

# Механика

УДК 539.32

## Исследование длительного влияния факторов тропической среды на механические свойства полимерных композиционных материалов\*

Е.В. Кротова<sup>1</sup>, Дао Киен Куонг<sup>2</sup>, М.Е. Кузнецов<sup>1</sup>, Ф.Р. Шакирзянов<sup>3</sup>,  
Н.В. Харин<sup>3</sup>, М.В. Митрайкин<sup>1</sup>, О.А. Саченков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им А. Н. Туполева — КАИ

<sup>2</sup> Российско-Вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр

<sup>3</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет

## Investigation of long-term influence of tropical environment factors on mechanical properties of polymer composite materials

E.V. Krotova<sup>1</sup>, Dao Kien Cuong<sup>2</sup>, M.E. Kuznetsov<sup>1</sup>, F.R. Shakirzyanov<sup>3</sup>,  
N.V. Kharin<sup>3</sup>, M.V. Mitryaikin<sup>1</sup>, O.A. Sachenkov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI

<sup>2</sup> Vietnam Russia Tropical Science and Technology Research Center

<sup>3</sup> Kazan (Volga region) Federal University

Изучена деградация полимерных композиционных материалов, изготовленных методом неавтоклавного формования, в условиях тропического климата в трех регионах Вьетнама (Ханой, Хошимин и Нячанг). Образцы подвергали экспозиции в течение трех лет в каждом регионе, после чего проводили механические испытания (на растяжение и сжатие) и микроскопический анализ. Контрольные образцы испытывали до экспозиции. Для обработки полученных данных использованы статистический анализ и метод главных компонент. По полученным результатам выявлено значительное ухудшение механических свойств образцов: их прочность на растяжение снизилась до 16,1 %, прочность на сжатие — на 20,4 %, а модуль упругости при растяжении увеличился на 11,7 %. Показано, что компоненты солнечной радиации являются основными факторами деградации, дополняемыми влагой. Так, УФ-А снижает прочность при растяжении образца, а УФ-Б влияет на модуль упругости. Микроскопия выявила обесцвечивание матрицы, микротрещины и депигментацию волокон, особенно в прибрежных районах и районах с высоким уровнем УФ-А. Сравнительный анализ с данными предыдущих исследований подтвердил синергизм УФ-А и влажности в ускорении гигротермической деградации, но выявил уникальные тенденции изменения модуля упругости, обусловленные кинетикой отверждения конкретного ма-

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке, выделяемой Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2023-0009.

териала. Полученные результаты подчеркивают уязвимость неавтоклавных полимерных композиционных материалов к тропическому климату и свидетельствуют в пользу использования стойких к ультрафиолетовому излучению покрытий или модификации матрицы для повышения долговечности.

**EDN:** LWPMYZ, <https://elibrary/lwpmyz>

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, углепластик, тропический климат, деградация материала, механические свойства, ультрафиолетовое излучение

The degradation of polymer composite materials manufactured by out-of-autoclave processing was investigated under tropical climatic conditions in three regions of Vietnam (Hanoi, Ho Chi Minh City, and Nha Trang). Specimens were exposed for three years in each region, followed by mechanical testing (tensile and compressive) and microscopic analysis. Control specimens were tested prior to exposure. Statistical analysis and principal component analysis were employed to process the obtained data. The results revealed significant deterioration of the mechanical properties: tensile strength decreased by up to 16.1%, compressive strength declined by 20.4%, while the tensile modulus increased by 11.7%. Solar radiation components were identified as the primary degradation factors, with moisture acting as a secondary contributor. Specifically, UVA radiation reduced tensile strength, whereas UVB affected the elastic modulus. Microscopy revealed matrix discoloration, microcracking, and fiber depigmentation—particularly pronounced in coastal areas and regions with high UVA levels. A comparative analysis with previous studies confirmed the synergistic effect of UVA and humidity in accelerating hygrothermal degradation, yet uncovered unique trends in elastic modulus variation attributed to the curing kinetics of the specific material system. These findings highlight the vulnerability of out-of-autoclave polymer composites to tropical climates and underscore the need for UV-resistant coatings or matrix modifications to enhance durability.

**EDN:** LWPMYZ, <https://elibrary/lwpmyz>

**Keywords:** polymer composite materials, carbon fiber reinforced polymer, tropical climate, material degradation, mechanical properties, ultraviolet radiation

Новые методы формования композиционных материалов (КМ) и развитие аддитивных технологий (АТ) позволили использовать неоднородные материалы [1, 2] в разных сферах промышленности [3]. КМ получили распространение в аэрокосмической [4], автомобильной [5], космической [6], энергетической [7] и других передовых отраслях [8, 9]. Изделия, изготовленные с помощью АТ, применяют в медицине [10–12], строительстве [13] и самолетостроении [14].

Однако, несмотря на широкое использование и исследование неоднородных материалов, возникают дефекты, связанные с технологической особенностью их изготовления и эксплуатации. Так, если изделия выполнены методами аддитивного производства, автоклавного и неавтоклавного формования, то в них возникает внутренняя пористость, которая может привести к негативным явлениям в процессе эксплуатации. [15–17]. Обычно пористость неоднородного изделия определяют с помо-

щью данных, полученных методом компьютерной томографии и ультразвукового контроля [16–19].

Другими словами, неоднородные материалы имеют неустойчивые механические характеристики, связанные с технологией изготовления, что способствует разбросу результатов при испытаниях. Полимерные КМ (ПКМ) отличаются низкой плотностью и высокой удельной прочностью. Однако неавтоклавым методом формования ПКМ невозможно изготовить высокопористую решетчатую или любую сложно структурированную архитектуру [20–22]. Кроме того, ПКМ является более податливым к воздействию климатических факторов (ультрафиолетового излучения (УФ), влажности и температуры), чем металлы, изготовленные АТ [23, 24]. Однако климатические факторы негативно влияют на ПКМ, снижая их эксплуатационные свойства.

Одним из основных климатических факторов, влияющих на механические характери-

ки ПКМ, является УФ солнечного света [25–27], способное изменять химическую структуру полимерных связей. Глубина проникновения УФ измеряется микрометрами, что свидетельствует о том, что деградация ПКМ — поверхностная [28–30]. В свою очередь, поверхностная деградация материала может привести к образованию небольших трещин, где будет накапливаться влага. С изменением температуры [31] могут появиться концентраторы напряжений, вследствие чего произойдет распространение трещины внутрь образца.

Экспериментальные методы исследования ПКМ под действием УФ и влаги позволят не только лучше понять процесс деградации таких материалов, но и разработать эффективные методы производства и постобработки [32, 33]. Это в конечном итоге улучшит физико-механические свойства, обеспечит надежность и безопасность конструкций, изготовленных из ПКМ.

Цель исследования — изучение влияния влажного и жаркого климата на механические свойства ПКМ, изготовленного неавтоклавным методом формования.

**Материалы и методы.** В качестве объекта исследования выступали образцы углепластика на основе препрега неавтоклавного формования В180, предназначенного для эксплуатации при температуре до 150° С.

**Техническая характеристика препрега В180**

Предел прочности, МПа:

при растяжении . . . . . 871

при сжатии . . . . . 802

Модуль упругости, ГПа:

при растяжении . . . . . 71

при сжатии . . . . . 60

Исследуемые образцы имели сплетение типа саржи 2×2 с поверхностной плотностью 200 г/м<sup>2</sup> и армирующую укладку 0°/90° с десятью слоями. Толщина слоя составляла 0,2 мм. Образцы представляли собой полосы прямоугольного сечения. Чтобы определить механические характеристики, изготавливали образцы двух типов: для испытания на растяжение и сжатие. Первые имели накладки, фиксируемые в испытательной машине. Схемы образцов для испытания на растяжение и сжатие приведены на рис. 1, а и б.

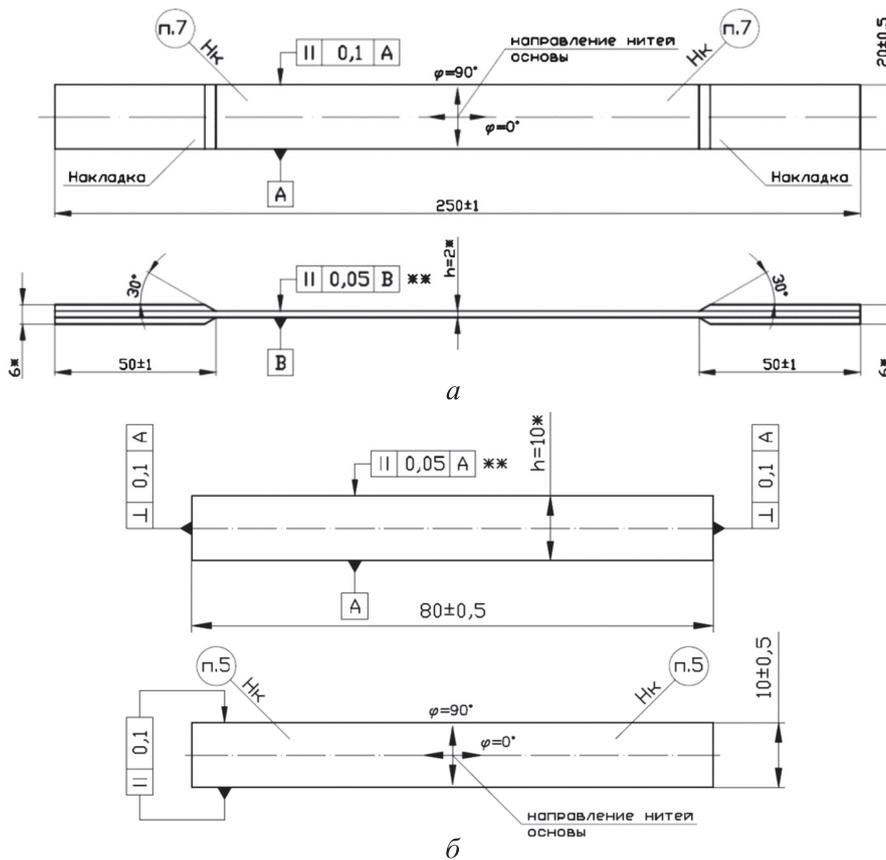


Рис. 1. Схемы образцов для испытания на растяжение (а) и сжатие (б)

Каждый тип образца изготавливали в количестве 40 шт. Десять образцов резервировали для контроля, т. е. их испытывали без учета влияния климатических факторов на механические характеристики. По десять образцов каждого типа отправляли на длительное экспонирование в различные тропические зоны Вьетнама.

**Механические характеристики.** Для определения механических характеристик образцов из ПКМ использовали универсальную испытательную машину BISS-50.

**Техническая характеристика  
испытательной машины BISS-50**

Максимальная нагрузка, кН . . . . . 50  
 Диапазон скоростей, мм/мин . . . . . 0,001...500,000  
 Точность измерения нагрузки, % . . . . .  $\pm 0,5$   
 Разрешение датчиков деформации, мкм . . . . . 0,1  
 Частота считывания показаний, кГц . . . . . 1

Все образцы испытывали до разрушения. Скорость перемещения траверсы составляла 2 мм/мин.

После испытаний образцов на растяжение и сжатие определяли линейный участок на диаграмме деформирования. Полученные данные аппроксимировали линейной зависимостью напряжения  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$

$$\sigma = k\epsilon + b,$$

где  $k$  — угловой коэффициент прямой;  $b$  — свободный член.

Модуль упругости  $E$  определяли как угловой коэффициент прямой аппроксимации

$$E = \text{tg } k.$$

Предел прочности образца  $\sigma_v$  вычисляли как отношение максимальной нагрузки  $F_{\max}$  при разрушении к начальной площади его поперечного сечения  $A_0$ :

$$\sigma_v = F_{\max} / A_0.$$

**Метеоданные.** В качестве площадок для длительного экспонирования образцов выбраны метеостанции Хоа Лак, КанЗе и Домбай в городах Ханой, Хошимин и Нячанг соответственно. Расположение каждой площадки характеризует свой климат, обусловленный географическим положением.

Площадка Хоа Лак (на севере Вьетнама) находится в зоне тропического муссонного



Рис. 2. Внешний вид стеллажа для экспонирования образцов

климата с ярко выраженными сезонами. Площадка КанЗе (на юге Вьетнама) расположена в зоне тропического климата, который почти однороден в течение года: температура воздуха стабильно высокая, а разница между сезонами — минимальная. Площадка Домбай (в центре Вьетнама) базируется в зоне тропического морского климата, где температура воздуха остается высокой круглый год, но благодаря постоянному воздействию морского бриза климат оказывается несколько смягченным.

Образцы размещали на специально оборудованных стеллажах, ориентированных к солнечному свету для максимального воздействия УФ. Стеллажи устанавливали под углом  $30^\circ$  относительно горизонтальной плоскости (рис. 2).

Образцы экспонировались на стеллажах в течение трех лет (2020–2022 гг.). В качестве климатических факторов тропической среды выступали суммарное солнечное УФ, суммарные УФ типа А (УФ-А) и Б (УФ-Б), суммарное количество осадков, средняя температура, влажность и атмосферное давление.

**Микроскопия.** Для исследования изменения внешней поверхности ПКМ в условиях длительной экспозиции проводили микроскопию с помощью цифрового микроскопа Levenhuk DTX 700 LCD.

**Техническая характеристика  
цифрового микроскопа Levenhuk DTX 700 LCD**

Увеличение, крат . . . . . 10...300  
 (с цифровым зумом 10...1200)  
 Максимальное разрешение, Мпикс . . . . . 12  
 Метод исследования . . . . . Светлое поле  
 Фокусировка, мм . . . . . 5...70

Для каждого образца отбирали участки, демонстрирующие характерные изменения внешней структуры. Исследовали как поверхности, подвергшиеся длительному воздействию климатических факторов, так и тех, которые остались неизменными.

**Обработка результатов.** После натурных испытаний на растяжение и сжатие для каждого образца рассчитывали модуль упругости и предел прочности. Все полученные характеристики проверяли на нормальность распределения данных с использованием теста Харке — Бера. Затем группы полученных характеристик проверяли с помощью парного *t*-критерия Стьюдента, чтобы определить независимые выборки с *p*-значимостью 0,05. Для отображения результатов использовали ящик с усами, для анализа зависимости между климатическими факторами и механическими характеристиками материалов — метод главных компонент (РСА — Principal Component Analysis).

**Результаты.** После экспонирования в течение трех лет образцы подвергали механическим испытаниям на растяжение и сжатие. Анализ полученных данных показал, что во всех группах образцов распределение механических характеристик соответствует нормальному закону. При анализе предела прочности и модуля упругости на растяжение статистически значимые различия обозначали знаком «\*», а на сжатие — «X». Распределение механических характеристик —

предела прочности и модуля упругости — по зонам экспонирования показано на рис. 3, *a* и *b*.

По результатам статистического анализа установлено, что предел прочности контрольного образца значительно отличается от значений всех групп длительного экспонирования как при растяжении, так и при сжатии. Модуль упругости при растяжении во всех исследованных группах демонстрирует достоверные отличия от контрольных значений, в то время как при испытании на сжатие ни одна из групп экспонирования не показала статистически значимых отличий от контрольного.

Статистический анализ предела прочности по испытаниям образцов на растяжение и сжатие выявил различие между данными, полученными в Нячанге и Ханое. При анализе модуля упругости статистически различимыми оказались только результаты испытаний на растяжение в Нячанге и Хошимине.

Собранные метеоданные включали в себя сведения о солнечной активности, которые суммировались по годам. Распределение суммарных интенсивностей УФ, УФ-А и УФ-Б по зонам экспонирования показано рис. 4, *a–в*. В случаях статистически значимых различий данные помечены символом «\*».

Общая солнечная активность за три года экспозиции статистически различалась между всеми городами. Значения интенсивности УФ-А значимо различались между Нячангом и Ханоем, а интенсивности УФ-Б — между Нячангом и Хошимин.

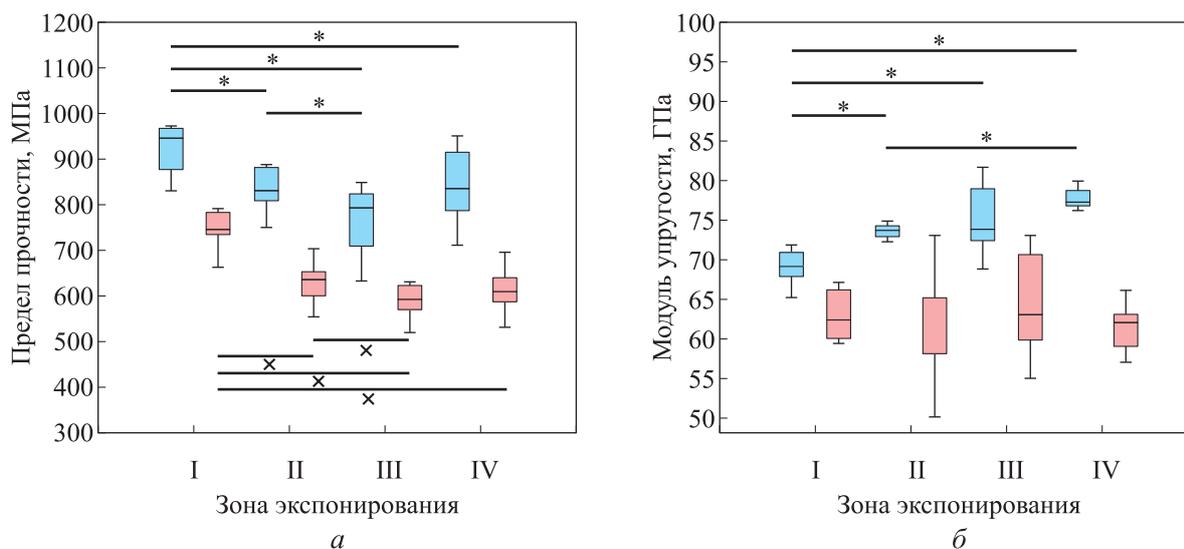


Рис. 3. Распределение предела прочности (*a*) и модуля упругости (*b*) после испытания образцов на сжатие (■) и растяжение (■) по зонам экспонирования: I — контрольное значение; II — Нячанг; III — Ханой; IV — Хошимин

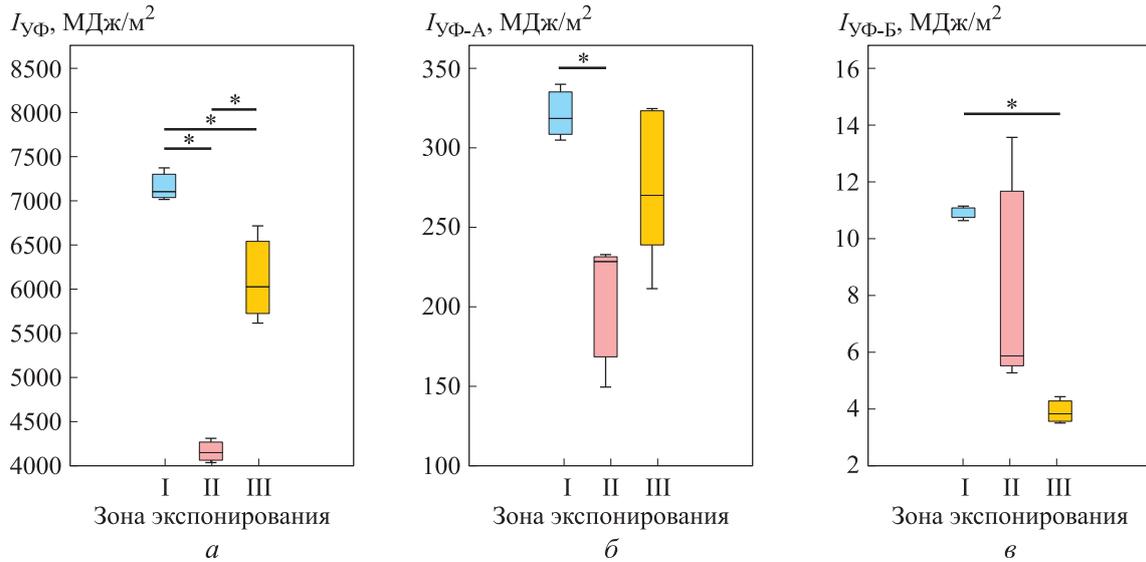


Рис. 4. Распределение суммарных интенсивностей УФ (а), УФ-А (б) и УФ-Б (в) по зонам экспонирования: I — Нячанг; II — Ханой; III — Хошимин

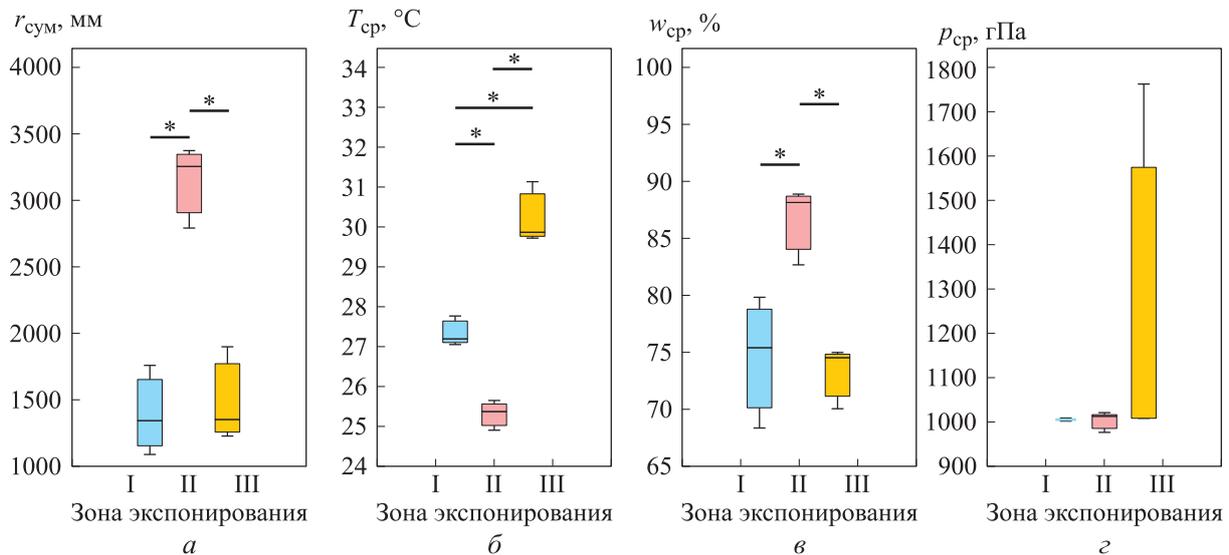


Рис. 5. Распределение суммарного количества осадков  $r_{сум}$  (а), средней температуры  $T_{ср}$  (б), средней влажности  $w_{ср}$  (в) и среднего атмосферного давления  $p_{ср}$  (г) по зонам экспонирования: I — Нячанг; II — Ханой; III — Хошимин

Суммарное количество осадков  $r_{сум}$  в Ханое статистически отличалось от значений в Нячанге и Хошимине (рис. 5, а). Средняя температура  $T_{ср}$  показала статистически значимые различия между всеми городами (рис. 5, б). Средняя влажность  $w_{ср}$  в Ханое также статистически отличалась от значений в Нячанге и Хошимине (рис. 5, в). Среднее атмосферное давление  $p_{ср}$  в целом не демонстрировало значимых различий между городами, однако в Хошимине выявлен явный выброс значений (рис. 5, г).

При микроскопическом исследовании внешней поверхности образцов получены ха-

рактерные изображения изменения их структуры. На рис. 6, а показана поверхность образца, подвергавшаяся воздействию климатических факторов в Нячанге, а на рис. 6, б — не подвергавшаяся (обратная сторона). На первой наблюдается потеря пигмента волокон, на второй участки приобретают коричневый оттенок, что свидетельствует о разрушении матричной структуры композита.

Образцы, экспонированные в Ханое, демонстрируют схожие изменения внешней поверхности (рис. 6, в). В отличие от образцов, экспонированных в Нячанге, утрата пигмента зафик-

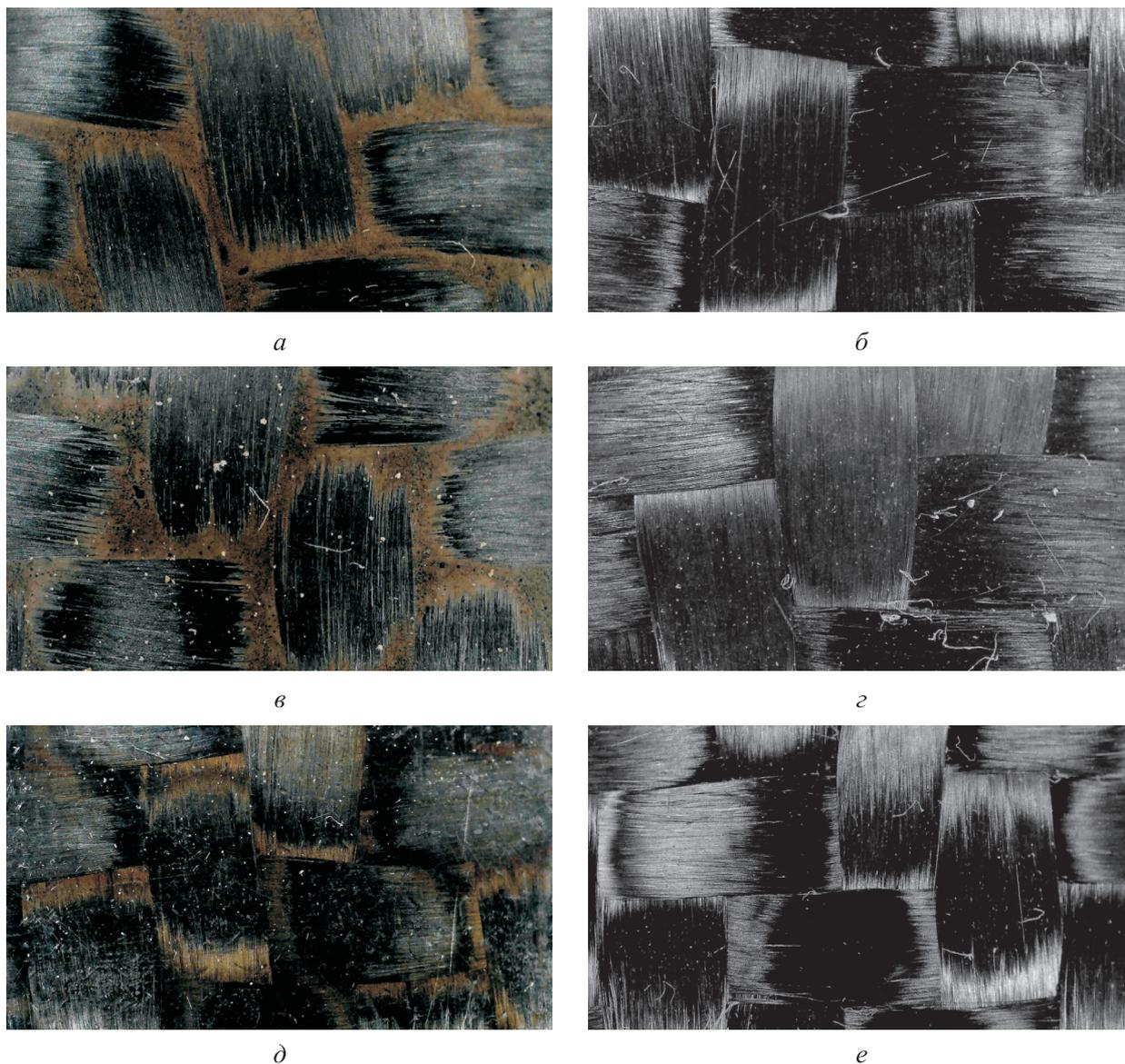


Рис. 6. Структуры внешних поверхностей образцов, подвергавшихся (а, в, д) и не подвергавшихся (б, г, е) воздействию климатических факторов в разных зонах экспонирования:  
а, б — Нячанг; в, г — Ханой; д, е — Хошимин

сирована не только по краям сегмента композита, но и по всей их длине (рис. 6, г).

Аналогичные явления наблюдаются и у образцов, экспонированных в Хошимине. Как видно из рис. 6, е, пигмент теряется по всей длине сегмента.

При анализе поверхности, подвергавшейся воздействию климатических факторов (рис. 6, д), можно заметить, что в отличие от предыдущих случаев, процесс деградации находится на начальной стадии, что подтверждается сохранением структуры волокон.

По результатам анализа методом РСА установлено, что наибольшее влияние на механиче-

ские характеристики образцов оказывает влажность, которая имеет коэффициент вклада 0,64. Существенный вклад также вносит уровень УФ-Б с параметром включения 0,26. Эти данные указывают на то, что процессы деградации ПКМ обусловлены влажностными условиями.

**Обсуждение результатов.** Анализ механических характеристик образцов после трехлетней экспозиции выявил статистически значимые различия в зависимости от зоны экспонирования. В частности, полученные при испытании на растяжение и сжатие значения пределов прочности существенно различались у образ-

цов из Нячанга и Ханоя. Единственным климатическим фактором, статистически различным только между этими городами, оказалась суммарная интенсивность УФ-А. Модуль упругости образцов из Нячанга при растяжении и сжатии статистически отличался от значений образцов из Хошимина, что коррелирует с различиями в суммарной интенсивности УФ-Б между этими городами.

Следует отметить, что суммарные осадки, средняя температура и влажность также различались между городами. Однако их влияние на механические характеристики было менее выраженным. Так, уровень осадков в Ханое статистически отличался от уровней в Нячанге и Хошимине, но не оказывал значимого воздействия на предел прочности или модуль упругости. Значения средней температуры статистически различались во всех трех городах, однако ее влияние на механические характеристики материалов требует дополнительных исследований.

В работе [25] изучали влияние УФ длиной волны 340 нм, соответствующего диапазону УФ-А, на механические свойства эпоксидных ламинатов в течение 180 ч. В качестве образцов использовали ламинаты, изготовленные на основе эпоксидной смолы Araldite LY-556, отвержденной отвердителем HY-951. Данный материал широко применяется в композитных конструкциях. По результатам испытаний установлено, что прочность на растяжение снизилась на 22,6 %. Кроме того, на поверхности образцов появились микротрещины, и наблюдалось пожелтение, что свидетельствует о процессе фотодеградации материала. Исследование продемонстрировало, что длительное воздействие УФ существенно ухудшает предел прочности эпоксидных ламинатов, что является критичным для их применения в условиях открытой среды.

Схожие результаты изменения механических свойств получены при исследовании влияния УФ-А на композиционный материал IM7/997, состоящий из углеродного волокна IM7 и термопластически модифицированной эпоксидной матрицы 997 [26]. Выявлено совокупное влияние УФ и повышенной влажности, отмечена эрозия матрицы с ухудшением механических характеристик.

Сопоставляя эти результаты с данными исследования, можно отметить аналогичную за-

висимость влияния УФ-А и влажности на пределы прочности при растяжении и сжатии. Как и в работе [25], показано увеличение модуля упругости под действием УФ-А, что можно объяснить постотверждением ПКМ.

В исследовании [13] рассмотрена деградация механических свойств композитов, армированных углеродным волокном, под действием УФ-А и УФ-Б. Образцы экспонировались в течение 512 ч. Авторами выявлено снижение предела прочности и модуля упругости экспонированных образцов: первый уменьшился на 18,85 %, второй — на 13,50 %.

По результатам проведенного исследования установлено, что максимальное падение предела прочности на растяжение составило 16,1 %, на сжатие — 20,4 %, а максимальное увеличение модуля упругости на растяжение — 11,7 %.

Полученные данные позволяют утверждать, что основным климатическим фактором, влияющим на предел прочности рассмотренных ПКМ, является УФ-А, а на модуль упругости — УФ-Б. По результатам РСА-анализа установлено, что на механические характеристики образцов значительно влияет влажность. Остальные климатические факторы либо не оказывают существенного влияния, либо их воздействие нивелируется доминирующим эффектом УФ и влажности. Дальнейшие исследования могут быть направлены на уточнение механизмов деградации материалов под действием различных климатических факторов, а также на разработку защитных покрытий или модификаций материала для повышения его устойчивости в условиях длительной эксплуатации.

## Вывод

Установлено, что климатические факторы в значительной степени влияют на механическую деградацию ПКМ. Компонент солнечной радиации УФ-А снижает прочность на разрыв, а УФ-Б — модуль упругости. Солнечная радиация выступает основным фактором ухудшения прочности ПКМ. Влажность также является значимым параметром снижения механических свойств ПКМ, в то время как другие климатические факторы демонстрируют незначительные или статистически незначимые эффекты, которые часто компенсируются доминирующим взаимодействием УФ и влажности.

## Литература

- [1] Zhang Z., Gao H., Wen S. et al. Scalable manufacturing of mechanical robust bioinspired ceramic–resin composites with locally tunable heterogeneous structures. *Adv. Mater.*, 2023, vol. 35, no. 14, art. 2209510, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202209510>
- [2] Vinod A., Tengsuthiwat J., Vijay R. et al. Advancing Additive manufacturing: 3d printing of hybrid natural fiber sandwich (Nona/Soy PLA) composites through filament extrusion and its effect on thermomechanical properties. *Polym. Compos.*, 2024, vol. 45, no. 9, pp. 7767–7789, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.28302>
- [3] Simões S. High-performance advanced composites in multifunctional material design: state of the art, challenges, and future directions. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 23, art. 5997, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17235997>
- [4] McGurk M., Stodieck O., Yuan, J. Probabilistic aeroelastic analysis of high-fidelity composite aircraft wing with manufacturing variability. *Compos. Struct.*, 2024, vol. 329, art. 117794, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117794>
- [5] Biswas P., Mondal M.K. Evaluation of a cast AL-MG2SI composite for automobile Disk-Brake rotor application. *JMEP*, 2024, vol. 33, no. 2, pp. 11188–11213, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08760-1>
- [6] Naito M., Kitamura H., Koike M. et al. Applicability of composite materials for space radiation shielding of spacecraft. *Life Sci. Space Res.*, 2021, vol. 31, pp. 71–79, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.08.004>
- [7] Trzepieciński T., Batu T., Kibrete F. et al. Application of composite materials for energy generation devices. *J. Compos. Sci.*, 2023, vol. 7, no. 2, art. 55, doi: <https://doi.org/10.3390/jcs7020055>
- [8] Waqar M., Memon A.M., Sabih M. et al. Composite pipelines: analyzing defects and advancements in non-destructive testing techniques. *Eng. Fail. Anal.*, 2024, vol. 157, art. 107914, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107914>
- [9] Czech K., Oliwa R., Krajewski D. et al. Hybrid polymer composites used in the arms industry: a review. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 11, art. 3047, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14113047>
- [10] Kharin N., Bolshakov P., Kuchumov A.G. Numerical and experimental study of a lattice structure for orthopedic applications. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 2, art. 744, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16020744>
- [11] Bolshakov P., Kuchumov A.G., Kharin N. et al. Method of computational design for additive manufacturing of hip endoprosthesis based on basic-cell concept. *Int. J. Numer. Method Biomed. Eng.* 2024, vol. 40, no. 3, art. e3802, doi: <https://doi.org/10.1002/cnm.3802>
- [12] Mobarak M.H., Islam Md.A., Hossain N. et al. Recent advances of additive manufacturing in implant fabrication — a review. *Appl. Surf. Sci. Adv.*, 2023, vol. 18, art. 100462, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100462>
- [13] Tuvayanond W., Prasittisopin L. Design for manufacture and assembly of digital fabrication and additive manufacturing in construction: a review. *Buildings*, 2023, vol. 13, no. 2, art. 429, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13020429>
- [14] Ghimire R., Raji A. Use of artificial intelligence in design, development, additive manufacturing, and certification of multifunctional composites for aircraft, drones, and spacecraft. *Appl. Sci.*, 2024, vol. 14, no. 3, art. 1187, doi: <https://doi.org/10.3390/app14031187>
- [15] Akifyev K.N., Kharin N.V., Statsenko E.O. et al. Pilot study of lattice endoprosthesis buckling by compression in-situ using X-ray tomography. *Russ. J. Biomech.*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 32–39, doi: <https://doi.org/10.15593/RJBiomech/2023.4.03>
- [16] Hudson T.B., Follis P.J., Pinakidis J.J. et al. Porosity detection and localization during composite cure inside an autoclave using ultrasonic inspection. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2021, vol. 147, art. 106337, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106337>
- [17] Addou F.Y., Bourada F., Tounsi A. et al. Effect of porosity distribution on flexural and free vibrational behaviors of laminated composite shell using a novel sinusoidal HSDT. *Archiv. Civ. Mech. Eng.* 2024, vol. 24, no. 2, art. 102, doi: <https://doi.org/10.1007/s43452-024-00894-w>

- [18] Kharin N.V., Gerasimov O.V., Bolshakov P.V. et al. Technique for determining the orthotropic properties of the bone organ according to computer tomography. *Russ. J. Biomech.*, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 395–402, doi: <https://doi.org/10.15593/RJBiomech/2019.3.11>
- [19] Akifyev K.N., Statsenko E.O., Smirnova V.V. et al. Method for studying the porosity of fluid phase samples by X-ray computed tomography under uniaxial compression. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2023, no. 2, pp. 11–21, doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.2.02>
- [20] Bolshakov P., Kharin N., Kashapov R. et al. Structural design method for constructions: simulation, manufacturing and experiment. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 20, art. 6064, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14206064>
- [21] Bolshakov P., Kharin N., Agathonov A. et al. Extension of the Voronoi diagram algorithm to orthotropic space for material structural design. *Biomimetics*, 2024, vol. 9, no. 3, art. 185, doi: <https://doi.org/10.3390/biomimetics9030185>
- [22] Garipova L.I., Batrakov A.S., Khabibullin F.F. Mechanical characteristics of a product manufactured by the FDM printing. *Russ. Aeronaut.*, 2024, vol. 67, no. 1, pp. 145–150, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068799824010173>
- [23] Muzata T.S., Gebrekrstos A., Orasugh J.T. et al. An overview of recent advances in polymer composites with improved UV shielding properties. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2023, vol. 140, no. 14, art. e53693, doi: <https://doi.org/10.1002/app.53693>
- [24] Harle S.M. Durability and long-term performance of fiber reinforced polymer (FRP) composites: a review. *Structures*, 2024, vol. 60, art. 105881, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105881>
- [25] Naveen R., Kumar M., Ramesh M. et al. An investigation on effect of ultraviolet (UV) rays on mechanical properties of epoxy laminates. *Mater. Today Proc.*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.257>
- [26] Kumar B.G., Singh R.P., Nakamura T. Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation. *J. Compos. Mater.*, 2002, vol. 36, no. 24, pp. 2713–2733. <https://doi.org/10.1177/002199802761675511>
- [27] Vedrtnam A., Gunwant D., Verma H. et al. Effect of aging and UV exposure on mechanical properties of natural fiber composites. In: *Aging effects on natural fiber-reinforced polymer composites*. Springer, 2022, pp. 189–217, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8360-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8360-2_11)
- [28] Afshar A., Alkhader M., Korach C.S. et al. Effect of long-term exposure to marine environments on the flexural properties of carbon fiber vinylester composites. *Compos. Struct.*, 2015, vol. 126, pp. 72–77, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.02.008>
- [29] Pavlenko V.I., Zabolotny V.T., Cherkashina N.I. et al. Effect of vacuum ultraviolet on the surface properties of high-filled polymer composites. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 219–223, doi: <http://dx.doi.org/10.1134/S2075113314030137>
- [30] Lu T., Solis-Ramos E., Yi Y. et al. UV degradation model for polymers and polymer matrix composites. *Polym. Degrad. Stabil.*, 2018, vol. 154, pp. 203–210, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.06.004>
- [31] Cerbu C., Wang H., Botis M.F. et al. Temperature effects on the mechanical properties of hybrid composites reinforced with vegetable and glass fibers. *Mech. Mater.*, 2020, vol. 149, art. 103538, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103538>
- [32] Yimyai T., Crespy D., Pena Francesch A. Self healing photochromic elastomer composites for wearable UV sensors. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, vol. 33, no. 20, art. 2213717, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202213717>
- [33] Sun Y., Yuan S., Fan W. et al. A smart composite coating with photothermal response, anti-uv and anti-corrosion properties. *Chem. Eng. J.*, 2022, vol. 452-1, art. 138983, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138983>

## References

- [1] Zhang Z., Gao H., Wen S. et al. Scalable manufacturing of mechanical robust bioinspired ceramic–resin composites with locally tunable heterogeneous structures. *Adv. Mater.*, 2023, vol. 35, no. 14, art. 2209510, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202209510>
- [2] Vinod A., Tengsuthiwat J., Vijay R. et al. Advancing Additive manufacturing: 3d printing of hybrid natural fiber sandwich (Nona/Soy PLA) composites through filament extrusion and

- its effect on thermomechanical properties. *Polym. Compos.*, 2024, vol. 45, no. 9, pp. 7767–7789, doi: <https://doi.org/10.1002/pc.28302>
- [3] Simões S. High-performance advanced composites in multifunctional material design: state of the art, challenges, and future directions. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 23, art. 5997, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17235997>
- [4] McGurk M., Stodieck O., Yuan, J. Probabilistic aeroelastic analysis of high-fidelity composite aircraft wing with manufacturing variability. *Compos. Struct.*, 2024, vol. 329, art. 117794, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117794>
- [5] Biswas P., Mondal M.K. Evaluation of a cast AL-MG2SI composite for automobile Disk-Brake rotor application. *JMEP*, 2024, vol. 33, no. 2, pp. 11188–11213, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08760-1>
- [6] Naito M., Kitamura H., Koike M. et al. Applicability of composite materials for space radiation shielding of spacecraft. *Life Sci. Space Res.*, 2021, vol. 31, pp. 71–79, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.08.004>
- [7] Trzepieciński T., Batu T., Kibrete F. et al. Application of composite materials for energy generation devices. *J. Compos. Sci.*, 2023, vol. 7, no. 2, art. 55, doi: <https://doi.org/10.3390/jcs7020055>
- [8] Waqar M., Memon A.M., Sabih M. et al. Composite pipelines: analyzing defects and advancements in non-destructive testing techniques. *Eng. Fail. Anal.*, 2024, vol. 157, art. 107914, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107914>
- [9] Czech K., Oliwa R., Krajewski D. et al. Hybrid polymer composites used in the arms industry: a review. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 11, art. 3047, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14113047>
- [10] Kharin N., Bolshakov P., Kuchumov A.G. Numerical and experimental study of a lattice structure for orthopedic applications. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 2, art. 744, doi: <https://doi.org/10.3390/ma16020744>
- [11] Bolshakov P., Kuchumov A.G., Kharin N. et al. Method of computational design for additive manufacturing of hip endoprosthesis based on basic-cell concept. *Int. J. Numer. Method Biomed. Eng.* 2024, vol. 40, no. 3, art. e3802, doi: <https://doi.org/10.1002/cnm.3802>
- [12] Mobarak M.H., Islam Md.A., Hossain N. et al. Recent advances of additive manufacturing in implant fabrication — a review. *Appl. Surf. Sci. Adv.*, 2023, vol. 18, art. 100462, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100462>
- [13] Tuvayanond W., Prasittisopin L. Design for manufacture and assembly of digital fabrication and additive manufacturing in construction: a review. *Buildings*, 2023, vol. 13, no. 2, art. 429, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13020429>
- [14] Ghimire R., Raji A. Use of artificial intelligence in design, development, additive manufacturing, and certification of multifunctional composites for aircraft, drones, and spacecraft. *Appl. Sci.*, 2024, vol. 14, no. 3, art. 1187, doi: <https://doi.org/10.3390/app14031187>
- [15] Akifyev K.N., Kharin N.V., Statsenko E.O. et al. Pilot study of lattice endoprosthesis buckling by compression in-situ using X-ray tomography. *Russ. J. Biomech.*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 32–39, doi: <https://doi.org/10.15593/RJBiomech/2023.4.03>
- [16] Hudson T.B., Follis P.J., Pinakidis J.J. et al. Porosity detection and localization during composite cure inside an autoclave using ultrasonic inspection. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 2021, vol. 147, art. 106337, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106337>
- [17] Addou F.Y., Bourada F., Tounsi A. et al. Effect of porosity distribution on flexural and free vibrational behaviors of laminated composite shell using a novel sinusoidal HSDT. *Archiv. Civ. Mech. Eng.* 2024, vol. 24, no. 2, art. 102, doi: <https://doi.org/10.1007/s43452-024-00894-w>
- [18] Kharin N.V., Gerasimov O.V., Bolshakov P.V. et al. Technique for determining the orthotropic properties of the bone organ according to computer tomography. *Russ. J. Biomech.*, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 395–402, doi: <https://doi.org/10.15593/RJBiomech/2019.3.11>
- [19] Akifyev K.N., Statsenko E.O., Smirnova V.V. et al. Method for studying the porosity of fluid phase samples by X-ray computed tomography under uniaxial compression. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2023, no. 2, pp. 11–21, doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.2.02>
- [20] Bolshakov P., Kharin N., Kashapov R. et al. Structural design method for constructions: simulation, manufacturing and experiment. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 20, art. 6064, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14206064>

- [21] Bolshakov P., Kharin N., Agathonov A. et al. Extension of the Voronoi diagram algorithm to orthotropic space for material structural design. *Biomimetics*, 2024, vol. 9, no. 3, art. 185, doi: <https://doi.org/10.3390/biomimetics9030185>
- [22] Garipova L.I., Batrakov A.S., Khabibullin F.F. Mechanical characteristics of a product manufactured by the FDM printing. *Russ. Aeronaut.*, 2024, vol. 67, no. 1, pp. 145–150, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068799824010173>
- [23] Muzata T.S., Gebrekrstos A., Orasugh J.T. et al. An overview of recent advances in polymer composites with improved UV shielding properties. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2023, vol. 140, no. 14, art. e53693, doi: <https://doi.org/10.1002/app.53693>
- [24] Harle S.M. Durability and long-term performance of fiber reinforced polymer (FRP) composites: a review. *Structures*, 2024, vol. 60, art. 105881, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105881>
- [25] Naveen R., Kumar M., Ramesh M. et al. An investigation on effect of ultraviolet (UV) rays on mechanical properties of epoxy laminates. *Mater. Today Proc.*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.257>
- [26] Kumar B.G., Singh R.P., Nakamura T. Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation. *J. Compos. Mater.*, 2002, vol. 36, no. 24, pp. 2713–2733. <https://doi.org/10.1177/002199802761675511>
- [27] Vedrtnam A., Gunwant D., Verma H. et al. Effect of aging and UV exposure on mechanical properties of natural fiber composites. In: *Aging effects on natural fiber-reinforced polymer composites*. Springer, 2022, pp. 189–217, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8360-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8360-2_11)
- [28] Afshar A., Alkhader M., Korach C.S. et al. Effect of long-term exposure to marine environments on the flexural properties of carbon fiber vinylester composites. *Compos. Struct.*, 2015, vol. 126, pp. 72–77, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.02.008>
- [29] Pavlenko V.I., Zabolotny V.T., Cherkashina N.I. et al. Effect of vacuum ultraviolet on the surface properties of high-filled polymer composites. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 219–223, doi: <http://dx.doi.org/10.1134/S2075113314030137>
- [30] Lu T., Solis-Ramos E., Yi Y. et al. UV degradation model for polymers and polymer matrix composites. *Polym. Degrad. Stabil.*, 2018, vol. 154, pp. 203–210, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.06.004>
- [31] Cerbu C., Wang H., Botis M.F. et al. Temperature effects on the mechanical properties of hybrid composites reinforced with vegetable and glass fibers. *Mech. Mater.*, 2020, vol. 149, art. 103538, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103538>
- [32] Yimyai T., Crespy D., Pena Francesch A. Self healing photochromic elastomer composites for wearable UV sensors. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, vol. 33, no. 20, art. 2213717, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202213717>
- [33] Sun Y., Yuan S., Fan W. et al. A smart composite coating with photothermal response, anti-uv and anti-corrosion properties. *Chem. Eng. J.*, 2022, vol. 452-1, art. 138983, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138983>

Статья поступила в редакцию 03.04.2025

## Информация об авторах

**КРОТОВА Екатерина Викторовна** — ведущий инженер ИЛ ПНК ЛА ИАТТ. Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. Карла Маркса, д. 10, e-mail: [kati\\_mit@mail.ru](mailto:kati_mit@mail.ru)).

**КИЕН КУОНГ Дао** — научный сотрудник. Российско-Вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр (122103, Ханой, Вьетнам, Ул. Нгуен Ван Хуен, Нгиа До, Кау Зай, e-mail: [kiencuong90@gmail.com](mailto:kiencuong90@gmail.com)).

## Information about the authors

**KROTOVA Ekaterina Viktorovna** — Leading Engineer, IL PNK LA IATT. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, Karla Marksa St., Bldg. 10, e-mail: [kati\\_mit@mail.ru](mailto:kati_mit@mail.ru)).

**KIEN CUONG Dao** — Researcher. Vietnam Russia Tropical Science and Technology Research Center (122103 Hanoi, Vietnam, Nguyen Van Huyen, Nghia Do, Cau Zay St., e-mail: [kiencuong90@gmail.com](mailto:kiencuong90@gmail.com)).

**КУЗНЕЦОВ Михаил Евгеньевич** — аспирант кафедры машиноведения и инженерной графики, ведущий инженер ИЛ ПНК ЛА ИАТТ. Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. Карла Маркса, д. 10, e-mail: mekuznetsov@kai.ru).

**ШАКИРЗЯНОВ Фарид Рашитович** — старший научный сотрудник, НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева, лаборатория механики оболочек. Казанский (Приволжский) федеральный университет (420008, Казань, Российская Федерация, ул. Кремлевская, д. 18, e-mail: faritbox@mail.ru).

**ХАРИН Никита Вячеславович** — научный сотрудник, НИЦ НИИММ им. Н.Г. Чеботарева, лаборатория механики оболочек. Казанский (Приволжский) федеральный университет (420008, Казань, Российская Федерация, ул. Кремлевская, д. 18, e-mail: nik1314@mail.ru).

**МИТРИЙКИН Виктор Иванович** — доктор технических наук, профессор кафедры машиноведения и инженерной графики, ведущий инженер ИЛ ПНК ЛА ИАТТ. Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им А. Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. Карла Маркса, д. 10, e-mail: vmitryaykin@bk.ru).

**САЧЕНКОВ Оскар Александрович** — кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой компьютерной математики и информатики. Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского, Казанский (Приволжский) федеральный университет (420008, Казань, Российская Федерация, ул. Кремлевская, д. 18, e-mail: 4works@bk.ru).

**KUZNETSOV Mikhail Evgenievich** — Postgraduate, Department of Machine Learning and Engineering Graphics. Leading Engineer of IL PNC LA IATT. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, Karla Marks St., Bldg. 10, e-mail: mekuznetsov@kai.ru).

**SHAKIRZYANOV Farid Rashitovich** — Senior Researcher. N.G. Chebotarev SRC SRI of Math. and Mech., Laboratory of Shell Mechanics. Kazan Federal University (420008, Kazan, Russian Federation, Kremlyovskaya St., Bldg. 18, e-mail: faritbox@mail.ru).

**KHARIN Nikita Vyacheslavovich** — Researcher, N.G. Chebotarev SRC SRI of Math. and Mech., Laboratory of Shell Mechanics. Kazan Federal University (420008, Kazan, Russian Federation, Kremlyovskaya St., Bldg. 18, e-mail: nik1314@mail.ru).

**MITRYAKIN Victor Ivanovich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Machine Learning and Engineering Graphics, Leading Engineer, IL PNC LA IATT. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, Karla Marks St., Bldg. 10, e-mail: vmitryaykin@bk.ru).

**SACHENKOV Oskar Aleksandrovich** — Candidate of Science (Physics and Maths), Head of the Department of Computer Mathematics and Informatics, N.I. Lobachevsky Institute of Mathematics and Mechanics. Kazan (Volga Region) Federal University (420008, Kazan, Russian Federation, Kremlyovskaya St., Bldg. 18, e-mail: 4works@bk.ru).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Кротова Е.В., Киен Куонг Дао, Кузнецов М.Е., Шакирзянов Ф.Р., Харин Н.В., Митряйкин М.В., Саченков О.А. Исследование длительного влияния факторов тропической среды на механические свойства полимерных композиционных материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 1, с. 3–15.

**Please cite this article in English as:**

Krotova E.V., Kien Cuong Dao, Kuznetsov M.E., Shakirzyanov F.R., Kharin N.V., Mitryaikin M.V., Sachenkov O.A. Investigation of long-term influence of tropical environment factors on mechanical properties of polymer composite materials. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 1, pp. 3–15.