Вильдеман В.Э., Староверов О.А., Мугатаров А.И., Кучуков А.М. Усталостная чувствительность стеклопластиков в условиях пропорционального циклического растяжения с кручением // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 6. С. 29–40. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.03

Wildemann V.E., Staroverov O.A., Mugatarov A.I., Kuchukov A.M. Fatigue sensitivity of GFRP under proportional cyclic tension with torsion. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2023, no. 6, pp. 29-40. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.03

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 6, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.03
УДК 539.3

УСТАЛОСТНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ В УСЛОВИЯХ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО РАСТЯЖЕНИЯ С КРУЧЕНИЕМ

В.Э. Вильдеман, О.А. Староверов, А.И. Мугатаров, А.М. Кучуков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 07 мая 2023 г.
Одобрена: 21 октября 2023 г.
Принята к публикации:
31 ноября 2023 г.

Ключевые слова:

композит, трубчатый образец, накопление повреждений, усталостная чувствительность, многоосное нагружение, остаточная жесткость.

АННОТАЦИЯ

Изготовленные из композиционных материалов конструкции в процессе эксплуатации подвержены циклическим, динамическим, вибрационным и другим воздействиям, приводящим к накоплению повреждений и постепенной деградации механических характеристик. В связи с этим актуальным является проведение экспериментальных и теоретических исследований влияния комбинированных воздействий на изменение механических характеристик материала. При этом необходим учет реализуемого в конструкциях сложного напряженного состояния.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию закономерностей деградации жесткостных характеристик стеклопластиковых трубчатых образцов, полученных непрерывной намоткой, по мере накопления усталостных повреждений вследствие двухосного пропорционального циклического воздействия. Рассмотрены методические аспекты реализации двухосного нагружения. Проведены квазистатические и усталостные испытания образцов с различными углами намотки при одноосном растяжении, кручении, а также пропорциональном растяжении с кручением с тремя различными соотношениями нормальной и касательной компонент тензора напряжений. Выявлено наличие ниспадающего участка на диаграммах нагружения при кручении. Построены поверхности прочности. С использованием ранее разработанной авторами аппроксимации кривых усталостной чувствительности проведена обработка экспериментальных данных о снижении динамических модулей упругости по мере роста числа циклов воздействия. Отмечена высокая описательная способность разработанной модели и низкие значения коэффициентов вариации рассчитанных параметров. Выявлены немонотонные зависимости параметров модели от вида напряженного состояния. Обнаружено значительное влияние угла намотки на усталостную чувствительность композита. Сделан вывод о необходимости учета возникающего вследствие усталостных повреждений снижения механических характеристик материалов в расчетах конструкций и рациональности проведения дальнейших экспериментальных исследований для верификации ранее разработанных моделей.

© ПНИПУ

© **Вильдеман Валерий Эрвинович** – д.ф.-м.н., проф., зав. каф. экспериментальной механики и конструкционного материаловедения, директор Центра экспериментальной механики, e-mail: wildemann@pstu.ru, ID: 0000-0002-6240-4022.
Староверов Олег Александрович – к.т.н., с.н.с. Центра экспериментальной механики, e-mail: cem_staroverov@mail.ru, ID: 0000-0001-6095-0962.
Мугатаров Артур Ильдарович – инж.-исслед. Центра экспериментальной механики, e-mail: cem_mugatarov@mail.ru, ID: 0000-0002-2229-8181.
Кучуков Артур Марсович – инж.-исслед. Центра экспериментальной механики, e-mail: artur.kuchukov.59@mail.ru, ID: 0000-0001-9058-879X.

Valeriy E. Wildemann – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Experimental Mechanics and Structural Materials Science, Director of the Center of Experimental Mechanics, e-mail: wildemann@pstu.ru, ID: 0000-0002-6240-4022.
Oleg A. Staroverov – PhD in Technical Sciences, Senior Researcher of the Center of Experimental Mechanics, e-mail: cem_staroverov@mail.ru, ID: 0000-0001-6095-0962.
Artur I. Mugatarov – Research Engineer of the Center of Experimental Mechanics, e-mail: cem_mugatarov@mail.ru, ID: 0000-0002-2229-8181.
Artur M. Kuchukov – Research Engineer of the Center of Experimental Mechanics, e-mail: artur.kuchukov.59@mail.ru, ID: 0000-0001-9058-879X.

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)

FATIGUE SENSITIVITY OF GFRP UNDER PROPORTIONAL CYCLIC TENSION WITH TORSION

V.E. Wildemann, O.A. Staroverov, A.I. Mugatarov, A.M. Kuchukov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 07 May 2023
Approved: 21 October 2023
Accepted for publication:
31 November 2023

Keywords:

composite, tubular specimen, damage accumulation, fatigue sensitivity, multiaxial loading, residual stiffness.

ABSTRACT

The constructions made of composite materials are subjected to cyclic, dynamic, vibration and other loads in operations related to damage accumulation and degradation of progressive mechanical characteristics. Thus it is important to conduct experimental and theoretical studies of the combined impact effects on the change in the mechanical characteristics of the material. In this case, it is necessary to take into account the complex stress state realized in the structures.

This work deals with an experimental study of the degradation patterns of the stiffness characteristics of fiberglass tubular specimens obtained by continuous winding as fatigue damage accumulates due to biaxial proportional cyclic loading. The methodological aspects of realization of biaxial loading are considered. Quasi-static and fatigue tests were performed on specimens with different winding angles under uniaxial tension, torsion, and proportional tension, i.e. torsion with three different ratios of the normal and shear stress tensor components. The presence of a decreasing region in the torsional load diagrams has been revealed. Strength surfaces are constructed. By using the approximation of the fatigue sensitivity curves previously developed by the authors, we process the experimental data on the decrease in the dynamic modulus of elasticity as the number of cycles of exposure increases. The high descriptive ability of the developed model and the low values of the variation coefficients of the calculated parameters were noted. Nonmonotonic dependences of model parameters on the type of stress state are revealed. A significant influence of the winding angle on the fatigue sensitivity of the composite has been found. We have made the conclusion about necessity of taking into account the decrease of mechanical characteristics of materials in calculations of constructions and rationality of further experimental researches for verification of earlier developed models.

© PNRPU

Введение

Использование современных полимерных композиционных материалов вместо традиционных металлов и сплавов в ответственных деталях и узлах конструкций позволяет решать проблему снижения массы при сохранении высокого уровня физико-механических характеристик, что наиболее актуально для гражданской авиации, судостроения, строительства, автомобилестроения, а также нефтегазохимической промышленности [1–10]. При этом важно учитывать, что каждое динамическое, циклическое либо вибрационное воздействие, даже малой интенсивности и продолжительности, может привести к существенному изменению механических характеристик материала, что, в свою очередь, вызывает значительное снижение ресурса изделий из композитов. Данные особенности должны быть учтены при проектировании конструкций.

Большое число работ посвящено изучению закономерностей изменения прочностных и жесткостных характеристик полимерных композиционных материалов, подверженных одноосным циклическим воздействиям [11–15]. Однако в подверженных циклическим воздействиям конструкциях чаще всего реализуется сложное напряженно-деформированное состояние, характеризующееся различными соотношениями амплитуд компонент тензора напряжений [16–20], углами сдвига фаз между модами нагружения [21], соотношениями частот [21], средними напряжениями в цикле [22–25]. Следовательно, необходимо исследовать влияние поврежденности, накопленной вследствие многоосной усталости, на изменение механических характеристик материала.

Современные испытательные системы позволяют реализовывать многоосное циклическое воздействие путем нагружения крестообразных образцов по двум ортогональным осям, растяжения трубчатых образцов при наличии внутреннего давления, совместного кручения с изгибом трубчатых образцов, а также совместного растяжения – сжатия с кручением [26–37]. Результаты исследований, посвященных изучению деградации механических характеристик конструкционных полимерных композитов в условиях двухосных циклических воздействий, представлены в работах [38–40]. Отмечена проблема надежного крепления трубчатых образцов в захватах испытательных систем [41].

Полученные экспериментально зависимости остаточных прочностных и жесткостных характеристик материала от продолжительности предварительного циклического воздействия представимы в виде так называемых диаграмм усталостной чувствительности [42–45]. В некоторых случаях кривая усталостной чувствительности представляется в виде зависимости динамического модуля упругости от числа циклов воздействия в относительных координатах [42; 45]. Как правило, получаемые диаграммы имеют три характерные стадии: I – стадия инициации, характеризующаяся быстрым снижением остаточной прочности и жесткости при малой продолжительности циклического воздействия; II – протяженная

(≈60–85 % от долговечности) стадия стабилизации, соответствующая медленному снижению остаточных механических характеристик; III – стадия обострения, на которой происходит резкое снижение механических характеристик, приводящее к макроразрушению образца. Границы перехода между данными стадиями могут быть определены по точкам, в которых угол наклона касательной к кривой усталостной чувствительности достигает значения, характерного для данного класса материала [44].

Существуют различные модели, позволяющие аппроксимировать полученные экспериментально диаграммы усталостной чувствительности. В частности, одна из широко используемых моделей была предложена Мао и Махадеваном [46]; в ней аппроксимация проводится двумя степенными функциями. Авторами данной работы было отмечено, что вид кривых усталостной чувствительности напоминает интегральные функции распределения вероятности. На основе этого были разработаны две модели, основанные на использовании закона распределения Вейбулла и бета-распределения [42]. Верификация перечисленных трех моделей была проведена в работах [45; 47], наилучшей описательной способностью обладала аппроксимация, соответствующая интегральной функции распределения вероятности Вейбулла.

Данная работа посвящена исследованию закономерностей деградации жесткостных характеристик композитных трубок, полученных методом непрерывной продольно-поперечной намотки, по мере накопления повреждений вследствие двухосного пропорционального циклического растяжения с кручением. Целью работы является получение новых экспериментальных данных и верификация ранее разработанной модели усталостной чувствительности с выявлением связи между параметрами аппроксимации и видом сложного напряженного состояния в цикле нагружения.

1. Методика проведения испытаний

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены тонкостенные стеклопластиковые трубчатые образцы, полученные методом непрерывной продольно-поперечной намотки, на основе стекловолокна ЕС 1200 текс и эпоксидной смолы KER 828 холодного отверждения. Рассмотрены два варианта угла намотки: 80° и 85°. Длина образцов составляла 140 мм при длине рабочей части $L \approx 60$ мм, внутренний диаметр d = 25,0 мм для образцов с углом намотки 80° и d = 25,4 мм – с углом 85°, наружный диаметр $D \approx 30$ мм.

Испытания образцов проведены с использованием сервогидравлической системы Instron 8802 (максимальная нагрузка 100 кН, максимальный крутящий момент 1000 Н·м), оснащенной контроллером FastTrack и программным обеспечением WaveMatrix. Образцы устанавливались в цанговые захваты, для предотвращения смятия торцов на всю длину захватных частей были установлены цилиндрические стальные заглушки. Изображения испытательной системы, цанговых захватов и стальной заглушки приведены на рис. 1. При установке образца давление в контуре сервогидравлических захватов постепенно повышалось с 50 до 200 бар. С целью предотвращения деформирования образцов в процессе закрепления значения осевой нагрузки и крутящего момента удерживались на нулевом уровне.

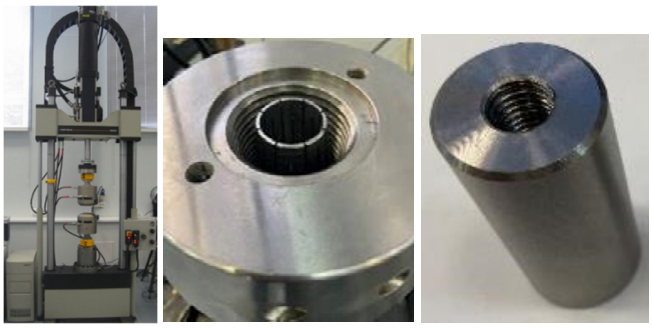


Рис. 1. Фотографии (слева направо): испытательной системы Instron 8802, цангового захвата, стальной заглушки

Fig. 1. Photos of (from left to right): Instron 8802 testing system, collet grip, cylindrical steel plug

Рассмотрены методические аспекты крепления образцов в цанговых захватах для предотвращения проскальзывания. Отработаны три варианта подготовки захватных частей: 1 – без специальной подготовки; 2 – установка прокладки в виде наждачной бумаги; 3 – вклеивание в алюминиевые тонкостенные гильзы. Использовался эпоксидный клей марки ЦМК-5, после вклеивания образцы с гильзами выдерживались в печи при температуре 80 °С в течение 3 ч.

Проведены испытания образцов на квазистатические растяжение и кручение. Скорость перемещения траверсы испытательной системы в процессе растяжения составляла 2 мм/мин, скорость вращения при кручении – 20 °/мин. Выявлено, что отсутствие подготовки захватной части приводило к проскальзыванию и разрушению образца под захватом испытательной системы. Наждачная бумага позволила избежать проскальзывания при кручении, разрушение происходило в рабочей части, однако при растяжении происходило проскальзывание и разрушение образца на границе цанги. Вклеивание образцов в алюминиевые гильзы позволило избежать проскальзывания образцов во время испытаний. Отмечено, что при использовании гильз с толщиной стенки менее 1 мм разрушение происходило на границе цанги, с толщиной стенки 1,5 мм – в рабочей части образца. В связи с этим рекомендуется при проведении испытаний композитных трубок вклеивать их в металлические гильзы с толщиной стенки не менее 1,5 мм. Фотографии разрушенных образцов с различными вариантами подготовки захватных частей представлены на рис. 2.

Скорость перемещения подвижного захвата испытательной системы при квазистатическом испытании на одноосное растяжение (Р) составляла 2 мм/мин. Режиму нагружения «Пропорциональный 1» (ПЦ1) соответствовала скорость перемещения траверсы 1 мм/мин, режиму

«Пропорциональный 2» (ПЦ2) – 2 мм/мин, режиму «Пропорциональный 3» (ПЦ3) – 4 мм/мин. В испытании на кручение (К), а также во всех режимах пропорционального нагружения скорость вращения захвата составляла 20 °/мин. В процессе квазистатических испытаний проводилась запись перемещения u, осевой нагрузки P, угла закручивания φ и крутящего момента M. С их помощью проводилось построение диаграмм деформирования в виде зависимости нормальных напряжений σ от осевой деформации ε и касательных напряжений τ от угла сдвига γ, которые рассчитывались по формулам:

$$\sigma = \frac{4P}{\pi\left(D^2 - d^2\right)};\ \varepsilon = \frac{u}{L};\ \tau = \frac{16DM}{\pi\left(D^4 - d^4\right)};\ \gamma = \frac{\varphi D}{2L\left(1+\varepsilon\right)}. \quad (1)$$



Рис. 2. Фотографии разрушенных образцов (слева направо): без предварительной подготовки захватной части; с наждачной бумагой; с алюминиевыми гильзами, толщина стенки менее 1 мм; с алюминиевыми гильзами, толщина стенки ≈1,5 мм

Fig. 2. Photos of fractured samples, which gripping parts were (from left to right): without a preliminary preparation; wrapped in sandpaper; glued into aluminum sleeves less than 1 mm thick; glued into aluminum sleeves ≈1.5 mm thick

Для каждого режима нагружения определялись средние значения максимальных нормальных напряжений σ_{max} и касательных напряжений τ_{max}. Амплитуды и средние значения нормальных и касательных напряжений подбирались таким образом, чтобы максимальные значения напряжений в цикле соответствовали половине σ_{max} и τ_{max}, а коэффициент асимметрии был равен 0,1. Частота нагружения во всех случаях составляла 1 Гц. Для каждого из режимов нагружения было испытано по 2–3 образца. В процессе циклического нагружения записывались пиковые значения нагрузки, перемещения, угла закручивания и крутящего момента каждый первый, десятый и сотый цикл. Полученные данные были использованы для вычисления динамических модулей упругости E' и G' в N-м цикле:

$$E' = \frac{P_{max} - P_{min}}{u_{max} - u_{min}} \frac{4L}{\pi\left(D^2 - d^2\right)};$$
$$G' = \frac{M_{max} - M_{min}}{\varphi_{max} - \varphi_{min}} \frac{32L}{\pi\left(D^4 - d^4\right)}. \quad (2)$$

Если обозначить динамический модуль Юнга за первый цикл как E_0, динамический модуль сдвига за первый цикл как G_0, то можно рассчитать коэффициенты усталостной чувствительности K_E и K_G, отражающие падение жесткости материала по мере накопления усталостных повреждений, а также соответствующее им относительное значение предварительного циклического воздействия n:

$$K_E = \frac{E'}{E_0};\ K_G = \frac{G'}{G_0};\ n = \frac{N}{N_0}. \quad (3)$$

Получены экспериментально зависимости $K_E(n)$ и $K_G(n)$ аппроксимируются разработанной авторами ранее моделью, в которой используется интегральная функция распределения вероятности Вейбулла. Границы стадий накопления повреждений определяются по точкам, где скорость роста поврежденности ω'_E превышает пороговое значение (0,3 для графиков снижения динамического модуля Юнга и 0,5 для графиков снижения динамического модуля сдвига). Зависимости $K_E(n)$ и $\omega'_E(n)$ имеют вид

$$K_E = 1 - \lambda_E\left(-\ln\left(1-n\right)\right)^{\frac{1}{\kappa_E}};$$
$$\omega'_E = \frac{\lambda_E}{\kappa_E}\left(-\ln\left(1-n\right)\right)^{\frac{1}{\kappa_E}-1}\frac{1}{1-n}. \quad (4)$$

Параметры модели κ_E и λ_E определяют форму и масштаб кривой усталостной чувствительности соответственно и определяются численно методом наименьших квадратов.

Представленная методика проведения испытаний, подготовки захватных частей стеклопластиковых тонкостенных трубчатых образцов и интерпретации получаемых экспериментальных данных позволяют исследовать закономерности изменения остаточных механических характеристик полимерных композитов в условиях двухосных циклических воздействий.

2. Результаты статических испытаний

В результате проведения квазистатических испытаний на одноосное растяжение, кручение и пропорциональное растяжение с кручением стеклопластиковых трубчатых образцов с углами намотки 80° и 85° получены зависимости нагрузки от перемещения и крутящего момента от угла закручивания. На их основе с использованием формулы (1) построены диаграммы деформирования при растяжении и при сдвиге для различных режимов нагружения (рис. 3).

При одноосном растяжении образцов с углом намотки 85° поведение материала является практически упругохрупким. Со снижением угла намотки до 80° происходит качественное изменение характера деформирования при растяжении, появляется протяженная стадия неупругого упрочнения. При пропорциональном нагружении на диаграммах деформирования при растяжении можно отметить наличие закритической стадии деформирования [48], для образцов с углом намотки 80° она является более протяженной. При одноосном кручении

для обеих групп образцов также выявлено наличие ниспадающего участка диаграммы деформирования. Обнаружено увеличение максимального значения нормальных напряжений σ_{max} и снижение максимального значения касательных напряжений τ_{max} с ростом скорости перемещения траверсы. Можно сделать вывод о значительной чувствительности материала к сложному напряженному состоянию для обоих углов намотки.

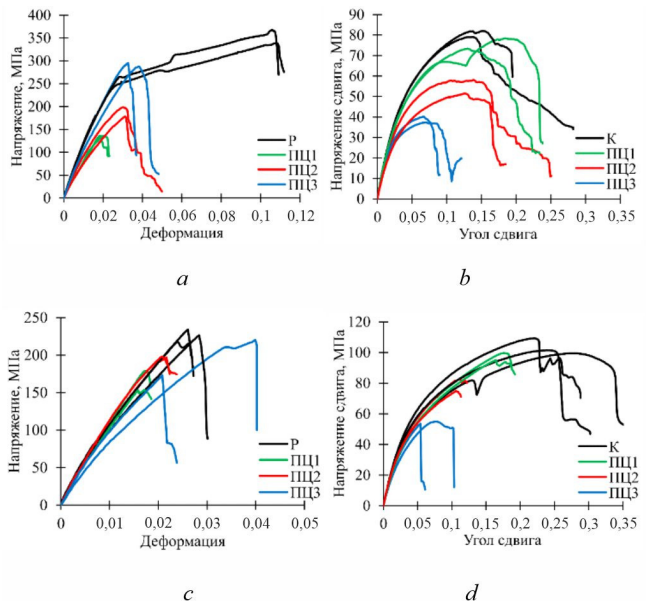


Рис. 3. Диаграммы деформирования: *a*, *b* – для образцов с углом намотки 80°, *c*, *d* – для образцов с углом намотки 85°, *a*, *c* – при растяжении, *b*, *d* – при сдвиге

Fig. 3. Stress–strain curves: *a*, *b* – for the samples with winding angle of 80°, *c*, *d* – for the samples with winding angle of 85°, *a*, *c* – during tension, *b*, *d* during torsion

Полученные экспериментально максимальные значения касательных и нормальных напряжений могут быть аппроксимированы выражением, задающим критерий разрушения, аналогичный критерию Хашина для разрушения матрицы при растяжении:

$$\left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{0max}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{max}}{\tau_{0max}}\right)^2 = 1. \qquad (5)$$

Здесь σ_{0max} и τ_{0max} соответствуют случаям разрушения при одноосном растяжении и при чистом сдвиге. Данные параметры были подобраны численно методом наименьших квадратов и составили: σ_{0max}=342,5 МПа и τ_{0max}=79,3 МПа для угла намотки 80° и σ_{0max}=242,0 МПа и τ_{0max}=113,8 МПа для угла намотки 85°. На рис. 4 приведены полученные экспериментально максимальные значения нормальных и касательных напряжений, их средние значения для различных режимов нагружения, а также аппроксимация по формуле (5).

Отмечено, что используемая аппроксимация хорошо соответствует экспериментальным данным. Выявлено, что рост угла намотки с 80° до 85° приводит к существенному изменению параметров σ_{0max} (уменьшение на 29 %) и τ_{0max} (увеличение на 44 %). Сделан вывод о значительном влиянии схемы на прочность рассматриваемых композитов. Кроме этого, представляется целесообразной модификация выражения (5) для учета угла намотки [49] и улучшения соответствия получаемых поверхностей прочности экспериментальным данным.

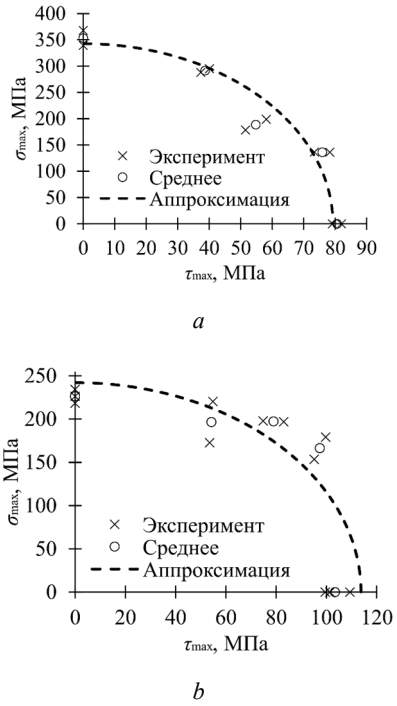


Рис. 4. Максимальные значения напряжений при пропорциональном двухосном нагружении и их аппроксимация: *a* – для образцов с углом намотки 80°; *b* – с углом намотки 85°

Fig. 4. Maximum stress values under proportional biaxial loading and data approximation: *a* – for the samples with winding angle of 80°; *b* – with winding angle of 85°

3. Результаты усталостных испытаний

В результате проведения усталостных испытаний получены значения долговечности стеклопластиковых трубчатых образцов с различными схемами армирования при различных вариантах пропорционального циклического воздействия. Данные приведены в таблице.

Результаты усталостных испытаний
(средние значения долговечности)

Fatigue tests results (average durability values)

Угол намотки	Усталостная долговечность *N*, циклов				
	Режим нагружения				
	P	K	ПЦ1	ПЦ2	ПЦ3
80°	7598 ± 1270	97133 ± 27930	2325 ± 552	12502 ± 1116	4347 ± 1652
85°	29519 ± 20848	21456 ± 14765	2466 ± 1374	13429 ± 6360	17650 ± 1481

Во всех случаях наблюдались значительные коэффициенты вариации значений долговечности. Выявлено, что при угле намотки 85° долговечность при одноосном

циклическом растяжении и циклическом кручении является схожей, однако при снижении угла намотки до 80° происходит значительное снижение долговечности при циклическом растяжении и повышение долговечности при кручении. Отмечено существенное влияние вида напряженного состояния в цикле нагружения на долговечность. Выявлено, что наиболее опасным вариантом циклического нагружения для обеих групп образцов являлся режим «Пропорциональный 1», при этом изменение угла намотки слабо повлияло на значение долговечности. Обнаружено, что связь долговечности с величиной соотношения между амплитудами касательной и нормальной составляющих тензора напряжений является немонотонной. Требуется проведение дальнейших испытаний для уточнения характера данной зависимости.

Для каждого циклического испытания проведена обработка полученных экспериментально в соответствии с формулами (2)–(4) зависимостей коэффициентов усталостной чувствительности от относительного значения предварительного циклического воздействия. Пример полученных кривых усталостной чувствительности для образца с углом намотки 80° при циклическом нагружении в режиме «Пропорциональный 2», а также соответствующих им графиков скорости роста поврежденности представлен на рис. 5. На рисунке вертикальные пунктирные линии соответствуют границам стадий накопления повреждений, горизонтальная пунктирная линия – величине скорости роста поврежденности, при которой происходит смена стадии.

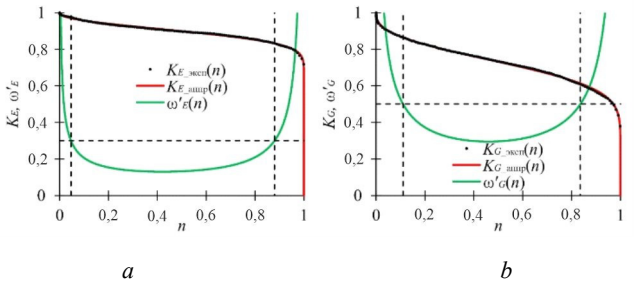


Рис. 5. Пример кривых усталостной чувствительности и соответствующих функций скорости роста поврежденности: *a* – для динамического модуля Юнга; *b* – для модуля сдвига

Fig. 5. Example of fatigue sensitivity curves and corresponding damage function growth rate: *a* – for the dynamic Young's modulus; *b* – for the shear modulus

Во всех случаях аппроксимации обладали высокой описательной способностью несмотря на наличие только двух параметров, коэффициент детерминации R^2 был не ниже 0,955. В связи с этим сделан вывод о рациональности использования предложенной модели для анализа характера изменения жесткостных характеристик композитов по мере накопления усталостных повреждений.

Связь между определяемыми параметрами аппроксимации и видом сложного напряженного состояния может быть выражена в виде зависимостей параметров κ_E и λ_E от величины η, рассчитываемой по формуле:

$$\eta = \arctan\left(\frac{\tau_a}{\sigma_a}\frac{\sigma_{0\max}}{\tau_{0\max}}\right), \qquad (6)$$

где σ_a и τ_a – амплитуды нормальных и касательных напряжений в цикле. На рис. 6 продемонстрированы полученные зависимости $\kappa_E(\eta)$ и $\lambda_E(\eta)$.

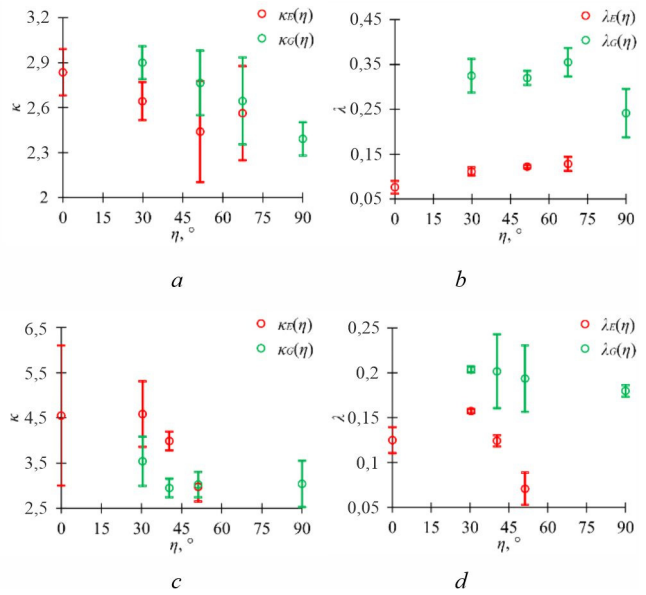


Рис. 6. Зависимости параметров аппроксимации от вида напряженного состояния: *a*, *c* – κ(η); *b*, *d* – λ(η); *a*, *b* – угол намотки 80°; *c*, *d* – угол намотки 85°

Fig. 6. Dependences of approximation parameters of stress state: *a*, *c* – κ(η); *b*, *d* – λ(η); *a*, *b* winding angle of 80°; *c*, *d* winding angle of 85°

Выявлено, что коэффициент вариации значений параметров аппроксимации для одного режима нагружения и одного угла намотки находится в диапазоне 3–26 % и лишь в одном случае достигает 34 %. Это подтверждает, что параметры κ и λ достаточно точно отражают чувствительность композитов к усталости, следовательно, могут быть использованы для определения механического поведения материала в условиях циклического нагружения.

Отмечено, что в некоторых случаях параметры аппроксимации кривых усталостной чувствительности слабо зависят от вида сложного напряженного состояния (например, $\kappa_G(\eta)$ и $\lambda_G(\eta)$ для образцов с углом намотки 85°). В других случаях полученные зависимости являются монотонно убывающими (для образцов с углом намотки 80°) либо возрастающими ($\kappa_G(\eta)$ и $\lambda_E(\eta)$ для образцов с углом намотки 85° соответственно). Также присутствуют немонотонные зависимости ($\lambda_E(\eta)$ для образцов с углом намотки 85°). На основе этого можно сделать вывод о различном характере влияния вида напряженного состояния при пропорциональных циклических воздействиях на параметры аппроксимаций кривых усталостной чувствительности. Необходимо проведение дальнейших исследований для уточнения полученных зависимостей от вида сложного напряженного состояния в цикле нагружения.

На рис. 7 представлены построенные для средних значений параметров аппроксимации в каждом режиме нагружения кривые усталостной чувствительности и соответствующие графики скорости роста поврежденности с границами стадий накопления повреждений.

Для сравнения различных режимов циклического воздействия целесообразно ввести такой параметр, как среднюю скорость снижения коэффициента усталостной чувствительности на стадии стабилизации:

$$\psi_E = \frac{K_E(n_1) - K_E(n_2)}{n_2 - n_1}. \quad (7)$$

Здесь n_1 и n_2 – левая и правая граница стадии стабилизации, соответственно.

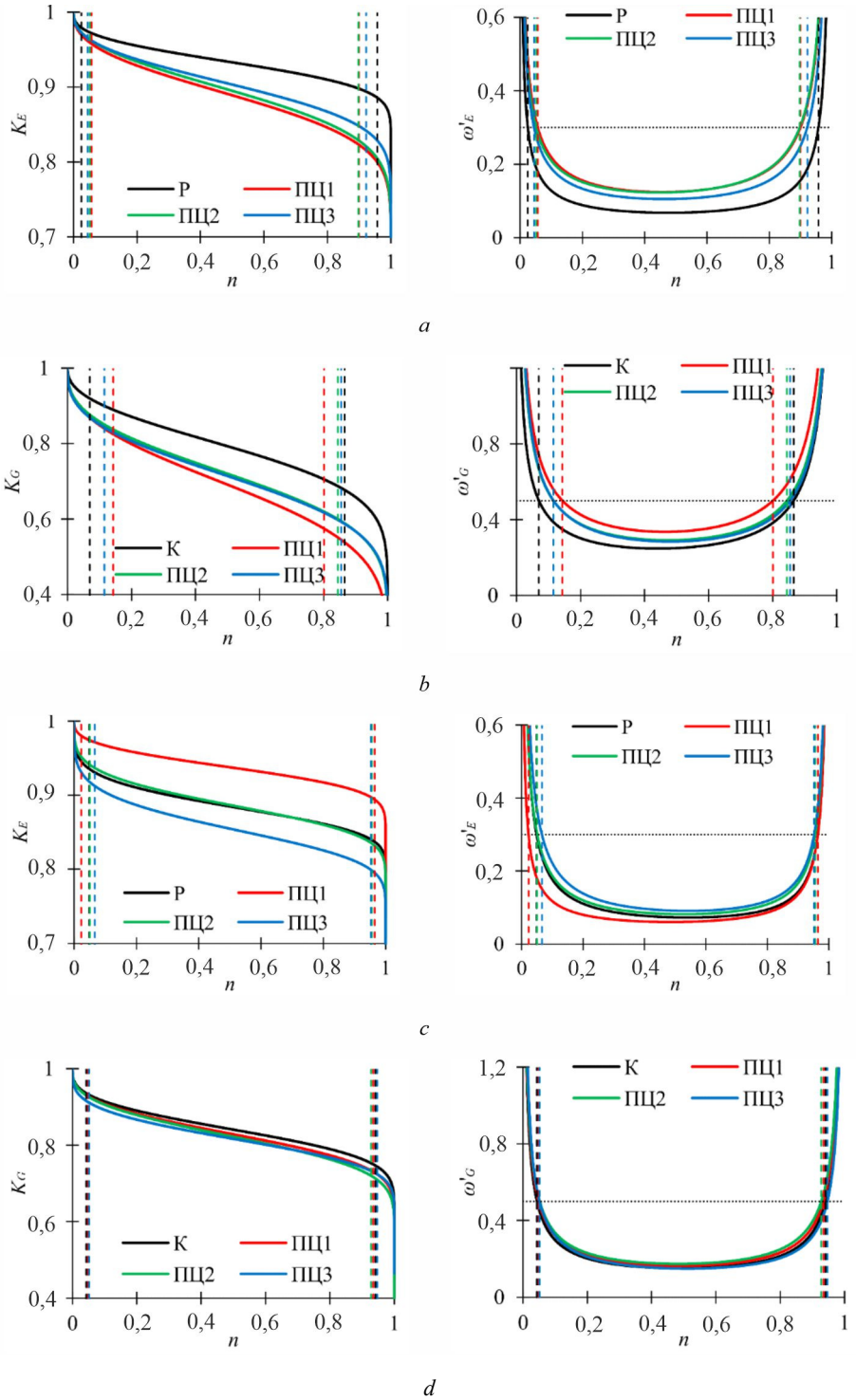


Рис. 7. Осредненные кривые усталостной чувствительности (слева) и соответствующие графики скорости роста поврежденности (справа): *a* – $K_E(n)$, угол намотки 80°; *b* – $K_G(n)$, угол намотки 80°; *c* – $K_E(n)$, угол намотки 85°; *d* – $K_G(n)$, угол намотки 85°

Fig. 7. Average fatigue sensitivity curves (left side) and corresponding damage growth rate function (right side): *a* – $K_E(n)$, winding angle of 80°; *b* – $K_G(n)$, winding angle of 80°; *c* – $K_E(n)$, winding angle of 85°; *d* – $K_G(n)$, winding angle of 85°

Выявлено, что для образцов с углом намотки 80° по мере роста касательной составляющей тензора напряжений наблюдается постепенное повышение скорости снижения динамического модуля Юнга (параметр ψ_E вырос с 0,10 до 0,16 для режимов одноосного растяжения и «Пропорциональный 1»), сопровождающееся уменьшением продолжительности стадии стабилизации (на ≈10 %). Иные результаты наблюдались для динамического модуля сдвига: наименьшая скорость снижения коэффициента усталостной чувствительности выявлена для чистого сдвига (ψ_G=0,305), наибольшая – для режима нагружения «Пропорциональный 1» (ψ_G=0,380), протяженность стадии стабилизации снизилась на ≈17 %. Кривые усталостной чувствительности для режимов нагружения «Пропорциональный 2» и «Пропорциональный 3» заняли промежуточное положение. Данная особенность может быть связана с более низкой долговечностью образцов в режиме «Пропорциональный 1» и иным характером накопления усталостных повреждений.

Повышение угла намотки с 80° до 85° привело к изменению характера влияния вида сложного напряженного состояния на вид кривых усталостной чувствительности. Так, наибольшая скорость снижения динамического модуля Юнга соответствовала режиму нагружения «Пропорциональный 3», наименьшая – режиму «Пропорциональный 1» (параметр ψ_E составил 0,127 до 0,091 соответственно). Протяженность стадии стабилизации изменилась при этом на ≈6 %. Кривые усталостной чувствительности при одноосном растяжении и режиме нагружения «Пропорциональный 2» заняли промежуточное положение. Кривые усталостной чувствительности, отражающие изменение динамического модуля сдвига, во всех случаях оказались близкими: параметр ψ_G составил 0,204–0,234, протяженность стадии стабилизации – около 0,88. Отмечено, что изменение угла намотки привело к снижению скорости изменения динамического модуля сдвига для всех режимов нагружения, при этом характер снижения динамического модуля Юнга остался схожим.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод о значительном влиянии соотношения между нормальными и касательными составляющими тензора напряжений при пропорциональном нагружении, а также угла намотки на усталостную чувствительность рассматриваемых композитных трубчатых образцов. Целесообразным является проведение дальнейших исследований для уточнения характера выявленных закономерностей.

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование усталостной чувствительности стеклопластиковых труб, полученных методом непрерывной продольно-поперечной намотки, к двухосному пропорциональному циклическому растяжению с кручением. Рассмотрены методические аспекты подготовки захватных частей образцов для предотвращения проскальзывания во время испытания. Для обеспечения надежного закрепления предложено вклеивать образцы в алюминиевые гильзы толщиной ≈1,5 мм. Результаты квазистатических испытаний на пропорциональное растяжение с кручением продемонстрировали значительную чувствительность материала к виду напряженно-деформированного состояния. Построены поверхности прочности, выявлено значительное влияние угла намотки на прочность композита при растяжении и сдвиге.

Выявлено существенное влияние вида сложного напряженного состояния на долговечность материала, определен наиболее опасный режим воздействия из рассмотренных. На основе ранее разработанной авторами модели проведена аппроксимация экспериментальных данных, отражающих снижение динамических модулей упругости по мере роста числа циклов воздействия. Вычислены параметры модели, выявлена их связь с режимом циклического воздействия и углом намотки. Отмечено, что в некоторых случаях полученные зависимости являются немонотонными.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод о рациональности и необходимости учета снижения жесткостных характеристик композитов, подверженных многоосным циклическим воздействиям.

Библиографический список

1. Luinge H., Warnet L.L. On an application of multi-material composite laminates in the aerospace sector // Advanced Composites and Hybrid Materials. – 2020. – Vol. 3. – P. 294–302. DOI: 10.1007/s42114-020-00163-3

2. Srinivasan V., Kunjiappan S., Palanisamy P. A brief review of carbon nanotube reinforced metal matrix composites for aerospace and defense applications // International nano letters. – 2021. – Vol. 11. – P. 321–345. DOI: 10.1007/s40089-021-00328-y

3. Alfa fiber-polyurethane composite as a thermal and acoustic insulation material for building applications / S. Sair, S. Mansouri, O. Tanane, Y. Abbound, A. El Bouari // SN Applied Sciences. – 2019. – Vol. 1. DOI: 10.1007/s42452-019-0685-z

4. Wang Z., Song K. Application of building block approach on crashworthiness design of composite vehicular structures // Fibers and Polymers. – 2022. – Vol. 23. – P. 1701–1712. DOI: 10.1007/s12221-022-4887-4

5. Композиционные материалы на основе поливинилпирролидона и фосфатов кальция для медицины / И.В. Фадеева, А.С Фомин, Г.А. Давыдова, И.И. Селезнева, Е.С. Трофимчук, С.М. Баринов // Материаловедение. – 2021. – № 1. – С. 31–36. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-1-31-36

6. Композиционные цементные материалы на основе сульфата и фосфата кальция для медицины / В.В. Смирнов, С.М. Баринов, М.А. Гольдберг, О.С. Антонова, Д.Р. Хайрутдинова // Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 483, № 2. – С. 162–165. DOI: 10.31857/S086956520003473-3

7. Samipour S.A., Khaliulin V.I., Batrakov V.V. Development of the technology of manufacturing aerospace composite tubular elements

by radial braiding // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2018. – Vol. 47. – P. 284–289. DOI: 10.3103/S1052618818030135

8. Incombustible, inorganic fiber-reinforced composites for shipbuilding / S. Backens, J. Unseld, N. Glück, A. Wolter // Lightweight Design worldwide. – 2019. – Vol. 12. – P. 38–43. DOI: 10.1007/s41777-019-0059-7

9. Биоразлагаемые наноструктурированные композиты для хирургии и регенеративной медицины / В.А. Демина, Н.Г. Седуш, Е.Н. Гончаров, С.В. Крашенинников, А.Е. Крупнин, Н.Г. Гончаров, С.Н. Чвалун // Российские нанотехнологии. – 2021. – Т. 16, № 1. – С. 4–22. DOI: 10.1134/S1992722321010040

10. Synthesis and applications of nano-MgO and composites for medicine, energy, and environmental remediation: a review / M. Chinthala, A. Balakrishnan, P. Venkataraman, R. Polagani, V.M. Gowtham // Environmental Chemistry Letters. – 2021. – Vol. 19. – P. 4415–4454. DOI: 10.1007/s10311-021-01299-4

11. Nadjafi M., Gholami P. Reliability study of notched composite laminates under uniaxial loading based on continuum damage mechanics approach // Iranian Journal of Science and Technology. – 2022. – Vol. 46. – P. 911–925. DOI: 10.1007/s40997-021-00458-w

12. Изменение межслоевой прочности и вязкости разрушения углерод-углеродного композиционного материала под действием циклических нагрузок / А.А. Степашкин, Д.Ю. Ожерелков, Ю.Б. Сазонов, А.А. Комиссаров, В.В. Мозалев // Материаловедение. – 2018. – № 6. – С. 37–43.

13. Стрижиус В.Е. Прогнозирование деградации остаточной прочности при циклическом нагружении слоистых композитов // Механика композитных материалов. – 2022. – Т. 58, № 4. – С. 757–770. DOI: 10.22364/mkm.58.4.06

14. Evaluation of the influence of preliminary low-velocity impacts on the residual fatigue life of CFRP composites / O. Staroverov, D. Lobanov, E. Strungar, E. Lunegova // International Journal of Structural Integrity. – 2023. – Vol. 14. – P. 44–56. DOI: 10.1108/IJSI-04-2022-0056

15. A multiaxial fatigue damage model based on constant life diagrams for polymer fiber-reinforced laminates / A. Elkin, V. Gaibel, D. Dzhurinskiy, I. Sergeichev // Polymers. – 2022. – Vol. 14. DOI: 10.3390/polym14224985

16. Influence of additional static stresses on biaxial low-cycle fatigue of 2024 aluminum alloy / A. Yankin, A. Lykova, A. Mugatarov, V. Wildemann, A. Ilinykh // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2022. – Vol. 16. – P. 180–193. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.62.13

17. Biaxial fatigue behavior of gradient structural purity titanium under in-phase and out-of-phase loading / Q. Wang, C. Xin, Q. Sun, L. Xiao, J. Sun // International Journal of Fatigue. – 2018. – Vol. 116. – P. 602–609. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.07.015

18. Zhang J., Shi X., Fei B. High cycle fatigue and fracture mode analysis of 2A12-T4 aluminum alloy under out-of-phase axial-torsion constant amplitude loading // International Journal of Fatigue. – 2012. – Vol. 38. – P. 144–154. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2011.12.017

19. Wang Y., Yao W. A multiaxial fatigue criterion for various metallic materials under proportional and nonproportional loading // International Journal of Fatigue. – 2006. – Vol. 28. – P. 401–408. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.07.007

20. Pejkowski L., Skibicki D., Seyda J. Stress-strain response and fatigue life of a material subjected to asynchronous loadings // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2028. DOI: 10.1063/1.5066406

21. Yankin A., Mugatarov A., Wildemann V. Influence of different loading paths on the multiaxial fatigue behavior of 2024 aluminum alloy under the same amplitude values of the second invariant of the stress deviator tensor // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2020. – Vol. 15. – P. 327–335. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.55.25

22. Skibicki D., Pejkowski L. Low-cycle multiaxial fatigue behaviour and fatigue life prediction for CuZn37 brass using the stress-strain models // International Journal of Fatigue. – 2017. – Vol. 102. – P. 18–36. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.04.011

23. Gates N.R., Fatemi A. On the consideration of normal and shear stress interaction in multiaxial fatigue damage analysis // International Journal of Fatigue. – 2017. – Vol. 100. – P. 322–336. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.03.042

24. Gu A., Luo Y., Xu B. Continuous condition monitoring of reinforced concrete using an active diagnosis method // Structural Health Monitoring. – 2016. – Vol. 15. – P. 104–111. DOI: 10.1177/1475921715624501

25. Papuga J., Halama R. Mean stress effect in multiaxial fatigue limit criteria // Archive of Applied Mechanics. – 2018. – P. 1–12. DOI: 10.1007/s00419-018-1421-7

26. Sines G. Failure of materials under combined repeated stresses with superimposed static stress // Washington. National Advisory Committee for Aeronautics. – 1955.

27. Strengthening of cruciform sample arms for large strains during biaxial stretching / G. Mitukiewicz, M. Głogowski, J. Stelmach, J. Leyko, Z. Dimitrova, D. Batory // Materials Today Communications. – 2019. – Vol. 21. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2019.100692.

28. Арутюнян А.Р. Критерий усталостной прочности композиционных материалов // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 488, № 5. – С. 488–492. – DOI: 10.31857/S0869-56524885488-492

29. Multiaxial fatigue experiments for elastomers based on true strain invariants / E. Le Mire, E. Verron, B. Huneau, N. Seller // Journal of Rubber Research. – 2021. – Vol. 24. – P. 227–236. DOI: 10.1007/s42464-021-00088-6

30. Guptha V.L.J., Sharma R.S. Experimental studies on strength behaviour of notched glass/epoxy laminated composites under uni-axial and bi-axial loading // Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. – 2019. – Vol. 100. – P. 75–81. DOI: 10.1007/s40032-017-0413-7

31. Aroo H., Azadi M., Azadi M. Corrosion effects on high-cycle fatigue lifetime and fracture behavior for heat-treated aluminum-matrix nano-clay-composite compared to piston aluminum alloy // Silicon. – 2022. – Vol. 14. – P. 3749–3763. DOI: 10.1007/s12633-021-01129-w

32. Tasdemir B., Pellegrino A., Tagarielli V. A strategy to formulate data-driven constitutive models from random multiaxial experiments // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12. DOI: 10.1038/s41598-022-26051-y

33. Bauer R., Neukamm S., Schäffner M. Derivation of a homogenized bending–torsion theory for rods with micro-heterogeneous prestrain // Journal of Elasticity. – 2020. – Vol. 141. – P. 109–145. DOI: 10.17877/DE290R-21954

34. A multiscale experimental analysis of mechanical properties and deformation behavior of sintered copper–silicon carbide composites enhanced by high-pressure torsion / S. Nosewicz, P. Bazarnik, M. Clozel, L. Kurpaska, P. Jenczyk, D. Jarzabek, M. Chmielewski, B. Romelczyk-Baishya, M. Lewandowska, Z. Pakiela, Y, Huang, T.G. Langdon // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 21. DOI: 10.1007/s43452-021-00286-4

35. Quaresimin M., Carraro P.A. On the investigation of the biaxial fatigue behaviour of unidirectional composites // Composites Part B: Engineering. – 2013. – Vol. 54. – P. 200–208. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.05.014.

36. Multiaxial fatigue life prediction of composite laminates / W. Jingmeng, M. Tong, W. Weidong, W. Shaodong // Chinese Journal of Aeronautics. – 2021. – Vol. 34, is. 12. – P. 227–237. DOI: 10.1016/j.cja.2020.06.016

37. Fatigue damage behavior in carbon fiber polymer composites under biaxial loading / T. Skinner, S. Datta, A. Chattopadhyay, A. Hall // Composites Part B: Engineering. – 2019. – Vol. 174. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.106942

38. Kawakami H., Fujii T.J., Morita Y. Fatigue degradation and life prediction of glass fabric polymer composite under tension/torsion biaxial loadings // The Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 1996. – Vol. 15. – P. 183–195. DOI: 10.1177/073168449601500204

39. Quaresimin M., Susmel L., Talreja R. Fatigue behavior and live assessment of composite laminates under multiaxial loadings // International Journal of Fatigue. – 2010. – Vol. 32. – P. 2–16. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2009.02.012

40. Torsion damage mechanisms analysis of two-dimensional braided composite tubes with digital image correction and X-ray micro-computed tomography / Y. Gu, D. Zhang, Z. Zhang, J. Sun, S. Yue, G. Li, K. Qian // Composite structures. – 2021. – Vol. 256. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118848

41. Полилов А.Н., Арутюнова А.С., Татусь Н.А. Влияние концентрации напряжений вблизи захватов на прочность композитов при растяжении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2020. – Т. 86, № 11. – С. 48–59. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-11-48-59

42. Description of fatigue sensitivity curves and transition to critical states of polymer composites by cumulative distribution functions / V.E Wil'deman, O.A. Staroverov, A.S. Yankin, A.I. Mugatarov // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2023. – Vol. 17, no. 63. – P. 91–99. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.63.09

43. Random fatigue damage accumulation analysis of composite thin-wall structures based on residual stiffness method / Z. Wu, G. Fang, M. Fu, X. Chen, J. Liang, D. Lv // Composite structures. – 2019. – Vol. 211. – P. 546–556. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.01.018

44. 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. – P. 313–320. DOI: 10.1007/s11029-018-9741-9

45. Mechanical properties degradation of fiberglass tubes during biaxial proportional cyclic loading / V. Wildemann, O. Staroverov, E. Strungar, A. Mugatarov, A. Kuchukov // Polymers. – 2023. – Vol. 15. DOI: 10.3390/polym15092017

46. Mao H., Mahadevan S. Fatigue damage modelling of composite materials // Composite structures. – 2002. – Vol. 58. – P. 405–410.

47. Mugatarov A., Staroverov O., Wildemann V. Influence of loading conditions on GFRP fatigue sensitivity curves parameters and transition to critical states // Procedia structural integrity. – 2023. – Vol. 45. – P. 654–659.

48. Stability of postcritical deformation of CFRP under static ±45° tension with vibrations / V.E Wildemann, O.A. Staroverov, E.M. Strungar, E.M. Lunegova, A.I. Mugatarov // Polymers. – 2022. – Vol. 14. DOI: 10.3390/polym14214502

49. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Экспериментальное обоснование критериев прочности волокнистых композитов, проявляющих направленный характер разрушения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 2. – С. 140–166.

References

1. Luinge H., Warnet L.L. On an application of multi-material composite laminates in the aerospace sector. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2020, vol. 3, pp. 294–302. doi: 10.1007/s42114-020-00163-3

2. Srinivasan V., Kunjiappan S., Palanisamy P. A brief review of carbon nanotube reinforced metal matrix composites for aerospace and defense applications. *International nano letters*, 2021, vol. 11, pp. 321–345. doi: 10.1007/s40089-021-00328-y

3. Sair S., Mansouri S., Tanane O., Abbound Y., Bouari El A. Alfa fiber-polyurethane composite as a thermal and acoustic insulation material for building applications. *SN Applied Sciences*, 2019, vol. 1., doi: 10.1007/s42452-019-0685-z

4. Wang Z., Song K. Application of Building Block Approach on Crashworthiness Design of Composite Vehicular Structures. *Fibers and Polymers*, 2022, vol. 23, pp. 1701–1712. doi: 10.1007/s12221-022-4887-4

5. Fadeeva I.V., Fomin A.S., Davydova G.A, Selezneva I., Trofimchuk E., Barinov S.M. Kompozicionnye materialy na osnove polivinilpirrolidona i fosfatov kal'ciya dlya mediciny [Composite Materials Based on Polyvinylpyrrolidone and Calcium Phosphates for Medicine]. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2021, vol. 12, pp. 1060–1065. doi: 10.1134/S2075113321040146

6. Smirnov V.V., Khairutdinova D.R., Antonova O.S., Goldberg M.A., Smirnov S.V., Barinov S.M. Kompozicionnye cementnye materialy na osnove sul'fata i fosfata kal'ciya dlya mediciny [Composite Cement Materials Based on Calcium Sulfate and Phosphate for Medicine]. *Doklady Chemistry*, 2018, pp. 279–282. doi: 10.1134/S0012500818110083

7. Samipour S.A., Khaliulin V.I., Batrakov V.V. Development of the Technology of Manufacturing Aerospace Composite Tubular Elements by Radial Braiding. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2018, vol. 47, pp. 284–289. doi: 10.3103/S1052618818030135

8. Backens S., Unseld J., Glück N., Wolter A. Incombustible, Inorganic Fiber-reinforced Composites for Shipbuilding. *Lightweight Design worldwide*, 2019, vol. 12, pp. 38–43. doi: 10.1007/s41777-019-0059-7

9. Demina, V.A., Sedush, N.G., Goncharov, E.N. Krasheninnikov S., Krupnin A., Goncharov N.G., Chvalun S.N. Biorazlagaemye nanostrukturirovannye kompozity dlya hirurgii i regenerativnoj mediciny [Biodegradable Nanostructured Composites for Surgery and Regenerative Medicine]. *Nanotechnol Russia*, 2021, pp. 2-18. doi: 10.1134/S2635167621010043

10. Chinthala M., Balakrishnan A., Venkataraman P., Polagani R.R., Gowtham V.M. Synthesis and applications of nano-MgO and composites for medicine, energy, and environmental remediation: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, vol. 19, pp. 4415–4454. doi: 10.1007/s10311-021-01299-4

11. Nadjafi M., Gholami P. Reliability Study of Notched Composite Laminates Under Uniaxial Loading Based on Continuum Damage Mechanics Approach. *Iranian Journal of Science and Technology*, 2022, vol. 46, pp. 911–925. doi: 10.1007/s40997-021-00458-w

12. Stepashkin A.A., Ozherelkov D.Y., Sazonov Y.B., Komissarov A., Mozalev V.V. Izmenenie mezhsloevoj prochnosti i vyazkosti razrusheniya uglerod-uglerodnogo kompozicionnogo materiala pod dejstviem ciklicheskih nagruzok [Change in Interlayer Strength and Fracture Toughness of Carbon-Carbon Composite Material under the Impact of Cyclic Loads]. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2019, vol. 10., pp. 155–161. doi: 10.1134/S2075113319010301

13. Strizhius V. Prognozirovanie degradacii ostatochnoj prochnosti pri ciklicheskom nagruzhenii sloistyh kompozitov [Predicting the Degradation of the Residual Strength in Cyclic Loading of Layered Composites]. *Mechanics of Composite Materials*, 2022, vol. 58, pp. 527–536. doi: 10.1007/s11029-022-10047-w

14. Staroverov O., Lobanov D., Strungar E., Lunegova E. Evaluation of the influence of preliminary low-velocity impacts on the residual fatigue life of CFRP composites. *International Journal of Structural Integrity*, 2023, vol. 14, pp. 44–56. doi: 10.1108/IJSI-04-2022-0056

15. Elkin A., Gaibel V., Dzhurinskiy D., Sergeichev I. A Multiaxial Fatigue Damage Model Based on Constant Life Diagrams for Polymer Fiber-Reinforced Laminates. *Polymers*, 2022, vol. 14. doi: 10.3390/polym14224985

16. Yankin A., Lykova A., Mugatarov A., Wildemann V., Ilinykh A. Influence of additional static stresses on biaxial low-cycle fatigue of 2024 aluminum alloy. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2022, vol. 16, pp. 180–193. doi: 10.3221/IGF-ESIS.62.13

17. Wang Q., Xin C., Sun Q., Xiao L., Sun J. Biaxial fatigue behavior of gradient structural purity titanium under in-phase and out-of-phase loading. *International Journal of Fatigue*, 2018, vol. 116, pp. 602–609. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.07.015

18. Zhang J., Shi X., Fei B. High cycle fatigue and fracture mode analysis of 2A12-T4 aluminum alloy under out-of-phase axial-torsion constant amplitude loading. *International Journal of Fatigue*, 2012, vol. 38, pp. 144–154. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2011.12.017

19. Wang Y., Yao W. A multiaxial fatigue criterion for various metallic materials under proportional and nonproportional loading. *International Journal of Fatigue*, 2006, vol. 28, pp. 401-408. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2005.07.007

20. Pejkowski L., Skibicki D., Seyda J. Stress-strain response and fatigue life of a material subjected to asynchronous loadings. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2028. doi: 10.1063/1.5066406

21. Yankin A., Mugatarov A., Wildemann V. Influence of different loading paths on the multiaxial fatigue behavior of 2024 aluminum alloy under the same amplitude values of the second invariant of the stress deviator tensor. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2020, vol. 15, pp. 327–335. doi:10.3221/IGF-ESIS.55.25

22. Skibicki D., Pejkowski L. Low-cycle multiaxial fatigue behaviour and fatigue life prediction for CuZn37 brass using the stress-strain models. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 102, pp. 18–36. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2017.04.011

23. Gates N.R., Fatemi A. On the consideration of normal and shear stress interaction in multiaxial fatigue damage analysis. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 100, pp. 322–336. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2017.03.042

24. Gu A., Luo Y., Xu B. Continuous condition monitoring of reinforced concrete using an active diagnosis method. *Structural Health Monitoring*, 2016, vol. 15, pp. 104–111. doi: 10.1177/1475921715624501

25. Papuga J., Halama R. Mean stress effect in multiaxial fatigue limit criteria. *Archive of Applied Mechanics*, 2018, pp. 1-12. doi: 10.1007/s00419-018-1421-7

26. Sines G. Failure of materials under combined repeated stresses with superimposed static stress. *Washington. National Advisory Committee for Aeronautics*, 1955

27. Mitukiewicz G., Głogowski M., Stelmach J., Leyko J., Dimitrova Z., Batory D. Strengthening of cruciform sample arms for large strains during biaxial stretching. *Materials Today Communications*, 2019, vol. 21. doi: 10.1016/j.mtcomm.2019.100692.

28. Arutyunyan A.R. Kriterij ustalostnoj prochnosti kompozicionnyh materialov [A Fatigue-Fracture Criterion for Composite Materials]. *Doklady Physics,* 2019, vol. 64, pp. 394–396. doi: 10.31857/S0869-56524885488-492

29. Le Mire E., Verron E., Huneau B., Seller N. Multiaxial fatigue experiments for elastomers based on true strain invariants. *Journal of Rubber Research*, 2021, vol. 24, pp. 227–236. doi: 10.1007/s42464-021-00088-6

30. Guptha V.L.J., Sharma R.S. Experimental Studies on Strength Behaviour of Notched Glass/Epoxy Laminated Composites under Uni-axial and Bi-axial Loading. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 2019, vol. 100, pp. 75–81. doi: 10.1007/s40032-017-0413-7

31. Aroo H., Azadi M., Azadi M. Corrosion Effects on High-cycle Fatigue Lifetime and Fracture Behavior for Heat-treated Aluminum-matrix Nano-clay-composite Compared to Piston Aluminum Alloy. *Silicon*, 2022, vol. 14, pp. 3749–3763. doi: 10.1007/s12633-021-01129-w

32. Tasdemir B., Pellegrino A., Tagarielli V. A strategy to formulate data-driven constitutive models from random multiaxial experiments. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12. doi: 10.1038/s41598-022-26051-y

33. Bauer R., Neukamm S., Schäffner M. Derivation of a Homogenized Bending–Torsion Theory for Rods with Micro-Heterogeneous Prestrain. *Journal of Elasticity*, 2020, vol. 141, pp. 109–145. doi: 10.17877/DE290R-21954

34. Nosewicz S., Bazarnik P., Clozel M., Kurpaska L., Jenczyk P., Jarzabek D., Chmielewski M., Romelczyk-Baishya B., Lewandowska M., Pakiela Z., Huang Y., Langdon T.G. A multiscale experimental analysis of mechanical properties and deformation behavior of sintered copper–silicon carbide composites enhanced by high-pressure torsion. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021, vol. 21. doi: 10.1007/s43452-021-00286-4

35. Quaresimin M., Carraro P.A. On the investigation of the biaxial fatigue behaviour of unidirectional composites. *Composites Part B: Engineering*, 2013, vol. 54, pp. 200–208. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.05.014.

36. Jingmeng W., Tong M., Weidong W., Shaodong W. Multiaxial fatigue life prediction of composite laminates. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, vol. 34, iss. 12, pp. 227-237, doi: 10.1016/j.cja.2020.06.016.

37. Skinner T., Datta S., Chattopadhyay A., Hall A. Fatigue damage behavior in carbon fiber polymer composites under biaxial loading. *Composites Part B: Engineering*, 2019, vol. 174. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.106942.

38. Kawakami H., Fujii T. J., Morita Y. Fatigue Degradation and Life Prediction of Glass Fabric Polymer Composite under Tension/Torsion Biaxial Loadings. *The Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1996, vol. 15, pp. 183–195. doi: 10.1177/073168449601500204

39. Quaresimin M.; Susmel L.; Talreja R. Fatigue behavior and live assessment of composite laminates under multiaxial loadings. *International Journal of Fatigue*, 2010, vol. 32, pp. 2–16. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2009.02.012

40. Gu Y., Zhang D., Zhang Z., Sun J., Yue S., Li G., Qian K. Torsion damage mechanisms analysis of two-dimensional braided composite tubes with digital image correction and X-ray micro-computed tomography. *Composite structures*, 2021, vol. 256. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118848

41. Polilov A.N., Arutyunova A.S., Tatus' N.A. Vliyanie koncentracii napryazhenij vblizi zahvatov na prochnost' kompozitov pri rastyazhenii [Effect of Stress Concentration near Grips on the Tensile Strength of Composites]. *Inorganic Materials*, 2021, vol. 57, pp. 1555–1564. doi: 10.26896/1028-6861-2020-86-11-48-59

42. Wil'deman V.E., Staroverov O.A., Yankin A.S., Mugatarov A.I. Description of fatigue sensitivity curves and transition to critical states of polymer composites by cumulative distribution functions. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2023, vol. 17. No 63. P. 91–99. doi: 10.3221/IGF-ESIS.63.09

43. Wu Z., Fang G., Fu M., Chen X., Liang J., Lv D. Random fatigue damage accumulation analysis of composite thin-wall structures based on residual stiffness method. *Composite structures*, 2019, vol. 211, pp. 546-556. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.01.018.

44. 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, pp. 313–320. doi:10.1007/s11029-018-9741-9

45. Wildemann V., Staroverov O., Strungar E., Mugatarov A., Kuchukov A.echanical Properties Degradation of Fiberglass Tubes during Biaxial Proportional Cyclic Loading. *Polymers*, 2023, vol. 15. doi: 10.3390/polym15092017

46. Mao H., Mahadevan S. Fatigue damage modelling of composite materials. *Composite structures*, 2002, vol. 58, pp. 405–410.

47. Mugatarov A., Staroverov O., Wildemann V. Influence of loading conditions on GFRP fatigue sensitivity curves parameters and transition to critical states. *Procedia structural integrity*, 2023, vol. 45, P. 654-659.

48. Wildemann V.E., Staroverov O.A., Strungar E.M., Lunegova E.M., Mugatarov A.I. Stability of Postcritical Deformation of CFRP under Static ±45° Tension with Vibrations. *Polymers*, 2022, vol. 14. doi: 10.3390/polym14214502

49. Polilov A.N., Tatus N.A. Eksperimental'noe obosnovanie kriteriev prochnosti voloknistyh kompozitov, proyavlyayushchih napravlennyj harakter razrusheniya [Experimental substantiation of strength criteria for fibrous composites exhibiting directional characteristics of failure]. PNRPU Mechanics Bulletin, 2012, vol. 2, pp. 140–166.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-0136, https://rscf.ru/project/22-79-00136.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Funded. This research was carried out with the support of the Russian Science Foundation (Project No 22-79-00136, https://rscf.ru/en/project/22-79-00136/).
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The contribution of the authors is equivalent.