

Лобанов Д.С., Лунегова Е.М., Мугатаров А.И. Влияние предварительного температурного старения на остаточную межслоевую прочность и стадийность накопления повреждений в конструкционном углепластике // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. – № 1. С. 41–51. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.1.05

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 Mechanics Bulletin*, 2021, no. 1, pp. 41-51. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.1.05



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2021

PNRPU MECHANICS BULLETIN

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



DOI: 10.15593/perm.mech/2021.1.05

УДК 539.3

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАРЕНИЯ НА ОСТАТОЧНУЮ МЕЖСЛОЕВУЮ ПРОЧНОСТЬ И СТАДИЙНОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОНСТРУКЦИОННОМ УГЛЕПЛАСТИКЕ

Д.С. Лобанов, Е.М. Лунегова, А.И. Мугатаров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 27 августа 2020 г.
Принята: 01 марта 2021 г.
Опубликована: 15 апреля 2021 г.

Ключевые слова:

межслоевой сдвиг, испытания короткой балки, температурные зависимости, акустическая эмиссия, температурное старение, углепластик.

АННОТАЦИЯ

Старение композитов является повсеместной проблемой, которая приводит к ухудшению механических свойств, сокращению проектного срока службы конструкции и потенциальному преждевременному аварийному разрушению. Работа посвящена экспериментальному исследованию влияния предварительного температурного старения на остаточные механические свойства образцов конструкционного углепластика. Для этого была применена методика совместного использования испытательных систем и системы для регистрации и анализа сигналов акустической эмиссии. Проведены серии квазистатических испытаний образцов углепластика на межслоевой сдвиг по методу короткой балки до и после предварительных температурных воздействий при различных режимах. Испытания проводились на универсальных электромеханических системах Instron 5882 и Instron 5965 в соответствии с рекомендациями ASTM D2344. В процессе нагружения образцов производилась непрерывная регистрация сигналов акустической эмиссии при помощи системы AMSY-6. Применялся пьезоэлектрический преобразователь с частотным диапазоном 300–800 кГц. При проведении испытаний была осуществлена синхронизация испытательной и диагностической системы.

В ходе работы были определены значения прочности при межслоевом сдвиге для образцов слоистого углепластика. Проиллюстрированы характерные виды разрушения образцов. При анализе изменения механических свойств углепластика от повышения температуры установлены критические значения температур, при которых происходит резкий спад прочностных и упругих характеристик материалов, обусловленный активной деструкцией связующего. Построены и проанализированы графики зависимости энергетического параметра и частотных характеристик сигналов акустической эмиссии от времени. Проведена оценка процессов накопления повреждений в композитах, показана смена механизмов накопления повреждений. Полученные результаты иллюстрируют влияние повышенных температур и продолжительности их воздействия на механическое поведение образцов конструкционного углепластика при статических испытаниях на межслоевой сдвиг.

© ПНИПУ

© Лобанов Дмитрий Сергеевич – к.т.н., с.н.с., e-mail: cem.lobanov@gmail.com, ID: [0000-0003-1948-436X](https://orcid.org/0000-0003-1948-436X).

Лунегова Екатерина Михайловна – м.н.с., e-mail: cem.zubova@mail.ru, ID: [0000-0001-8829-3546](https://orcid.org/0000-0001-8829-3546).

Мугатаров Артур Ильдарович – лаб., e-mail: cem_mugatarov@mail.ru, ID: [0000-0002-2229-8181](https://orcid.org/0000-0002-2229-8181).

Dmitry S. Lobanov – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: cem.lobanov@gmail.com,

ID: [0000-0003-1948-436X](https://orcid.org/0000-0003-1948-436X).

Ekaterina M. Lunegova – Junior Researcher, e-mail: cem.zubova@mail.ru, ID: [0000-0001-8829-3546](https://orcid.org/0000-0001-8829-3546).

Artur I. Mugatarov – Assistant, e-mail: cem_mugatarov@mail.ru, ID: [0000-0002-2229-8181](https://orcid.org/0000-0002-2229-8181).



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)



INFLUENCE OF PRELIMINARY THERMAL AGING ON THE RESIDUAL INTERLAYER STRENGTH AND STAGING OF DAMAGE ACCUMULATION IN STRUCTURAL CARBON PLASTIC

D.S. Lobanov, E.M. Lunegova, A.I. Mugatarov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 27 August 2020
Accepted: 01 March 2021
Published: 15 April 2021

Keywords:

CFRP, short beam shear test, temperature aging, acoustic emission.

ABSTRACT

Aging of composites is a pervasive problem that leads to mechanical properties degradation, reduced design life of a structure and premature accidental failure. The work is devoted to an experimental study of the preliminary temperature aging effect on the residual mechanical properties of structural CFRP. The joint use of test systems and systems for registration and analysis of acoustic emission signals was applied. The Short Beam Shear Test of CFRP specimens were carried out using the short beam method. The tests were carried out on universal electromechanical systems Instron 5882 and Instron 5965 in accordance with the recommendations of ASTM D2344. In the process of loading the samples were continuously recorded by using the acoustic emission signals system AMSY-6. A piezoelectric sensor with a frequency range of 300-800 kHz was used. The test and diagnostic systems were synchronized during the tests.

In the course of the work the values of the interlayer shear strength were determined for the samples of CFRP. Typical types of the sample destruction are illustrated. When analyzing the change in the mechanical properties of the carbon fiber reinforced plastic from a temperature increase the critical values of temperatures were established in which a sharp decline in the strength and elastic characteristics of materials occurs due to an active destruction of the binder. The graphs of the energy parameter dependence and frequency characteristics of acoustic emission signals on time have been constructed and analyzed. The estimate of the processes of damage accumulation in composites is carried out. The change of the damage accumulation mechanisms was illustrated. The obtained results illustrate the effect of elevated temperatures and the duration of their impact on the mechanical behavior of structural CFRP specimens during the static tests for the interlayer shear.

© PNRPU

Введение

В настоящее время углеродные композиционные материалы широко применяются для изготовления элементов ответственных конструкций авиационного и гражданского назначения, в том числе элементов, подверженных влиянию высоких температур. Данный факт приводит к необходимости изучения влияния повышенных эксплуатационных температур на механические свойства углепластиков. При этом необходимо уделять внимание процессам инициации и накопления повреждений, связанных с неоднородной структурой данного класса полимерных волокнистых материалов.

Для прогнозирования ресурса работоспособности конструкций из полимерных композитов важным направлением исследования является изучение вопросов, связанных с термовлажностным старением данных материалов. Старение композитов является повсеместной проблемой, которая приводит к ухудшению механических свойств, сокращению проектного срока службы конструкции и потенциальному преждевременному аварийному разрушению. На решение проблемы старения полимерных композитов в водной среде в настоящее время направлены исследовательские усилия по всему миру [1–6]. Большинство конструкций из полимерных композитов во время эксплуатации подвержены воздействию атмосферных факторов (температура, влаж-

ность, солнечная радиация, циклическое изменение температуры, тропический и морской климат и т.д.), которые оказывают влияние на их физические, химические и механические свойства [7–11]. Актуальными задачами становятся оценка и анализ деградации механических свойств полимерных композитов после предварительного термовлажностного старения и температурного старения.

В работе для изучения влияния температурного старения на механические свойства и процессы накопления повреждений в углепластике 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. Волны регистрируются на поверхности образца при помощи пьезоэлектрических преобразователей, после чего подвергаются фильтрации и усилению для извлечения полезной информации. Анализ собранных опытных данных позволяет исследовать процессы, связанные с инициацией дефектов, их расширением и распространением в структуре материала под действием нагрузки в режиме реального времени [12–14].

Анализ результатов экспериментального исследования процессов накопления повреждений в углерод-

ных композиционных материалах с использованием метода АЭ представлен в современных научных публикациях [15–29]. Авторы в своих работах обращают внимание на целесообразность использования данного метода с целью экспериментального исследования процессов деформирования в углепластике. В качестве информативных параметров часто используются такие, как пиковые значения амплитуд, длительность сигнала, энергетический параметр, частота спектрального максимума (характеристика быстрого преобразования Фурье) и др. [30–32]. При анализе теоретических и экспериментальных работ было отмечено, что авторами определены диапазоны значений частот спектрального максимума для описания основных механизмов накопления повреждений в углепластике (растрескивание матрицы, нарушение адгезии между волокном и матрицей, разрушение волокна) [33–35]. Данные из некоторых работ представлены в табл. 1. Следует отметить, что диапазоны значений для идентификации режима повреждения могут отличаться и зависят от типа выбранного датчика, вида испытания и т.д. Но, тем не менее, наблюдается зависимость в том, что более низкие значения частотных диапазонов соответствуют растрескиванию матрицы, высокие значения характеризуют разрушение волокна, а промежуточные связаны с нарушением адгезии между волокном и матрицей и расслоением.

Таблица 1

Диапазоны значений параметров АЭ, соответствующие основным механизмам накопления повреждений в углепластике

Table 1

Ranges of values of AE parameters which match basic damage accumulation mechanisms in CFRP

Научные источники	Диапазоны частот для механизмов повреждений, кГц		
	Растрескивание матрицы	Нарушение адгезии между волокном и матрицей, расслоение	Разрушение волокна
Xu J. [33]	25–75	100–200	250–450
de Groot P.J. [34]	50–180	200–300	>300
Jong H.-J. [35]	200–600	100–500	>1500

1. Материалы, оборудование и методика испытаний

Экспериментальные исследования осуществлялись на базе современного оборудования Центра экспериментальной механики ПНИПУ. Проведены серии механических испытаний на межслоевой сдвиг по ASTM D2344 образцов углепластика на основе ткани (сатин 5/1) из углеволокна AKSA F49 12K и эпоксидного связующего T26 со схемой укладки слоев [0/90]₁₀ при нормальной и повышенных (120, 160 и 200 °С) температурах и после предварительного температурного старения при режимах, представленных в табл. 2. Механические

испытания проводились на универсальных электромеханических системах Instron 5882 (100 кН) и Instron 5965 (5кН) при скорости передвижения подвижного захвата 1 мм/мин. Для нарезки образцов из плит использовался плоттер Zund GL-2500. Для проведения испытаний отбирались образцы без видимых дефектов поверхности. Условия кондиционирования были следующими: с момента выхода плит с режима и до нарезки образцов заготовки (плиты) хранились герметично упакованными в полиэтилен в лабораторных условиях не менее трех месяцев при средней температуре 24 °С и влажности 50 % (по данным журнала контроля микроклимата лаборатории). После нарезки и перед началом экспонирования (старения) в термокамере группы образцов с температурным режимом 120 °С хранились в лабораторных условиях не менее недели, группы образцов с температурным режимом 200 °С – не менее 4 недель. После температурного старения и до механических испытаний на межслоевой сдвиг при нормальной температуре образцы хранились в лабораторных условиях не менее недели.

Таблица 2

Режимы температурного старения образцов углепластика

Table 2

Modes of temperature aging for CFRP specimens

Температура выдержки, °С	Количество суток	Количество образцов
Без температурной выдержки	–	5
120	5	5
	15	5
160	5	5
	15	5
200	5	5
	15	5

Образцы были вырезаны в форме коротких балок с общими размерами 24×4×8 мм. Расстояние между опорами было 20 мм, радиусы скругления опор и нагружающего индентора составляли 2,5 мм и 5 мм соответственно.

Регистрация сигналов АЭ осуществлялась с помощью многоканальной системы AMSY-6 фирмы Vallen GmbH (Германия) от начала испытания до полного разрушения образца. Использовались широкополосный пьезоэлектрический датчик M31 (частотный диапазон 300–800 кГц) и усилитель (коэффициент усиления 34 дБ). Датчик крепился на образцы с помощью клея, как показано на рис. 1. Частота дискретизации данных составляла 10 МГц, пороговое значение при регистрации сигналов АЭ – 40 дБ. Для записи приложенной нагрузки осуществлялась синхронизация AMSY-6 и испытательной системы при помощи блока синхронизации.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов углепластика на межслоевой сдвиг при нормальной и повышенных температурах

Table 3

Results of tests of CFRP samples for interlayer shear at normal and elevated temperatures

№	Максимальная нагрузка, Н	Предел прочности при сдвиге, МПа	Средний предел прочности при сдвиге, МПа	Температура, °С
1	1458,6	32,2	33,7 ± 2,5	22
2	1498,7	34,2		
3	1704,8	37,9		
4	1405,9	32,2		
5	1394,0	32,0		
1	1302,7	29,8	29,3 ± 1,1	120
2	1312,8	30,1		
3	1237,6	28,1		
1	1154,9	26,6	27,0 ± 1,2	160
2	1136,1	26,1		
3	1280,9	28,2		
1	581,6	13,2	15,4 ± 2,0	200
2	722,0	16,5		
3	731,0	16,6		

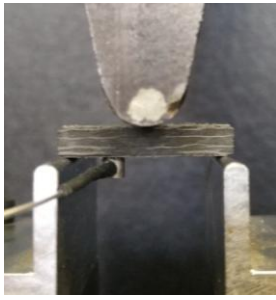


Рис. 1. Фото образца в захватах испытательной системы с прикрепленным датчиком АЭ

Fig. 1. Photo of the sample in the grips of the test system with an attached AE sensor

2. Результаты механических испытаний

Результаты испытаний на межслоевой сдвиг при нормальных и повышенных температурах приведены в табл. 3 и на рис. 2. Определены значения прочности при межслоевом сдвиге для образцов слоистого углепластика. Характерные виды разрушения образцов углепластика приведены на рис. 3. При всех температурах испытания образцы углепластика разрушались по механизмам «одиночный сдвиг» и «множественный сдвиг».

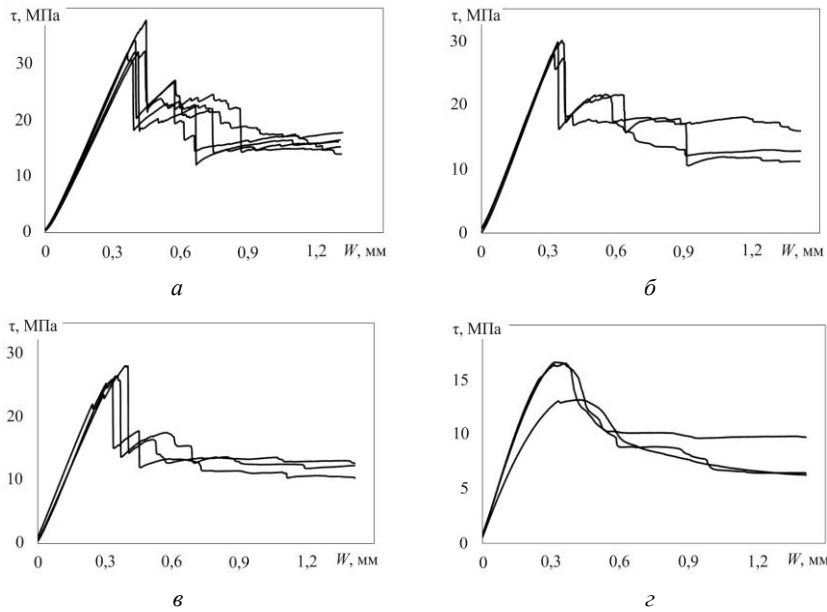


Рис. 2. Диаграммы нагружения образцов углепластика при испытаниях на межслоевой сдвиг (метод короткой балки) в условиях нормальной и повышенных температур: а – 22 °С; б – 120 °С; в – 160 °С; г – 200 °С

Fig. 2. Loading diagrams of CFRP specimens during interlayer shear tests (short beam method) at normal and elevated temperatures: a – 22 °C; b – 120 °C; c – 160 °C; d – 200 °C

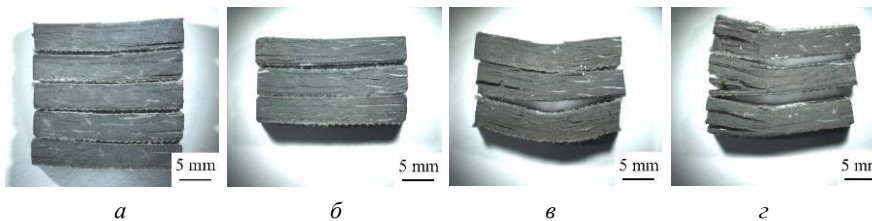


Рис. 3. Виды разрушений углепластика при нормальной и повышенных температурах: а – 22 °С; б – 120 °С; в – 160 °С; г – 200 °С

Fig. 3. Types of destruction of CFRP at normal and elevated temperatures: a – 22 °C; b – 120 °C; c – 160 °C; d – 200 °C

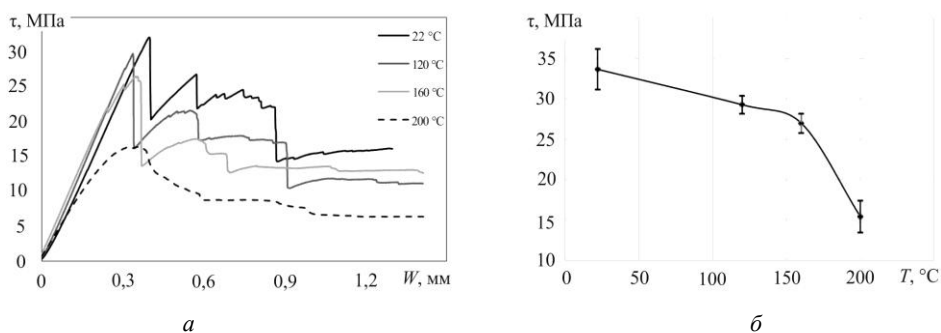


Рис. 4. Характерные диаграммы нагружения углепластика при межслоевом сдвиге в условиях нормальной и повышенных температур (120, 160, 200 °C) – а; график температурной зависимости предела прочности при межслоевом сдвиге образцов углепластика – б

Fig. 4. Typical diagrams of loading of CFRP during interlayer shear under conditions of normal and elevated temperatures (120, 160, 200 °C) – a; and the temperature dependence graph of the ultimate strength during the interlayer shear of CFRP specimens – b

На рис. 4 приведены характерные диаграммы нагружения при нормальной и повышенных температурах, полученные при испытаниях образцов углепластика на основе углеволокна AKSA F49 12K на межслоевой сдвиг (метод короткой балки).

При повышении температуры до 120 °C происходит снижение значений прочности при межслоевом сдвиге на 13 %, что попадает в статистический разброс, при температуре 160 °C снижение составляет 20 %, при температуре 200 °C происходит резкое снижение значений прочности при межслоевом сдвиге на 54 %. Таким образом, при анализе изменения механических свойств углепластика от повышения температуры установлены критические значения температур, при которых происходит резкий спад прочностных и упругих характеристик материалов, обусловленный активной деструкцией связующего.

На рис. 5 представлены типовые диаграммы нагружения до и после температурного старения при различных режимах при испытаниях на межслоевой сдвиг для образцов углепластика.

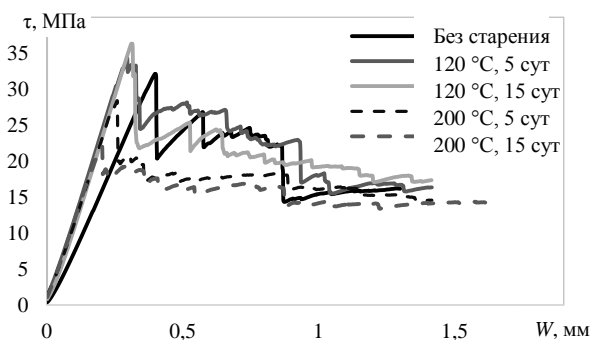


Рис. 5. Типовые диаграммы нагружения до и после температурного старения при различных режимах при испытаниях на межслоевой сдвиг для образцов углепластика AKSA F49 12K

Fig. 5. Typical loading diagrams before and after temperature aging under various conditions during Short Beam Shear Test for AKSA F49 12K specimens

Результаты исследования влияния предварительного температурного старения представлены на рис. 6. По полученным результатам отмечают немонотонные зависимости изменения остаточного предела прочности

при межслоевом сдвиге от выбранного режима предварительного воздействия.

Картины излома образцов, испытанных при квазистатических испытаниях на межслоевой сдвиг, после предварительного температурного воздействия при разных режимах и продолжительности показывают, при каких режимах происходит смена механизмов разрушения в связи с изменением свойств матрицы и возникновением локальных поверхностных дефектов (рис. 7, 8). Визуальный анализ проводился с помощью стереомикроскопа Carl Zeiss SteREO Discovery V12.



Рис. 6. Зависимости изменения остаточного предела прочности при межслоевом сдвиге от выбранного режима предварительного воздействия для образцов углепластика AKSA F49 12K

Fig. 6. Dependences of the change in the residual strength at the interlayer shear on the selected thermal aging mode for AKSA F49 12K specimens

Исследования микроструктуры после предварительного температурного воздействия образцов углепластика показали, что при режиме «120 °C – 5 сут» видимых дефектов на поверхности образцов не было обнаружено, цвет поверхности образцов не изменился. При «120 °C – 15 сут» цвет связующего приобрел желтый оттенок, дефектов на поверхности не обнаружено. При режимах «200 °C – 5 и 15 сут» поверхность образцов стала матовой, связующее стало ярко-желтого цвета, на боковых поверхностях отмечается появление трещин на границах «волокно – матрица» (желтая линия на рис. 8) и зон с образовавшимися дефектами связующего (красные области на рис. 8).

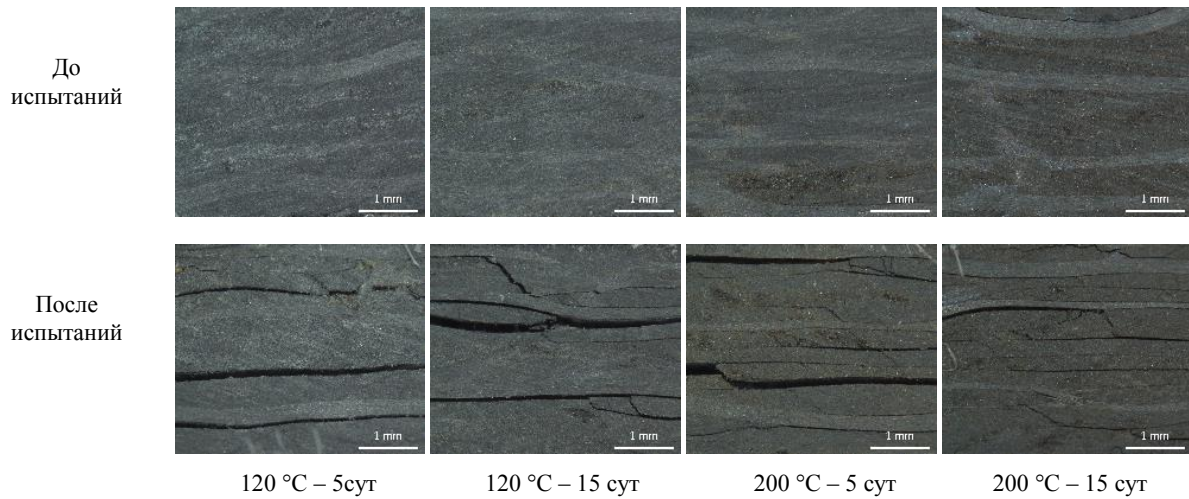


Рис. 7. Структура образцов углепластика на основе углеволокна AKSA F49 12K после предварительного температурного воздействия при разных режимах до и после испытаний

Fig. 7. Structure of CFRP specimens based on AKSA F49 12K carbon fiber after different temperature aging modes before and after testing

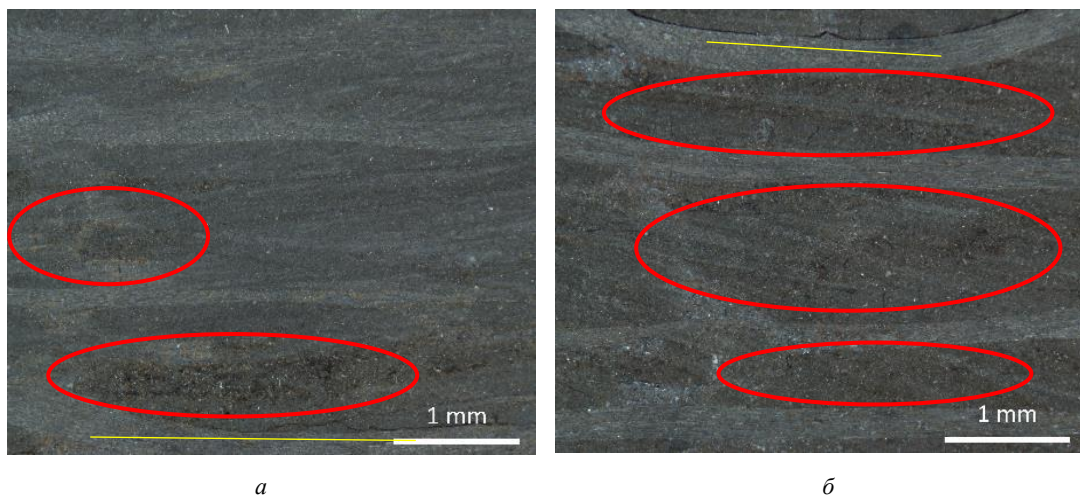


Рис. 8. Дефекты структуры образцов углепластиков после предварительного температурного старения: а – при 200 °C и 5 сут; б – при 200 °C и 15 сут до механических испытаний

Fig. 8. Defects in the structure of CFRP specimens after temperature aging: a – at 200 °C and 5 days; b – at 200 °C and 15 days before the mechanical tests

Появившиеся дефектные зоны представляют собой области поверхностного охрупчивания, высыпания матрицы и образования раковин и пустот. Следует отметить, что все испытанные образцы углепластика в соответствии с классификацией ASTM D 2344 разрушались по режиму «межслоевой сдвиг».

3. Результаты анализа сигналов АЭ

Испытания на межслоевой сдвиг образцов, не подверженных предварительному температурному старению и состаренных при режимах старения 120 °C (5 и 15 сут) и 200 °C (5 и 15 сут), проводились совместно с регистрацией сигналов АЭ. В качестве информативных параметров в работе используются энергетический параметр и частота спектрального максимума (характеристика быстрого преобразования Фурье). Вычисление энерге-

тического параметра сигналов АЭ осуществлялось с помощью специальной программной опции в единицах энергии e_u , $1e_u = 10^{-14} B^2c$.

В ходе анализа экспериментальных данных для образцов, не подвергшихся температурному старению, построены графики зависимости энергетического параметра сигналов от времени, совмещенные с графиком нагружения (рис. 9). Отмечается, что значение энергетического параметра скачкообразно увеличивается перед моментом, предшествующим первому спаду на диаграмме нагружения образца ($t \approx 26$ с). В дальнейшем, по мере нагружения образца, рост значений энергетического параметра соответствует моменту спада значений нагрузки на графике.

Построены и проанализированы графики зависимости значений частот спектрального максимума (ЧСМ, кГц) для всех образцов. Для примера данное распреде-

ление продемонстрировано на рис. 10. Как видно из данного рисунка, все зарегистрированные сигналы АЭ группируются в определенные диапазоны.

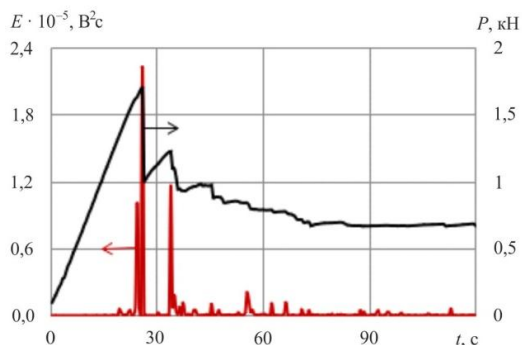


Рис. 9. Характерные диаграммы распределения энергетического параметра сигналов АЭ от времени, совмещенные с графиком нагружения для образцов слоистого углепластика на основе углеволокна AKSA F49 12K

Fig. 9. Typical diagrams of the AE energy parameter distribution versus time, combined with the loading graph for the CFRP samples based on AKSA F49 12K carbon fiber

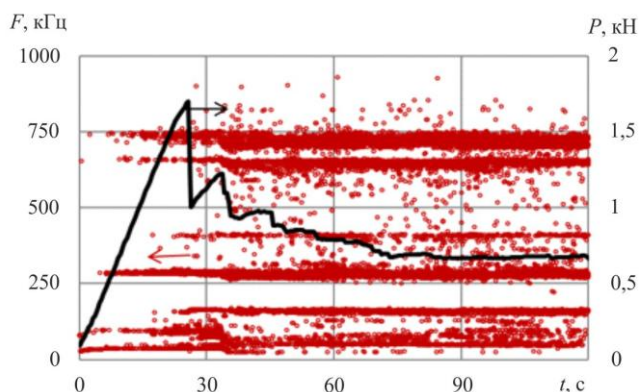


Рис. 10. Характерные диаграммы распределения значений ЧСМ от времени, совмещенные с графиком нагружения для образцов слоистого углепластика на основе углеволокна AKSA F49 12K

Fig. 10. Typical diagrams of the frequency distribution versus time combined with the loading graph for the CFRP samples based on AKSA F49 12K carbon fiber

Рассмотрим распределение этих диапазонов на примере одного образца. На рис. 11 представлены гистограммы ЧСМ в моменты времени 15 с, 26 с и 60 с от начала испытания, где вертикальная шкала – количество зарегистрированных сигналов (N , ед.). Эти моменты соответствуют началу регистрации сигналов АЭ на образце, первому спаду по значениям нагрузки на диаграмме нагружения и моменту стабилизации процесса накопления повреждений в образце на завершающей стадии нагружения соответственно. Распределения представлены в одинаковом масштабе по оси y , для того чтобы показать появление новых диапазонов частот в процессе нагружения. Так, на начальной стадии нагружения регистрируются сигналы АЭ в низком (25–200 кГц) и среднем (200–600 кГц) частотном диапа-

зоне, связанные с растрескиванием матрицы, нарушением адгезии между волокном и матрицей и расслоением. По мере нагружения картина распределения частотных диапазонов меняется. После достижения максимального значения по нагрузке ($t \approx 26$ с) начинают регистрироваться сигналы в высоком (600–800 кГц) частотном диапазоне, связанные с разрушением волокна. Данные распределения иллюстрируют смену механизмов накопления повреждений в образце при нагрузке.

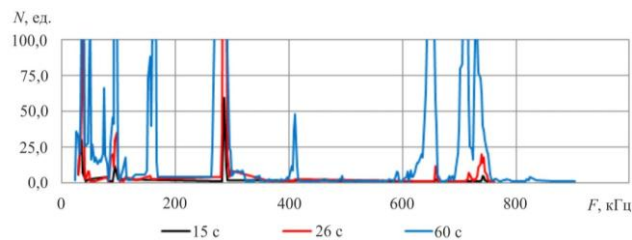


Рис. 11. Гистограммы распределения ЧСМ в разные моменты времени, иллюстрирующие появление новых диапазонов значений ЧСМ в ходе нагружения образца

Fig. 11. Histograms of the frequency distribution at different times which illustrate the occurrence of new ranges of frequency values during the loading of the sample

В дальнейшем по полученным экспериментальным данным для групп образцов углепластика, не подверженных температурному старению (22 °С), и для групп образцов, состаренных при температуре 120 и 200 °С в течение 5 и 15 сут, были построены графики, иллюстрирующие распределение значений ЧСМ сигналов АЭ за все время нагружения. Данные графики представлены на рис. 12.

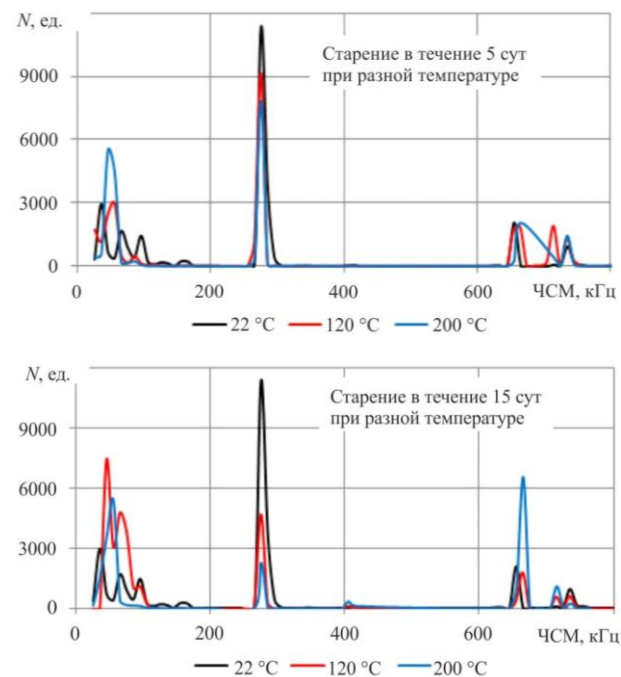


Рис. 12. Гистограммы распределения ЧСМ за все время нагружения образца

Fig. 12. Histograms of the frequency distribution during the sample loading

Анализируя графики на рис. 12, можно отметить, что значения частот спектрального максимума для всех образцов можно разделить на три диапазона. Для образцов, испытанных после старения при различных температурах в течение 5 сут, характерно наличие большинства зарегистрированных сигналов в среднем диапазоне значений частоты максимума спектра (≈ 300 кГц). Для образцов, испытанных после старения при различных температурах в течение 15 сут, наибольшее число зарегистрированных сигналов приходится на низкий (25–200 кГц) и высокий (600–800 кГц) диапазоны частот.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования влияния повышенной температуры и предварительного температурного старения разной интенсивности на деградацию механических свойств образцов конструкционного углепластика при испытаниях на межслоевой сдвиг. В данной работе образцы, подвергшиеся предварительному температурному старению, сравнивались с образцами-номиналами. В результате получены новые экспериментальные данные о влиянии повышенных (эксплуатационных) температур на механические свойства углепластика. Установлено, что повышение температуры до 200 °С приводит к смене механизма деформирования и снижению значений прочности при межслоевом сдвиге на 54 % относительно получаемых значений при нормальной температуре. Получена зависимость изменения прочностных свойств образцов углепластика в условиях межслоевого сдвига до и после предварительного температурного старения. Можно отметить, что по результатам микроструктурных исследований поверхности образцов установлены режимы предварительного старения, при которых происходит смена механизмов деформирования и разрушения. Для групп образцов 200 °С (5 и 15 сут) в процессе нагружения образуется большее количество трещин и расслоений, чем для групп образцов 120 °С (5 и 15 сут). Стоит отметить, что предварительные температурные воздействия при режимах 200 °С (5 и 15 сут) приводят к снижению прочности при межслоевом сдвиге на 20 % и 40 % соответственно.

В качестве дополнительного метода диагностики углепластиков использовался метод акустической эмис-

сии. Регистрация сигналов осуществлялась в непрерывном режиме до момента разрушения образцов. По полученным экспериментальным данным были построены и проанализированы графики зависимости энергетического параметра от времени и диаграмма распределения значений частот спектрального максимума. Проведена оценка процессов накопления повреждений в композициях. В ходе анализа диаграммы частотного распределения было отмечено, что сигналы группируются в три диапазона (низкий – 25–200 кГц, средний – 200–600 кГц и высокий – 600–800 кГц). Согласно изученным литературным источникам, данные частотные диапазоны совпадают с основными механизмами накопления повреждений в углепластиках, такими как растрескивание матрицы, расслоение, разрушение волокна. Отмечается, что степени предварительного температурного старения образцов оказывают влияние на механизмы разрушения. Так, для образцов, состаренных при температурах 120 °С и 200 °С в течение 5 сут, большинство зарегистрированных сигналов находятся в среднем частотном диапазоне. Для образцов, состаренных при аналогичных температурах в течение 15 сут, наибольшее количество сигналов находится в низком и высоком частотном диапазоне.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-31-90148, 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).

Acknowledgements

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within research Projects No. 19-31-90148, 19-41-590005 r_a. The Experimental studies as part 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 (No. FSNM-2020-0027).

Библиографический список

1. 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.
2. 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.
3. 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.

4. 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 // *Composites Part A.* – 2015. – Vol. 78. – P. 380–389.

5. 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.

6. Karbhari V.M., Xian G. Hygrothermal effects on high VF pultruded unidirectional carbon/epoxy composites: Moisture uptake // *Composites Part B* –2009. – Vol. 40. – P. 41–49.
7. Effects of accelerated environmental aging on glass fiber reinforced thermoset polyurethane composites / J. Nicholas, M. Mohamed, G.S. Dhaliwal, S. Anandan, K. Chandrashekhara // *Composites Part B*. – 2016. – Vol.94. – P. 370–378.
8. Long-term durability of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) sheets and the epoxy resin matrix under a wet-dry cyclic condition in a chloride-containing environment / Z. Lu, J. Xie, H. Zhang, J. Li // *Polymers*. – 2017. – Vol. 9, no. 12. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6418758/> (дата обращения: 15.03.2013).
9. Lu Z., Xian G., Li H. Effects of exposure to elevated temperatures and subsequent immersion in water or alkaline solution on the mechanical properties of pultruded BFRP plates // *Composites Part B*. – 2015. – Vol.77. – P. 421–430.
10. Zhang M., Sun B., Gu B. Experimental and numerical analyses of matrix shrinkage and compressive behavior of 3-D braided composite under thermo-oxidative ageing conditions // *Compos. Struct.* – 2018. – Vol. 204. – P. 320–333.
11. Effect of the natural aging process on the shear strength of FRP composite single lap joints / R.A. Hunter-Alarcón, A. Vizán, J. Pérez, J. Leyrer, P. Hidalgo, B. Pavez, L.F.M. da Silva // *Int. J. Adhes. Adhes.* – 2018. – Vol. 86. – P. 4–12.
12. Lobanov D.S., Zubova E.M. Temperature aging effects on mechanical behavior of structural GFRP on interlaminar shear tests // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 747. 012119. DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012119
13. 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 Structural Integrity*. – Vol. 18. – 2019. – P. 347–352. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.174
14. 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.
15. Alam P., Robert C., Ó Brádaigh C.M. Tidal turbine blade composites – A review on the effects of hygrothermal aging on the properties of CFRP // *Composites Part B*. – 2018. – Vol. 149. – P. 248–259.
16. 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. 69–79.
17. Effect of hygrothermal aging in distilled and saline water on the mechanical behaviour of mixed short fibre/woven composites / L. Mansouri, A. Djebbar, S. Khatir, M. Abdel Wahab // *Compos. Struct.* – 2019. – Vol. 207. – P. 816–825.
18. Chen Y., Davalos J.F., Ray I. Durability prediction for GFRP reinforcing bars using short-term data of accelerated aging tests // *Journal of Composites for Construction*. –2006. – Vol. 10, no. 4. – P. 279–286.
19. Application of the acoustic emission technique to studying the damage accumulation in a functional ceramic coating / E.M. Zubova, D.S. Lobanov, E.M. Strungar, V.E. Wildemann, Y.B. Lyamin // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2019. – Vol. 1. – P. 38–48.
20. Feasibility and limitations of damage identification in composite materials using acoustic emission / E. Maillet, C. Baker, G.N. Morscher, V.V. Pujar, J.R. Lemanski // *Composites Part A*. – 2015. – Vol. 75. – P. 77–83.
21. Mouzakis D.E., Dimogianopoul 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.
22. Experimental wavelet analysis of acoustic emission signal propagation in CFRP / C. Barile, C. Casavola, G. Pappaletta, P.K. Vimalathithan // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2019. – Vol. 210. – P. 400–407.
23. Clustering effect on damage mechanisms in open-hole laminated carbon/epoxy composite under constant tensile loading rate, using acoustic emission / H. Sayar, M. Azadi, M. Ghasemi-Ghalebahmana, S.M. Jafarib // *Compos. Struct.* – 2018. – Vol. 204. – P. 1–11.
24. Xiao D., Yong G. Damage monitoring of carbon fiber reinforced silicon carbide composites under random vibration environment by acoustic emission technology // *Ceramics International*. – 2020. – Vol. 46, iss. 11. – P. 18948–18957. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.04.218
25. Health monitoring of timber beams retrofitted with carbon fiber composites via the acoustic emission technique / F.J. Rescalvo, E. Suarez, I. Valverde-Palacios, J.M. Santiago-Zaragoza, A. Gallego // *Compos. Struct.* – 2018. – Vol. 206. – P. 392–402. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.08.068
26. Beheshtizadeh N., Mostafapour A., Abbasi H. Effect of fiber layout on signal analyzing of carbon/glass/epoxy hybrid composite laminates flexural loading using acoustic emission // *Measurement*. – 2019. – Vol. 136. – P. 608–614. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.01.047
27. Transverse cracking in carbon fiber reinforced polymer composites: Modal acoustic emission and peak frequency analysis / C. Baker, G.N. Morscher, V.V. Pujar, J.R. Lemanski // *Compos. Sci. Technol.* – 2015. – Vol. 116. – P. 26–32. DOI: 10.1016/j.compscitech.2015.05.005
28. Asamene K., Hudson L., Sundaresan M. Influence of attenuation on acoustic emission signals in carbon fiber reinforced polymer panels // *Ultrasonics*. – 2015. – Vol. 59. – P. 86–93. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.01.016
29. Damage classification in carbon fibre composites using acoustic emission: A comparison of three techniques / J.P. McCrory, S.Kh. Al-Jumaili, D. Crivelli, M.R. Pearson, M. Eaton, C.A. Featherston, M. Guagliano, K.M. Holford, R. Pullin // *Composites Part B*. – 2015. – Vol. 68. – P. 424–430. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.08.046
30. Local strain and damage measurements on a composite with digital image correlation and acoustic emission / C. Flament, M. Salvia, B. Berthel, G. Crosland // *J. Compos. Mater.* – 2016. – Vol. 50(14). – P. 1989–1996.
31. Static strength and damage evaluation of high speed drilled composite material using acoustic emission and finite element techniques / N.A. Shakhosravi, J. Yousefi, M.A. Najfabad, G. Minak, H. Hosseini-Toudeshky, F. Sheibani // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2019. – Vol. 210. – P. 470–485.
32. Barile C. Innovative mechanical characterization of CFRP by using acoustic emission technique // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2019. – Vol. 210. – P. 414–421.
33. Damage pattern recognition and damage evolution analysis of unidirectional CFRP tendons under tensile loading using acoustic emission technology / J. Xu, W. Wang, Q. Han, X. Liu // *Compos. Struct.* – 2020. – Vol. 238. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111948
34. de Groot P.J., Wijnen P.A.M., Janssen R.B.F. Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites // *Compos. Sci. Technol.* – 1995. – Vol. 55. – P. 405–412.
35. Jong H.-J. Transverse Cracking in a Cross-ply Composite Laminate – Detection in Acoustic Emission and Source Characterization // *J. Compos. Mater.* – 2005. – Vol. 40. – P. 37–69.

References

1. 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, no. 1, pp. 18-24.
2. 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.
3. 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.
4. 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. *Composites Part A.*, 2015, vol. 78, pp. 380-389.
5. 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.
6. Karbhari V.M., Xian G. Hygrothermal effects on high VF pultruded unidirectional carbon/epoxy composites: Moisture uptake. *Composites Part B*, 2009, vol. 40, pp. 41-49.
7. Nicholas, J., Mohamed, M., Dhaliwal, G.S., Anandan, S., Chandrashekhara, K. Effects of accelerated environmental aging on glass fiber reinforced thermoset polyurethane composites. *Composites Part B*, 2016, vol.94, pp. 370-378.
8. Lu, Z., Xie, J., Zhang, H., Li, J. Long-term durability of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) sheets and the epoxy resin matrix under a wet-dry cyclic condition in a chloride-containing environment. *Polymers*, 2017, vol. 9, no. 12. available at: (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6418758/>).
9. Lu Z., Xian G., Li H. Effects of exposure to elevated temperatures and subsequent immersion in water or alkaline solution on the mechanical properties of pultruded BFRP plates. *Composites Part B*, 2015, vol.77, pp. 421-430.
10. Zhang, M. Sun, B., Gu, B. Experimental and numerical analyses of matrix shrinkage and compressive behavior of 3-D braided composite under thermo-oxidative ageing conditions. *Compos. Struct.*, 2018, vol. 204, pp. 320-333.
11. Hunter-Alarcón, R.A., Vizán, A., Pérez, J., Leyrer, J., Hidalgo, P., Pavez, B., da Silva, L.F.M. Effect of the natural aging process on the shear strength of FRP composite single lap joints. *Int. J. Adhes. Adhes.*, 2018, vol. 86, pp. 4-12.
12. Lobanov D.S. Zubova E.M. Temperature aging effects on mechanical behavior of structural GFRP on interlaminar shear tests. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020, 747, 012119, DOI:10.1088/1757-899X/747/1/012119.
13. 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 Structural Integrity*. 2019, vol. 18, pp. 347-352. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.174
14. 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.
15. Alam, P., Robert, C., Ó Brádaigh, C.M. Tidal turbine blade composites – A review on the effects of hygrothermal aging on the properties of CFRP. *Composites Part B*, 2018, vol. 149, pp. 248-259.
16. Lobanov D.S., Vildeman V.E., Babin A.D., 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. 69-79.
17. Mansouri, L., Djebbar, A., Khatir, S., Abdel Wahab, M. Effect of hygrothermal aging in distilled and saline water on the mechanical behaviour of mixed short fibre/woven composites. *Compos. Struct.*, 2019, vol. 207, pp. 816-825.
18. Chen, Y., Davalos, J.F., Ray, I. Durability prediction for GFRP reinforcing bars using short-term data of accelerated aging tests. *Journal of Composites for Construction*, 2006, vol. 10, no. 4, pp. 279-286.
19. Zubova E.M., Lobanov D.S., Strungar E.M., Wildemann V.E., Lyamin Y.B. Application of the acoustic emission technique to studying the damage accumulation in a functional ceramic coating. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, vol.1, pp. 38-48.
20. Maillat E., Baker C., Morscher G. N., Pujar V.V., Lemanski J.R. Feasibility and limitations of damage identification in composite materials using acoustic emission. *Composites Part A.*, 2015, vol. 75, pp. 77-83.
21. Mouzakis, D. E., Dimogianopoul, 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.
22. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Vimalathithan P.K. Experimental wavelet analysis of acoustic emission signal propagation in CFRP. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, vol. 210, pp. 400-407.
23. Sayar H., Azadi M., Ghasemi-Ghalebahmana M., Jafarib S. M. Clustering effect on damage mechanisms in open-hole laminated carbon/epoxy composite under constant tensile loading rate, using acoustic emission. *Compos. Struct.*, 2018, vol. 204, pp. 1-11.
24. Xiao D., Yong G. Damage monitoring of carbon fiber reinforced silicon carbide composites under random vibration environment by acoustic emission technology. *Ceramics International.*, 2020, vol. 46, Is. 11, pp. 18948-18957. DOI: 10.1016/J.CERAMINT.2020.04.218.
25. Rescalvo F. J., Suarez E., Valverde-Palacios I., Santiago-Zaragoza J. M., Gallego A. Health monitoring of timber beams retrofitted with carbon fiber composites via the acoustic emission technique. *Compos. Struct.*, 2018, vol. 206, pp. 392-402. doi:10.1016/j.compstruct.2018.08.068.
26. Beheshtizadeh N., Mostafapour A., Abbasi H. Effect of fiber layout on signal analyzing of carbon/glass/epoxy hybrid composite laminates flexural loading using acoustic emission. *Measurement*, 2019, vol. 136, pp. 608-614. DOI:10.1016/j.measurement.2019.01.047.
27. Baker C., Morscher G.N., Pujar V.V., Lemanski J.R. Transverse cracking in carbon fiber reinforced polymer composites: Modal acoustic emission and peak frequency analysis. *Compos. Sci. Technol.*, 2015, vol. 116, pp. 26-32. DOI:10.1016/j.compscitech.2015.05.005.
28. Asamene K., Hudson L., Sundaresan M. Influence of attenuation on acoustic emission signals in carbon fiber reinforced polymer panels. *Ultrasonics*, 2015, vol. 59, pp. 86-93. DOI:10.1016/j.ultras.2015.01.016.
29. McCrory J. P., Al-Jumaili S. Kh., Crivelli D., Pearson M. R., Eaton M. Featherston C.A., Guagliano M., Holford K. M., Pullin R. Damage classification in carbon fibre composites using acoustic emission: A comparison of three techniques. *Composites Part B.*, 2015, vol. 68, pp. 424-430. DOI:10.1016/j.compositesb.2014.08.046.

30. Flament C., Salvia M., Berthel B., Crosland G. Local strain and damage measurements on a composite with digital image correlation and acoustic emission. *J. Compos. Mater.*, 2016, vol. 50(14), pp. 1989-1996.
31. Shahkhosravi N.A., Yousefi J., Najfabadi M.A., Minak G., Hosseini-Toudeshky H., Sheibani F. Static strength and damage evaluation of high speed drilled composite material using acoustic emission and finite element techniques. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, vol. 210, pp. 470-485.
32. Barile C. Innovative mechanical characterization of CFRP by using acoustic emission technique. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, vol. 210, pp. 414-421.
33. Xu J., Wang W., Han Q., Liu X. Damage pattern recognition and damage evolution analysis of unidirectional CFRP tendons under tensile loading using acoustic emission technology. *Compos. Struct.*, 2020, vol. 238. DOI:10.1016/j.compstruct.2020.111948.
34. de Groot P.J., Wijnen P.A.M., Janssen R.B.F. Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites. *Compos. Sci. Technol.*, 1995, vol. 55, pp. 405-412.
35. Jong H.-J. Transverse Cracking in a Cross-ply Composite Laminate – Detection in Acoustic Emission and Source Characterization. *J. Compos. Mater.*, 2005, vol. 40., pp. 37-69.