

Лобанов, Д.С. Оценка влияния термовлажностного старения в агрессивных средах на изменение механического поведения стеклопластика при изгибе короткой балки стеклопластика на основе регистрации сигналов акустической эмиссии / Д.С. Лобанов, Е.М. Лунегова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 4. – С. 42–53. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.05

Lobanov D.S., Lunegova E.M. Evaluation of the thermal and moisture aging influence in aggressive environments on the change in the of the mechanical behavior of fiberglass by a short beam bending tests based on acoustic emission technique. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2022, no. 4, pp. 42-53. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.05



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2022

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.05

УДК 539.3

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОГО СТАРЕНИЯ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ НА ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКА ПРИ ИЗГИБЕ КОРОТКОЙ БАЛКИ СТЕКЛОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Д.С. Лобанов, Е.М. Лунегова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 01 ноября 2022 г.
Одобрена: 08 декабря 2022 г.
Принята к публикации:
12 декабря 2022 г.

Ключевые слова:

экспериментальная механика, термовлажностное старение, агрессивные среды, стеклопластик, акустическая эмиссия, несущая способность, остаточная прочность, межслоевой сдвиг.

АННОТАЦИЯ

Работа направлена на экспериментальное исследование и описание закономерностей механического поведения и деградации прочностных свойств волокнистого полимерного композиционного материала при термовлажностном старении в агрессивных (эксплуатационных) средах разной продолжительности и температурах. Объектом исследования являлся стеклотекстолит общего и электротехнического назначения СТЭФ. СТЭФ – это слоистый армированный стеклопластик, полученный путем горячего прессования стеклоткани, пропитанной термореактивным связующим на основе комбинированных эпоксидных и фенолформальдегидных смол.

После предварительного старения при различных температурно-временных режимах образцы стеклопластика испытывались при нормальной температуре на межслоевой сдвиг. Для изучения инициирования и распространения данных дефектных структур в процессе деформирования стеклопластика после предварительного старения при различных температурно-временных режимах и средах в работе применяется метод акустической эмиссии, позволяющий исследовать стадийность неупругого деформирования и отследить процессы, связанные с формированием дефектов в структуре волокнистого композита.

Получены и проанализированы данные о влиянии различных сред, таких как техническая вода, морская вода и машинное масло, при различной продолжительности (15, 30, 45 суток) и температуре (22°, 60° и 90 °С) на процессы разрушения композита и реализацию различных механизмов накопления повреждений при квазистатических испытаниях на межслоевой сдвиг. В работе приводятся результаты испытаний, полученные системой регистрации сигналов акустической эмиссии. Приведены и описаны данные, иллюстрирующие стадийность накопления повреждений и проанализированы основные механизмы повреждения структуры композита при нагружении. Описаны результаты исследования микроструктуры образцов, полученные с помощью стереомикроскопа до и после термовлажностного старения в агрессивных средах.

© ПНИПУ

© Лобанов Дмитрий Сергеевич – к.т.н., с.н.с., e-mail: cem.lobanov@gmail.com, ID: 0000-0003-1948-436X.

Лунегова Екатерина Михайловна – к.т.н., н.с., e-mail: cem.zubova@mail.ru, ID: 0000-0001-8829-3546.

Dmitry S. Lobanov – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: cem.lobanov@gmail.com, ID: 0000-0003-1948-436X.

Ekaterina M. Lunegova – CSc in Technical Sciences, Research, e-mail: cem.zubova@mail.ru, ID: 0000-0001-8829-3546.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

EVALUATION OF THE THERMAL AND MOISTURE AGING INFLUENCE IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS ON THE CHANGE IN THE OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF FIBERGLASS BY A SHORT BEAM BENDING TESTS BASED ON ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE

D.S. Lobanov, E.M. Lunegova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 01 November 2022
Approved: 08 December 2022
Accepted for publication:
12 December 2022

Keywords:

experimental mechanics, thermal aging, aggressive environments, fiberglass, acoustic emission, residual strength, interlayer shear test.

ABSTRACT

The work is aimed at experimental research and description of the mechanical behavior and degradation of the fibrous structural composite material strength properties during thermal and moisture aging in aggressive (operational) environments of different duration and temperatures. The object of the study was STEF structural fiberglass. STEF is a laminated fiberglass reinforced plastic obtained by hot pressing of glass fabric impregnated with a thermosetting binder based on combined epoxy and phenol-formaldehyde resins.

After preliminary aging under various temperature-time conditions, fiberglass samples were tested at normal temperature for interlayer shear. To study the defect initiation and propagation during the deformation of fiberglass after preliminary aging under various temperature-time conditions and environments, the acoustic emission method is used in this work, which makes it possible to study the deformation stage structure and track the processes associated with the formation of defects in the structure of the fibrous composite.

Influence of various media, such as industrial water, sea water and machine oil, at different durations (15, 30, 45 days) and temperatures (22°, 60° и 90 °C) on the processes of composite destruction and the implementation of various mechanisms damage accumulation during quasi-static interlaminar shear tests were obtained and analyzed. The paper presents the test results obtained by the acoustic emission signals processing. The data illustrating the stages of damage accumulation are presented and described, and the main mechanisms of damage to the composite structure under loading are analyzed. The results of a study of the microstructure of samples obtained using a stereomicroscope before and after thermal and moisture aging in aggressive media are described.

© PNRPU

Введение

При внедрении композиционных материалов особое значение приобретают вопросы анализа условий разрушения и живучести изделий.

Актуальной задачей является исследование и анализ влияния повышенных и пониженных (эксплуатационных) температур на механические свойства и механизмы разрушения армирующих и композиционных материалов, а также установления температурных зависимостей упругих и прочностных свойств волокнистых композитов, применяемых в ответственных конструкциях. Экспериментальные данные о влиянии эксплуатационных и климатических температур на механические свойства разных классов полимерных композитных материалов представлены в [1; 2].

Для прогнозирования ресурса работоспособности конструкций из полимерных композитов актуальным направлением исследований становится изучение вопросов, связанных со старением полимерных композиционных материалов. Старение полимерных композитов является повсеместной проблемой, которая приводит к ухудшению механических свойств, сокращению проектного срока службы конструкции и потенциальному преждевременному аварийному разрушению. Проблема старения полимерных композитов

в воздушной среде исследована в работах [3–5]. Большинство конструкций из полимерных композитов во время эксплуатации подвержены воздействию атмосферных факторов (температура, влажность, солнечная радиация, циклическое изменение температуры, тропический и морской климат и т.д), которые оказывают влияние на их физические, химические и механические свойства.

Важной задачей является изучение вопросов термовлажностного старения полимерных композитов, так как при повышении температуры можно ускорить процессы старения. Исследования тенденций изменения физических и механических свойств полимерных композитов на основе стекло-, угле- и базальтового волокна и эпоксидных, акриловых и полиамидных термопластических связующих при термовлажностном старении в различных средах (дистиллированная вода, морская вода, машинное масло, щелочные растворы и т.д.) отражены в работах авторов [6–19]. В работах основное внимание уделяется исследованию деградации микроструктуры, диффузии жидкой среды.

Разрушение волокнистых композиционных материалов является многостадийным процессом, связанным и с формированием дефектных структур, таких как растрескиванием матрицы, расслоение и разрыв волокон. Для изучения инициирования и распростра-

нения данных дефектных структур в процессе деформирования стеклопластиков, предварительно составленных в различных средах, применяются в том числе и дополнительные методы диагностики материалов. Для получения дополнительной информации о влиянии агрессивных сред на механизмы структурного разрушения в стеклопластике в работе применяется методика совместного использования испытательных систем и системы регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ). Метод акустической эмиссии основан на регистрации упругих волн, возникающих при деформировании и внутренней локальной перестановке в структуре материала [20]. Анализ собранных опытных данных позволяет исследовать процессы, связанные с инициацией дефектов, их распространением в структуре материала под действием нагрузки в режиме реального времени [21–23]. Авторы в своих работах обращают внимание на целесообразность использования данного метода с целью экспериментального исследования процессов деформирования в стеклопластиках. Чаще всего в качестве информативного параметра используется частота спектрального максимума (характеристика быстрого преобразования Фурье) [24–28]. Большое внимание уделяется вопросам установления связи с механизмами структурного разрушения в композиционных материалах по параметрам сигналов акустической эмиссии. При подобного рода исследованиях наблюдается определенная зависимость: высокие значения частот сопоставляют с разрывами волокон, низкие – с разрушением матрицы, а средние – с образованием расслоений и нарушением адгезии между структурными элементами композита [29–32]. Авторами также была экспериментально доказана связь частоты и амплитуды сигналов с основными механизмами накопления повреждений в волокнистых композитах [33; 34]. В ряде работ представлены данные об использовании метода акустической эмиссии при исследовании температурного старения и старения в агрессивных средах волокнистых композиционных материалов [35–38].

Целью работы является получение и анализ новых опытных данных, иллюстрирующих влияние предварительного термовлажностного воздействия агрессивных сред на несущую способность и остаточную прочность стеклопластика в условиях квазистатического деформирования и исследование процессов накопления повреждений и разрушения на основе комплексного анализа механических характеристик и параметров сигнала акустической эмиссии.

1. Материалы, оборудование и методика испытаний

В качестве материала исследования был использован стеклотекстолит СТЭФ электротехнического назначения. СТЭФ – это слоистый армированный стеклопластик, полученный путем горячего прессо-

вания стеклоткани, пропитанной термореактивным связующим на основе комбинированных эпоксидных и фенолформальдегидных смол. Процедура подготовки образцов и предварительного термовлажностного старения выполнялась в следующем порядке. Вырезанные образцы делились на группы, маркировались, взвешивались и закладывались в ванны с подготовленными жидкими средами: морская вода (коэффициент солености 30 %), техническая вода и машинное масло (синтетическое масло для автомобильных двигателей).

В качестве технической воды использовалась водопроводная вода со следующими показателями: мутность (по каолину) – менее 0,3 мг/дм³; цветность – 1,2 ± 0,4 град.; водородный показатель – 7,8 ± 0,2 ед. рН; Жесткость общая – 4,5 ± 0,7 мг-экв/дм³; сухой остаток 176 ± 33 мг/дм³; железо (Fe, суммарно) – менее 0,1 мг/дм³.

В качестве машинного масла было использовано синтетическое масло со следующими физико-химическими свойствами: класс вязкости – 5W-30; плотность при 20 °С – 0,848 г/см³; вязкость при 40 °С и 100 °С – 72,3 и 11,7 мм²/с соответственно; вязкость НТНС при 150 °С – 3,5 мПа.с; индекс вязкости – 157; сульфатная зольность – 0,6 мас. %; щелочное число – 7,2 мг КОН/г.

Часть контейнеров оставалось при лабораторных условиях другая часть помещалась в температурные камеры с постоянной температурой 60° и 90 °С на 45 суток. В процессе экспонирования осуществлялся ежедневный визуальный контроль испарения, в случае необходимости производился долив среды, предварительно разогретой до требуемой температуры. Образцы извлекались через 15, 30 и 45 дней экспонирования, вытирались хлопчатобумажной салфеткой и оставлялись на сутки на открытом воздухе в лабораторных условиях, после чего повторно взвешивались. Перед испытаниями производилась фиксация микроструктуры поверхности образцов после старения в ненагруженном состоянии. Далее проводились испытания образцов стеклопластика на межслоевой сдвиг (метод короткой балки) с последующим исследованием микроструктуры и анализом механизмов разрушения. Механические испытания на межслоевой сдвиг проводились на базе ЦКП «Центр экспериментальной механики» ПНИПУ». Механические испытания проводились в соответствии с рекомендациями ASTM D2344, в части выбора геометрии образцов, геометрии оснастки, скорости нагружения и проведения процедуры расчета прочности при межслоевом сдвиге и статистической обработке результатов испытаний. Испытания проводились на электромеханической испытательной системе Instron 5965. Скорость нагружения составляла 1 мм/мин. Размеры образцов были 24×8×4 мм. Расстояние между опорами составляло 20 мм. В результате испытаний определялась несущая способность (F^* , Н) образцов стеклопластика при изгибе короткой балки (табл. 1).

Таблица 1/Table 1

Режимы температурного старения и количество образцов
Temperature aging modes and number of samples

Режим старения	Среда											
	без среды	машинное масло			морская вода			техническая вода				
Время выдержки, сут	–	15			30			45				
Температура выдержки, °С	–	22	60	90	22	60	90	22	60	90		
	5 образцов	По 3 образца на каждую точку										



Рис. 1. Образец стеклопластика СТЭФ в оснастке для испытаний на межслоевой сдвиг с прикрепленным датчиком АЭ

Fig. 1. STEF fiberglass sample in interlaminar shear test and AE sensor

Анализ микроструктуры поверхности образцов на всех этапах исследования проводился при помощи стереомикроскопа Carl Zeiss Discovery V12. Для регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) использовалась система Valen AMSY-6, широкополосные пьезоэлектрические преобразователи с частотным диапазоном 300–800 кГц и предусилитель (коэффициент усиления 34 дБ). Частота дискретизации данных 10 МГц, пороговое значение при регистрации сигналов АЭ составляло 40 дБ. Фотография проведения эксперименталь-

ного исследования и образец в захватах испытательной системы с прикрепленным датчиком АЭ представлены на рис. 1.

2. Результаты механических испытаний

Результаты механических испытаний образцов СТЭФ после предварительного термовлажностного старения при разных режимах и средах представлены в виде гистограмм на рис. 2. Проведена оценка адсорбции образцов после предварительного термовлажностного старения в агрессивных средах. Результаты изменения массы образцов приведены в табл. 2 в условных единицах.

Оценка адсорбции материала является важной составляющей для подведения результатов термовлажностного старения. Данная характеристика оказывает существенное влияние на остаточные механические свойства многих материалов, что отмечается в публикациях отечественных и зарубежных авторов [5; 14]. Поглощение влаги одними материалами приводило к гидролизации связи волокно/матрица и вследствие снижения остаточных механических свойств, при этом у других ПКМ отмечали высокий уровень сохранения изначальных характеристик.

Наблюдается незначительное изменение массы, в среднем – менее 1 %. Стоит отметить группы образцов, показавшие неопределенные результаты. Первая группа проходила термовлажностное старение в течение 15 суток при температуре 60 °С в среде – техническая вода, один образец этой группы показал снижении массы на 3,66 % при этом остальные на 1,67 и 2,60 % увеличились по массе при сравнении с начальным результатом взвешивания. Вторая группа образцов после термовлажностного старения в течение 30 суток при температуре 60 °С в среде – техническая вода показала увеличение массы двух образцов на 2,51; 3,30 % в сравнении с первоначальным взвешиванием.

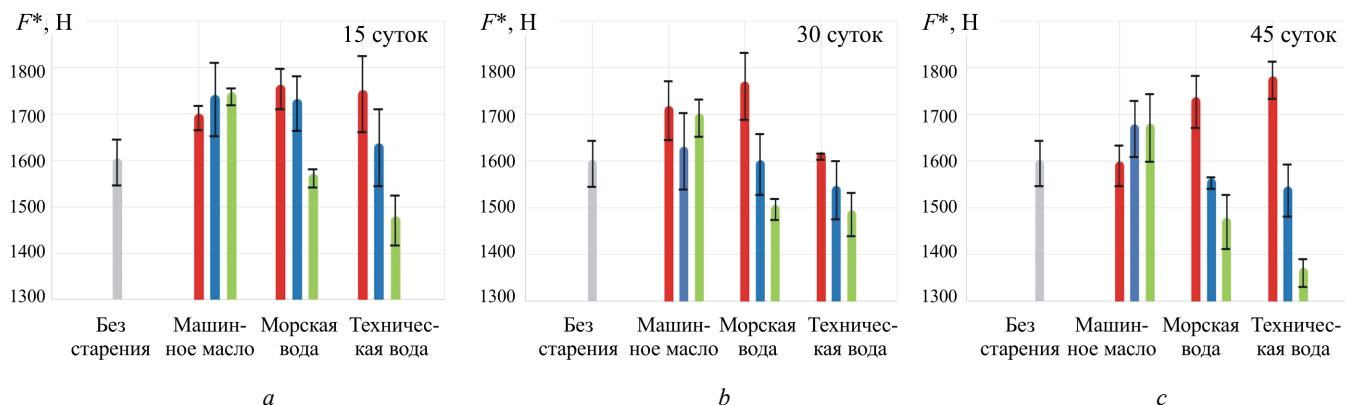


Рис. 2. Диаграммы разброса средних значений несущей способности при изгибе короткой балки образцов стеклопластика после термовлажностного старения при 22 °С (красный столбик), 60 °С (синий столбик) и 90 °С (зеленый столбик) в течении 15 суток (а), 30 суток (b) и 45 суток (c) относительно среднего значения для контрольных образцов (серый столбик)

Fig. 2. Scatter diagrams of strength average values at max load of fiberglass samples after thermal and moisture aging at 22 °C (red column), 60 °C (blue column) and 90 °C (green column) for 15 days (a), 30 days (b) and 45 days (c) relative to the mean value for control samples (gray bar)

Таблица 2/Table 2

Влияние жидких сред, их температуры и времени выдержки на привес

Influence of solutions, their temperature and exposure time on weight gain

Среда	Температура режима, °С	Изменение массы, %		
		15 суток	30 суток	45 суток
Машинное масло	22	0,10	0,02	–
	60	0,06	–0,09	–0,10
	90	–0,14	–0,15	0,15
Морская вода	22	0,18	0,33	–
	60	0,67	0,79	1,02
	90	0,81	0,77	0,92
Техническая вода	22	0,19	0,18	–
	60	1,67	0,60	0,66
	90	0,65	0,34	1,06

Были проведены исследования микроструктуры поверхности изломов образцов стеклопластиков после термовлажностного старения при помощи стереомикроскопа Carl Zeiss SteREO Discovery V12 (рис. 3). Результаты исследования микроструктуры позволили зафиксировать режимы предварительного термовлажностного воздействия, при которых происходит возникновение поверхностных дефектов в образцах стеклотекстолита в не нагруженном состоянии.

На рис. 3 приведены фотографии микроструктуры поверхности образцов стеклопластика после испытания на межслоевой сдвиг для исходного (без старения) образца и после термовлажностного старения при всех режимах старения в машинном масле, морской воде и технической воде. Для всех испытанных образцов без старения и после старения в среде машинное масло первичное разрушение начинается на растягиваемой поверхности с последующим межслойным расслоением нижних и средних слоев. Межслоевые трещины имеют локальный характер в центре образца под нагружающим штифтом. Для образцов после старения в морской воде и технической воде наблюдается отличный характер разрушения. Образцы разрушаются хрупко, происходит совместное разрушение от растяжения и межслоевого сдвига. Между средними слоями возникают обширные магистральные трещины, выходящие с торцов образца. В месте приложения нагрузки от штифта происходит смятие материала с последующим локальным расслоением.

Также стоит отметить, что на поверхности образцов при всех исследуемых температурах для агрессивных сред морская вода и техническая вода наблюдалось отложение извести и соли. Чем более продолжительный и высокотемпературный был режим термовлажностного старения, тем отмечались более интенсивные отложения на поверхности образцов (рис. 4).

Статистическая оценка значимости полученных результатов изменения значений межслоевой прочности (см. рис. 2) и изменение массы образцов (см. табл. 2) представлено в работе [39], по результатам которой следует, что статистически значимыми результатами

увеличения массы образцов являются для старения в технической воде 0,2 % и в морской воде – 0,17 %. Этот эффект объясняется в том числе отложением соли и извести на поверхности образцов.

Результаты анализа сигналов АЭ

При проведении механических испытаниях на межслоевой сдвиг по методу короткой балки были испытаны образцы как неподверженные предварительному температурному старению, так и состаренные в агрессивных средах (машинное масло, морская вода, техническая вода) при различных температурах и продолжительности старения. В качестве информативных параметров для анализа процессов неупругого деформирования использовалась кумулятивная энергия сигналов АЭ, отражающая степень накопления дефектов в структуре материала, и частота спектрального максимума сигналов, позволяющая проанализировать основные механизмы повреждения структуры композита при нагружении.

На рис. 5 представлены функции распределения значений частот спектрального максимума (ЧСМ, кГц) сигналов АЭ за все время нагружения. Анализируя график (см. рис. 5), можно отметить, что все значения частот максимума спектра группируются в 3 диапазона. Основываясь на научных работах, можно сделать вывод о наличии следующих повреждений в структуре композита: растрескивание матрицы (примерно 25–110 кГц), расслоения и нарушение адгезии (примерно 260–310 кГц), разрушение волокон (примерно 710–740 кГц). Рассматривая данные распределения, можно определить механизмы повреждений, которые внесли существенный вклад в разрушение образца.

При анализе функции распределения значений частот на образцах стеклопластика, не подвергшихся температурному старению, можно отметить, что количество сигналов в низком и среднем диапазонах частот приблизительно одинаково (см. рис. 5). Это может говорить о том, что основные механизмы структурного разрушения в данном случае – это повреждение матрицы, нарушение адгезии и расслоение.

Далее представляется интересным изучить, как температурное старение в различных агрессивных средах будет влиять на функцию распределения частот спектрального максимума (рис. 6).

Например, при старении в машинном масле в течение 15 суток и 60 °С, 15 суток и 90 °С, 30 суток и 22 °С наблюдается, что большинство сигналов зарегистрированы в высоком диапазоне частот, который предположительно связан с разрушением волокон. При анализе распределений значений частот на образцах стеклопластика, состаренных в машинном масле в течение 30 суток при комнатной температуре, можно отметить, что сигналы в среднем диапазоне частот (нарушение адгезии и расслоение) практически не зарегистрированы. Наименьшие отклонения распределений для состаренных в машинном масле образцов в сравнении с несостаренными образцами наблюдается для случаев: 30 суток и 60 °С, 30 суток и 90 °С, 45 суток и 90 °С.

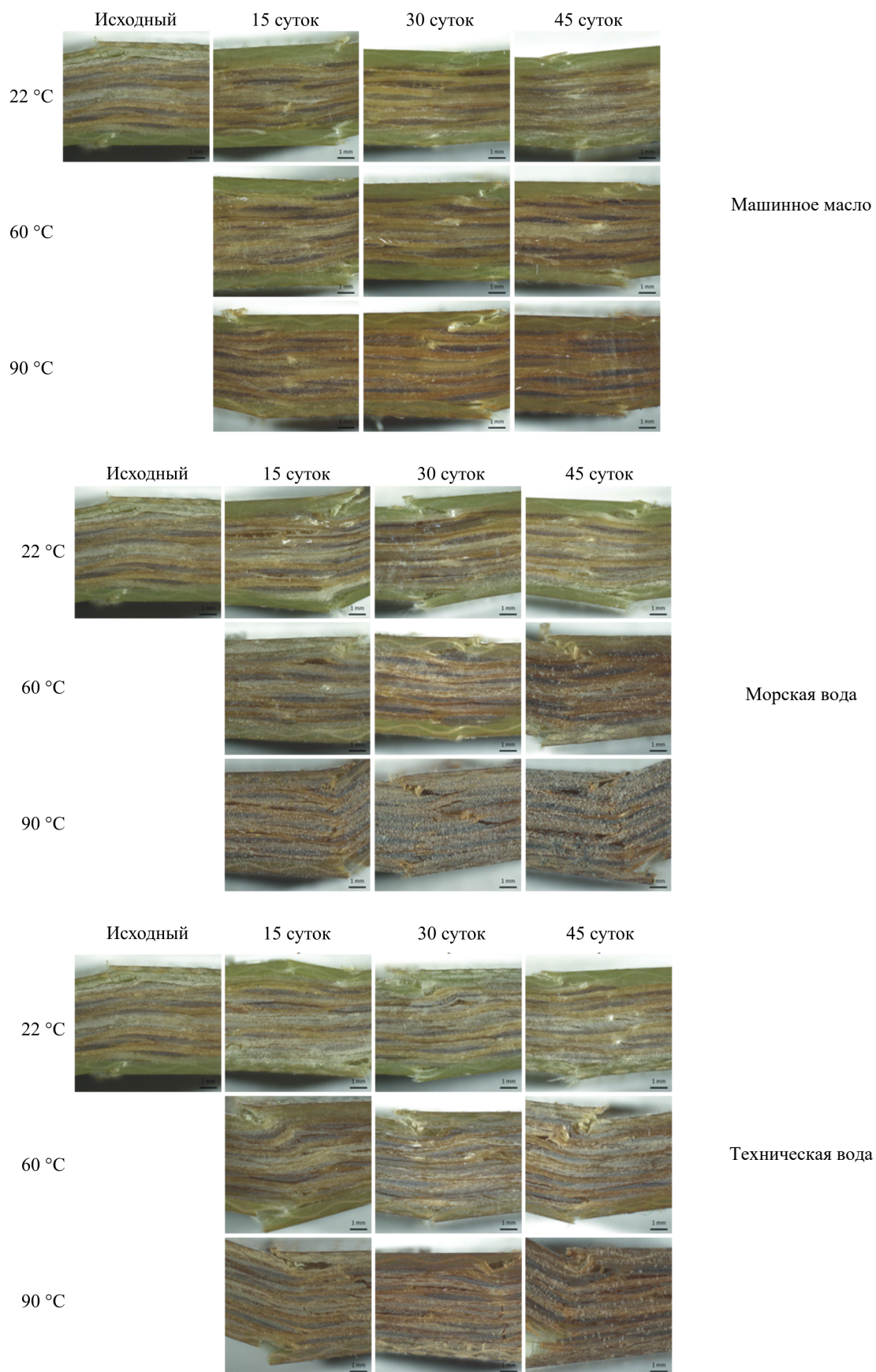


Рис. 3. Микроструктура поверхности изломов образцов стеклопластика СТЭФ после термовлажностного старения

Fig. 3. The fracture surface microstructure of STEF specimens after thermal moisture aging

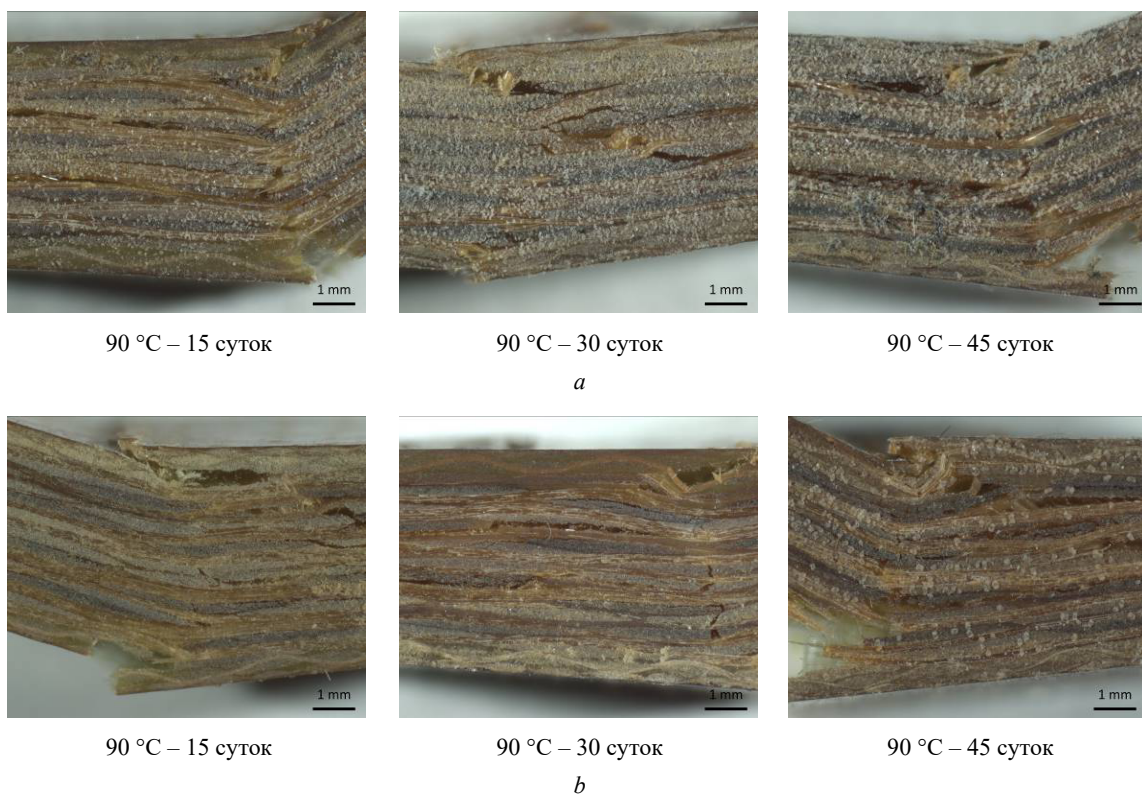


Рис. 4. Микроструктура поверхности изломов образцов стеклопластика СТЭФ после предварительного старения при 90 °С в морской воде (а) и технической воде (б) разной продолжительности

Fig. 4. The fracture surface microstructure of the STEF after preliminary aging at 90 °C in sea water (a) and technical water (b) at different duration

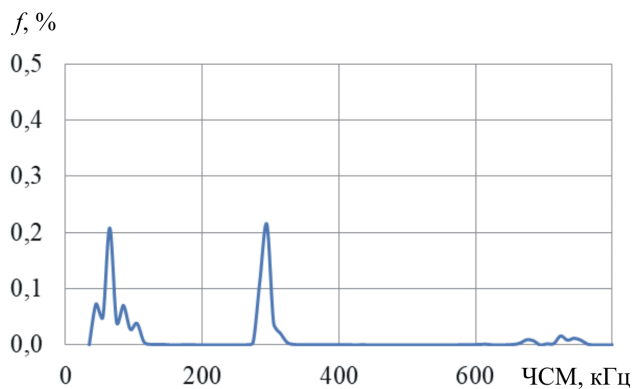


Рис. 5. Функция распределения частот спектрального максимума для образца стеклопластика, не подвергнутого температурному старению и старению в агрессивных средах

Fig. 5. Frequency distribution function for a fiberglass sample not subjected to temperature aging and aging in aggressive environments

При анализе частотных распределений, полученных на образцах стеклопластика, выдержанных в морской воде при разной температуре и продолжительности, можно отметить, что при режиме старения 15 суток и 60 °С наибольшая доля зарегистрированных сигналов находится в диапазоне частот 710–740 кГц, связанном с разрушением волокон. При режиме 30 суток и 22 °С, 60 °С и 90 °С, 45 суток и 60 °С также наблюдается уве-

личение доли сигналов от общего количества в высоком диапазоне частот. Для всех образцов, состаренных при температуре 60 °С, отмечено снижение доли сигналов в самом низком диапазоне частот, предположительно связанном с растрескиванием матрицы, и увеличение доли сигналов в высоком диапазоне частот (разрывы волокон) по сравнению с несостаренным образцом. Наибольшая доля сигналов в низком диапазоне частот зафиксирована для образца при режиме старения 45 суток и 90 °С.

При анализе частотных распределений, полученных на образцах стеклопластика, выдержанных в технической воде при разной температуре и продолжительности, можно отметить, что увеличение доли сигналов в диапазоне частот 710–740 кГц зафиксировано для всех образцов при длительности старения 45 суток и всех образцов, выдержанных при температуре 90 °С. Изменение доли зарегистрированных сигналов приводится в сравнении с данными, полученными на образцах, не подвергшихся влиянию агрессивных сред и температур.

Построены и проанализированы графики распределения кумулятивной энергии (КЭ) сигналов АЭ от времени нагружения для всех образцов рассматриваемого стеклопластика, выдержанных в различных средах. Отмечается, что для образцов, состаренных как в морской воде, так и в технической и в машинном масле, характерно, что кривая кумулятивной энергии для образцов, не

подвергшихся термовлажностному старению, расположена выше остальных. Ниже этой кривой располагаются кривые для всех образцов, состаренных при температуре 22 °С при разной продолжительностью выдержки в таких средах, как морская вода и техническая вода. Для образцов, состаренных в морской воде, кривые кумулятивной энергии, группируются в зависимости от температуры воздействия. Для образцов, выдержанных в разных средах в течение 15 суток при комнатной температуре, можно отметить, что график зависимости кумулятивной энергии от времени визуально схож с графиком, полученным при анализе данных на несостаренных образцах, и имеет вид, иллюстрирующий стадийность накопления повреждений (за счет изменения угла наклона кривой). Также стадийность наблюдается на графиках для образцов, состаренных в машинном масле при разной продол-

жительности и температуре, и образцов, состаренных в морской воде при комнатной температуре.

Таким образом, основываясь на анализе параметров акустической эмиссии, можно сделать вывод, что каждый из режимов термовлажностного старения повлиял на процессы деформирования стеклопластика. При выдержке в машинном масле в течение 15 суток при различных температурах появились сигналы акустической эмиссии, связанные с разрывами волокон, при этом на графике кумулятивной энергии наблюдается, что кривые, построенные по данным, полученным на этих образцах, расположены выше, чем кривые, полученные по данным на образцах, состаренных в морской и технической воде. В водных же средах наибольшие значения кумулятивной энергии наблюдались при старении с различной продолжительностью при комнатной температуре.

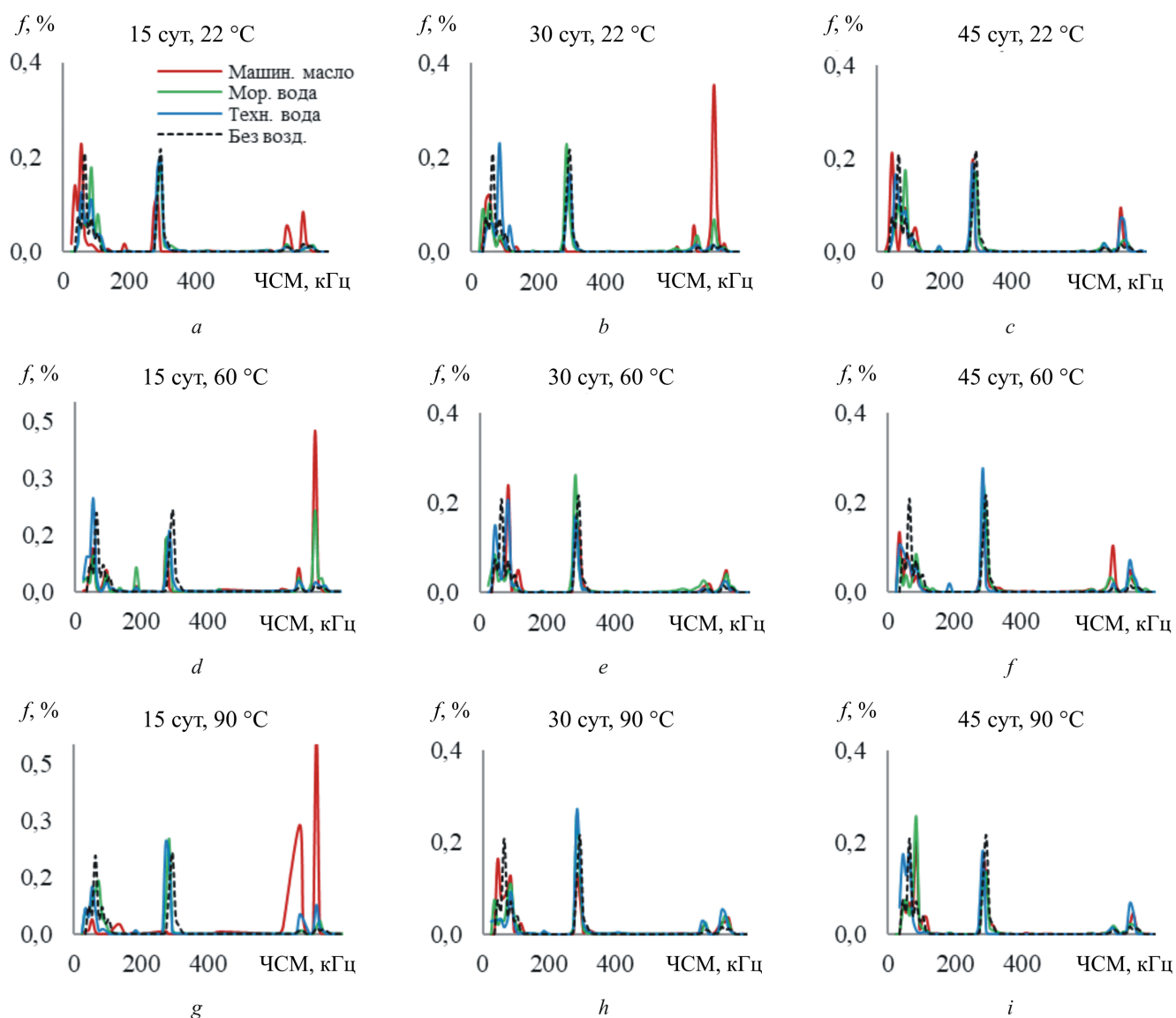


Рис. 6. Функции распределения частот спектрального максимума для образца стеклопластика после старения в агрессивных средах с разной продолжительностью и температурой

Fig. 6. Frequency distribution functions for a fiberglass sample after aging in aggressive environments at different duration and temperature

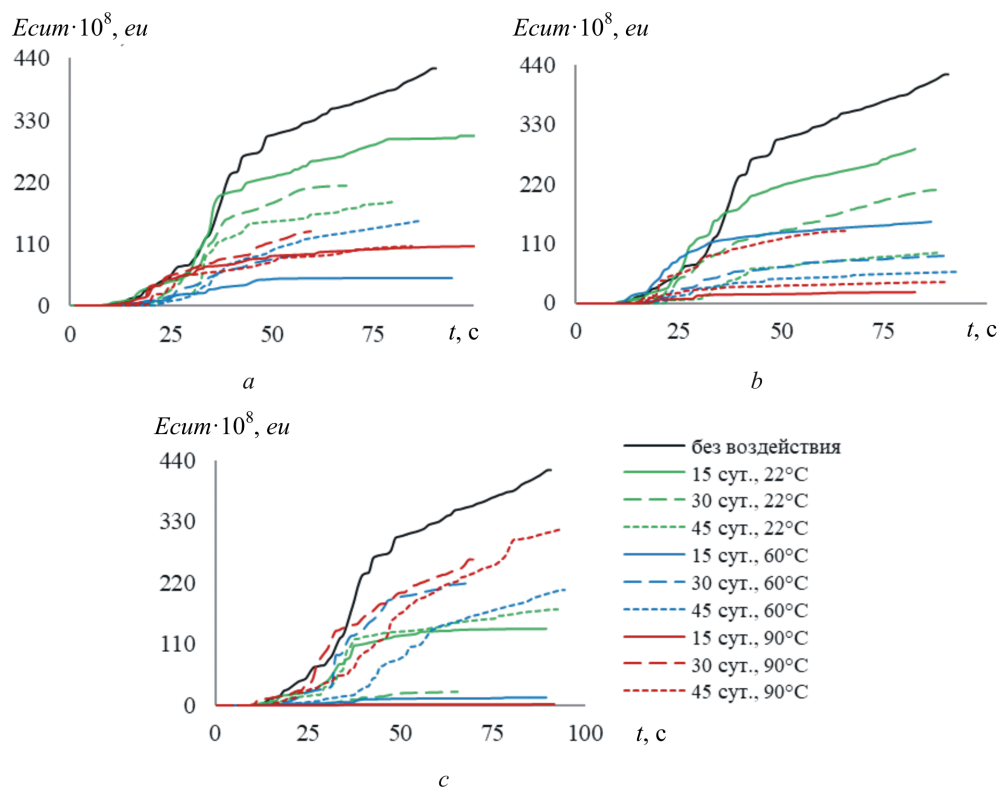


Рис. 7. Графики распределения кумулятивной энергии сигналов АЭ для образца стеклопластика, не подвергнутого температурному старению и воздействию агрессивных сред и для образцов, состаренных в морской воде (а), технической воде (b) и машинном масле (c)

Fig. 7. Graphs of AE cumulative energy distribution for a fiberglass sample not subjected to temperature aging and exposure to aggressive environment and for samples aged in sea water (a), technical water (b) and engine oil (c)

Заключение

Проведены экспериментальные исследования влияния предварительного термовлажностного старения разной интенсивности (температуры, продолжительности) на изменение механических свойств и реализацию различных механизмов разрушения образцов стеклопластика при испытаниях на межслоевой сдвиг совместно с системой регистрации сигналов акустической эмиссии. В результате получены новые экспериментальные данные о закономерностях деформирования и разрушения образцов стеклопластика при межслоевом сдвиге и предварительном термовлажностном старении в машинном масле, морской воде и технической воде при разных температурных (22°, 60° и 90 °С) и временных (15, 30, 45 суток) режимах.

Установлено, что зависимости изменения значений несущей способности образцов короткой балки имеют немонотонный характер. Среда «машинное масло» при

исследуемых режимах (температура / продолжительность) старения не оказывает значимого влияния на сорбцию, и изменение значений несущей способности. Однако по анализу сигналов акустической эмиссии некоторые из температурно-временных режимов при старении в масле повлияли на смену механизмов разрушения в сравнении с образцами стеклопластика без старения. Стоит отметить, что наблюдается существенное увеличение доли сигналов в высоком диапазоне частот для состаренных в машинном масле образцов, по сравнению с образцами, состаренными в водных средах.

Среды «морская вода» и «техническая вода» оказывают влияние на немонотонное изменение значений несущей способности образцов в зависимости от температурно-временного режима старения. Также после старения в этих средах происходит смена механизмов разрушения образцов стеклопластика относительно группы образцов без старения.

Библиографический список

1. Lobanov D.S., Slovikov S.V. Mechanical behavior of a unidirectional basalt-fiber-reinforced plastic under thermomechanical loadings // Mech. Compos. Mater. – 2018 – Vol. 54, no. 3. – P. 351–358.
2. Lobanov D.S., Babushkin A.V., Luzenin A.Yu. Effect of increased temperatures on the deformation and strength charac-

teristics of a GFRP based on a fabric of volumetric weave // Mech. Compos. Mater. – 2018. – Vol. 54, no. 5. – P. 655–664.

3. Lobanov D.S., Lunegova E.M., Mugatarov A.I. Influence of preliminary thermal aging on the residual interlayer strength and staging of damage accumulation in structural carbon plastic // PNRPU Mech. Bull. – 2021. – No. 1. – P. 41–51.

4. Lobanov D.S., Zubova E.M. Research of temperature aging effects on mechanical behaviour and properties of composite material by tensile tests with used system of registration acoustic emission signal // *Procedia Struct. Integr.* – 2019. – Vol. 18. – P. 347–352.
5. Kablov E.N., Startsev V.O. The Influence of Internal Stresses on the Aging of Polymer Composite Materials: Review // *Mech. Compos. Mater.* – 2021. – Vol. 57, no. 5. – P. 565–579.
6. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе часть 4. Натурные климатические испытания полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы / Е.В. Николаев, С.Л. Барботько, Н.П. Андреева, М.Р. Павлов, Д.В. Гращенков // *Труды ВИАМ.* – 2016. – № 6 (42). – С. 93–108.
7. de Souza L.R., Marques A.T., d'Almeida J.R.M. Effects of aging on water and lubricating oil on the creep behavior of a GFRP matrix composite // *Compos. Struct.* – 2017. – Vol. 168. – P. 285–291.
8. Park S.Y., Choi W.J., Choi H.S. The effects of void contents on the long-term hygrothermal behaviors of glass/epoxy and GLARE laminates // *Compos. Struct.* – 2010. – Vol. 92, № 1. – P. 18–24.
9. Исследование свойств наномодифицированных углекомполитов до и после термовлажностного старения / В.А. Большаков, С.В. Кондрашов, Ю.И. Меркулова, Т.П. Дьячкова, Г.Ю. Юрков, А.В. Ильичев // *Авиационные материалы и технологии.* – 2015. – № 2 (35). – С. 61–66.
10. Изменение физико-механических и термомеханических свойств базальтопластика в результате климатического старения / А.Н. Блазнов, А.С. Кротов, В.Б. Маркин [и др.] // *Южно-Сибирский научный вестник.* – 2019. – № 3 (27). – С. 116–120.
11. Malmstein M., Chambers A.R., Blake J.I.R. Hygrothermal ageing of plant oil based marine composites // *Compos. Struct.* – 2013. – Vol. 101. – P. 138–143.
12. Effect of hygrothermal aging on the damage characteristics of carbon woven fabric/epoxy laminates subjected to simulated lightning strike / Y. Li, R. Li, L. Huang, K. Wang, X. Huang // *Mater. Des.* – 2016. – Vol. 99. – P. 477–489.
13. Evaluation of tensile strength retention and service life prediction of hydrothermal aged balanced orthotropic carbon/glass and Kevlar/glass fabric reinforced polymer hybrid composites / M. Muralidharan, T.P. Sathishkumar, N. Rajini, P. Navaneethakrishnan, S. Arun Kumar, S.O. Ismail, K. Senthilkumar, S. Siengchin // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2022. – Vol. 139 (6). – 51602.
14. Experimental research into the effect of external actions and polluting environments on the serviceability of fiber-reinforced polymer composite materials / D.S. Lobanov, V.E. Vildeman, A.D. Babin, M.A. Grinev // *Mech. Compos. Mater.* – 2015. – Vol. 51, no. 1. – P. 97–108.
15. Characterization of sea water ageing effects on mechanical properties of carbon/epoxy composites for tidal turbine blades / N. Tual, N. Carrere, P. Davies, T. Bonnemains, E. Lolive // *Compos. Part A Appl. Sci.* – 2015. – Vol. 78. – P. 380–389.
16. Davies P., Le Gac P.-Y., Le Gall M. Influence of Sea Water Aging on the Mechanical Behaviour of Acrylic Matrix Composites I // *Appl. Compos. Mater.* – 2017. – Vol. 24. – P. 97–111.
17. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги // *Труды ВИАМ.* – 2014. – № 7. – С. 9.
18. Развитие методов климатических испытаний материалов для машиностроения и строительства в ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова / С.В. Панин, В.О. Старцев, М.Г. Курс, Е.А. Варченко // *Все материалы. Энциклопедический справочник.* – 2016. – № 10. – С. 50–61.
19. Старцев О.В., Лебедев М.П., Блазнов А.Н. Старение полимерных композиционных материалов в нагруженном состоянии // *Все материалы. Энциклопедический справочник.* – 2020. – № 10. – С. 7–18.
20. Неразрушающий контроль: справочник: 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т 7: в 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии; Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова [и др.] // *Вибродиагностика.* – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
21. Степанова Л.Н., Чернова В.В., Кабанов С.И. Анализ модового состава сигналов акустической эмиссии при одновременном тепловом и статическом нагружении образцов из углепластика Т800 // *Контроль. Диагностика.* – 2018. – № 11. – С. 4–13.
22. On the use of acoustic emission to identify the dominant stress/strain component in carbon/epoxy composite materials / K.-A. Kalteremidou, D.G. Aggelis, D. Van Hemelrijck, L. Pyl // *Mech. Res. Commun.* – 2021. – Vol. 111. – P. 103663.
23. Investigation of the Staging of Damage Accumulation in Polymer Composite Materials during Bending and Tensile Tests / A.A. Bryansky, O.V. Bashkov, D.P. Malysheva, D.B. Solovlev // *Key Eng. Mater.* – 2021. – Vol. 887. – P. 116–122.
24. Damage mechanisms assessment of Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) composites using multivariable analysis methods applied to acoustic emission data / W. Harizi, S. Chaki, G. Bourse, M. Ourak // *Compos. Struct.* – 2022. – Vol. 289. – P. 115470.
25. Damage process in glass fiber reinforced polymer specimens using acoustic emission technique with low frequency acquisition / L. Friedrich, A. Colpo, A. Maggi, T. Becker, G. Lacidogna, I. Iturrioz // *Composite Structures.* – 2021. – Vol. 256. – P. 113105.
26. Arumugam V., Saravanakumar K., Santulli C. Damage characterization of stiffened glass-epoxy laminates under tensile loading with acoustic emission monitoring // *Compos. B. Eng.* – 2018. – Vol. 147. – P. 22–32.
27. Feature selection and clustering of damage for pseudo-ductile unidirectional carbon/glass hybrid composite using acoustic emission / A. Ichenihi, W. Li, Y. Gao, Y. Rao, A. Ichenihi // *Appl. Acoust.* – 2021. – Vol. 182. – P. 108184.
28. Zhao W., Pei N., Xu Ch. Experimental study of carbon/glass fiber-reinforced hybrid laminate composites with torsional loads by using acoustic emission and Micro-CT // *Compos. Struct.* – 2022. – Vol. 290. – P. 115541.
29. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Vimalathithan P.K. Damage characterization in composite materials using acoustic emission signal-based and parameter-based data // *Compos. B. Eng.* – 2019. – Vol. 178. – P. 107469.
30. Beheshtizadeh N., Mostafapour A., Davoodi S. Three point bending test of glass/epoxy composite health monitoring by acoustic emission // *Alex. Eng. J.* – 2019. – Vol. 58, is. 2. – P. 567–578.
31. Experimental and numerical investigation on fracture behavior of glass/carbon fiber hybrid composites using acoustic emission method and refined zigzag theory / I.E. Tabrizi, A. Kefal, J.S.M. Zanjani, C. Akalin, M. Yildiz // *Compos. Struct.* – 2019. – Vol. 223. – P. 110971.
32. Groot P.J., Wijnen A.M., Janssen R.B. Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture

mechanisms in carbon/epoxy composites // *Compos. Sci. Technol.* – 1995. – Vol. 55, no. 4. – P. 405–412.

33. Tretyakov M.P., Tretyakova T.V., Zubova E.M. Experimental study of the crack growth processes in composite samples // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2216. – P. 040020.

34. Брянский А.А., Башков О.В. Идентификация структурных повреждений в стеклопластике, подвергнутом термоокислительному старению // *Новые материалы и технологии в условиях Арктики: сб. тез.* – 2022. – С. 112–114.

35. Evaluation of thermally-aged carbon fiber/epoxy composites using acoustic emission, electrical resistance and thermogram / P. Shin, J. Kim, H. Park, Y. Baek, D. Kwon, K.L. DeVries, J. Park // *Comp. Struct.* – 2018. – Vol. 196. – P. 21–29.

36. Godin N., Huguet S., Gaertner R. Influence of hydrolytic ageing on the acoustic emission signatures of damage mechanisms

occurring during tensile tests on a polyester composite: Application of a Kohonen's map // *Composite Structures*. – 2006. – Vol. 72, is. 1. – P. 79–85.

37. Mouzakis D.E., Dimogianopoulos D.G. Acoustic emission detection of damage induced by simulated environmental conditioning in carbon fiber reinforced composites // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2019. – Vol. 210. – P. 422–428.

38. Акустическая эмиссия в вершине трещины при охлаждении влагонасыщенного композита / О.В. Старцев, В.В. Поляков, Д.С. Салита, М.П. Лебедев // *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах*. – 2020. – Т. 492–493. – С. 157–161.

39. Lobanov D.S., Yankin A.S., Berdnikova N.I. Statistical evaluation of the effect of hygrothermal aging on the interlaminar shear of GFRP // *Frat. ed Integrita Strutt.* – 2022. – Vol. 16 (60). – P. 146–157.

References

1. Lobanov D.S., Slovikov S.V. Mechanical behavior of a unidirectional basalt-fiber-reinforced plastic under thermomechanical loadings. *Mech. Compos. Mater.*, 2018, Vol. 54, No. 3, pp. 351-358.

2. Lobanov D.S., Babushkin A.V., Luzenin A.Yu. Effect of increased temperatures on the deformation and strength characteristics of a GFRP based on a fabric of volumetric weave. *Mech. Compos. Mater.*, 2018, Vol. 54., No. 5, pp. 655-664.

3. Lobanov D.S., Lunegova E.M., Mugatarov A.I. Influence of preliminary thermal aging on the residual interlayer strength and staging of damage accumulation in structural carbon plastic. *PNRPU Mech. Bull.*, 2021, No. 1, pp. 41-51.

4. Lobanov D.S., Zubova E.M. Research of temperature aging effects on mechanical behaviour and properties of composite material by tensile tests with used system of registration acoustic emission signal. *Procedia Struct. Integr.*, 2019, Vol. 18, pp. 347-352.

5. Kablov, E.N., Startsev, V.O. The Influence of Internal Stresses on the Aging of Polymer Composite Materials: Review. *Mech. Compos. Mater.*, 2021, Vol. 57, No. 5, pp. 565-579.

6. Nikolaev E.V., Barbot'ko S.L., Andreeva N.P., Pavlov M.R., Grashhenkov D.V. Kompleksnoe issledovanie vozdeystviya klimaticheskikh i jekspluatacionnykh faktorov na novoe pokolenie jepoksidnogo svjazujushhego i polimernyh kompozicionnykh materialov na ego osnove. Part 4. Naturnye klimaticheskie ispytaniya polimernyh kompozicionnykh materialov na osnove jepoksidnoj matricy. *Trudy VIAM*, 2016, № 6 (42), pp. 93-108.

7. de Souza L.R., Marques A.T., d'Almeida J.R.M. Effects of aging on water and lubricating oil on the creep behavior of a GFRP matrix composite. *Compos. Struct.*, 2017, Vol. 168., pp. 285-291.

8. Park S.Y., Choi W.J., Choi H.S. The effects of void contents on the long-term hygrothermal behaviors of glass/epoxy and GLARE laminates. *Compos. Struct.*, 2010, Vol. 92, № 1, pp. 18-24.

9. Bolshakov V.A., Kondrashov S.V., Merkulova Ju. I., Dyachkova T.P., Jurkov G. Ju., Ilichev A.V. Issledovanie svojstv nanomodificirovannykh uglekompozitov do i posle termovlazhnostnogo starenija. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, № 2 (35), pp. 61-66.

10. A.N. Blaznov, A.S. Krotov, V.B. Markin [et al.] Izmenenie fiziko-mehaničeskikh i termomehaničeskikh svojstv bazal'toplastika v rezul'tate klimaticheskogo starenija. *Juzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik - South-Siberian Scientific Bulletin*. 2019, № 3 (27), pp. 116-120.

11. Malmstein M., Chambers A.R., Blake J.I.R. Hygrothermal ageing of plant oil based marine composites. *Compos. Struct.*, 2013, Vol. 101, pp. 138-143.

12. Li Y., Li R., Huang L., Wang K., Huang X. Effect of hygrothermal aging on the damage characteristics of carbon woven fabric/epoxy laminates subjected to simulated lightning strike. *Mater. Des.*, 2016, Vol. 99, pp. 477-489.

13. Muralidharan M., Sathishkumar T.P., Rajini N., Nava-neethakrishnan P., Arun Kumar S., Ismail S.O., Senthilkumar K., Siengchin S. Evaluation of tensile strength retention and service life prediction of hydrothermal aged balanced orthotropic carbon/glass and Kevlar/glass fabric reinforced polymer hybrid composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2022, Vol. 139 (6), 51602.

14. Lobanov D.S., Vildeman V.E., Babin A.D., and Grinev M.A. Experimental research into the effect of external actions and polluting environments on the serviceability of fiber-reinforced polymer composite materials. *Mech. Compos. Mater.*, 2015, Vol. 51, No. 1, pp. 97–108.

15. Tual N., Carrere N., Davies P., Bonnemains T., Lolive E. Characterization of sea water ageing effects on mechanical properties of carbon/epoxy composites for tidal turbine blades. *Compos. Part A Appl. Sci.*, 2015, Vol. 78, pp. 380-389.

16. Davies P., Le Gac P.-Y., Le Gall M. Influence of Sea Water Aging on the Mechanical Behaviour of Acrylic Matrix Composites I. *Appl. Compos. Mater.*, 2017, Vol. 24, pp. 97-111.

17. Panin S.V., Starcev O.V., Krotov A.S. Diagnostika nachal'noj stadii klimaticheskogo starenija PKM po izmeneniju koeficienta diffuzii vlagi. *Trudy VIAM*, 2014, Vol. 7, p. 9.

18. Panin S.V., Starcev V.O., Kurs M.G., Varchenko E.A. Razvitie metodov klimaticheskikh ispytanij materialov dlja mashinostroenija i stroitel'stva v GCKI VIAM Im. G.V. Aki-mova. Vse materialy. Jenciklopedičeskij spravočnik, 2016, Vol. 10, p. 50-61.

19. Starcev O.V., Lebedev M.P., Blaznov A.N. Starenie polimernyh kompozicionnykh materialov v nagružennom sostojanii. Vse materialy. Jenciklopedičeskij spravočnik, 2020, Vol. 10, p. 7-18.

20. Nerazrushajushhij kontrol': spravočnik: 8 t./ pod obshh. red. V.V. Kljueva. T 7: v 2 kn. Kn. 1: V.I. Ivanov, I.Je. Vlasov. Metod akustičeskoj jemissii; Kn. 2: F.Ja. Balickij, A.V. Barkov, N.A. Barkova [et al.] Vibrodiagnostika. – M.: Mashinostroenie, 2005. – 829 p.

21. Stepanova L.N., Chernova V.V., Kabanov S.I. Analiz modovogo sostava signalov akustičeskoj jemissii pri odnovre-

menom teplovom i staticeskom nagruženii obrazcov iz ugleplastika T800. *Kontrol'. Diagnostika.*, 2018, № 11, pp. 4-13.

22. Kalteremidou K.-A. Aggelis D.G., Van Hemelrijck D., Pyl L. On the use of acoustic emission to identify the dominant stress/strain component in carbon/epoxy composite materials. *Mech. Res. Commun.*, 2021, Vol. 111, 103663.

23. Bryansky A.A., Bashkov O.V., Malysheva D.P., Solovev D.B. Investigation of the Staging of Damage Accumulation in Polymer Composite Materials during Bending and Tensile Tests. *Key Eng. Mater.*, 2021, Vol. 887, pp. 116-122.

24. Harizi W., Chaki S., Bourse G., Ourak M. Damage mechanisms assessment of Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) composites using multivariable analysis methods applied to acoustic emission data. *Compos. Struct.*, 2022, Vol. 289, 115470.

25. Friedrich L., Colpo A., Maggi A., Becker T., Lacidogna G., Iturrioz I. Damage process in glass fiber reinforced polymer specimens using acoustic emission technique with low frequency acquisition. *Composite Structures.*, 2021, Vol. 256, 113105.

26. Arumugam V., Saravanakumar K., Santulli C. Damage characterization of stiffened glass-epoxy laminates under tensile loading with acoustic emission monitoring. *Compos. B. Eng.*, 2018, Vol. 147, pp. 22-32.

27. Ichenihi A., Li W., Gao Y., Rao Y., Ichenihi A. Feature selection and clustering of damage for pseudo-ductile unidirectional carbon/glass hybrid composite using acoustic emission. *Appl. Acoust.*, 2021, Vol. 182, 108184.

28. Zhao W., Pei N., Xu Ch. Experimental study of carbon/glass fiber-reinforced hybrid laminate composites with torsional loads by using acoustic emission and Micro-CT. *Compos. Struct.*, 2022, Vol. 290, 115541.

29. Barile C., Casavola C., Pappaletta G., Vimalathithan P.K. Damage characterization in composite materials using acoustic emission signal-based and parameter-based data. *Compos. B. Eng.*, 2019, Vol. 178, 107469.

30. Beheshtizadeh N., Mostafapour A., Davoodi S. Three point bending test of glass/epoxy composite health monitoring by acoustic emission. *Alex. Eng. J.*, 2019, Vol. 58, Is. 2, pp. 567-578.

31. Tabrizi I.E., Kefal A., Zanjani J.S.M., Akalin C., Yildiz M. Experimental and numerical investigation on fracture behavior of glass/carbon fiber hybrid composites using acoustic emission method and refined zigzag theory. *Compos. Struct.*, 2019, Vol. 223, 110971.

32. Groot P.J., Wijnen A.M., Janssen R.B. Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites. *Compos. Sci. Technol.*, 1995, Vol. 55, No. 4, pp. 405-412.

33. Tretyakov M.P., Tretyakova T.V., Zubova E.M. Experimental study of the crack growth processes in composite samples. *AIP Conference Proceedings*, 2020, Vol. 2216, 040020.

34. Brjanskij A.A., Bashkov O.V. Identifikacija strukturnyh povrezhdenij v stekloplastike, podvergnutom termookislitel'nomu stareniju. *Novye materialy i tehnologii v usloviyah Arktiki: sb. tez.*, 2022, pp. 112-114.

35. Shin P., Kim J., Park H., Baek Y., Kwon D., DeVries K.L., Park J. Evaluation of thermally-aged carbon fiber/epoxy composites using acoustic emission, electrical resistance and thermogram. *Comp. Struct.*, 2018, Vol. 196, pp. 21-29.

36. Godin N., Huguet S., Gaertner R. Influence of hydrolytic ageing on the acoustic emission signatures of damage mechanisms occurring during tensile tests on a polyester composite: Application of a Kohonen's map. *Composite Structures.*, 2006, Vol. 72, Is. 1, pp. 79-85.

37. Mouzakis D.E., Dimogianopoulos D.G. Acoustic emission detection of damage induced by simulated environmental conditioning in carbon fiber reinforced composites // *Engineering Fracture Mechanics.* – 2019. – Vol. 210. – pp. 422-428.

38. Starcev O.V., Poljakov V.V., Salita D.S., Lebedev M.P. Akusticheskaja jemissija v vershine treshhiny pri ohlazhdenii vlagonasyshhennogo kompozita. *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Himija, nauki o materialah*, 2020, Tom 492–493, pp. 157–161.

39. Lobanov D.S., Yankin A.S., Berdnikova N.I. Statistical evaluation of the effect of hygrothermal aging on the interlaminar shear of GFRP. *Frat. ed Integrita Strutt.*, 2022, Vol. 16 (60), pp. 146–157.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-41-590005 р_а. Экспериментальные исследования в рамках описания механического поведения конструкционно-неоднородных материалов проводились в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSNM-2020-0027).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Financing. The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of research Project No. 19-41-590005 r_a. The Experimental studies in the framework of the description of the mechanical behavior of structurally inhomogeneous materials were conducted within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ FSNM-2020-0027).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.