

Научная статья

УДК 620.1:678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-146-160

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА ВПС-53/Т-25 ПРИ НАТУРНЫХ И УСКОРЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

В.О. Старцев¹, А.А. Нечаев¹

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

Аннотация. Исследовано изменение рельефа поверхности стеклопластика ВПС-53/Т-25 после климатических испытаний в открытых условиях умеренного и умеренно теплого климата в течение 24 мес., а также лабораторных имитационных испытаний по двум режимам. После каждого съема проводили исследования характеристик рельефа поверхности образцов с построением распределения высот неоднородностей. Выявлены существенные различия в скорости изменения значений центров распределения неоднородностей поверхности при натуральных и ускоренных лабораторных климатических испытаниях.

Ключевые слова: климатическое старение, стеклопластик, профилометрия, рельеф поверхности, математическое моделирование

Для цитирования: Старцев В.О., Нечаев А.А. Исследование рельефа поверхности стеклопластика ВПС-53/Т-25 при натуральных и ускоренных климатических испытаниях // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 146–160. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-146-160.

Scientific article

STUDY OF THE SURFACE RELIEF OF VPS-53/T-25 GLASS-FIBER-REINFORCED PLASTIC UNDER FULL-SCALE AND ACCELERATED CLIMATIC TESTING

V.O. Startsev¹, A.A. Nechaev¹

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

Abstract. The surface topography of VPS-53/T-25 fiberglass was studied after 24 months of outdoor climatic testing in moderate and moderately warm climates, as well as after laboratory simulation tests in two modes. After each exposure, the surface topography characteristics of the samples were analyzed, plotting the distribution of surface irregularity heights. Significant differences in the rate of change in the centers of the surface irregularity distribution were revealed during both full-scale and accelerated laboratory climatic tests.

Keywords: climatic aging, fiberglass, profilometry, surface relief, mathematical modeling

For citation: Startsev V.O., Nechaev A.A. Study of the surface relief of VPS-53/T-25 glass-fiber-reinforced plastic under full-scale and accelerated climatic testing. *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 146–160. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-146-160.

Введение

Благодаря сочетанию высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и технологичности переработки, полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в авиакосмической технике, автомобилестроении, судостроении, ветроэнергетике и строительстве. Однако длительная эксплуатация изделий из ПКМ в открытых атмосферных условиях [1–5] ухудшает показатели материала из-за воздействия солнечного излучения [6, 7], циклических температурных перепадов, воздействия влаги [8–12] и агрессивных сред [13, 14]. Несмотря на применение защитных покрытий [15, 16], поверхность материала – наиболее уязвимая и одновременно информативная область: происходят фотоокислительные реакции и гидролиз, наблюдаются образование микротрещин и вымывание компонентов. Изменение рельефа поверхности (возрастание шероховатости, образование кратероподобных дефектов, нарушение адгезии между матрицей и армирующим наполнителем) приводит не только к ухудшению внешнего вида, но и непосредственно влияет на деформационно-прочностные свойства материала, поскольку возникающие микронеоднородности служат концентраторами напряжений.

В ряде исследований показано, что при натурной экспозиции ПКМ изменение рельефа поверхности имеет устойчивый характер и зависит от типа ПКМ и климатической зоны. В работе [17] показано, что для древесно-полипропиленовых композитов после одного года испытаний методом сканирующей электронной микроскопии выявлены многочисленные микротрещины и увеличение средней шероховатости, коррелирующее с потерей прочности. Аналогичный материал в работе [18] показал возрастание шероховатости на 40–70 %, причем более интенсивное – в условиях повышенной влажности. В исследовании [19] на ПКМ с наполнителем из волокна курауа после одного года натурального экспонирования выявлены растрескивание поверхности и вымывание лигнина, что привело к увеличению шероховатости с 0,8 до 2,4 мкм. Сравнение открытого экспонирования ПКМ и экспонирования под стеклом в работе [20] показало, что при прямом воздействии шероховатость возрастает на 78 %, а под стеклом – на 22 %, что подтверждает доминирующее значение ультрафиолетового (УФ) излучения. В исследовании [21] для пальмовых волокон в линейном полиэтилене низкой плотности после 12 мес. натурных испытаний обнаружены поперечные трещины и отслоение матрицы, причем шероховатость увеличилась в 3,2 раза. В работе [22] измеряли прочность и разрушающую нагрузку образцов стекло- и углепластиков после трех лет экспозиции в различных климатических зонах. Выявлено, что разрушение поверхностного слоя приводит к существенному разбросу измеряемой толщины образцов и делает невозможным корректное определение модуля упругости стандартными методами. Для биокompозитов на основе полибутиленисукцината и сизалевого волокна после одного года натурального старения поверхность становится шероховатой с множественными порами и выступами, причем в тропическом климате изменения в 1,5 раза существеннее, чем в умеренном [23].

Значительно более многочисленную группу составляют работы, в которых старение моделировали в лабораторных условиях с помощью УФ-облучения, конденсации влаги, соляного тумана и циклических температур. В работе [24] методом профилометрии и наноиндентирования показано, что после 1000 ч ускоренного старения шероховатость полимерного покрытия возрастает с 0,15 до 0,9 мкм, причем твердость снижается пропорционально росту шероховатости. Модель УФ-деградации, предложенная в исследовании [25], объясняет изменение рельефа неравномерным фотоокислением по глубине. Для композитов на основе поливинилхлорида с диоксидом титана с помощью атомно-силовой микроскопии обнаружено немонокотное изменение шероховатости:

сначала (до 200 ч) происходит сглаживание поверхности, затем после 500 ч – резкое возрастание шероховатости [26]. В работе [27] при исследовании базальтонаполненных биокомпозитов показано, что ускоренное старение в течение 1020 ч повышает шероховатость в 4 раза и изменяет смачиваемость с гидрофобной на гидрофильную. Для материала на основе полимолочной кислоты и полибутиленадипат-терефталата с древесной мукой и волластонитом после 500 ч УФ-облучения зафиксировано образование пустот и кратеров на поверхности [28]. В работе [29] выявлено, что ПКМ с наполнителями из волокон кенафа и ананаса при влажностном старении в течение 1000 ч показали увеличение шероховатости на 115 %, причем трибологические свойства ухудшились пропорционально. В работе [30] на многослойных полиуретановых ПКМ показано, что совместное циклическое воздействие УФ-излучения и влаги приводит к формированию сетки микротрещин глубиной до 30 мкм. Для древесно-наполненного полиэтилена высокой плотности после ускоренного старения шероховатость возросла с 0,2 до 1,1 мкм, причем обнаружена корреляция с карбонильным индексом [31]. В исследовании [32] методом атомно-силовой микроскопии детально изучен нанорельеф древесно-полипропиленовых композиционных материалов: уже через 300 ч УФ-облучения шероховатость увеличивалась с 20 до 120 нм, а через 1000 ч – до 350 нм. Сравнение различных методов ускоренных испытаний показало, что стандартные циклы ASTM недостаточно точно воспроизводят реальное растрескивание поверхности [33]. В работе [34] исследование трех типов древесно-полимерных композитов (на основе полипропилена, полиэтилена и полистирола) показало, что наихудшую устойчивость рельефа имеет полистирольная матрица, у которой после 500 ч появляются глубокие борозды. Исследование полиуретанового покрытия на образцах ПКМ после 200 дней циклического воздействия УФ-излучения, соляного тумана и повышенной температуры показало возрастание шероховатости в 5 раз и снижение адгезии на 80 % [35]. В работе [36] исследовали влияние УФ-старения на изменение шероховатости поверхности 3D-печатных непрерывно-армированных ПКМ с углеродными, стеклянными и арамидными волокнами. Образцы подвергали облучению в течение 720, 1440 и 2160 ч, имитируя до трех лет наружной экспозиции. Установлено, что шероховатость поверхности возрастает для всех типов композитов, причем наиболее значительно – для ПКМ со стеклянными волокнами. Таким образом, ускоренные испытания подтверждают основные закономерности, наблюдаемые в натурных условиях, но, как правило, дают более высокие скорости деградации.

В работе [37] проанализирована взаимосвязь между потерей механических свойств, выделением летучих продуктов деструкции и изменением рельефа поверхности при старении полимеров и биокомпозитов. Показано, что изменение рельефа поверхности является связующим звеном между химическими превращениями и макроскопическим снижением эксплуатационных характеристик. В исследовании [38] показано, что рост шероховатости может привести к переходу от гидрофобности к гидрофильности, что дополнительно ускоряет деградацию. В работе [39] сравниваются механизмы старения стекло- и натуральноволокнистых композитов и показано, что для натуральных волокон значительное изменение рельефа поверхности начинается уже на ранних стадиях из-за их гигроскопичности. В работе [40] систематизированы основные проявления старения волокнистых ПКМ, среди которых универсальным признаком деградации указывается увеличение шероховатости поверхности. В обзоре [41] рассмотрены различные методы модификации поверхности натуральных волокон и показано, что даже оптимальная обработка, направленная на улучшение совместимости с полимерной матрицей, не позволяет полностью предотвратить возрастание шероховатости при длительном климатическом воздействии.

Таким образом, независимо от типа климатического воздействия (натурное или ускоренное) наблюдается существенное изменение показателей рельефа поверхности ПКМ. Несмотря на значительный объем накопленных экспериментальных данных, исследование закономерностей изменения параметров рельефа поверхности ПКМ под влиянием климатических факторов остается актуальной задачей – требуется прямое сравнение изменения рельефа при разных видах климатического воздействия. В данной работе поставлена задача – исследовать изменения показателей рельефа стеклопластика при натурных испытаниях в условиях умеренного и умеренно теплого климата, а также при двух видах ускоренных лабораторных испытаний.

Материалы и методы

Исследовали стеклопластик ВПС-53/Т-25 на основе стеклянной ткани Т-25 (ВМП) и связующего ВСЭ-34. Плиты стеклопластика экспонировали в открытых условиях умеренного климата (Москва) и умеренно теплого климата (Геленджик) в течение 24 мес.; основные показатели климата приведены в работах [2, 12]. Ускоренные лабораторные климатические испытания проводили по двум режимам (имитация годового цикла), включающим последовательное воздействие повышенной и пониженной температур, перепадов температур и солнечного излучения. Во втором режиме ускоренных испытаний воздействие солнечного излучения совмещено с воздействием повышенной влажности воздуха, а интегральная плотность потока солнечного излучения увеличена с 1120 до 1400 Вт/м².

После 6, 12, 18 и 24 мес. натурных испытаний и после имитации 6, 12, 18 и 24 мес. натурных испытаний в лабораторных условиях проводили исследование образцов стеклопластика на оптическом (увеличение объектива $\times 5$, общее увеличение $\times 118$, площадь зрения 2565×2565 мкм) и конфокальном сканирующем микроскопах. Получение массива данных проводили с применением объектива $\times 10$ при общем увеличении микроскопа $\times 236$. Площадь сканируемого участка образца составляла 2420×2850 мкм. Массив данных для этой области представлен в виде CSV-файла с количеством столбцов 1940 и строк 2870, в каждой ячейке представлено значение неоднородности рельефа R_z (всего 5 567 800 значений). Для каждой строки производилось построчное усреднение параметра R_z по всем столбцам. В полученном массиве показателей R_z определялись минимальное (R_{zmin}) и максимальное (R_{zmax}) значения этого показателя. Весь диапазон $\Delta R = (R_{zmax} - R_{zmin})$ разделяли на 21 равный интервал и подсчитывали количество N_R -значений R_z для каждого интервала. Далее количество полученных значений N_R для каждого интервала переводили в процентную частоту от общего количества. Полученные экспериментальные данные по частоте от значения неоднородности рельефа аппроксимировали распределением Гаусса для $x = R_z$ с параметрами смещения μ и масштаба σ по модели (1):

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Результаты и обсуждение

На рис. 1–4 приведены микрофотографии поверхностей в исходном состоянии, а также после экспонирования в условиях умеренного (рис. 1) и умеренно теплого климата (рис. 2), ускоренных лабораторных испытаний по режимам 1 (рис. 3) и 2 (рис. 4).

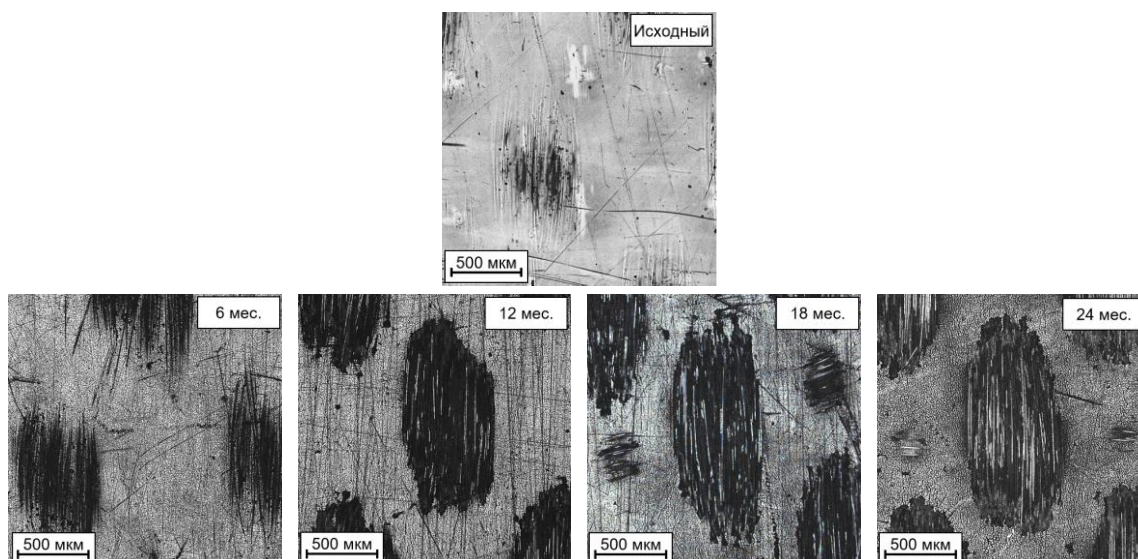


Рис. 1. Микрофотографии поверхности стеклопластика ВПС-53/Т-25 в исходном состоянии и после экспонирования в условиях умеренного климата

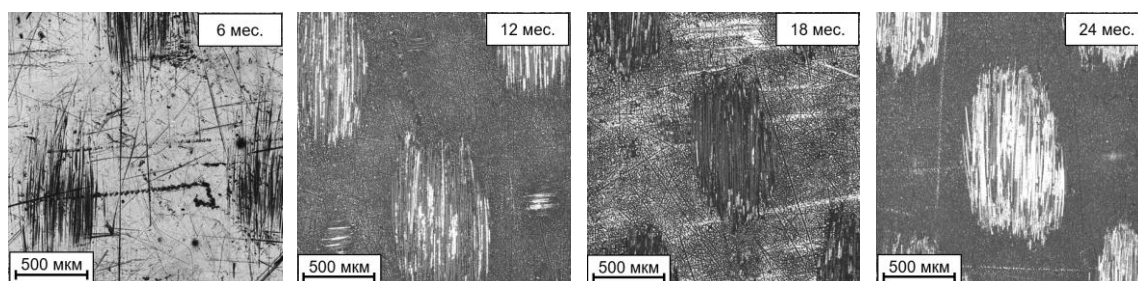


Рис. 2. Микрофотографии поверхности стеклопластика ВПС-53/Т-25 после экспонирования в условиях умеренно теплого климата

В исходном состоянии микрорельеф поверхности образца отличается гладкостью и однородностью, при этом стекловолокна практически полностью закрыты слоем полимерной матрицы. При экспонировании в натуральных условиях после 6 мес. фиксируются признаки деградации в виде локальной эрозии, потери глянца и микротрещин, ориентированных вдоль армирующих волокон. К 12 мес. натурального старения на поверхности проявляется рисунок тканого переплетения жгутов вследствие истончения связующего, что сопровождается обнажением верхних слоев нитей и расширением трещин с формированием сетки межволоконных разрывов. Через 18 и 24 мес. натурального воздействия морфология характеризуется обширным растрескиванием матрицы, появлением сквозных каналов к волокну и чередованием участков обнаженного стекловолокна с остаточными фрагментами деструктированного связующего.

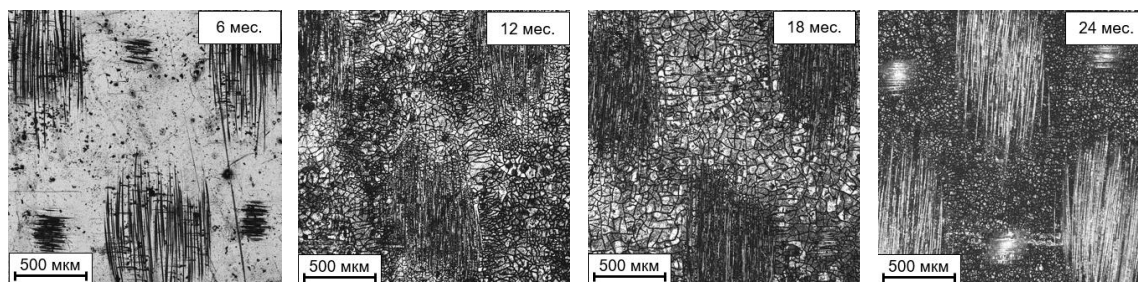


Рис. 3. Микрофотографии поверхности стеклопластика ВПС-53/Т-25 при ускоренных лабораторных испытаниях по режиму 1

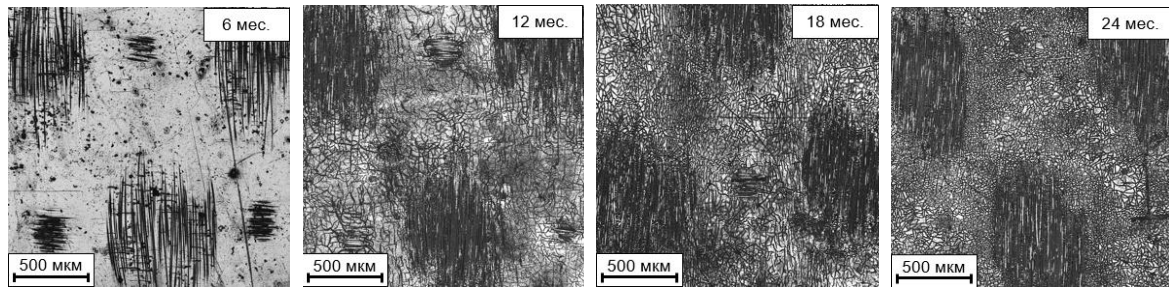


Рис. 4. Микрофотографии поверхности стеклопластика ВПС-53/Т-25 при ускоренных лабораторных испытаниях по режиму 2

В отличие от натуральных условий, лабораторное ускоренное старение с контролируемыми температурой, влажностью и УФ-излучением приводит к иной картине изменений. При лабораторном воздействии уже на ранних сроках (имитация 6–12 мес.) наблюдается значительно более интенсивное растрескивание связующего, трещины имеют большую густоту, глубину и разветвленность. После имитации 12 мес. сетка трещин покрывает практически всю поверхность матрицы, в то время как степень обнажения жгутов остается менее выраженной, чем в натуральных условиях. После имитации 18 мес. растрескивание приобретает характер сплошной микроразрушенности связующего с множественными сколами, однако оголение волокон происходит медленнее. После имитации 24 мес. фиксируется максимальная плотность трещин. Существенное различие между натурными и лабораторными испытаниями заключается в том, что натурное воздействие преимущественно усиливает эрозию и обнажение волокна, а лабораторные испытания делают акцент на разрушении самой полимерной матрицы. В обоих случаях конечным результатом является потеря целостности поверхностного слоя, однако механизмы и кинетика разрушения различаются: при натурном старении доминирует износ связующего с обнажением наполнителя, а при лабораторном – преобладает растрескивание и фрагментация матрицы. Необходимо учитывать режим экспонирования при оценке долговечности стеклопластика, так как лабораторные испытания могут давать завышенные показатели деградации связующего по сравнению с реальными натурными условиями.

На рис. 5 показано распределение высот неоднородностей рельефа и результаты аппроксимации данных моделью (1) стеклопластика ВПС-53/Т-25 в исходном состоянии. В таблице приведены результаты моделирования экспериментальных данных после всех съёмов и всех видов климатических испытаний.

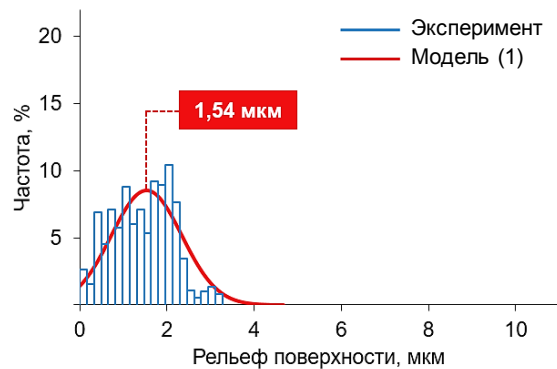


Рис. 5. Распределение высот неоднородностей профиля поверхности стеклопластика ВПС-53/Т-25 в исходном состоянии

Центр распределения составляет $\mu = 1,54$ мкм, стандартное отклонение $\sigma = 0,81$ мкм (см. таблицу), что указывает на значительную вариативность данных (разброс данных составляет 53 %). Около 95 % экспериментальных данных находятся в пределах 0–3,16 мкм, распределение имеет умеренно широкий «колокол» и асимметрию из-за усечения слева.

На рис. 6 приведено изменение распределения высот неоднородностей рельефа при экспонировании в натуральных условиях умеренно теплого климата.

Расчетные параметры модели (1)

Условия испытаний	Значения параметров после экспонирования в течение, мес.														
	В исходном состоянии			6			12			18			24		
	μ	σ	R^2	μ	σ	R^2	μ	σ	R^2	μ	σ	R^2	μ	σ	R^2
Натурные в умеренно теплом климате	1,54	0,81	0,91	2,46	1,45	0,84	3,67	1,02	0,94	5,32	1,68	0,89	6,32	1,81	0,98
Натурные в умеренном климате				1,55	0,51	0,92	2,72	1,19	0,86	2,90	0,95	0,96	3,21	1,29	0,98
Ускоренные по режиму 1				5,24	4,51	0,72	5,27	3,39	0,81	5,54	4,86	0,78	7,06	2,31	0,88
Ускоренные по режиму 2				3,48	4,16	0,88	3,98	2,21	0,91	6,12	1,91	0,93	7,81	3,37	0,74

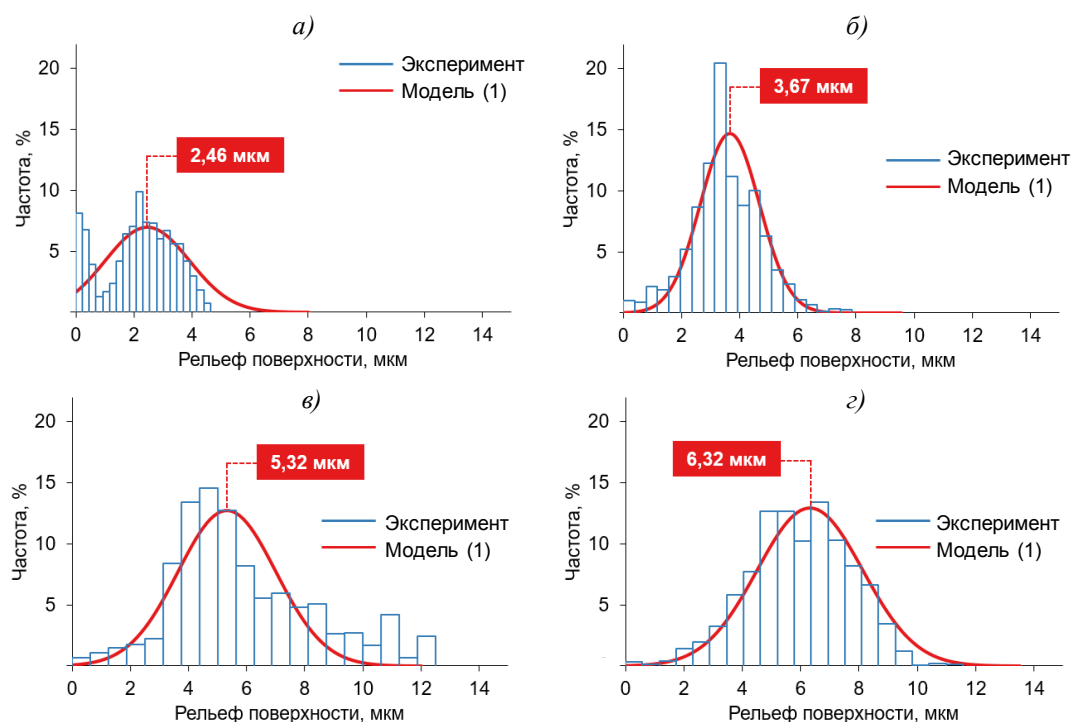


Рис. 6. Распределение высот неоднородностей профиля поверхности стеклопластика ВПС-53/Т-25 после 6 (а), 12 (б), 18 (в) и 24 мес. (г) натуральных климатических испытаний в умеренно теплом климате

Как видно из данных рис. 6 и таблицы после 6 мес. μ возрастает до 2,46 мкм, σ — до 1,45 мкм. После 12 мес. μ продолжает возрастать до 3,67 мкм, однако σ снижается до

1,02 мкм, после 18 мес. μ возрастает до 5,23 мкм, σ увеличивается до 1,68 мкм, а R^2 снижается с 0,94 до 0,89. Увеличение разброса при одновременном снижении R^2 , вероятно, означает начало необратимой деструкции с появлением локальных зон с аномальными высотами (в частности, оголением волокон – рис. 1). После 24 мес. μ достигает 6,32 мкм, σ : 1,81 мкм, а R^2 возрастает до 0,98, т. е. процессы разрушения распространились по всей площади равномерно, сформировалась новая стационарная шероховатость с высокой средней высотой (рост параметра μ в 4,1 раза – с 1,54 до 6,32 мкм) и широким разбросом, но с сохранением статистической однородности.

На рис. 7 показано изменение распределения высот неоднородностей рельефа при экспонировании в натуральных условиях умеренного климата.

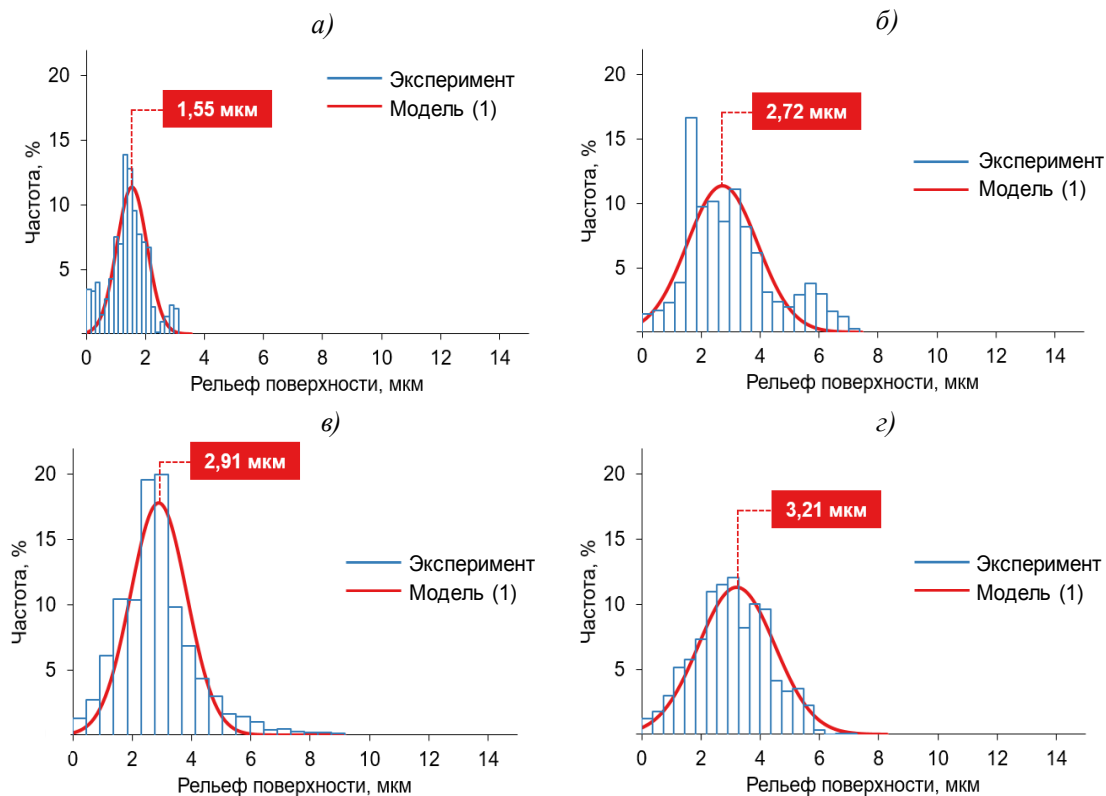


Рис. 7. Распределение высот неоднородностей профиля поверхности стеклопластика ВПС-53/Т-25 после 6 (а), 12 (б), 18 (в) и 24 мес. (з) натуральных климатических испытаний в умеренном климате

После 6 мес. μ остается практически на исходном уровне (1,55 мкм), а σ снижается до 0,51 мкм. После 12 мес. μ возрастает до 2,72 мкм, σ увеличивается до 1,19 мкм, а R^2 снижается с 0,92 до 0,86.

Как и при экспонировании в умеренно теплом климате, рост разброса при одновременном снижении R^2 свидетельствует о начале локальных деструктивных процессов (рис. 2). После 18 мес. μ достигает 2,90 мкм, σ снижается до 0,95 мкм, а R^2 возрастает до 0,96, что указывает на стабилизацию и выравнивание рельефа за счет удаления слабо связанных фрагментов. После 24 мес. μ увеличивается до 3,21 мкм, σ – до 1,29 мкм, а R^2 достигает 0,98. За 24 мес. наблюдается рост параметра μ в 2,1 раза.

Изменения распределения высот неоднородностей рельефа при лабораторных ускоренных испытаниях по режиму 1 показаны на рис. 8.

После 6 мес. μ резко возрастает до 5,24 мкм, σ – до 4,51 мкм, а R^2 составляет 0,72. Столь значительный рост средней высоты (в 3,4 раза) и особенно разброса (в 5,6 раза) при низком коэффициенте детерминации свидетельствует о крайне неоднородной деградации поверхности с выраженными локальными аномалиями (отслоения, глубокие впадины, выкрашивание – рис. 3).

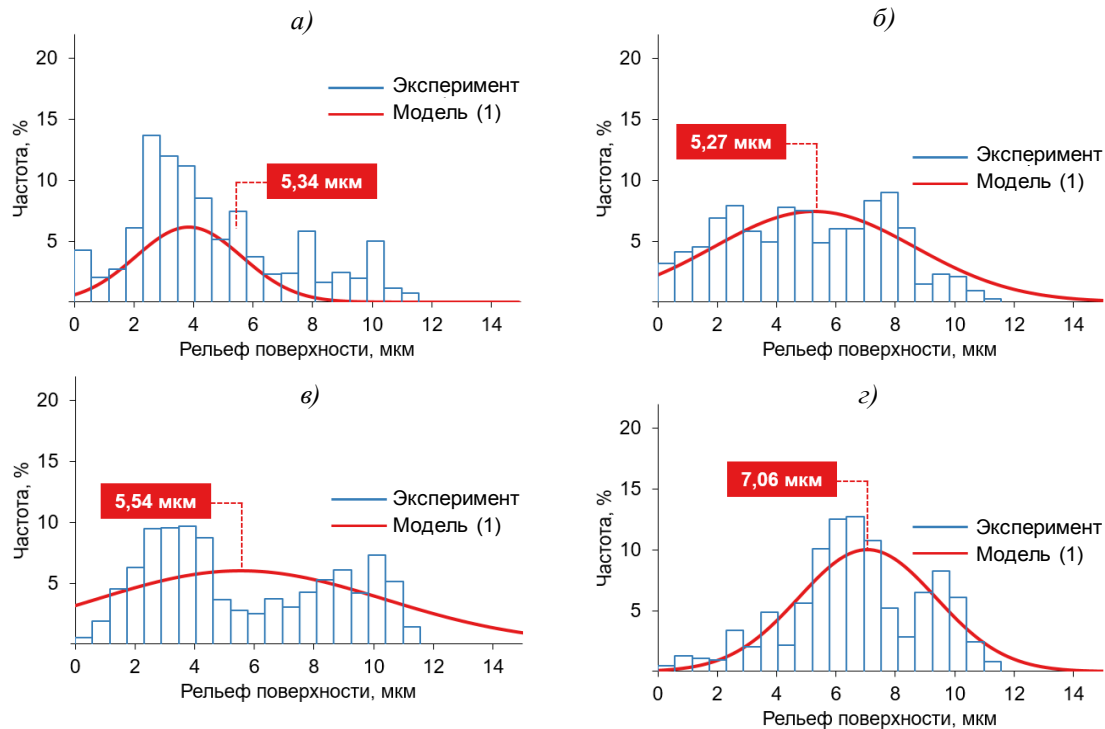


Рис. 8. Распределение высот неоднородностей профиля поверхности стеклопластика ВПС-53/Т-25 после имитации 6 (а), 12 (б), 18 (в) и 24 мес. (з) натуральных климатических испытаний по режиму 1

После имитации 12 мес. μ практически не меняется (5,27 мкм), σ снижается до 3,39 мкм, однако R^2 остается невысоким (0,81). Уменьшение разброса при стабильной средней высоте указывает на частичное сглаживание наиболее выраженных неровностей. После 18 мес. μ незначительно увеличивается до 5,54 мкм, σ возрастает до 4,86 мкм (максимум за весь период), а R^2 снижается до 0,78. Возрастание разброса до максимальных значений при одновременном снижении R^2 подтверждает усиление пространственной неоднородности – образование новых дефектов на фоне уже имеющихся. После имитации 24 мес. μ достигает 7,06 мкм, σ снижается до 2,31 мкм, а R^2 повышается до 0,88. Увеличение средней высоты при существенном уменьшении разброса и улучшении аппроксимации свидетельствует о стабилизации структуры поверхности: мелкие неровности нивелируются, формируется более упорядоченный рельеф с меньшей вариативностью. Таким образом, при имитации 24 мес. в режиме 1 средняя высота неоднородностей возросла в 4,6 раза (с 1,54 до 7,06 мкм), а среднеквадратическое отклонение к концу срока увеличилось в 2,8 раза (с 0,81 до 2,31 мкм). При всех съемах наблюдаются высокие значения σ , что указывает на значительно бóльшую неоднородность поверхности по сравнению с результатами после натуральных климатических испытаний. Значения $R^2 = 0,72\text{--}0,88$ свидетельствуют о сложном механизме разрушения поверхности с множественными локальными очагами.

Изменение распределения высот неоднородностей рельефа при лабораторных ускоренных испытаниях по режиму 2 приведены на рис. 9.

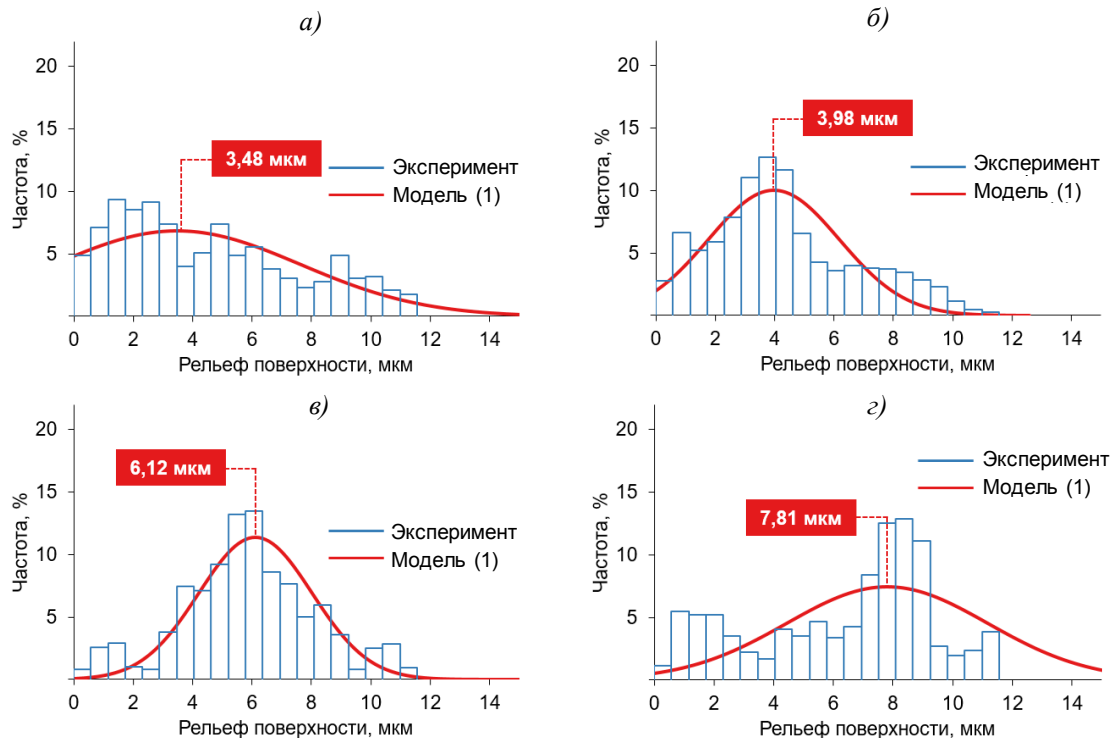


Рис. 9. Распределение высот неоднородностей профиля поверхности стеклопластика ВПС-53/Т-25 после имитации 6 (а), 12 (б), 18 (в) и 24 мес. (г) натуральных климатических испытаний по режиму 2

За 24 мес. лабораторного воздействия по режиму 2 средняя высота неоднородностей возросла в 5,1 раза (с 1,54 до 7,81 мкм), а среднеквадратическое отклонение увеличилось в 4,2 раза (с 0,81 до 3,37 мкм). Высокие значения σ на протяжении всего эксперимента (см. таблицу) указывают на значительно бóльшую неоднородность поверхности по сравнению с натурными климатическими испытаниями, а низкий R^2 на финальном этапе свидетельствует о сложной структуре рельефа, плохо описываемой гауссовым распределением.

Заключения

Таким образом, при всех видах климатических испытаний происходит возрастание средней высоты неоднородностей, однако интенсивность и характер этого процесса существенно различаются. По значению μ можно провести ранжирование видов климатических испытаний:

- режим ускоренных лабораторных испытаний 2 – в 5,1 раза;
- режим ускоренных лабораторных испытаний 1 – в 4,6 раза;
- натурные испытания в умеренно теплом климате – в 4,1 раза;
- натурные испытания в умеренном климате – в 2,1 раза.

Натурные климатические воздействия приводят к предсказуемой и статистически устойчивой эволюции шероховатости, тогда как лабораторные режимы генерируют более хаотичную деградацию поверхности с низким качеством гауссовой аппроксимации, что требует учета при прогнозировании долговечности материала.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотруднику НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ А.И. Гуляеву за участие в экспериментальной части работы.

Список источников

1. 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.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 2. Новые подходы к оценке коррозивности приморских атмосфер // *Коррозия: материалы, защита*. 2016. № 1. С. 1–15.
3. 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 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
4. Горбовец М.А., Николаев Е.В., Старцев В.О. Климатические испытания материалов для Арктики. Часть 2. Требования к испытаниям // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 1 (78). С. 138–147. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.06.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-138-147.
5. Горбовец М.А., Николаев Е.В., Старцев В.О. Климатические испытания материалов для Арктики. Часть 1. Требования к материалам // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). С. 180–188. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.06.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-180-188.
6. Startsev O.V., Isupov V.V., Nikishin E.F. The Gradient of Mechanical Characteristics Across the Thickness of Composite Laminates After Exposure to a Low Earth Orbit Environment // *Polymer Composites*. 1998. Vol. 19. No. 1. P. 65–70.
7. Старцев О.В., Никишин Е.Ф. Старение полимерных композитных материалов в условиях открытого космоса // *Механика композитных материалов*. 1993. № 4. С. 457–467.
8. Filistovich D.V., Startsev O.V., Kuznetsov A.A. et al. Effect of moisture on the anisotropy of the dynamic shear modulus of glass-reinforced plastics // *Doklady Physics*. 2003. Vol. 48. No. 6. P. 306–308.
9. 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.
10. Kablov E.N., Startsev O.V., Panin S.V. Moisture transfer in carbon-fiber-reinforced plastic with degraded surface // *Doklady Physical Chemistry*. 2015. Vol. 461. No. 2. P. 80–83.
11. Старцев В.О., Панин С.В., Старцев О.В. Сорбция и диффузия влаги в полимерных композитных материалах с ударными повреждениями // *Механика композитных материалов*. 2015. Т. 51. № 6. С. 1081–1094.
12. Корниенко Г.В., Старцев О.В., Кротов А.С., Коваль Т.В. Моделирование зависимости модуля сдвига углепластика от времени увлажнения и влагосодержания // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 3 (80). С. 161–178. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.06.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-161-178.
13. Старцев В.О. Методы исследования старения полимерных связующих // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2020. № 9. С. 16–26.
14. Старцев В.О., Молоков М.В., Старцев О.В., Низина Т.А., Низин Д.Р. Влияние алифатического разбавителя ЭТАЛ-1 на климатическую стойкость эпоксидных полимеров на основе смолы ЭД-20 // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. № 12. С. 26–36.
15. Старцев В.О., Фролов А.С. Влияние климатического воздействия на цветовые характеристики лакокрасочных покрытий // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2015. № 3. С. 16–18.
16. Коваль Т.В., Старцев О.В., Александрова Т.В. Оценка состояния акрилстирольного покрытия после длительного климатического старения методом импедансной спектроскопии // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 3 (80). С. 179–192. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.06.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-179-192.

17. Butylina S., Hyvärinen M., Kärki T. A study of surface changes of wood-polypropylene composites as the result of exterior weathering // *Polymer Degradation and Stability*. 2012. Vol. 97. No. 3. P. 337–345.
18. Badji C., Soccalingame L., Garay H. et al. Influence of weathering on visual and surface aspect of wood plastic composites: Correlation approach with mechanical properties and microstructure // *Polymer Degradation and Stability*. 2017. Vol. 137. P. 162–172.
19. Santos T.A., Silva R.L., De Paoli M.-A., Spinacé M.A.S. Evaluation of the weathering processes after natural exposure of polypropylene/Curauá fiber composites // *Polymer*. 2026. Vol. 342. P. 129300.
20. Badji C., Beigbeder J., Garay H. et al. Exterior and under glass natural weathering of hemp fibers reinforced polypropylene biocomposites: Impact on mechanical, chemical, microstructural and visual aspect properties // *Polymer Degradation and Stability*. 2018. Vol. 148. P. 104–116.
21. Debabeche N., Boussehel H., Hachaichi A. et al. Influence of natural weathering on aesthetics, structural, morphological, and mechanical properties of the palm petiole fibers/LLDPE composites // *Journal of Polymer Research*. 2025. Vol. 32. No. 4. P. 101.
22. Startsev O.V., Veligodsky I.M., Medvedev I.M., Gladkikh A.V., Gorbovets M.A. Measurement of Strength and Fracture Load of Weathered Samples of Polymer Composite Materials // *Polymer Science. Series D*. 2024. Vol. 17. No. 2. P. 302–310.
23. Kumar K.S., Swamynaidu M., Singh C., Singh I. Natural weathering and soil degradation characteristics of lignocellulosic sisal fiber based bio-PBS composites // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 332. P. 148679.
24. Zhang Z.Y., Dhakal H.N., Surip S.N. et al. Characterisation of roof tile coating degradation using nano-indentation test and surface profilometry // *Polymer Degradation and Stability*. 2011. Vol. 96. No 5. P. 833–838.
25. Lu T., Solis-Ramos E., Yi Y., Kumosa M. UV degradation model for polymers and polymer matrix composites // *Polymer Degradation and Stability*. 2018. Vol. 154. P. 203–210.
26. Xu S., Xu J., Zhang J. Surface topography and cooling effects in poly(vinyl chloride) (PVC)/titanium dioxide (TiO₂) composites exposed to UV-irradiation // *Iranian Polymer Journal*. 2018. Vol. 27. No. 12. P. 1011–1022.
27. Jagadeesh P., Puttegowda M., Mavinkere Rangappa S., Siengchin S. Accelerated weathering of sustainable and micro-filler Basalt reinforced polymer biocomposites: Physical, mechanical, thermal, wettability, and water absorption studies // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 80. P. 108040.
28. Chuayjuljit S., Leejarkpai T., Chaiwutthinan P. Effect of accelerated weathering on the properties of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend and composite containing wood flour and wollastonite // *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*. 2024. Vol. 40. No. 3. P. 268–286.
29. Kumar S., Bhowmik S. Accelerated Weathering with Humidity Effects on Physical, Surface Interfacial and Tribology Behavior of Kenaf-Pineapple Laminated Biocomposite Under Different Loading Constraint // *Fibers and Polymers*. 2025. Vol. 26. No. 1. P. 173–195.
30. Strąk C., Kozikowska E., Małek M., Wachowski M. Degradation of the Surface of Synthetic Layered Composites Due to Accelerated Ageing // *Materials*. 2025. Vol. 18. No. 14. P. 3342.
31. Stark N.M., Matuana L.M. Surface chemistry and mechanical property changes of wood-flour/high-density-polyethylene composites after accelerated weathering // *Journal of Applied Polymer Science*. 2004. Vol. 94. No. 6. P. 2263–2273.
32. Peng Y., Liu R., Cao J. Characterization of surface chemistry and crystallization behavior of polypropylene composites reinforced with wood flour, cellulose, and lignin during accelerated weathering // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 332. P. 253–259.
33. Sudoł E., Kozikowska E., Szewczak E. Artificial Weathering Resistance Test Methods for Building Performance Assessment of Profiles Made of Natural Fibre-Reinforced Polymer Composites // *Materials*. 2021. Vol. 15. No. 1. P. 296.
34. Acosta A.P., Amico S.C., Delucis R. et al. Surface analysis of different wood polymer composites exposed to artificial weathering // *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2024. Vol. 44. No. 2. P. 88–101.

35. Mushtaq M., Gulipalli P., Adusumalli R., Suresh K., Abraham A.A. Effect of 200 days of cyclic weathering and salt spray on the performance of PU coating applied on a composite substrate // *Science and Engineering of Composite Materials*. 2025. Vol. 32. No. 1. P. 20250055.
36. Rogha E., Bazli M., Shahbazi R. et al. Understanding UV-driven degradation in 3D-printed continuous fibre composites: Impact, hardness, and surface evolution // *Journal of Building Engineering*. 2026. Vol. 120. P. 115494.
37. Nzimande M.C., Mtibe A., Tichapondwa S., John M.J. A Review of Weathering Studies in Plastics and Biocomposites – Effects on Mechanical Properties and Emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs) // *Polymers*. 2024. Vol. 16. No. 8. P. 1103.
38. Ramesh M., Selvan M.T., Deepa C. Wettability and weathering behavior of polymeric bionanocomposites // *Polymer Nano-Biocomposites: Preparation, Properties and Applications*. Elsevier, 2025. P. 253–292.
39. Nezafatkah S., Margoto O.H., Sassani F., Milani A.S. Understanding natural and accelerated weathering degradation mechanisms of glass and natural fiber composites: A review // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2026. Vol. 45. No. 7–8. P. 1741–1763.
40. Oliveira M.S., da Luz F.S., Monteiro S.N. Research Progress of Aging Effects on Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Brief Review // *Characterization of Minerals, Metals and Materials*. Springer, 2021. P. 505–515.
41. Tongco J.V. Effects of treatment methods on surface morphology and performance of modified natural fiber biopolymers and biocomposites – a comprehensive review // *Journal of Polymer Research*. 2025. Vol. 32. No. 12. P. 443.

References

1. 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.
2. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Corrosivity of the Marine Atmosphere. Part 2. New Approaches to Assessing the Corrosivity of Marine Atmospheres. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2016, no. 1, pp. 1–15.
3. 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.
4. Gorbovets M.A., Nikolaev E.V., Startsev V.O. Climate testing of Arctic materials. Part 2. Test requirements. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), pp. 138–147. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 11, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-138-147.
5. Gorbovets M.A., Nikolaev E.V., Startsev V.O. Climate testing of Arctic materials. Part 1. Requirements for materials. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), pp. 180–188. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 11, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-180-188.
6. Startsev O.V., Isupov V.V., Nikishin E.F. The Gradient of Mechanical Characteristics Across the Thickness of Composite Laminates After Exposure to a Low Earth Orbit Environment. *Polymer Composites*, 1998, vol. 19, no. 1, pp. 65–70.
7. Startsev O.V., Nikishin E.F. Aging of polymer composite materials in open space. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1993, no. 4, pp. 457–467.
8. Filistovich D.V., Startsev O.V., Kuznetsov A.A. et al. Effect of moisture on the anisotropy of the dynamic shear modulus of glass-reinforced plastics. *Doklady Physics*, 2003, vol. 48, no. 6, pp. 306–308.
9. Startsev O.V., Krotov A.S., Senatorova O.G., Anikhovskaya L.I., Antipov V.V., Grashchenkov D.V. Moisture sorption and diffusion in SIAL-type layered metal-polymer composite materials. *Materialovedenie*, 2011, no. 12, pp. 38–44.
10. Kablov E.N., Startsev O.V., Panin S.V. Moisture transfer in carbon-fiber-reinforced plastic with degraded surface. *Doklady Physical Chemistry*, 2015, vol. 461, no. 2, pp. 80–83.

11. Startsev V.O., Panin S.V., Startsev O.V. Moisture Sorption and Diffusion in Polymer Composite Materials with Impact Damage. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2015, vol. 51, no. 6, pp. 1081–1094.
12. Kornienko G.V., Startsev O.V., Krotov A.S., Koval T.V. Dependence modeling of the CFRP shear modulus on moisture content. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 3 (80), pp. 161–178. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 11, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-161-178.
13. Startsev V.O. Methods for investigating the aging of polymer binders. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2020, no. 9, pp. 16–26.
14. Startsev V.O., Molokov M.V., Startsev O.V., Nizina T.A., Nizin D.R. Effect of the aliphatic diluent ETAL-1 on the climatic resistance of epoxy polymers based on ED-20 resin. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2016, no. 12, pp. 26–36.
15. Startsev V.O., Frolov A.S. Effect of climatic exposure on the color characteristics of paint coatings. *Lakokrasochnyye materialy i ikh primeneniye*, 2015, no. 3, pp. 16–18.
16. Koval T.V., Startsev O.V., Alexandrova T.V. Assessment of the state of an acrylic styrene coating after prolonged climatic aging by impedance spectroscopy. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 3 (80), pp. 179–192. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 11, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-179-192.
17. Butylina S., Hyvärinen M., Kärki T. A study of surface changes of wood-polypropylene composites as the result of exterior weathering. *Polymer Degradation and Stability*, 2012, vol. 97, no. 3, pp. 337–345.
18. Badji C., Soccalingame L., Garay H. et al. Influence of weathering on visual and surface aspect of wood plastic composites: Correlation approach with mechanical properties and microstructure. *Polymer Degradation and Stability*, 2017, vol. 137, pp. 162–172.
19. Santos T.A., Silva R.L., De Paoli M.-A., Spinacé M.A.S. Evaluation of the weathering processes after natural exposure of polypropylene/Curauá fiber composites. *Polymer*, 2026, vol. 342, p. 129300.
20. Badji C., Beigbeder J., Garay H. et al. Exterior and under glass natural weathering of hemp fibers reinforced polypropylene biocomposites: Impact on mechanical, chemical, microstructural and visual aspect properties. *Polymer Degradation and Stability*, 2018, vol. 148, pp. 104–116.
21. Debabeche N., Boussehel H., Hachaichi A. et al. Influence of natural weathering on aesthetics, structural, morphological, and mechanical properties of the palm petiole fibers/LLDPE composites. *Journal of Polymer Research*, 2025, vol. 32, no. 4, p. 101.
22. Startsev O.V., Veligodsky I.M., Medvedev I.M., Gladkikh A.V., Gorbovets M.A. Measurement of Strength and Fracture Load of Weathered Samples of Polymer Composite Materials. *Polymer Science. Series D*, 2024, vol. 17, no. 2, pp. 302–310.
23. Kumar K.S., Swamynaidu M., Singh C., Singh I. Natural weathering and soil degradation characteristics of lignocellulosic sisal fiber based bio-PBS composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, vol. 332, p. 148679.
24. Zhang Z.Y., Dhakal H.N., Surip S.N. et al. Characterisation of roof tile coating degradation using nano-indentation test and surface profilometry. *Polymer Degradation and Stability*, 2011, vol. 96, no. 5, pp. 833–838.
25. Lu T., Solis-Ramos E., Yi Y., Kumosa M. UV degradation model for polymers and polymer matrix composites. *Polymer Degradation and Stability*, 2018, vol. 154, pp. 203–210.
26. Xu S., Xu J., Zhang J. Surface topography and cooling effects in poly(vinyl chloride) (PVC)/titanium dioxide (TiO₂) composites exposed to UV-irradiation. *Iranian Polymer Journal*, 2018, vol. 27, no. 12, pp. 1011–1022.
27. Jagadeesh P., Puttegowda M., Mavinkere Rangappa S., Siengchin S. Accelerated weathering of sustainable and micro-filler Basalt reinforced polymer biocomposites: Physical, mechanical, thermal, wettability, and water absorption studies. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 80, p. 108040.
28. Chuayjuljit S., Leejarkpai T., Chaiwutthinan P. Effect of accelerated weathering on the properties of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend and composite containing wood flour and wollastonite. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 2024, vol. 40, no. 3, pp. 268–286.

29. Kumar S., Bhowmik S. Accelerated Weathering with Humidity Effects on Physical, Surface Interfacial and Tribology Behavior of Kenaf-Pineapple Laminated Biocomposite Under Different Loading Constraint. *Fibers and Polymers*, 2025, vol. 26, no. 1, pp. 173–195.
30. Strąk C., Kozikowska E., Małek M., Wachowski M. Degradation of the Surface of Synthetic Layered Composites Due to Accelerated Ageing. *Materials*, 2025, vol. 18, no. 14, p. 3342.
31. Stark N.M., Matuana L.M. Surface chemistry and mechanical property changes of wood-flour/high-density-polyethylene composites after accelerated weathering. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, vol. 94, no. 6, pp. 2263–2273.
32. Peng Y., Liu R., Cao J. Characterization of surface chemistry and crystallization behavior of polypropylene composites reinforced with wood flour, cellulose, and lignin during accelerated weathering. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 332, pp. 253–259.
33. Sudół E., Kozikowska E., Szewczak E. Artificial Weathering Resistance Test Methods for Building Performance Assessment of Profiles Made of Natural Fibre-Reinforced Polymer Composites. *Materials*, 2021, vol. 15, no. 1, p. 296.
34. Acosta A.P., Amico S.C., Delucis R. et al. Surface analysis of different wood polymer composites exposed to artificial weathering. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2024, vol. 44, no. 2, pp. 88–101.
35. Mushtaq M., Gulipalli P., Adusumalli R., Suresh K., Abraham A.A. Effect of 200 days of cyclic weathering and salt spray on the performance of PU coating applied on a composite substrate. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2025, vol. 32, no. 1, p. 20250055.
36. Rogha E., Bazli M., Shahbazi R. et al. Understanding UV-driven degradation in 3D-printed continuous fibre composites: Impact, hardness, and surface evolution. *Journal of Building Engineering*, 2026, vol. 120, p. 115494.
37. Nzimande M.C., Mtibe A., Tichapondwa S., John M.J. A Review of Weathering Studies in Plastics and Biocomposites – Effects on Mechanical Properties and Emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs). *Polymers*, 2024, vol. 16, no. 8, p. 1103.
38. Ramesh M., Selvan M.T., Deepa C. Wettability and weathering behavior of polymeric bionanocomposites. *Polymer Nano-Biocomposites: Preparation, Properties and Applications*. Elsevier, 2025, pp. 253–292.
39. Nezafatkah S., Margoto O.H., Sassani F., Milani A.S. Understanding natural and accelerated weathering degradation mechanisms of glass and natural fiber composites: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2026, vol. 45, no. 7–8, pp. 1741–1763.
40. Oliveira M.S., da Luz F.S., Monteiro S.N. Research Progress of Aging Effects on Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Brief Review. *Characterization of Minerals, Metals and Materials*. Springer, 2021, pp. 505–515.
41. Tongco J.V. Effects of treatment methods on surface morphology and performance of modified natural fiber biopolymers and biocomposites – a comprehensive review. *Journal of Polymer Research*, 2025, vol. 32, no. 12, p. 443.

Информация об авторах

Старцев Валерий Олегович, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Нечаев Александр Андреевич, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Valery O. Startsev, Head of Laboratory, Doctor of Science (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksandr A. Nechaev, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 10.07.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.07.2026.
The article was submitted 10.07.2026; approved and accepted for publication after reviewing 15.07.2026.