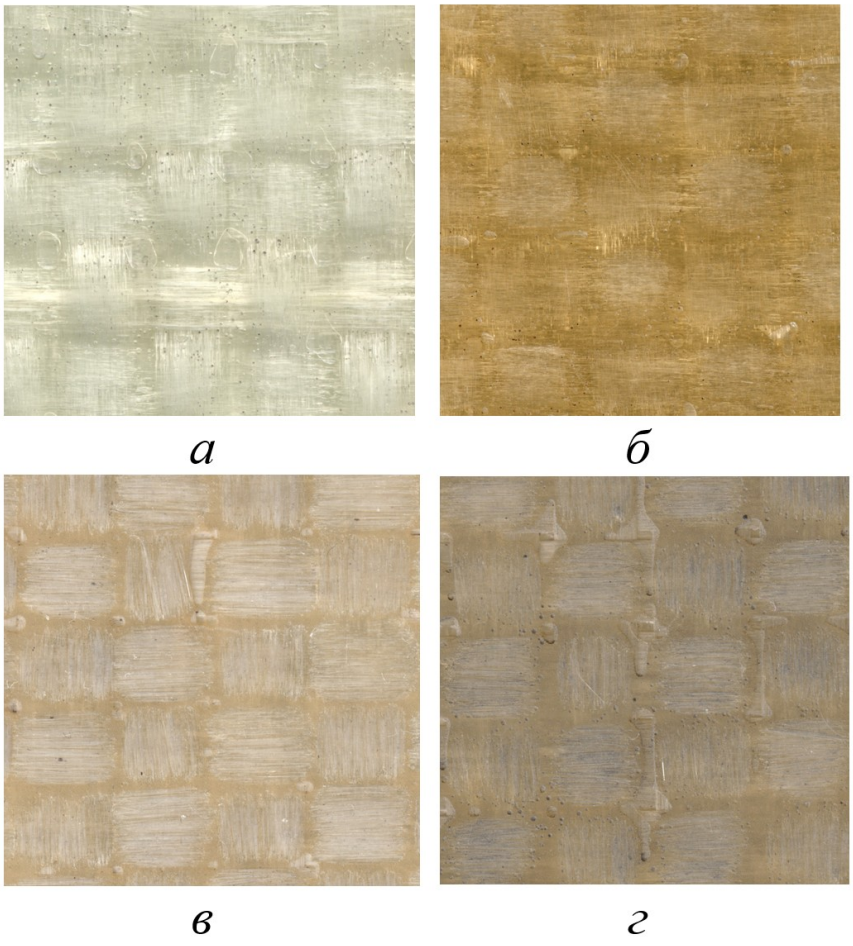


Рисунок 1 - Фото образца СП с лицевой стороны в исходном (*а*), после первого (*б*), после второго (*в*) и после четвертого (*г*) года натурных испытаний на полигоне ИФТПС СО РАН в г. Якутске

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.25.1

 © Авторы статьи / Authors of the article

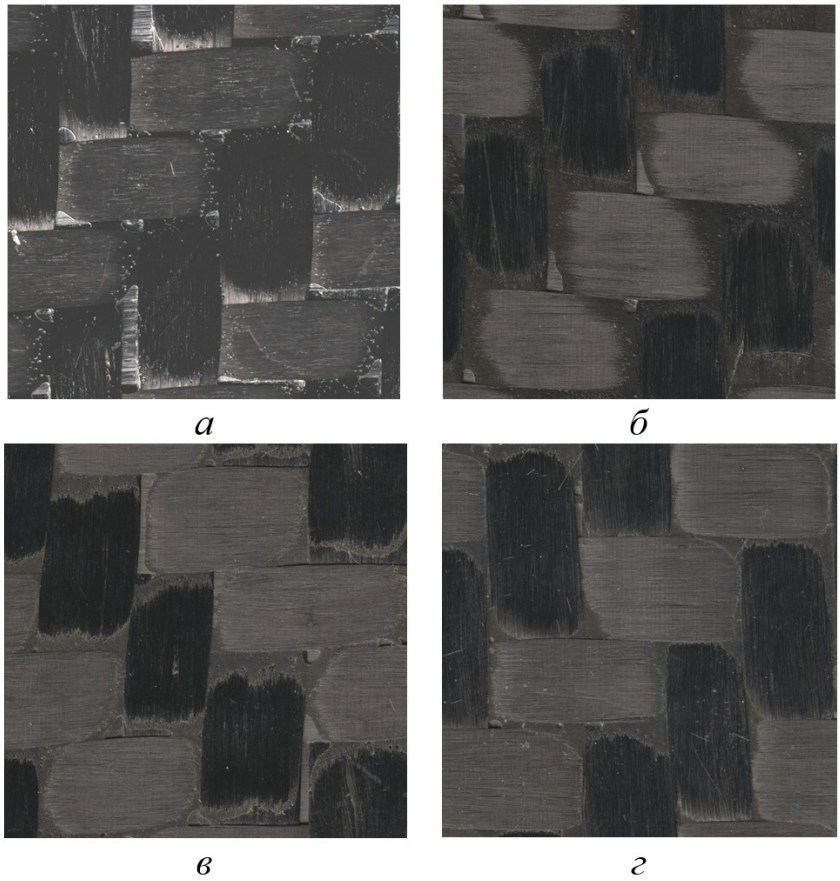


Рисунок 2 - Фото образца УП с лицевой стороны в исходном (*а*), после первого (*б*), после второго (*в*) и после четвертого (*г*) года натурных испытаний на полигоне ИФТПС СО РАН в г. Якутске
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.25.2

Как видно из фотографий, при экспонировании в условиях Севера, на поверхности стеклопластика наблюдается постепенный съём поверхностного слоя эпоксидной смолы, при котором открываются изолированные поры на перекрестиях армирующей ткани. У гибридных композитов поверхностный слой выполнен из стеклоткани, поэтому характер деградации аналогичен стеклопластику. После 4 лет климатических испытаний происходит частичное оголение волокон армирующей ткани. У углепластика также наблюдается постепенный съём поверхностного слоя эпоксидной смолы и появление пор на перекрестиях углеткани. На тыльной стороне композитов происходят минимальные изменения, наблюдаются единичные оголения выступающей части поверхности композитов, открываются некоторые изолированные поры.

В таблице 1 приведены результаты измерения открытой пористости $П_о$ исследуемых композитов. Как видно из таблицы, после 4 лет экспонирования у СП и гибридных пластиков происходит увеличение значений открытой пористости. У УП до второго года испытаний происходит увеличение открытой пористости, а после 4 лет наблюдается уменьшение значений открытой пористости до исходного значения. Поры и пустоты, находящиеся в изолированном состоянии в исходном и на начальном этапе экспонирования, с разрушением поверхностного слоя эпоксидной смолы открываются, тем самым увеличивается открытая пористость образцов. Со временем данные поры сглаживаются меняя характер (профиль) поверхности. Следует заметить, что после первого года у исследуемых композитов происходит увеличение значений открытой пористости.

Таблица 1 - Значения открытой пористости стекло- и углепластиковых композитов в исходном состоянии, после 1 года, 2 и 4 лет климатических испытаний в условиях Севера

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.25.3

Марка	Открытая пористость $П_о$, %			
	Исходные	После 1 года экспонирования	После 2 лет экспонирования	После 4 лет экспонирования
СП	0,17	0,44	0,27	0,28

 © Авторы статьи / Authors of the article

Марка	Открытая пористость $П_о$, %			
	Исходные	После 1 года экспонирования	После 2 лет экспонирования	После 4 лет экспонирования
СП1УП3	0,09	0,23	0,19	0,31
СП2УП2	0,13	0,21	0,25	0,33
СП3УП1	0,15	0,15	0,23	0,33
УП	0,13	0,42	0,45	0,13

Далее были исследованы поверхности композитов с двух сторон (лицевая и тыльная) на профилометре. На таблице 2 показаны значения средней шероховатости (*Ra*) лицевой и тыльной стороны.

Таблица 2 - Значения средней шероховатости лицевой и тыльной стороны стекло- и углепластиковых композитов в исходном состоянии, после 1 года, 2 и 4 лет климатических испытаний в условиях Севера

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.25.4

Марка	Средняя шероховатость поверхности (*Ra*), мкм			
	Исходная, Лицевая/тыльная	После первого года экспонирования, Лицевая/тыльная	После второго года экспонирования, Лицевая/тыльная	После четвертого года экспонирования, Лицевая/тыльная
СП	1,61 / 5,61	1,5 / 5,93)	5,92 / 5,62	8,38 / 9,05
СП1УП3	1,32 / 3,30	1,49 / 5,12	5,21 / 4,25	8,70 / 6,38
СП2УП2	1,86 / 5,22	1,95 / 4,81	5,54 / 6,17	9,32 / 7,30
СП3УП1	2,44 / 6,07	1,92 / 5,48	6,14 / 5,82	8,83 / 6,71
УП	1,17 / 6,55	1,07 / 4,55	2,30 / 5,95	3,32 / 8,79

Как видно из таблицы, изменения значений шероховатости с лицевой стороны у композитов после первого года экспонирования разные, наблюдается повышение, так же и понижение. После второго года экспонирования шероховатость резко увеличивается у всех марок исследуемых композитов до *Ra* ≈5-6 мкм, а у УП до *Ra* ≈2,3 мкм. После 4 лет испытаний значения шероховатости увеличивается до *Ra* ≈8-9 мкм, у УП до *Ra* ≈3,3 мкм. Тыльная сторона исследуемых материалов также показывает разнонаправленное изменение независимо от времени испытания. Значения средней шероховатости лежат на интервале погрешности измерений, из этого следует предположить, что в течение испытуемого времени тыльная сторона не подвержена (или подвержена минимально) воздействию природным условиям очень холодного климата.

На рисунках 3–5 показаны характерные профилограммы поверхностей лицевых сторон стекло- и углепластиковых композитов до, после 1 года, 2 и 4 лет испытаний на открытом воздухе в условиях Севера. Следует отметить, что на СП и гибридных композитах поверхностная ткань выполнена из стеклоткани, поэтому деградация поверхности происходит практически одинаково. Как видно из рисунков, после второго года экспонирования происходит изменение профилей композитов, лицевая сторона (солнечная) претерпевает существенные изменения, поверхность приобретает более шероховатую текстуру. Данные изменения происходят за счет выветривания поверхностного слоя, открывания изолированных пор и оголения наиболее близких к поверхности участков волокон армирующей ткани композитов. После 4 лет испытаний у профиля увеличивается размах, на поверхность выступает оголенная армирующая ткань.

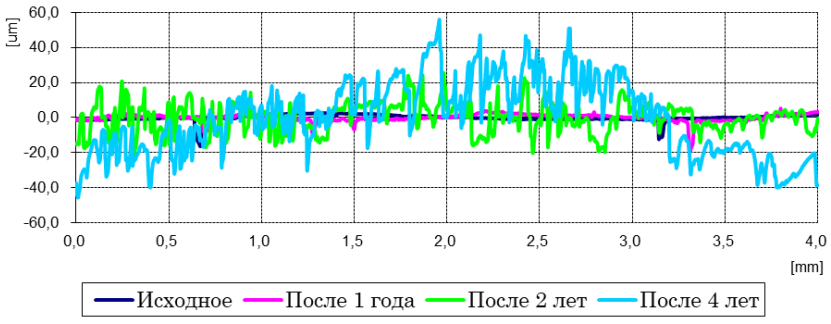


Рисунок 3 - Профилограммы поверхности лицевой стороны СП до, после 1 года, 2 и 4 лет натурных испытаний на полигоне ИФТПС СО РАН в г. Якутске

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.25.5

 © Авторы статьи / Authors of the article

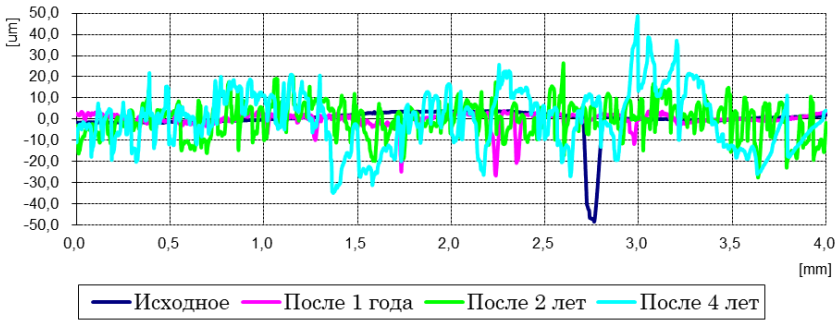


Рисунок 4 - Профилограммы поверхности лицевой стороны СП2УП2 до, после 1 года, 2 и 4 лет натурных испытаний на полигоне ИФТПС СО РАН в г. Якутске
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.25.6

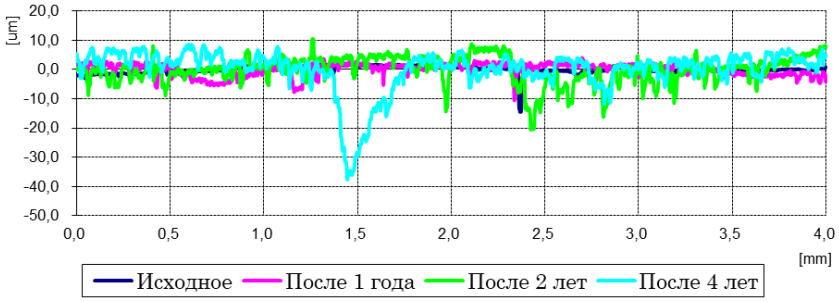


Рисунок 5 - Профилограммы поверхности лицевой стороны УП до, после 1 года, 2 и 4 лет натурных испытаний на полигоне ИФТПС СО РАН в г. Якутске
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.25.7

Профиль поверхности УП также претерпевает определенные изменения, характерные как у СП и гибридных композитов. В отличие от данных композитов у УП изменения минимальные, наблюдаются открывшиеся поры на перекрестиях плетения углеткани.

Заключение

Таким образом, испытание на открытом полигоне стекло-, и углепластиковых композитов в течение 4 лет показали, что начиная со второго года климатических испытаний на поверхностях лицевой стороны происходят существенные изменения. Из-за съёма поверхностного слоя эпоксидной смолы и частичного оголения волокон армирующей ткани композитов увеличиваются значения открытой пористости и средней шероховатости, что также отражается на профилях поверхностей. Минимальные изменения поверхности лицевой стороны ПКМ наблюдается у УП, а у СП и гибридных сопоставимы, что объясняется тем, что у них поверхностный слой армирующей ткани выполнены из стеклоткани.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FWRS-2024-0058 (124103000033-3) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Funding

This work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FWRS-2024-0058 (124103000033-3) using the scientific equipment of the Shared Research Facility of the Federal Research Center "Yakutsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences" (FRC YSC SB RAS).

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Список литературы / References

1. Славин А.В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях в 2025–2035 гг. (Обзор) / А.В. Славин, К.И. Донецкий, А.В. Хрульков // Труды ВИАМ. — 2022. — № 11 — С. 81–92.

2. Старцев В.О. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) / В.О. Старцев, В.В. Антипов, А.В. Славин [и др.] // Авиационные материалы и технологии. — 2023. — № 2. — С. 71.

3. Тимошков П.Н. Особенности технологии и полимерные композиционные материалы для изготовления крыльев перспективных самолетов (обзор) / П.Н. Тимошков, В.А. Гончаров, М.Н. Усачева [и др.] // Труды ВИАМ. — 2022. — № 1 — С. 66–75.

4. Starkova O. Modelling of environmental ageing of polymers and polymer composites —durability prediction methods / O. Starkova, A.I. Gagani, C.W. Karl [et al.] // Polymers. — 2022. — Vol. 14. — № 5. — P. 907–943.

5. Uthaman A. Aging and Durability of FRP Composites and Nanocomposites / A. Uthaman, S. Thomas, H.M. Lal. — London : Elsevier, 2024. — P. 432.

6. Harle S.M. Durability and long-term performance of fiber reinforced polymer (FRP) composites: A review, Structures / S.M. Harle // Elsevier. — 2024. — Vol. 60. — Art. 105881.

7. Старцев В.О. Влияние внешних воздействий на коэффициент линейного теплового расширения углепластиков Часть 1. Анализ теоретических и экспериментальных результатов (обзор) / В.О. Старцев, А.М. Варданян // Труды ВИАМ. — 2023. — № 2. — С. 147–168.

8. Велигодский И.М. Исследование климатической стойкости образцов стеклопластика после натурной экспозиции в различных климатических зонах / И.М. Велигодский, Т.В. Коваль, А.О. Курносов [и др.] // Труды ВИАМ. — 2022. — № 11 — С. 134–148.

9. Long-term durability of polymeric matrix composites / Ed. by K.V. Pochiraju, G.P. Tandon, G.A. Schoeppner. — Springer, 2012. — 677 p.

10. Service Life Prediction of Polymers and Plastics Exposed to Outdoor Weathering / Ed. by C.C. White, K.M. White, L.E. Pickett. — William Andrew Publ, 2017. — 342 p.

11. Каблов Е.Н. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников / Е.Н. Каблов, В.О. Старцев // Авиационные материалы и технологии. — 2018. — № 2. — С. 47–58.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Slavin A.V. Perspektivi primeneniya polimernikh kompozitsionnikh materialov v aviatsionnikh konstruktsiyakh v 2025–2035 gg. (Obzor) [Prospects for the use of polymer composite materials in aerospace structures in 2025–2035 (a review)] / A.V. Slavin, K.I. Donetskii, A.V. Khrulkov // Trudi VIAM [Proceedings of VIAM]. — 2022. — № 11 — P. 81–92. [in Russian]

2. Startsev V.O. Sovremennie otechestvennie polimernie kompozitsionnie materiali dlya aviastroeniya (obzor) [Modern domestic polymer composite materials for aircraft construction (a review)] / V.O. Startsev, V.V. Antipov, A.V. Slavin [et al.] // Aviatsionnie materiali i tekhnologii [Aviation Materials and Technologies]. — 2023. — № 2. — P. 71. [in Russian]

3. Timoshkov P.N. Osobennosti tekhnologii i polimernie kompozitsionnie materiali dlya izgotovleniya krilev perspektivnikh samoletov (obzor) [Technical characteristics and polymer composite materials for the manufacture of wings for next-generation aircraft (a review)] / P.N. Timoshkov, V.A. Goncharov, M.N. Usacheva [et al.] // Trudi VIAM [Proceedings of VIAM]. — 2022. — № 1 — P. 66–75. [in Russian]

4. Starkova O. Modelling of environmental ageing of polymers and polymer composites —durability prediction methods / O. Starkova, A.I. Gagani, C.W. Karl [et al.] // Polymers. — 2022. — Vol. 14. — № 5. — P. 907–943.

5. Uthaman A. Aging and Durability of FRP Composites and Nanocomposites / A. Uthaman, S. Thomas, H.M. Lal. — London : Elsevier, 2024. — P. 432.

6. Harle S.M. Durability and long-term performance of fiber reinforced polymer (FRP) composites: A review, Structures / S.M. Harle // Elsevier. — 2024. — Vol. 60. — Art. 105881.

7. Startsev V.O. Vliyanie vneshnikh vozdeistvii na koeffitsient lineinogo teplovogo rasshireniya ugleplastikov Chast 1. Analiz teoreticheskikh i eksperimentalnikh rezultatov (obzor) [The influence of external factors on the coefficient of linear thermal expansion of carbon-fibre-reinforced plastics. Part 1: Analysis of theoretical and experimental results (a review)] / V.O. Startsev, A.M. Vardanyan // Trudi VIAM [Proceedings of VIAM]. — 2023. — № 2. — P. 147–168. [in Russian]

8. Veligodskii I.M. Issledovanie klimaticheskoi stoikosti obraztsov stekloplastika posle naturnoi ekspozitsii v razlichnikh klimaticheskikh zonakh [A study of the climatic durability of fibreglass samples following outdoor exposure in various climatic zones] / I.M. Veligodskii, T.V. Koval, A.O. Kurnosov [et al.] // Trudi VIAM [Proceedings of VIAM]. — 2022. — № 11 — P. 134–148. [in Russian]

9. Long-term durability of polymeric matrix composites / Ed. by K.V. Pochiraju, G.P. Tandon, G.A. Schoeppner. — Springer, 2012. — 677 p.

10. Service Life Prediction of Polymers and Plastics Exposed to Outdoor Weathering / Ed. by C.C. White, K.M. White, L.E. Pickett. — William Andrew Publ, 2017. — 342 p.

11. Kablov Ye.N. Sistemnii analiz vliyaniya klimata na mekhanicheskie svoistva polimernikh kompozitsionnikh materialov po dannim otechestvennikh i zarubezhnikh istochnikov [A systematic analysis of the influence of climate on the mechanical properties of polymer composite materials based on data from domestic and international sources] / Ye.N. Kablov, V.O. Startsev // Aviatsionnie materiali i tekhnologii [Aviation Materials and Technologies]. — 2018. — № 2. — P. 47–58. [in Russian]