Деформирование и разрушение тканевого углепластика при ультрамалоцикловом растяжении вдоль основы / С.Б. Сапожников, Е.В. Лешков, Д.С. Лобанов, Е.А. Чеботарёва. – DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.07 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 5. – С. 82–90.

Perm Polytech Style: Sapozhnikov S.B., Leshkov E.V., Lobanov D.S., Chebotareva E.A. Ultra-low-cycle tension of fabric cfrp along the WARP. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 5, pp. 82-90. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.07

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 5, 2024
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.07
УДК 620.171.34, 53.091

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ТКАНЕВОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ УЛЬТРАМАЛОЦИКЛОВОМ РАСТЯЖЕНИИ ВДОЛЬ ОСНОВЫ

С.Б. Сапожников[1], Е.В. Лешков[1], Д.С. Лобанов[2], Е.А. Чеботарёва[2]

[1]Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Российская Федерация
[2]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 03 сентября 2024 г.
Одобрена: 23 октября 2024 г.
Принята к публикации: 05 ноября 2024 г.

Ключевые слова:

тканевый углепластик, циклическое нагружение, акустическая эмиссия, накопление микроповреждений, эффект Кайзера, разрушение.

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований деформирования, акустической эмиссии и накопления микроповреждений в тканевом углепластике полотняного переплетения при циклическом растяжении вдоль нитей основы. Измерения деформаций проведены с помощью оптического экстензометра, обеспечивающего точное позиционирование образца вдоль направления нагружения. Программа нагружения предусматривала до 100 циклов растяжения с коэффициентом асимметрии R=0,1 с последующим дорывом. Все образцы выдержали программу предварительного циклического нагружения. Максимальные значения напряжений в циклах соответствовали 25…90 % от статического предела прочности. Выявлено, что в процессе циклического растяжения происходит одностороннее накопление деформаций (циклическая ползучесть). Накопленная деформация немонотонно зависит от максимального напряжения в цикле, возрастая до 600 МПа и снижаясь при больших напряжениях. Анализ кинетики деформирования в циклах выявил рост касательного модуля, что связано, очевидно, с распрямлением волокон. При дорыве отмечено повышение на 5–10 % остаточной прочности в сравнении с пределом прочности при однократном нагружении. Явления акустической эмиссии происходят как в полуциклах растяжения, так и в полуциклах разгрузки, эффект Кайзера не наблюдается. Циклические испытания при температуре 80 °С показали резкое снижение числа акустических событий и исчезновение событий в средних диапазонах частот. Это связано с тем, что нагрев приводит к снижению остаточных технологических напряжений в элементах мезоструктуры тканевого композита, вызывая изменения в процессе возникновения микроповреждений поперек волокон и на сдвиг в местах переплетения нитей основы и утка. Разрушение образцов во всех случаях происходит при достижении продольными деформациями величины 1,50 ± 0,06 %. Это может служить основой для прогнозирования прочности при других программах циклического нагружения.

© **Сапожников Сергей Борисович** – д. т. н., проф. кафедры «Техническая механика», гл. н. с., e-mail: sapozhnikovsb@susu.ru, iD: 0000-0002-7022-4865.
Лешков Егор Валерьевич – инженер, e-mail: leshkovev@susu.ru, iD: 0000-0001-9380-8719.
Дмитрий Сергеевич Лобанов – к. т. н., доц. кафедры Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение, с. н. с. Центра экспериментальной механики, e-mail: cem.lobanov@gmail.com, iD: 0000-0003-1948-436X.
Екатерина Александровна Чеботарева – м. н. с. Центра экспериментальной механики, e-mail: cem.chebotareva@mail.ru, iD: 0000-0002-6374-6964.
Sergei B. Sapozhnikov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, e-mail: sapozhnikovsb@susu.ru, iD: 0000-0002-7022-4865.
Egor V. Leshkov – Engineer, South Ural State University, e-mail: leshkovev@susu.ru, iD: 0000-0001-9380-8719.
Dmitry S. Lobanov – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: cem.lobanov@gmail.com, iD: 0000-0003-1948-436X.
Ekaterina A. Chebotareva – postgraduate student, e-mail: cem.chebotareva@mail.ru, iD: 0000-0002-6374-6964.

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)

ULTRA-LOW-CYCLE TENSION OF FABRIC CFRP ALONG THE WARP

S.B. Sapozhnikov[1], E.V. Leshkov[1], D.S. Lobanov[2], E.A. Chebotareva[2]

[1]South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russian Federation
[2]Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 03 September 2024
Approved: 23 October 2024
Accepted for publication:
05 November 2024

Keywords:

carbon fabric reinforced plastic, cyclic loading, acoustic emission, accumulation of microdamages, Kaiser effect, failure.

ABSTRACT

The paper presents the results of experimental studies of deformation, acoustic emission and accumulation of micro-damages in plain weave fabric carbon fiber reinforced plastic (CFRP) under cyclic tension along the warp threads. Strain measurements were carried out using an optical extensometer, which ensures accurate positioning of the specimen along the loading direction. The loading program included up to 100 stretching cycles with an asymmetry coefficient of R = 0.1 followed by failure. All specimens passed the pre-cyclic loading program. The maximum stress values in the cycles corresponded to 25...90 % of the static tensile strength. It is revealed that in the process of cyclic tension, a one-sided accumulation of strain (cyclic creep) occurs. The accumulated strain depends nonmonotonically on the maximum stress in the cycle, increasing to 600 MPa and decreasing at high stresses. Analysis of the strain kinetics in cycles revealed an increase in the tangential modulus, which is obviously due to the straightening of the fibers. During rupture, an increase of 5–10 % in residual strength was noted in comparison with the ultimate strength under single loading. Acoustic emission phenomena occur both in half-cycles of stretching and in half-cycles of unloading, the Kaiser effect is not observed. Cyclic tests at a temperature of 80 ° C showed a sharp decrease in the number of acoustic events and the disappearance of events in the medium frequency ranges. This is due to the fact that heating leads to a decrease in residual technological stresses in the mesostructure elements of the fabric composite, causing changes in the process of micro-damage across the fibers and to a shift in the places where the warp and weft threads intertwine. In all cases, the failure of the specimens occurs when the longitudinal strain reach a value of 1.50 ± 0.06%. This can serve as a basis for predicting strength in other cyclic loading programs.

Введение

Полимерные композиты с тканевым армированием нашли широкое применение ввиду высоких механических свойств, низкой плотности и технологичности [1; 2]. При этом отмечается [3–5], что при многоцикловом нагружении прочность таких композитов снижается весьма существенно, по сравнению со статической прочностью. Отмечается накопление микроповреждений и монотонное снижение жёсткости материала [6; 7]. На этой основе разработаны расчётные методы оценки усталостной долговечности при многоцикловом нагружении, учитывающие различные темпы снижения жёсткости на разных этапах нагружения [5; 8–20]. В ряде работ в качестве параметра для оценки нагруженности в цикле предложено использовать не напряжения, а деформации, и по их развитию оценивать усталостную прочность [21; 22]. Существенным дополнением традиционных усталостных испытаний являются циклические испытания с определением остаточной прочности (при дорыве) [23–27].

Область малоцикловой и в особенности ультрамалоцикловой (УМЦ) усталости композитов остаётся практически неизученной. При этом имеются области применения композитов (беспилотные летательные аппараты, возвращаемые ступени ракет), в которых количество циклов нагружения не превышает 50…100, где разработанные ранее расчётные методы неприменимы.

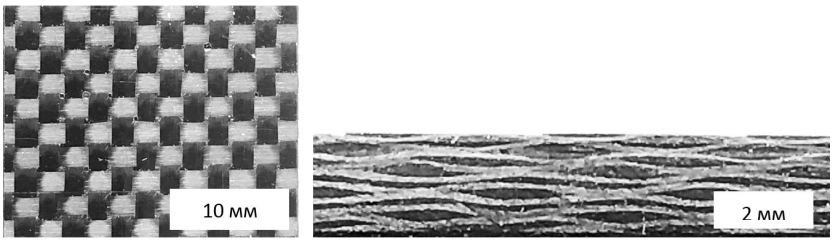
Важно также отметить, что оборудование для УМЦ-исследований может быть использовано то же, что и при квазистатическом нагружении (навесные и оптические экстензометры, сенсоры акустической эмиссии и др.), позволяя выявить механизмы микроповреждения, ползучести, накопления деформаций.

В связи с отмеченными выше положениями в данной работе проведены исследования нелинейного деформирования (циклической ползучести), развития микроповреждений и эффектов упрочнения тканевого углепластика при растяжении вплоть до разрушения при дорыве при ультрамалом числе циклов нагружения.

Материал, технология изготовления и образцы

Для экспериментальных исследований выбран 10-слойный углепластик на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя ХТ152Б (54/46 в.ч.) и углеткани полотняного переплетения 3К-1250-200 [28] номинальной плотностью 200 г/м^2, толщиной 200 мкм с шириной нити ~2 мм (рис. 1).

Были изготовлены три пластины размерами 300×300×2 мм (горячее прессование при максимальной температуре 150 °С), из которых вдоль основы вырезаны прямоугольные образцы размерами 250×25×2 мм с накладками в зоне захватов из стеклотекстолита размерами 40×25×2 мм. Накладки были приклеены цианакрилатным клеем.



a *b*

Рис. 1. Структура материала: вид сверху (*a*) и вид сбоку (*b*)

Fig. 1. Structure of the material: top view (*a*) and side view (*b*)

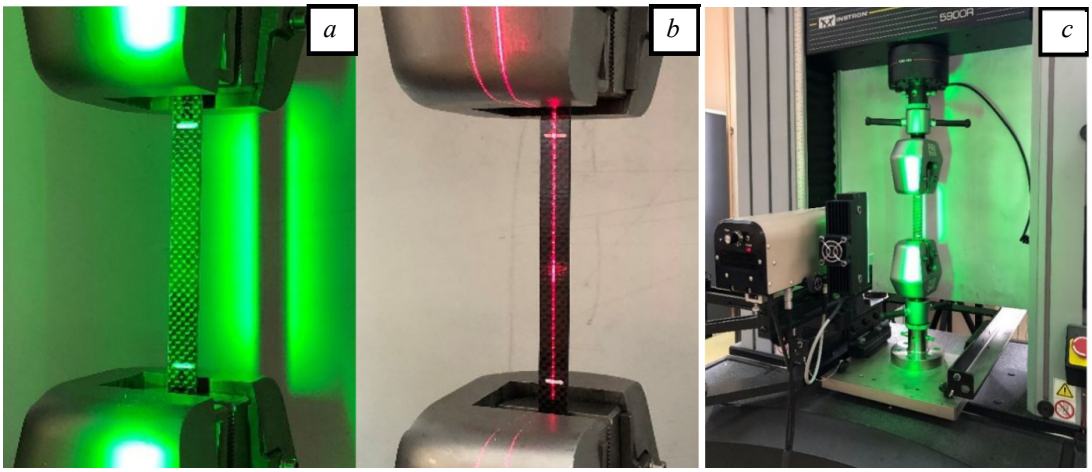


Рис. 2. Образец с метками (*a*, *b*) и испытательная машина с оптическим экстензометром (*c*)

Fig. 2. Sample with marks (*a*, *b*) and testing machine with optical extensometer (*c*)

Методика экспериментальных исследований

Все испытания проведены на универсальной электромеханической машине Instron 5900R в клиновых захватах со скоростью нагружения и разгрузки 5 мм/мин. На образцы были нанесены белые метки на расстоянии 100 мм для использования оптического экстензометра Epsilon One [29] (рис. 2). Запись показаний осуществляли с частотой 10 Гц. Оптический экстензометр имел функцию лазерного позиционирования образца в захватах, что минимизировало ошибки выравнивания при установке.

Десять образцов были испытаны на однократное растяжение до разрушения с определением предела прочности и модуля упругости. Далее 14 образцов были испытаны на циклическое растяжение по программе, приведенной на рис. 3.

Здесь на первом этапе коэффициент асимметрии $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}=0{,}1$. Если не произошло разрушения, происходит нагружение до разрушения (дорыв). Измерения модулей упругости проводили на первом полуцикле нагружения (при малых напряжениях) и перед разрушением (при больших напряжениях, см. стрелки на рис. 3).

В процессе нагружения фиксацию событий акустической эмиссии (АЭ) производили с помощью системы AMSY-6 Vallen [30], установив два сенсора АЭ на расстоянии 80 мм по длине рабочей части образца. В испытаниях был применен широкополосный датчик AE105A с рабочим диапазоном частот от 450 до 1150 кГц и предусилитель с коэффициентом усиления 34 дБ. Частота дискретизации данных составила 10 МГц, пороговое значение регистрации сигналов АЭ – 40 дБ.

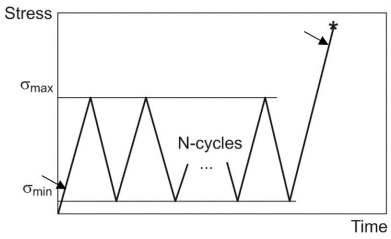
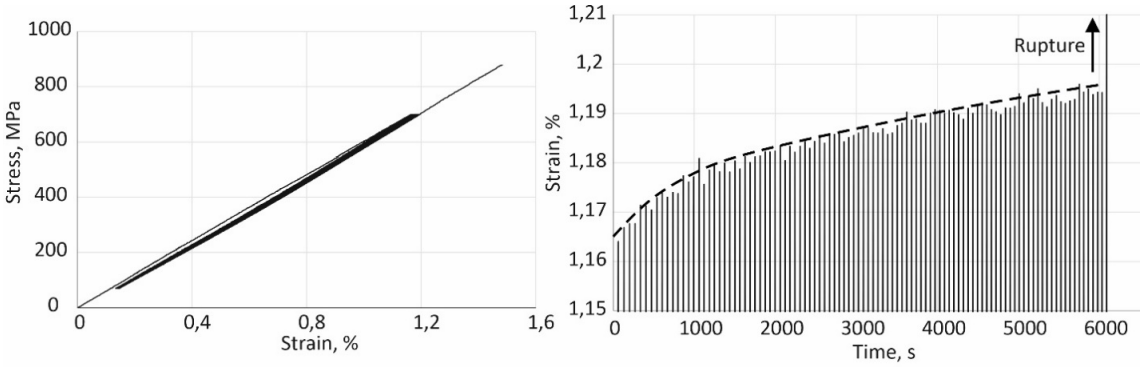


Рис. 3. Программа нагружения

Fig. 3. Loading program

Были проведены установочные испытания, в которых произведена калибровка оборудования, выявлено пороговое значение регистрации сигналов, при котором не происходит потеря данных в нижнем диапазоне, но при этом отсеивается «шум».

Регистрировали амплитуду, энергию и частоту импульсов АЭ. Эти испытания были проведены при комнатной температуре (24 °C). Были также осуществлены отдельные механические испытания с фиксацией деформаций навесным экстензометром и событий АЭ в термокамере при температуре 80 °C.



a *b*

Рис. 4. Диаграммы (*a*, *b*) циклического деформирования

Fig. 4. Cyclic (*a*, *b*) deformation diagrams

Результаты механических испытаний

Исследования при статическом нагружении показали, что предел прочности тканевого углепластика при растяжении вдоль основы составляет $F_{1t} = 805 \pm 49$ МПа, модуль упругости равен $E1 = 58 \pm 1{,}5$ ГПа. Здесь и ниже за знаком ± следует величина среднеквадратического отклонения выборки.

Характерные диаграммы циклического нагружения «напряжение – деформация» и «максимальные деформации в цикле – время» с дорывом (для примера: максимальные напряжения в цикле равны 700 МПа) приведены на рис. 4. Здесь пунктиром показан рост деформаций, определяемый циклической ползучестью и накоплением микроповреждений.

Отдельное внимание уделено определению начального E_{min} и финального модуля упругости E_{max}. Их определяли с использованием линейной аппроксимации типа $y(x)=a_0+a_1x$ по заданным участкам диаграммы «напряжение – деформация» (рис. 5). Линейное сглаживание было необходимо, так как оптический экстензометр имеет определённый «шум», связанный с вычислительными процедурами над изображением меток на образце.

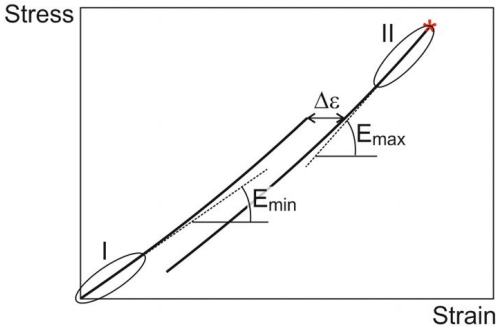


Рис. 5. Линейные аппроксимации для определения модулей упругости в зонах I и II для первого полуцикла нагружения и дорыва

Fig. 5. Linear approximations for determining the elastic moduli in zones I and II for the first half-cycle of loading and rupture

Показано значение накопленной односторонней деформации Δε. Результаты циклических испытаний приведены в таблице: амплитуда напряжений σ_{max}, минимальный и максимальный модули упругости E_{min}, E_{max}, остаточная прочность углепластика после дорыва F_{1t}*, разрушающая деформация e* и накопленная циклическая деформация Δε. В последней строке приведены результаты статистической обработки данных.

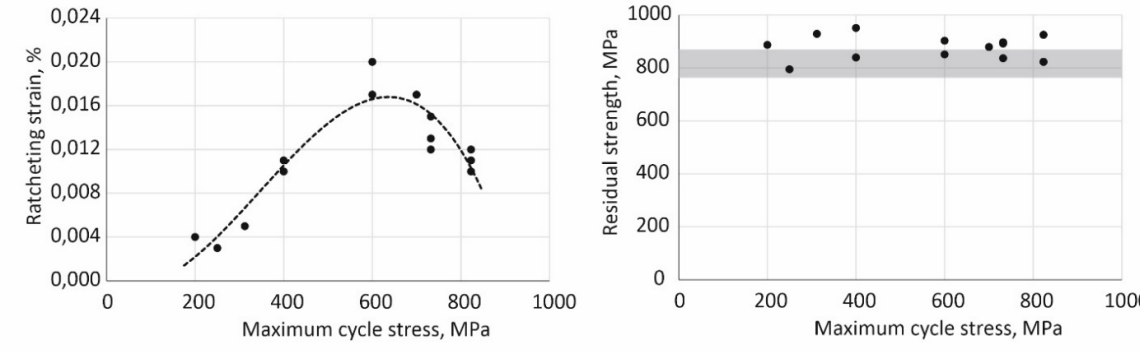
Результаты испытаний

Test results

№	σ_{max}, МПа	E_{min}, ГПа	E_{max}, ГПа	F_{1t}*, МПа	e*, %	Δε, %
1	200	57,3	63,4	887	1,41	0,004
2	250	58,4	63,9	795	1,53	0,003
3	312	58,2	63,6	929	1,46	0,005
4	400	58,4	63,9	951	1,56	0,011
5	400	59,1	62,0	840	1,39	0,010
6	600	57,3	63,5	851	1,43	0,020
7	600	58,0	65,7	903	1,44	0,017
8	700	59,4	61,2	879	1,48	0,017
9	732	58,4	63,6	897	1,47	0,013
10	732	58,9	64,0	892	1,42	0,012
11	732	58,9	64,4	837	1,60	0,015
12	823	59,3	63,0	823	1,42	0,010
13	823	57,8	66,0	925	1,52	0,012
14	823	58,5	63,5	823	1,45	0,011
		58,4 ± 0,66	63,7 ± 1,20	874 ± 46	1,50 ± 0,06	

На рис. 6 приведены зависимости накопленной деформации и остаточной прочности в функции максимальных напряжений в циклах.

Справа на рис. 6 (*b*) приведена полоса разброса статической прочности при растяжении: 805 ± 49 МПа. Увеличение остаточной прочности после циклического нагружения, очевидно, связано с распрямлением волокон в ткани и имеет предел, определяемый прочностью волокон. Накопление деформаций рассчитывается (см. рис. 5) от максимальной деформации первого полуцикла, которая, несомненно, включает в себя и распрямление волокон (это хорошо заметно на увеличении касательного модуля).



a *b*

Рис. 6. Зависимости накопленной деформации (*a*) и остаточной прочности (*b*) в функции максимальных напряжений цикла

Fig. 6. Dependences of accumulated deformation (*a*) and residual strength (*b*) as a function of maximum cycle stresses

При больших напряжениях (больше 600 МПа) волокна в композите уже практически распрямлены, циклическая ползучесть проявляется намного меньше, и это наблюдается на рис. 6 уменьшением величины накопленной деформации.

События акустической эмиссии

Установленные на образцы два пьезосенсора зафиксировали множество импульсов АЭ, которые были обработаны с получением величины F_{max}, которая несёт информацию о механизмах разрушения [31].

На рис. 7 приведена картина развития событий АЭ в процессе однократного нагружения до разрушения.

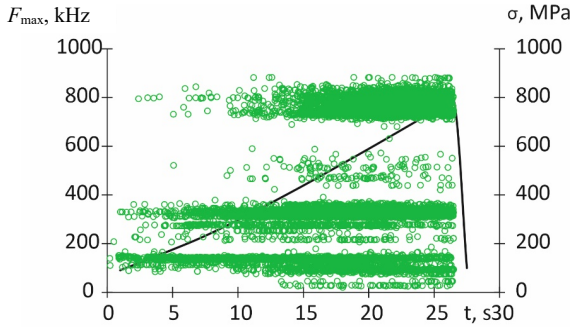
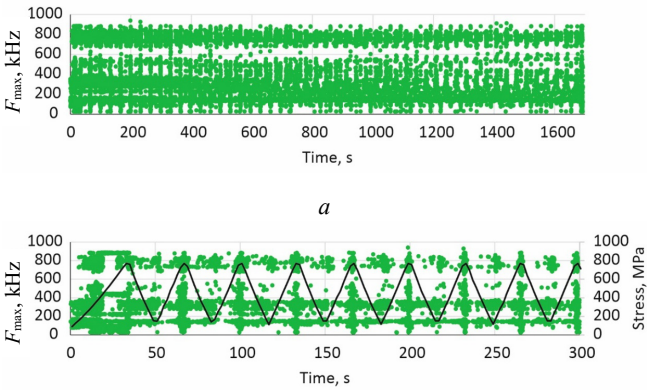


Рис. 7. Однократное нагружение

Fig. 7. Single loading

Можно отметить рост числа событий в области 0–150 кГц, множество событий в области 300–450 кГц и плотную группу событий в диапазоне 700–900 кГц. При этом имело место продолжение событий на частоте около 900 кГц вплоть до разрушения. Для ультрамалоциклового нагружения (50 циклов с дорывом) с амплитудой 600 МПа картина событий АЭ показана на рис. 8. При этом диапазоны с различными частотами соответствуют диапазонам на рис. 7 при однократном нагружении.

Эти картины являются характерными для всех других условий циклического нагружения и свидетельствуют о повторении событий АЭ на этапах нагрузки и разгрузки, начиная со второго-третьего цикла вплоть до разрушения.



a

b

Рис. 8. Диаграммы АЭ «F_{max} – Time» (*a*) и совместно с диаграммой «напряжение – время» (*b*)

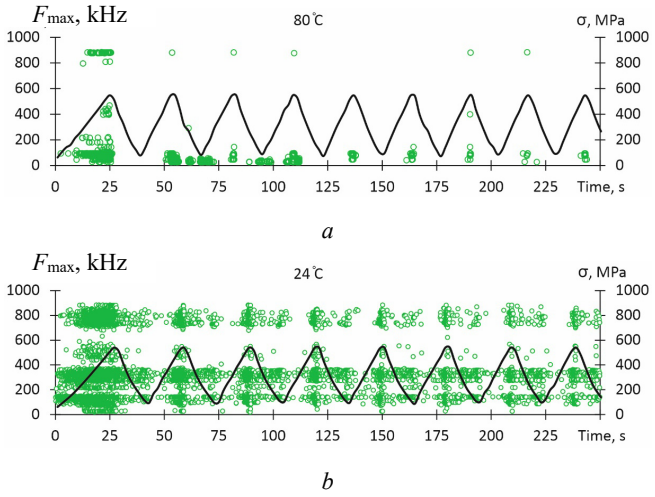
Fig. 8. AE diagrams “F_{max} – Time” (*a*) and together with the “stress – time” diagram (*b*)

Так как уровень максимальных напряжений от цикла к циклу оставался неизменным, в соответствии с эффектом Кайзера [32–35] (для хрупких материалов) рост числа событий АЭ после первого полуцикла должен был прекратиться. Но наблюдается иное, что свидетельствует, очевидно, о фрикционном характере акустических событий после первого полуцикла нагружения для тканевого углепластика. Аналогичный эффект наблюдался на тканевом стеклопластике при циклическом изгибе [36].

Интересно провести анализ событий акустической эмиссии образцов тканевого углепластика при одинаковых условиях нагружения при комнатной и при повышенной до 80 °C температуре. Здесь амплитуда цикла была 549 МПа (68 % от предела прочности), 50 циклов нагружения и дорыв. Модули упругости, накопленные циклические деформации практически не изменились (температура испытаний ниже температуры стеклова-

ния 125 °С). Остаточный предел прочности при 24 °С равен 844 МПа и 842 МПа – при 80 °С.

Однако, следует заметить, что повышение температуры существенно снижает величины остаточных технологических напряжений в элементах мезоструктуры композита, поэтому следует ожидать исчезновения (или уменьшения количества) некоторых характерных событий АЭ. Это продемонстрировано на рис. 9.



a

b

Рис. 9. Развитие АЭ при различных температурах:
a – 80 °С; *b* – 24 °С

Fig. 9. Development of AE at different temperatures:
a – 80 °C; *b* – 24 °C

Практически исчезли высоко- и среднечастотные события АЭ. Количество событий АЭ в остальных диапазонах резко снизилось.

Заключение

В исследовании проведены квазистатические и ультрамалоцикловые (до 100 циклов) испытания тканевого углепластика при растяжении вдоль нитей основы вплоть до разрушения. Максимальные напряжения цикла составляли от 30 до 90 % от предела прочности. Получены следующие новые результаты.

Диаграммы растяжения были существенно нелинейными: начальный модуль упругости составил 58,4 ± 0,66 ГПа, а конечный (перед разрушением) 63,7 ± 1,20 ГПа.

Деформации разрушения, измеренные бесконтактным оптическим экстензометром оказались неизменными и составили 1,50 ± 0,06 %.

Накопленные циклические деформации возрастали с ростом максимальных напряжений в цикле до ~80 % от предела прочности. При дальнейшем увеличении напряжений цикла накопленные деформации резко снижались (см. рис. 5).

При дорыве остаточная прочность после циклических испытаний была выше на 5–10 % статической прочности (см. рис. 6), измеренной при однократном растяжении с той же скоростью деформирования, что может быть обусловлено выпрямлением начально искривлённых волокон основы.

При проектировании изделий, изготовленных из тканевого углепластика и при малом числе циклов (до 100), предельным напряжением может служить предел прочности при однократном нагружении (консервативная оценка).

Исследования акустической эмиссии (АЭ) показали, что при циклическом нагружении с постоянными амплитудами во втором и далее циклах события АЭ продолжают развиваться и повторяются даже на полуциклах разгрузки (рис. 8). Это свидетельствует о фрикционной природе таких событий. В данном случае использование в качестве критерия разрушения критической суммы событий АЭ нецелесообразно.

Сравнительные испытания при нормальной и повышенной до 80 °С температуре показали, что средне- и высокочастотные акустические события исчезают, а повторяются лишь низкочастотные события. Этим подтверждается влияние остаточных напряжений в элементах мезоструктуры (нити основы и утка поперек волокон) на задержку их разрушения.

Таким образом, подтверждено, что низкочастотный диапазон АЭ отвечает за сдвиги на интерфейсе «волокно – матрица»), а средне- и высокочастотные события определяются разрушением поперек волокон в уточной и основной нитях.

Библиографический список

1. Daniel, I.M. Engineering mechanics of composite materials / I.M. Daniel, O. Ishai. – 2nd ed. – New York: Oxford University Press, 2006. – 411 p.

2. Barbero, E.J. Introduction to composite materials design / E.J. Barbero. – 2nd ed. – New York: CRC Press, 2011. – 520 p.

3. Carvelli, V. Fatigue of textile and short fiber reinforced composites / V. Carvelli, A. Jain, S.V. Lomov. – Wiley – ISTE, 2017. – 212 p.

4. Characterization of fatigue behavior of long fiber reinforced thermoplastic (LFT) composites / A. Goel, K.K. Chawla, U.K. Vaidya, N. Chawla, M. Koopman // Materials Characterization. – 2009. – Vol. 60, no. 6. – P. 537–544. DOI: 10.1016/j.matchar.2008.12.020

5. Clay, S.B. Experimental results of fatigue testing for calibration and validation of composite progressive damage analysis methods / S.B. Clay, P.M. Knoth // Journal of Composite Materials. – 2017. – Vol. 51, no. 15. – P. 2083–2100. DOI: 10.1177/0021998316670132

6. An investigation of fatigue behavior and residual strength model of steel-GFRP composite bar / Y.J. Cai, Z.H. Xie, S.H. Xiao, Z.R. Huang, J.X. Lin, Y.C. Guo, K.X. Zhuo, P.Y. Huang // Composite Structures. – 2024. – Vol. 327. – art. no. 117685. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.117685

7. Microstructure analysis of carbon-fiber-reinforced polymer laminates subjected to self-heating and fatigue strengthening under tension-tension fatigue loading / L. Qiao, L. Zhou, J. Zuo, X. Ding,

D. Wu, X. Li, X. He, Q. Wu // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2024. DOI: 10.1177/07316844241259104

8. Nicholas T. High cycle fatigue. A mechanics of materials perspective. – Elsevier Science, 2006. – 641 p.

9. Bond, I.P. Fatigue life prediction for GRP subjected to variable amplitude loading / I.P. Bond // Composites Part A. – 1999. – Vol. 30, no. 8. – P. 961–970. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00011-1

10. Caprino, G. Fatigue lifetime of glass fabric/epoxy composites / G. Caprino, G. Giorleo // Composites Part A. – 1999. – Vol. 30, no. 3. – P. 299–304. DOI: 10.1016/S1359-835X(98)00124-9

11. Hwang, W. Fatigue of composites-fatigue modulus concept and life Prediction / W. Hwang, K.S. Han // Journal of Composite Materials. – 1986. – Vol. 20, no. 2. – P. 154–165. DOI: 10.1177/002199838602000020

12. Shokrieh, M.M. Progressive fatigue damage modeling of cross-ply laminates, I: modeling strategy / M.M. Shokrieh, F. Taheri-Behrooz // Journal of Composite Materials. – 2010. – Vol. 44, no. 10. – P. 1217–1231. DOI: 10.1177/0021998309351604

13. Van Paepegem, W. Experimental setup for and numerical modelling of bending fatigue experiments on plain-woven glass/epoxy composites / W. Van Paepegem, J. Degrieck // Composite Structures. – 2001. – Vol. 51, no. 1. – P. 1–8. DOI: 10.1016/S0263-8223(00)00092-1

14. Nikishkov, Y. Progressive fatigue damage simulation method for composites / Y. Nikishkov, A. Makeev, G. Seon // International Journal of Fatigue. – 2013. – Vol. 48. – P. 266–279. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.11.005

15. Vassilopoulos, A.P. Fatigue behavior and life prediction of wind turbine blade composite materials / A.P. Vassilopoulos // Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials. – 2023. – P. 287–340. DOI: 10.1016/B978-0-08-103007-3.00005-7

16. Prediction on fatigue properties of the plain weave composite under broadband random loading / Y. Sun, Y. Zhang, C. Yang, Y. Liu, X. Chen, L. Yao, W. Gao // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 2021. – Vol. 44, no. 6. – P. 1515–1532. DOI: 10.1111/ffe.13445

17. An enhanced fatigue damage model based on strength degradation of composite materials / S. Liu, Z. Liu, K. Zhou, Y. Liu, X. Xiong, T. Liao, N. Ye // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 2024. DOI: 10.1111/ffe.14418

18. A model of strength degradation for glass fiber reinforced polymer composite laminates under fatigue loading / Q. Ma, J. Song, T. Tang, Z. An // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2022. – Vol. 236, no. 14. – P. 7953–7961. DOI: 10.1177/09544062221079172

19. Thermomechanical fatigue behavior of CF/PEKK composite under low and ultrasonic frequencies / J. Amraei, T. Rogala, A. Katunin, A. Premanand, G. Kokot, D. Wachla, W. Kuś, M. Bilewicz, B. Khatri, F. Balle // Composites Part B: Engineering. – 2024. – Vol. 281. – art. no. 111539. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111539

20. Strength and stiffness degradation modeling and fatigue life prediction of composite materials based on a unified fatigue damage model / J. Gao, P. Zhu, Y. Yuan, Z. Wu, R. Xu // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Vol. 137. – art. no. 106290. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106290

21. Mirzaei, A.H. Progressive fatigue damage modeling of laminated composites using strain-based failure criteria / A.H. Mirzaei, M.M. Shokrieh // Journal of Composite Materials. – 2024. – Vol. 58, no. 4. – P. 519–531. DOI: 10.1177/00219983241227098

22. Ganesan, C. Fatigue life modeling of FRP composites: A comprehensive review / C. Ganesan, P.S. Joanna, D. Singh // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 46. – P. 555–561. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.119

23. Artificial Intelligence Assisted Residual Strength and Life Prediction of Fiber Reinforced Polymer Composites / P. Pratim Das, M. Elenchezhian, V. Vadlamudi, R. Raihan // AIAA SciTech Forum and Exposition. – 2023. DOI: 10.2514/6.2023-0773

24. Vanhari, A.K. Modelling the residual strength degradation in composite materials without using residual strength tests / A.K. Vanhari, E. Fagan, J. Goggins // Journal of Composite Materials. – 2023. – Vol. 57, no. 16. – P. 2527–2542. DOI: 10.1177/00219983231175978

25. D'Amore, A. A method to predict the fatigue life and the residual strength of composite materials subjected to variable amplitude (VA) loadings / A. D'Amore, L. Grassia // Composite Structures. – 2019. – Vol. 228. – art. no. 111338. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111338

26. Wil'deman, V.E. Diagram and parameters of fatigue sensitivity for evaluating the residual strength of layered GFRP composites after preliminary cyclic loadings / V.E. Wil'deman, O.A. Staroverov, D.S. Lobanov // Mechanics of Composite Materials. – 2018. – Vol. 54, no. 3. – P. 313–320. DOI: 10.1007/s11029-018-9741-9

27. Wildemann, V.E. Deformation and failure of polymer composite materials under preliminary cyclic and low-velocity impacts / V.E. Wildemann, O.A. Staroverov, M.P. Tretyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 747, no. 1. – art. no. 012034. DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012034

28. ООО «Композит изделия» [Электронный ресурс]. – URL: https://cp-vm.ru/production (дата обращения: 12.08.2024).

29. Epsilontech [Электронный ресурс]. – URL: https://www.epsilontech.com/products/epsilon-one-advantages (дата обращения: 12.08.2024).

30. Vallen [Электронный ресурс]. – URL: https://www.vallen.de (дата обращения: 12.08.2024).

31. Arumugam, V. Damage characterization of stiffened glass-epoxy laminates under tensile loading with acoustic emission monitoring / V. Arumugam, K. Saravanakumar, C. Santulli // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 147. – P. 22–32. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.04.031

32. Unsupervised acoustic emission data clustering for the analysis of damage mechanisms in glass/polyester composites / A.R. Oskouei, H. Heidary, M. Ahmadi, M. Farajpur // Materials & Design. – 2012. – Vol. 37. – P. 416–422. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.01.018

33. Шкуратник, В.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти при циклическом одноосном нагружении образцов угля / В.Л. Шкуратник, Ю.Л. Филимонов, С.В. Кучурин // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47, № 2. – С. 103–109.

34. Салита, Д.С. Нарушение эффекта Кайзера при нагружении эвтектических сплавов системы Pb–Sn / Д.С. Салита, В.В. Поляков // Письма в ЖТФ. – 2020. – Т. 46, № 18. – С. 12–14. DOI: 10.21883/PJTF.2020.18.49994.18278

35. Эффект Кайзера при многоосном непропорциональном сжатии песчаника / И.А. Пантелеев, В.А. Мубассарова, А.В. Зайцев [и др.] // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2020. – Т. 495. – С. 63–67. DOI: 10.31857/S2686740020060152

36. Ultra-low cycle three-point bending fatigue of glass fabric reinforced plastic / S.B. Sapozhnikov, M.V. Zhikharev, E.M. Zubova // Composite Structures. – 2022. – Vol. 286. – P. 115293. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115293

References

1. Daniel I.M., Ishai O. Engineering mechanics of composite materials. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2006, p.

2. Barbero E.J. Introduction to composite materials design. 2nd ed. New York: CRC Press, 2011, 520 p.

3. Carvelli V., Jain A., Lomov S.V. Fatigue of textile and short fiber reinforced composites. Wiley - ISTE, 2017, 212 p.

4. Goel A., Chawla K.K., Vaidya U.K., Chawla N., Koopman M. Characterization of fatigue behavior of long fiber reinforced thermoplastic (LFT) composites. *Materials Characterization*, 2009, vol. 60, no. 6, pp. 537-544. DOI: 10.1016/j.matchar.2008.12.020

5. Clay S.B., Knoth P.M. Experimental results of fatigue testing for calibration and validation of composite progressive damage analysis methods. *Journal of Composite Materials*, 2017, vol. 51, no. 15, pp. 2083-2100. DOI: 10.1177/0021998316670132

6. Cai Y.J., Xie Z.H., Xiao S.H., Huang Z.R., Lin J.X., Guo Y.C., Zhuo K.X., Huang P.Y. An investigation of fatigue behavior and residual strength model of steel-GFRP composite bar. *Composite Structures*, 2024, vol. 327, art. no. 117685. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.117685

7. Qiao L., Zhou L., Zuo J., Ding X., Wu D., Li X., He X., Wu Q. Microstructure analysis of carbon-fiber-reinforced polymer laminates subjected to self-heating and fatigue strengthening under tension-tension fatigue loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2024. DOI: 10.1177/07316844241259104

8. Nicholas T. High cycle fatigue. A mechanics of materials perspective. Elsevier Science, 2006, 641 p.

9. Bond I.P. Fatigue life prediction for GRP subjected to variable amplitude loading. *Composites Part A*, 1999, vol. 30, no. 8, pp. 961-970. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00011-1

10. Caprino G., Giorleo G. Fatigue lifetime of glass fabric/epoxy composites. *Composites Part A*, 1999, vol. 30, no. 3, pp. 299-304. DOI: 10.1016/S1359-835X(98)00124-9

11. Hwang W., Han K.S. Fatigue of composites-fatigue modulus concept and life Prediction. *Journal of Composite Materials*, 1986, vol. 20, no. 2, pp. 154-165. DOI: 10.1177/002199838602000020

12. Shokrieh M.M., Taheri-Behrooz F. Progressive fatigue damage modeling of cross-ply laminates, I: modeling strategy. *Journal of Composite Materials*, 2010, vol. 44, no. 10, pp. 1217-1231. DOI: 10.1177/0021998309351604

13. Van Paepegem W., Degrieck J. Experimental setup for and numerical modelling of bending fatigue experiments on plain-woven glass/epoxy composites. *Composite Structures*, 2001, vol. 51, no. 1, pp. 1-8. DOI: 10.1016/S0263-8223(00)00092-1

14. Nikishkov Y., Makeev A., Seon G. Progressive fatigue damage simulation method for composites. *International Journal of Fatigue*, 2013, vol. 48, pp. 266-279. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.11.005

15. Vassilopoulos A.P. Fatigue behavior and life prediction of wind turbine blade composite materials. *Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials*, 2023, pp. 287-340. DOI: 10.1016/B978-0-08-103007-3.00005-7

16. Sun Y., Zhang Y., Yang C., Liu Y., Chen X., Yao L., Gao W. Prediction on fatigue properties of the plain weave composite under broadband random loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2021, vol. 44, no. 6, pp. 1515-1532. DOI: 10.1111/ffe.13445

17. Liu S., Liu Z., Zhou K., Liu Y., Xiong X., Liao T., Ye N. An enhanced fatigue damage model based on strength degradation of composite materials. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2024. DOI: 10.1111/ffe.14418

18. Ma Q., Song J., Tang T., An Z. A model of strength degradation for glass fiber reinforced polymer composite laminates under fatigue loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, vol. 236, no. 14, pp. 7953-7961. DOI: 10.1177/09544062221079172

19. Amraei J., Rogala T., Katunin A., Premanand A., Kokot G., Wachla D., Kuś W., Bilewicz M., Khatri B., Balle F. Thermomechanical fatigue behavior of CF/PEKK composite under low and ultrasonic frequencies. *Composites Part B: Engineering*, 2024, vol. 281, art. no. 111539. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111539

20. Gao J., Zhu P., Yuan Y., Wu Z., Xu R. Strength and stiffness degradation modeling and fatigue life prediction of composite materials based on a unified fatigue damage model. *Engineering Failure Analysis*, 2022, vol. 137, art. no. 106290. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106290

21. Mirzaei A.H., Shokrieh M.M. Progressive fatigue damage modeling of laminated composites using strain-based failure criteria. *Journal of Composite Materials*. 2024. vol. 58, no. 4, pp. 519-531. DOI: 10.1177/00219983241227098

22. Ganesan C., Joanna P.S., Singh D. Fatigue life modeling of FRP composites: A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 46, pp. 555-561. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.119

23. Pratim Das P., Elenchezhian M., Vadlamudi V., Raihan R. Artificial Intelligence Assisted Residual Strength and Life Prediction of Fiber Reinforced Polymer Composites. *AIAA SciTech Forum and Exposition*,b2023. DOI: 10.2514/6.2023-0773

24. Vanhari A.K., Fagan E., Goggins J. Modelling the residual strength degradation in composite materials without using residual strength tests. *Journal of Composite Materials*, 2023, vol. 57, no. 16, pp. 2527-2542. DOI: 10.1177/00219983231175978

25. D'Amore A., Grassia L. A method to predict the fatigue life and the residual strength of composite materials subjected to variable amplitude (VA) loadings. *Composite Structures*, 2019, vol. 228, art. no. 111338. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111338

26. Wil'deman V.E., Staroverov O.A., Lobanov D.S. Diagram and parameters of fatigue sensitivity for evaluating the residual strength of layered GFRP composites after preliminary cyclic loadings. *Mechanics of Composite Materials*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 313-320. DOI: 10.1007/s11029-018-9741-9

27. Wildemann V.E., Staroverov O.A., Tretyakov M.P. Deformation and failure of polymer composite materials under preliminary cyclic and low-velocity impacts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 747, no. 1, art. no. 012034. DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012034

28. OOO "Kompozit izdeliia" [Composite Products LLC], available at: https://cp-vm.ru/production (accessed 12 August 2024).

29. Epsilontech, available at: https://www.epsilontech.com/products/epsilon-one-advantages (accessed 12 August 2024).

30. Vallen, available at: https://www.vallen.de (accessed 12 August 2024).

31. Arumugam V., Saravanakumar K., Santulli C. Damage characterization of stiffened glass-epoxy laminates under tensile loading with acoustic emission monitoring. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 147, pp. 22-32. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.04.031

32. Oskouei A.R., Heidary H., Ahmadi M., Farajpur M. Unsupervised acoustic emission data clustering for the analysis of damage mechanisms in glass/polyester composites. *Materials & Design*, 2012, vol. 37, pp. 416-422. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.01.018

33. Shkuratnik V.L., Filimonov Iu.L., Kuchurin S.V. Akustoemissionnyi effekt pamiati pri tsiklicheskom odnoosnom nagruzhenii obraztsov uglia [Acoustic emission memory effect under cyclic uniaxial loading of coal samples]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaia fizika*, 2006, vol. 47, no. 2, pp. 103-109.

34. Salita D.S., Poliakov V.V. Narushenie effekta Kaizera pri nagruzhenii evtekticheskikh splavov sictemy Pb-Sn [Violation of the Kaiser effect under loading of eutectic alloys of the Pb−Sn system]. *Pis'ma v ZhTF*, 2020, vol. 46, no. 18, pp. 12-14. DOI: 10.21883/PJTF.2020.18.49994.18278

35. Panteleev I.A., Mubassarova V.A., Zaitsev A.V. et al. Effekt Kaizera pri mnogoosnom neproportsional'nom szhatii peschanika [Kaiser effect under multiaxial disproportionate compression of sandstone]. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki*, 2020, vol. 495, pp. 63-67. DOI: 10.31857/S2686740020060152

Sapozhnikov S.B., Zhikharev M.V., Zubova E.M. Ultra-low cycle three-point bending fatigue of glass fabric reinforced plastic. *Composite Structures*, 2022, vol. 286, 115293 p. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115293

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №23-19-20039).
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Funding. The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 23-19-20039).
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The contribution of the authors is equivalent.