Гурджиев, А.В. Анализ процессов деформирования и разрушения слоисто-волокнистых полимерных композиционных материалов при комбинированном нагружении / А.В. Гурджиев, М.П. Третьяков, В.Э. Вильдеман. – DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.02 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 5. – С. 14–26.

Perm Polytech Style: Gurdjiev A.V., Tretiakov M.P., Vildeman V.E. Analysis of Deformation and Destruction of Layered-Fibrous Composite Materials under Complex Loading. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 5, pp. 14-26. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.02

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/2024.5.02
УДК 539.42

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СЛОИСТО-ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ

А.В. Гурджиев, М.П. Третьяков, В.Э. Вильдеман

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 18 октября 2024 г.
Одобрена: 25 октября 2024 г.
Принята к публикации:
05 ноября 2024 г.

Ключевые слова:

полимерный композиционный материал, углепластик, стеклопластик, образец, V-образный концентратор, комбинированное нагружение, смешанная мода, вибрации кручения, равновесный рост повреждений, безопасность разрушения.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена изучению эффектов закритического поведения композитов при возникновении и равновесном росте трещин. Ключевым направлением исследования является экспериментальное изучение влияния дополнительных вибрационных воздействий и начальных накопленных циклических повреждений структуры на устойчивость процессов деформирования, закритического поведения и разрушения слоисто-волокнистых тканых полимерных композитов на примере стеклопластика и углепластика, которые применяются при изготовлении ответственных конструкций различного назначения. Проведено сравнение процессов деформирования и разрушения углепластика со схемами армирования [0°] и [± 45°] при растяжении и кручении образцов в виде пластин с краевыми V-образными надрезами. Испытания образцов на квазистатическое и циклическое растяжение при наличии вибраций проводились на универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8802. Реализовано двухэтапное нагружение образцов: предварительное циклическое растяжение и квазистатическое растяжение с дополнительными вибрациями на кручение. В результате испытаний получены диаграммы нагружения образцов с концентраторами и начальными усталостными трещинами, отражающие упругопластическое и закритическое деформирование и разрушение. Проведено экспериментальное исследование влияния степени предварительного циклического воздействия в условиях растяжения, а также параметров дополнительных вибраций по оси кручения на реализацию и протяженность ниспадающей ветви диаграмм деформирования образцов композиционных материалов. Для численной оценки реализации стадии закритического деформирования использованы соответствующие коэффициенты, которые характеризуют протяжённость участка закритического поведения по изменению напряжений и деформаций. На основе сопоставления и анализа полученных экспериментальных данных проведена оценка влияния дополнительных вибрационных воздействий кручения на устойчивость реализации закритической стадии деформирования.

© **Гурджиев Арсений Валерьевич** – студент кафедры экспериментальной механики, e-mail: gurd_20@mail.ru.
Третьяков Михаил Павлович – к. ф.-м. н., доц., доц. кафедры экспериментальной механики, e-mail: cem_tretyakov@mail.ru.
Вильдеман Валерий Эрвинович – д. ф.-м. н., проф., проф. кафедры экспериментальной механики, e-mail: wildemann@pstu.ru.

Arseny V. Gurdjiev – student of the Department of Experimental Mechanics, e-mail: gurd_20@mail.ru.
Mikhail P. Tretyakov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Ass. Professor, Department of Experimental Mechanics, e-mail: cem_tretyakov@mail.ru.
Valery E. Wildemann – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Experimental Mechanics, e-mail: wildemann@pstu.ru.

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)

ANALYSIS OF DEFORMATION AND DESTRUCTION OF LAYERED-FIBROUS COMPOSITE MATERIALS UNDER COMPLEX LOADING

A.V. Gurdjiev, M.P. Tretiakov, V.E. Vildeman

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 18 October 2024
Approved: 25 October 2024
Accepted for publication:
05 November 2024

Keywords:

polymer composite material, carbon fibre reinforced plastic, glass fibre reinforced plastic, sample, V-shaped concentrator, complex loading, mixed mode, torsional vibrations, constant increase in damage, safe destruction.

ABSTRACT

The paper studies effects of postcritical behavior of composites during the occurrence and equilibrium growth of cracks. The experimental study focuses on the influence of additional vibration effects and initial accumulated cyclic damage to the structure on the stability of the deformation processes, postcritical behavior and failure of layered-fiber woven polymer composites, using the example of fiberglass and carbon fiber, which are used in the manufacture of critical structures for various purposes. A comparison of the deformation and failure processes of carbon fiber with reinforcement schemes [0°] and [± 45°] was carried out under tension and torsion of specimens in the form of plates with edge V-shaped notches. Tests of specimens for quasi-static and cyclic tension in the presence of vibrations were carried out using a universal two-axis servohydraulic testing system Instron 8802. Two-stage loading of specimens was implemented: preliminary cyclic tension and quasi-static tension with additional vibrations for torsion. As a result of the tests, loading diagrams of samples with concentrators and initial fatigue cracks were obtained, reflecting elastic-plastic and postcritical deformation and failure. An experimental study was conducted of the influence of the degree of the preliminary cyclic action under tension conditions, as well as the parameters of additional vibrations along the torsion axis on the implementation and length of the descending branch of the deformation diagrams of composite material samples. For a numerical assessment of the implementation of the postcritical deformation stage, the corresponding coefficients were used, which characterize the length of the section of postcritical behavior by the change in stresses and strains. Based on the comparison and analysis of the obtained experimental data, an assessment was made of the influence of additional vibration effects of torsion on the stability of the implementation of the postcritical deformation stage.

Введение

Слоисто-волокнистые полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря своим особым свойствам и некоторым преимуществам в сравнении с традиционными материалами широко применяются при проектировании и изготовлении ответственных конструкций, поэтому изучение процессов деформирования и разрушения таких материалов является актуальной задачей и привлекает внимание большого числа исследователей. Наиболее широко распространёнными среди таких конструкционных материалов являются волокнистые КМ с полимерной матрицей, так как они обладают высокими показателями прочности и низкой плотностью, что имеет ключевое значение для конструкций авиационного назначения.

Разрушение материала, как правило, сопровождается образованием и ростом трещин вплоть до полного разрешения конструкции. Равновесной или устойчивой эволюцией трещин называют их постепенный рост, когда для увеличения длины трещины требуется дополнительное внешнее воздействие. В момент, когда деформации достигают критических значений, трещина переходит в неравновесное состояние, развиваясь неконтролируемо без увеличения внешнего воздействия. Для увеличения живучести конструкций необходимо, чтобы стадия равновесного роста трещин соответствовала максимальной продолжительности процесса деформирования. Поэтому существуют методы, которые в той или иной степени увеличивают стадию равновесного роста трещин или тормозят их развитие и, как следствие, увеличивают прочностной ресурс конструкций. В работах [1–5] рассмотрен метод стабилизации роста трещин за счет реализации в процессе квазистатического нагружения дополнительных вибраций. Авторами статей [6; 7] предложен метод нанесения тонких покрытий на поверхность изделий для замедления процессов развития повреждений. Также существуют и другие методы стабилизации процесса роста трещин, такие как повышение жёсткости нагружающей системы [1; 8–11] и начальная повреждённость структуры [2]. В ряде работ показано, что на кинетику роста трещин также может влиять и последовательность механического нагружения [12]. Оценить эффективность различных методов и способов стабилизации возможно на основе анализа диаграмм деформирования. Особый практический интерес при этом представляет участок закритического деформирования, соответствующий снижению напряжений при возрастающих деформациях. С использованием ниспадающей ветви деформирования можно получить информацию о степени и интенсивности повреждаемости материала, о характере процессов разрушения, об устойчивости процессов роста трещин и, как следствие, о степени катастрофичности гипотетического разрушения. Под степенью катастрофичности разрушения при этом понимается уровень напряжений в момент перехода процесса разрушения от равновесного характера к неравновесному. При полном разрушении

накопленная внутренняя энергия высвобождается, и чем ниже уровень напряжений, тем ниже эта запасенная энергия и тем менее катастрофично произойдет разрушение материала. Показателем степени катастрофичности разрушения является протяжённость ниспадающей ветви диаграммы деформирования, величина снижения напряжений и модуль разупрочнения, характеризующийся наклоном этого участка. Протяжённость закритического участка по деформациям (перемещениям) характеризует продолжительность устойчивого роста трещин и отражается на живучести материала и конструкции.

С точки зрения прогнозирования поведения материалов в реальных условиях эксплуатации особый прикладной интерес представляют комбинированные виды нагружения – это совместное действие на исследуемый объект как минимум двух сил, действующих по различным осям или последовательное механическое и температурное нагружение, а также их совокупность. Реализация комбинированного механического нагружения является нетривиальной технической задачей в лабораторных условиях, что требует наличия специального испытательного оборудования и соответствующих методик. Для этого используются испытательные машины, способные реализовать двухосное и трёхосное нагружение, ударные установки, температурные камеры и печи. В частности, нагружение по типу двухосного растяжения [13] реализуется на крестообразных образцах [14; 15], нагружение по типу трёхосного сжатия [16] – на кубических образцах [17], а также нагружение по типу растяжения (сжатия) со сдвигом [2; 18; 19] реализуется на цилиндрических [20; 21] или плоских образцах [18]. Исследование остаточного ресурса конструкции является актуальной задачей механики разрушения. Так, в статьях проведена оценка степени повреждённости КМ на примере воздействия квазистатического растяжения [22] или циклического сжатия [23] с предварительным ударом. Авторами [24] осуществлено исследование остаточного ресурса углепластика на растяжение после циклических воздействий. В настоящем исследовании также рассмотрено действие квазистатического растяжения с предварительным циклическим.

Для обеспечения применимости и практического использование результатов экспериментальных исследований при изучении характера деформирования и разрушения материалов в лабораторных условиях необходимо учитывать реальные условия эксплуатации и параметры физико-механического нагружения материалов в конструкциях. В частности, детали авиационного назначения испытывают действие комплекса нагрузок и различных внешних воздействий [25–27]. Так, центробежные силы приводят к возникновению напряжений растяжения, при этом могут приводить к изгибу и кручению. Кроме того, оказывают воздействие и газодинамические силы, также приводящие к изгибу и кручению. Часть этих нагрузок являются циклическими, приводящими к усталостным повреждениям материала. Условия эксплуатации трубопроводов также определяют работу применяемых материалов в условиях комбинации нагрузок, как правило, в виде внутреннего давления, растяжения, изгиба и кручения [28; 29]. Таким образом, актуальность работ в области исследований деформирования и разрушения композиционных материалов в условиях действия комплексных нагрузок определяется современными практическими задачами оценки ресурса материалов и обеспечения прочности и живучести конструкций.

Целью данного исследования является получение экспериментальных данных о влиянии дополнительных вибраций кручения, приводящих к реализации сдвига, и предварительного циклического растяжения на процесс деформирования и разрушения образцов из ПКМ.

Материалы и оборудование

Исследование влияния предварительного циклического растяжения и дополнительных вибраций кручения на процессы закритического деформирования слоисто-волокнистых ПКМ проведено на образцах трёх типов из двух композиционных материалов. Для исследования ПКМ с углеродными волокнами использовался материал марки ВКУ-60, который представляет собой многослойный пакет, состоящий из двадцати слоёв равнопрочной углеродной ткани саржевого плетения (2×2) ВТкУ-2.200, пропитанных эпоксидным связующим ВСЭ-58 и уложенных параллельно относительно друг друга. Из заготовки вырезались плоские образцы заданной геометрии под углом 0° и 45° относительно направления основы. В качестве ПКМ со стеклянными волокнами использовался материал марки СТЭФ, который состоит из нескольких слоёв электроизоляционной стеклоткани полотняного плетения, пропитанных термореактивной матрицей, представляющей собой смесь эпоксидной (65 %) и фенолформальдегидной смолы (35 %). Образцы вырезались из листа под углом 0° к направлению основы.

Данные материалы обладают специальными свойствами, необходимыми в областях их непосредственного применения, поэтому рассмотрение процессов деформирования и разрушения именно этих материалов является актуальным. Физико-механические свойства материалов представлены в табл. 1.

Геометрия образцов углепластика ВКУ-60 и стеклопластика СТЭФ приведена на рис. 1. Фотографии образцов приведены на рис. 2. В центральной части образцов изготовлены краевые концентраторы, равноудалённые от верхнего и нижнего торцов. *V*-образная форма концентраторов позволяет реализовать максимальное напряжение в локальной точке, которая определяет максимальную вероятность образования трещины в этой зоне. Обеспечивался минимальный радиус скругления в вершине концентраторов. На образцах из материала ВКУ-60 был выполнен шевронный надрез в вершинах концентраторов.

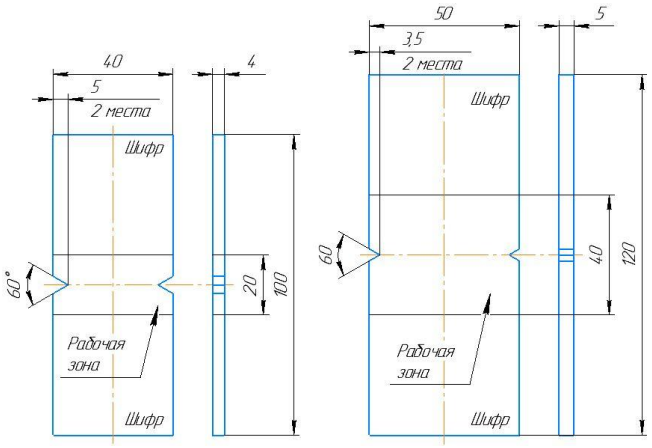
Таблица 1

Физико-механические свойства материалов ВКУ-60 и СТЭФ

Table 1

Physical and mechanical properties of materials VKU-60 and STEF

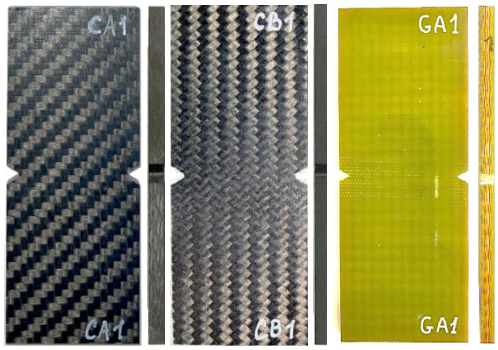
Параметр	ВКУ-60	СТЭФ [30]
Содержание связующего, мас. %	33…39	35…40
Плотность, г/см^3	1,49	1,68
$\sigma_в$ при растяжении [0], МПа, не менее	800	380
$\sigma_в$ при сжатии [0], МПа, не менее	600	240
$\sigma_в$ при межслоевом сдвиге [0], МПа, не менее	75	205
Модуль упругости $E_x = E_y$, ГПа	63,9	28
Модуль упругости E_z, ГПа	10	8
Модуль сдвига G_{xy}, ГПа	19,5	6,2
Модуль сдвига $G_{xz} = G_{yz}$, ГПа	2,7	3
Коэффициент Пуассона μ_{xy}	0,04	0,18
Коэффициент Пуассона $\mu_{xz} = \mu_{yz}$	0,3	0,4



a *b*

Рис. 1. Эскиз образцов углепластика (*a*) и стеклопластика (*b*)

Fig. 1. Sketch of samples of carbon fiber reinforced plastic (*a*) and fiberglass (*b*)



a *b* *c*

Рис. 2. Фотографии образцов ВКУ-60 [0] (*a*), ВКУ-60 [± 45] (*b*), СТЭФ (*c*)

Fig. 2. Photos of samples VKU-60 [0] (*a*), VKU-60 [± 45] (*b*), STEF (*c*)

Механические испытания образцов углепластика и стеклопластика проведены на универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8802 [31], позволяющей реализовать комбинированное нагружение в условиях растяжения с кручением с максимальным осевым усилием 100 кН и крутящим моментом 1000 Н·м. Испытательная система позволяет реализовать полностью независимое квазистатическое или циклическое нагружение по каждой оси нагружения с частотами до 30 Гц. Погрешность измерения нагрузок и перемещений составляет 0,5 % от измеряемой величины. Передача усилия на плоские образцы из ВКУ-60 и СТЭФ осуществлялась с помощью клиновидных захватов.

Программа испытаний

Механическое нагружение образца состояло из двух этапов:

– циклическое одноосное растяжение амплитудой (усилий) P_a и частотой f для образования начальных усталостных повреждений в структуре материала,

– квазистатическое одноосное растяжение с постоянной скоростью 0,4 мм/мин с действием дополнительных вибраций кручения амплитудой (углом закручивания) φ и частотой v.

Для определения параметров циклического растяжения для выращивания в образце с V-образными концентраторами усталостных начальных трещин была проведена серия пробных испытаний образцов из ВКУ-60 со схемами армирования [0] и [± 45], а также образцов из СТЭФ. В результате квазистатических испытаний на одноосное растяжение определены максимальные растягивающие усилия P_B для образцов со схемой армирования [0] и нагрузки $P_{пр}$, соответствующие пределу пропорциональности для образцов со схемой армирования [± 45]. На основании результатов установочных усталостных испытаний, были выбраны параметры циклических воздействий, приведённые в табл. 2, которые обеспечивали возникновение повреждений в структуре исследуемых материалов при долговечности порядка 150 000 циклов. Также в таблице приведено базовое число циклов N предварительного нагружения образцов ВКУ-60 и базовая длина предварительно выращенной трещины для образцов СТЭФ. Кроме этого, в таблице указаны базовые значения параметров вибраций кручения. Базовые параметры фиксировались при варьировании прочих.

Уровень предварительного усталостного повреждения оценивался ультразвуковым методом и путем замера длины начальной трещины после разрушения образцов.

В рамках настоящей работы было рассмотрено влияние на закритическую стадию деформирования следующих факторов:

1. Материал (углепластик/стеклопластик) и схема армирования ([0]/[± 45]) при квазистатическом растяже-

нии, растяжении с предварительным циклированием и растяжении с дополнительными вибрациями кручения.

2. Начальное усталостное повреждение циклическим растяжением (табл. 3) без вибраций и с вибрациями кручения при базовых параметрах.

3. Амплитуда (угол закручивания) дополнительных вибраций кручения (см. табл. 3) при фиксированном базовом значении частоты.

4. Частота дополнительных вибраций кручения (см. табл. 3) при фиксированном базовом значении амплитуды.

Таблица 2

Базовые параметры нагружения

Table 2

Basic loading parameters

Параметр	ВКУ-60		СТЭФ
	[0]	[± 45]	
P_B, кН	62	30	77
$P_{пр}$, кН	–	16	–
P_{max}, кН	55	16	30
P_{min}, кН	25	2	10
$P_{ср}$, кН	40	9	20
P_a, кН	15	7	10
f, Гц	20	15	10
N, ед.	20 500	20 500	5000
l, мм	–	–	5
φ, °	0,4	0,4	0,4
v, Гц	20	20	15

Таблица 3

Параметры числа циклов и вибраций кручения

Table 3

Parameters of the number of cycles and torsional vibrations

Параметр	ВКУ-60		СТЭФ
	[0]	[± 45]	
N	0	0	0
	5500	5500	5000
	20 500	20 500	7500[1]
	100 500	100 500	–
φ, °	0	0	0
	0,2	0,2	0,2
	0,4	0,4	0,4
	0,6	0,6	0,6
v, Гц	0	0	0
	5	5	5
	20	20	15
	30	30	20

Для проведения оценки влияния рассматриваемых параметров были введены коэффициент реализации закритической стадии k, характеризующий степень безопасности разрушения, и коэффициент равновесности развития повреждений r, определяемые по диаграмме нагружения с применением формул (1) и (2):

$$k = 1 - \frac{P_{раз}}{P_B}, \quad (1)$$

где $P_{раз}$ – нагрузка, при которой начинается динамический рост трещины; P_B – максимальная нагрузка, которую испытывает образец.

$$r = \frac{U_{раз}}{U_B}, \quad (2)$$

где $U_{раз}$ – перемещения, соответствующие нагрузке $P_{раз}$; U_B – перемещения, соответствующие максимальным нагрузкам P_B.

Используемые коэффициенты введены ранее в работе [2].

Результаты

Сравнение материалов и схем армирования проведено при испытании образцов ВКУ-60 [0], ВКУ-60 [± 45] и СТЭФ в условиях квазистатического растяжения. Проведено сравнение схем армирования углепластика при следующих видах нагружения:

– «статическое» растяжение;

– «статическое» растяжение с начальным циклическим растяжением;

– «статическое» растяжение с дополнительными вибрациями кручения;

– «статическое» растяжение в комбинации с циклическим растяжением и вибрациями кручения.

В результате проведения испытаний построены диаграммы деформирования (см. рис. 3). Фотографии разрушенных образцов приведены на рис. 4. Численно результаты отражены в табл. 4. Наибольшие значения параметров выделены жирным шрифтом.

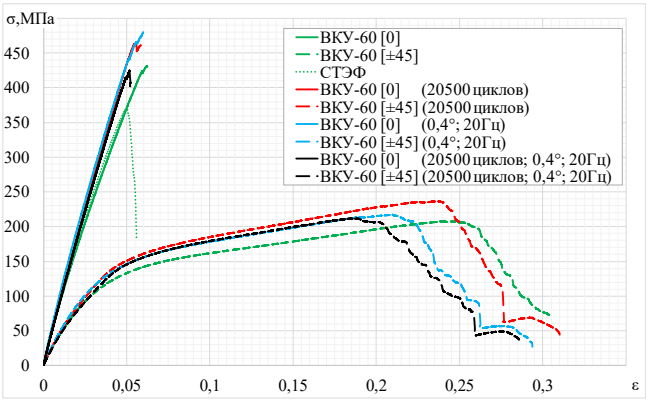


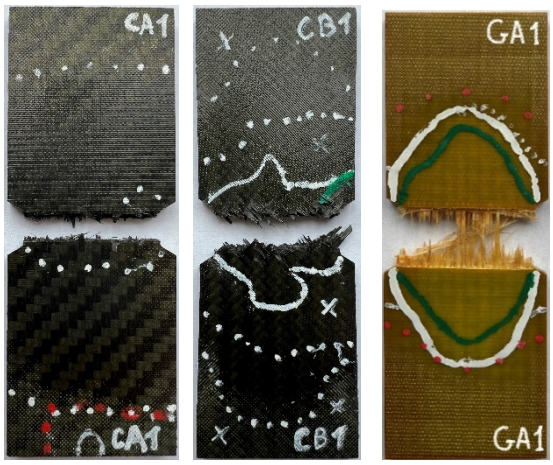
Рис. 3. Диаграммы деформирования ВКУ-60 [0], ВКУ-60 [± 45] и СТЭФ

Fig. 3. Deformation diagrams of VKU-60 [0], VKU-60 [± 45] and STEF

При испытании образцов на циклическое растяжение не удалось достичь образования усталостной трещины в углепластике при заданных параметрах циклирования. Образование усталостных трещин из вершин

[1] Число циклов с заданными параметрами, соответствующее длине трещины в 10 мм.

концентраторов зафиксировано на образцах СТЭФ. Это можно объяснить тем, что стеклянные волокна обладают меньшей жёсткостью, в отличие от углеродных.



a *b* *c*

Рис. 4. Фотографии образцов ВКУ-60 [0] (*a*), ВКУ-60 [± 45] (*b*), СТЭФ (*c*) после квазистатического растяжения

Fig. 4. Photos of samples VKU-60 [0] (*a*), VKU-60 [± 45] (*b*), STEF (*c*) after quasi-static stretching

Таблица 4

Сравнение исследуемых материалов при разных условиях нагружения

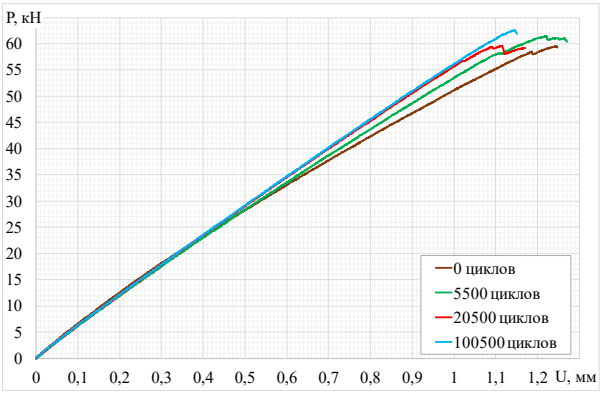
Table 4

Comparison of the materials under study under different loading conditions

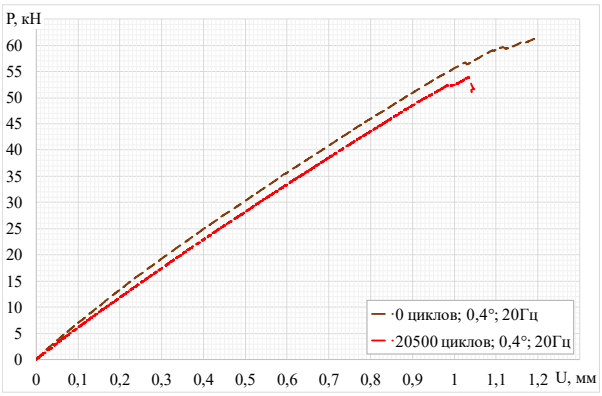
Нагружение	Параметр	ВКУ-60 [0]	ВКУ-60 [± 45]	СТЭФ
«Статика»	σ_B, МПа	**432**	208	370
	P_B, кН	**59,58**	28,58	–
	k	0,004	**0,651**	0,505
	r	1,000	**1,271**	1,116
«Циклика», «статика»	σ_B, МПа	**465**	237	–
	k	0,007	**0,813**	–
	r	1,049	**1,314**	–
«Статика», вибрации	σ_B, МПа	**480**	217	–
	k	0,000	**0,876**	–
	r	1,000	**1,402**	–
«Циклика», «статика», вибрации	σ_B, МПа	**425**	212	–
	k	0,141	**0,848**	–
	r	1,028	**1,523**	–

Из диаграмм деформирования видно, что закритическая стадия не реализуется в образцах материала ВКУ-60 с укладкой [0], так как при растяжении образцы разрушаются с образованием неравновесной трещины, при этом данный тип материала показал наибольшие значения предела прочности. Для образцов материала ВКУ-60 с укладкой [± 45] характерно образование трещин при изгибе и развороте волокон в направлении оси нагружения, наблюдается наличие «шейки» и существенное удлинение образца, что приводит к возникновению ниспадающей ветви диаграмм деформирования. Для образцов материала СТЭФ характерно образование равновесных трещин, что также приводит к реализации выраженной закритической стадии диаграмм деформирования.

Исследование влияния начальных усталостных повреждений на закритическую стадию деформирования проведено при испытании образцов ВКУ-60 [0], ВКУ-60 [± 45] и СТЭФ без дополнительных вибраций кручения и в условиях реализации крутильных вибраций. Диаграммы нагружения повреждённых образцов ВКУ-60 [0] после квазистатического растяжения представлены на рис. 5. Численно результаты отражены в табл. 5.



a



b

Рис. 5. Диаграммы нагружения образцов ВКУ-60 [0] после «циклики»: *a* – без вибраций; *b* – в условиях вибраций

Fig. 5. Loading diagrams for VKU-60 [0] samples after the *cyclic*: *a* – without vibration; *b* – under vibration conditions

Таблица 5

Параметры закритической стадии деформирования образцов ВКУ-60 [0]

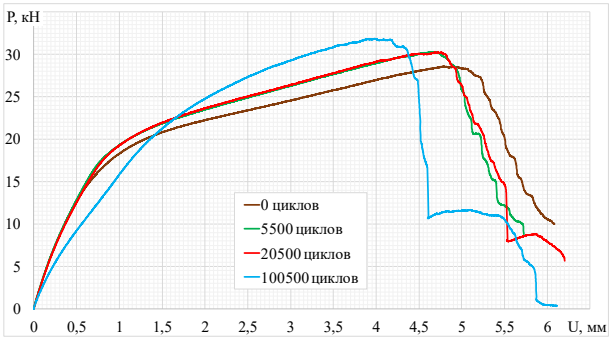
Table 5

Parameters of the supercritical stage of deformation of VKU-60 samples [0]

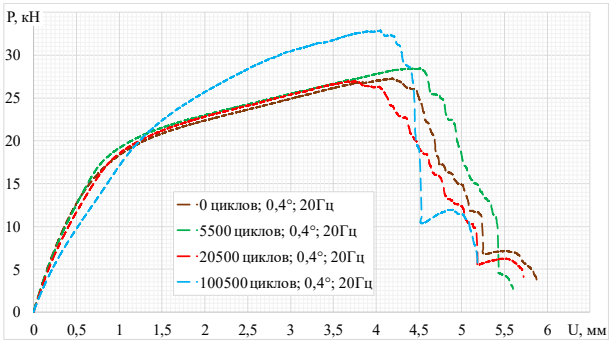
Нагружение	Параметр	0 циклов	5500 циклов	20 500 циклов	100 500 циклов
«Циклика», «статика»	P_B, кН	59,58	61,42	59,65	**62,63**
	k	0,004	**0,017**	0,007	0,011
	r	1,000	1,041	**1,049**	1,005
«Циклика», «статика», вибрации	P_B, кН	**61,47**	–	53,87	–
	k	0,000	–	**0,141**	–
	r	1,000	–	**1,028**	–

Из рис. 6 и табл. 5 видно, что повреждённые образцы выдержали большие прикладываемые усилия без наличия вибраций. Это связано со снятием технологических остаточных напряжений [32] при предварительном циклическом растяжении [24]. В образцах из ВКУ-60 [0] реализации закритической стадии и выявления влиянии начальной повреждённости достичь не удалось.

Диаграммы нагружения повреждённых образцов ВКУ-60 [± 45] после квазистатического растяжения представлены на рис. 6. Численно результаты отражены в табл. 6.



a



b

Рис. 6. Диаграммы нагружения образцов ВКУ-60 [± 45] после «циклики»: *a* – без вибраций; *b* – в условиях вибраций

Fig. 6. Loading diagrams for VKU-60 samples [± 45] after the *cyclic*: *a* – without vibration; *b* – under vibration conditions

Таблица 6

Параметры закритической стадии деформирования образцов ВКУ-60 [± 45]

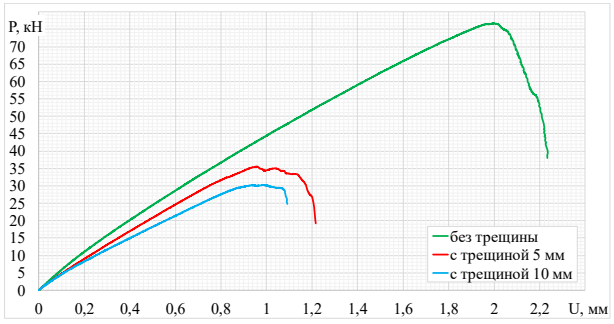
Table 6

Parameters of the supercritical stage of deformation of VKU-60 samples [± 45]

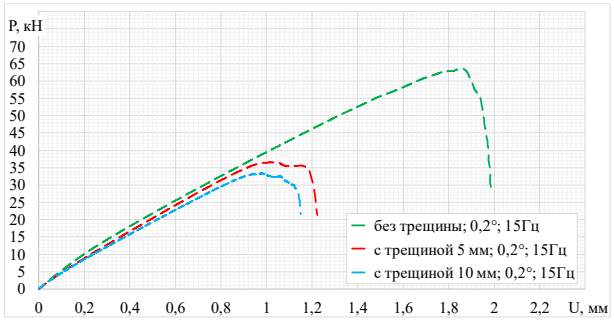
Нагружение	Параметр	0 циклов	5500 циклов	20 500 циклов	100 500 циклов
«Циклика», «статика»	P_B, кН	28,58	30,29	30,24	**31,85**
	k	0,651	0,710	0,813	**0,988**
	r	1,271	1,235	1,314	**1,533**
«Циклика», «статика», вибрации	P_B, кН	27,28	28,48	26,95	**32,88**
	k	0,876	**0,905**	0,848	0,832
	r	1,402	1,240	**1,523**	1,279

Из рис. 6 и табл. 6 видно, что повреждённые образцы выдержали бóльшие прикладываемые усилия без вибраций, как и образцы из ВКУ-60 [0]. Коэффициент реализации закритической стадии и коэффициент равновесного роста повреждений увеличиваются с возрастанием числа циклов предварительного нагружения. Подобной зависимости не наблюдается в условиях вибрационных воздействий.

Диаграммы нагружения повреждённых образцов СТЭФ после квазистатического растяжения представлены на рис. 7. Численно результаты отражены в табл. 7.



a



b

Рис. 7. Диаграммы нагружения образцов СТЭФ после «циклики»: *a* – без вибраций; *b* – в условиях вибраций

Fig. 7. Loading diagrams of STEF samples after a *cyclic*: *a* – without vibration, *b* – under vibration conditions

Таблица 7

Параметры закритической стадии деформирования образцов СТЭФ

Table 7

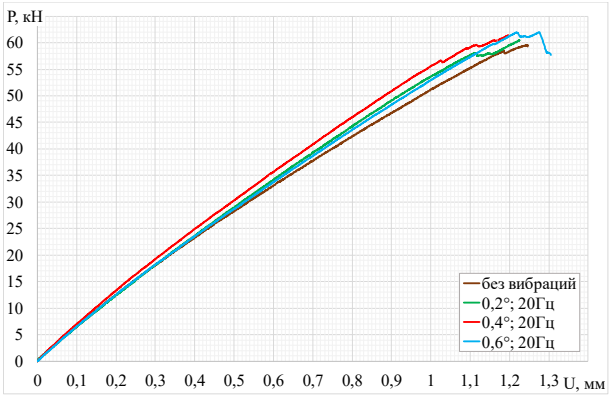
Parameters of the supercritical stage of deformation of STEF samples

Нагружение	Параметр	0 циклов	5000 циклов (трещина 5 мм)	7500 циклов (трещина 10 мм)
«Циклика», «статика»	P_B, кН	**76,76**	35,55	30,29
	k	**0,505**	0,459	0,182
	r	1,116	**1,273**	1,103
«Циклика», «статика», вибрации	P_B, кН	**63,52**	36,63	33,33
	k	**0,560**	0,417	0,353
	r	1,077	1,166	**1,173**

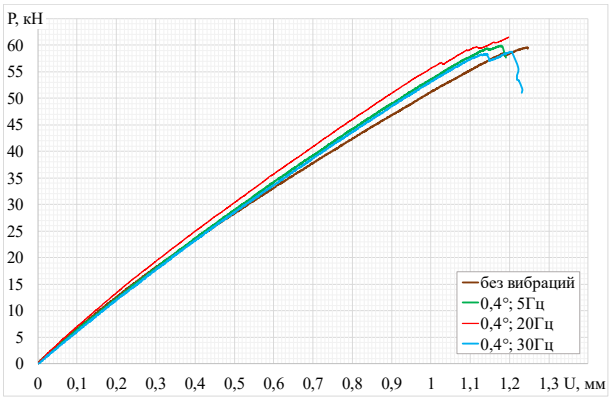
Из рис. 7 и табл. 7 видно, что трещины длиной 5 мм снизили максимальные прикладываемые усилия на 54 % (42 % с вибрациями), а трещины длиной 10 мм – на 60 % (48 % с вибрациями), в отличие от образцов из углепластика, где напротив начальная повреждённость

увеличивает максимальные усилия без дополнительных вибраций. Коэффициент реализации закритической стадии уменьшается с увеличением длины начальной трещины. Подобная зависимость наблюдается и в условиях вибрационных воздействий. Коэффициент равновесного роста трещины больше при условии наличия начальных трещин, при этом с увеличением её начальной длины коэффициент растёт только в условиях вибраций.

Исследование влияния дополнительных вибраций кручения с разной амплитудой и частотой закручивания на закритическую стадию деформирования проведено в испытаниях образцов ВКУ-60 [0], ВКУ-60 [± 45] без дополнительных вибраций кручения и с вибрациями с амплитудой угла закручивания 0,2°, 0,4°, 0,6° при частоте 20 Гц и с вибрациями с частотой 5 Гц, 20 Гц и 30 Гц при амплитуде угла закручивания 0,4°. Для образцов СТЭФ – без дополнительных вибраций кручения и с вибрациями с амплитудой угла закручивания 0,2°, 0,4°, 0,6° при частоте 15 Гц и с вибрациями с частотой 5 Гц, 15 Гц и 20 Гц при амплитуде угла закручивания 0,4°.



a



b

Рис. 8. Диаграммы растяжения образцов ВКУ-60 [0] с вибрациями: *a* – изменение амплитуды; *b* – изменение частоты

Fig. 8. Tensile diagrams of samples VKU-60 [0] with vibrations: *a* – change in amplitude; *b* – change in frequency

На рис. 8 показаны диаграммы растяжения образцов ВКУ-60 [0] с вибрациями кручения при разном угле закручивания и при разной частоте с фиксированными базовыми параметрами. В табл. 8 представлены численные результаты предельных усилий и расчётов коэффициентов.

Таблица 8

Параметры закритической стадии деформирования образцов ВКУ-60 [0] при растяжении с дополнительными вибрациями кручения

Table 8

Parameters of the supercritical stage of deformation of VKU-60 [0] samples under tension with additional torsional vibrations

Параметр	Без вибраций	Фактор амплитуды вибраций			Фактор частоты вибраций		
		0,2°	0,4°	0,6°	5 Гц	20 Гц	30 Гц
P_B, кН	59,58	60,43	61,47	**62,01**	59,88	**61,47**	53,87
k	0,004	0,000	0,000	**0,070**	0,037	0,000	**0,053**
r	1,000	1,001	1,000	**1,024**	**1,010**	1,000	1,008

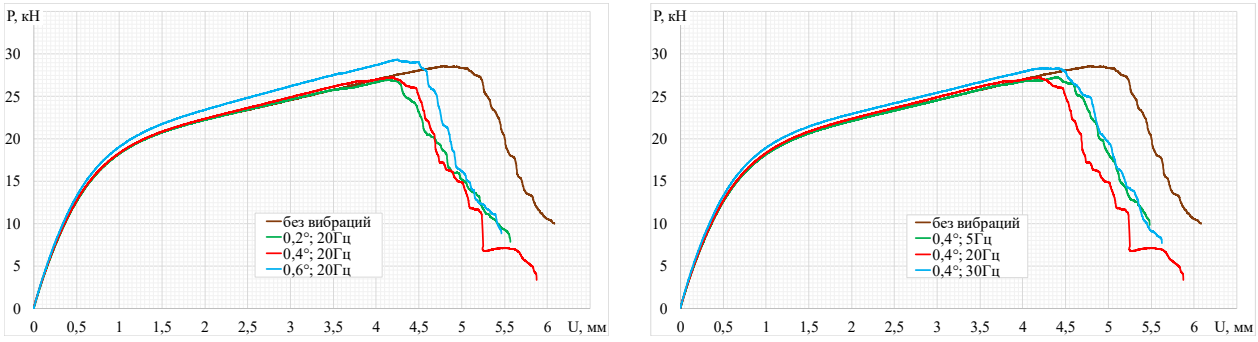
Изменение амплитуды или частоты не повлияло на реализацию закритической стадии деформирования в образцах ВКУ-60 [0]. Из диаграмм нагружения видно, что образцы выдержали большие прикладываемые усилия при реализации дополнительных вибраций кручения (с увеличением угла увеличивается максимальное усилие) при частоте 20 Гц. Это может быть связано, так же, как и при начальной повреждённости, со снятием технологических остаточных напряжений и локальным распрямлением волокон [24] под действием вибраций. Частота вибраций не оказала значимого влияния на предельные нагрузки разрушения образцов.

На рис. 9 показаны диаграммы растяжения образцов ВКУ-60 [± 45] с вибрациями кручения при разной амплитуде угла закручивания и при разной частоте с фиксированными базовыми параметрами. В табл. 9 представлены численные результаты предельных усилий и расчётов рассматриваемых коэффициентов.

Полученные диаграммы нагружения образцов ВКУ-60 [± 45] показали, что с увеличением угла закручивания при вибрациях с частотой 20 Гц увеличивается максимальное усилие, которое выдерживает образец, аналогично ВКУ-60 [0]. Изменение частоты вибраций не оказало значимого влияния на предельные нагрузки разрушения образцов. При действии дополнительных вибраций кручения коэффициенты реализации закритической стадии возрастают (исключение $\nu = 5$ Гц; $\varphi = 0{,}4$).

На рис. 10 показаны диаграммы растяжения образцов СТЭФ с вибрациями кручения при разной амплитуде угла закручивания и при разной частоте воздействий с фиксированными базовыми параметрами. В табл. 10 представлены численные результаты предельных усилий и расчётов коэффициентов.

Полученные диаграммы нагружения образцов СТЭФ показали, что дополнительные вибрации кручения снизили максимальные усилия при разрушении, в отличие от углепластика ВКУ-60. При действии дополнительных вибраций кручения коэффициент реализации закритической стадии возрастает.



a *b*

Рис. 9. Диаграммы растяжения образцов ВКУ-60 [± 45] с вибрациями: *a* – изменение амплитуды; *b* – изменение частоты

Fig. 9. Tensile diagrams of samples VKU-60 [± 45] with vibrations: *a* – change in amplitude; *b* – change in frequency

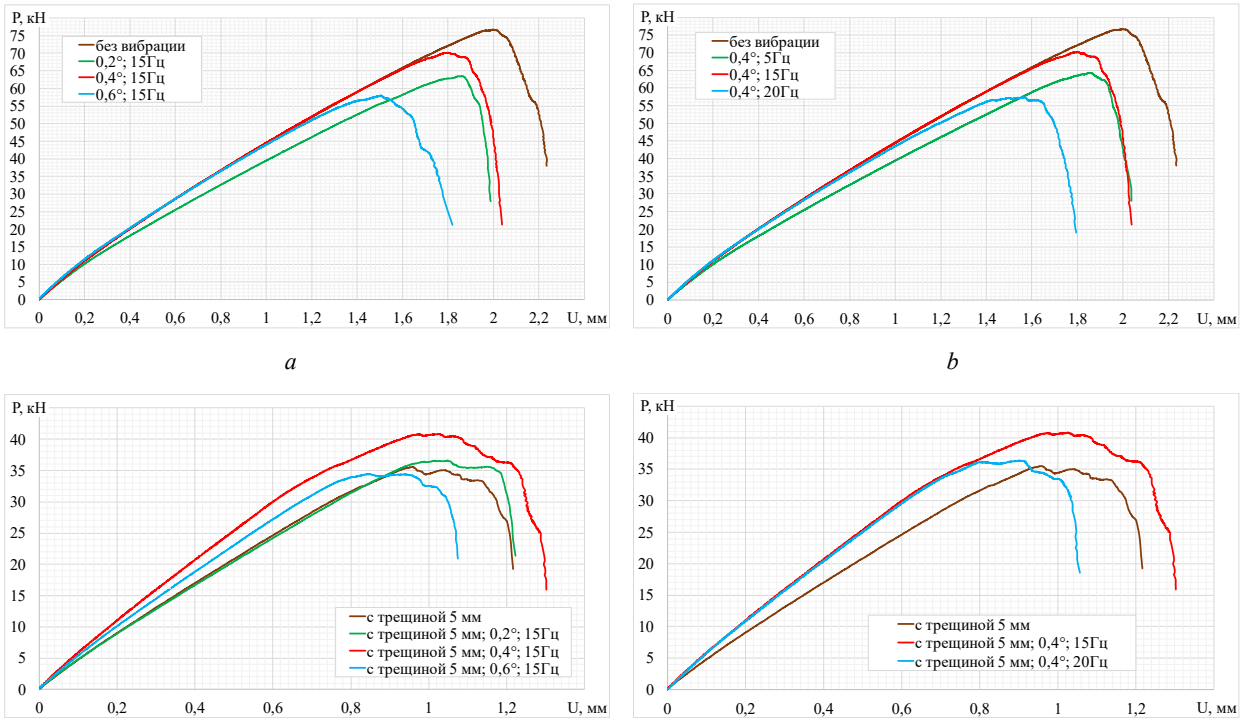
Таблица 9

Параметры закритической стадии деформирования образцов ВКУ-60 [± 45] при растяжении с дополнительными вибрациями кручения

Table 9

Parameters of the supercritical stage of deformation of samples VKU-60 [± 45] in tension with additional torsional vibrations

Параметр	Без вибраций	Фактор амплитуды вибраций			Фактор частоты вибраций		
		0,2°	0,4°	0,6°	5 Гц	20 Гц	30 Гц
P_B, кН	28,58	26,97	27,28	**29,35**	27,29	27,28	**28,35**
k	0,651	0,709	**0,876**	0,699	0,640	**0,876**	0,729
r	1,271	1,340	**1,402**	1,284	1,246	**1,402**	1,327



a *b*

c *d*

Рис. 10. Диаграммы растяжения образцов СТЭФ с вибрациями, для образцов без трещин: *a* – влияние амплитуды; *b* – влияние частоты; для образцов с трещинами; *c* – влияние амплитуды; *d* – влияние частоты

Fig. 10. Tensile diagrams of STEF samples with vibrations, where for samples without cracks: *a* – is effect of amplitude; *b* – is effect of frequency; for samples with cracks; *c* – is influence of amplitude; *d* – is influence of frequency

Таблица 10

Параметры закритической стадии деформирования образцов СТЭФ при растяжении с дополнительными вибрациями кручения

Table 10

Parameters of the supercritical stage of deformation of STEF samples under tension with additional torsional vibrations

Нагружение	Параметр	Без вибраций	Фактор амплитуды вибраций			Фактор частоты вибраций		
			0,2°	0,4°	0,6°	5 Гц	15 Гц	20 Гц
«Статика», вибрации	P_B, кН	76,76	63,52	**70,17**	57,99	64,27	**70,17**	57,36
	k	0,505	0,56	**0,697**	0,634	0,563	**0,697**	0,669
	r	1,116	1,077	1,138	**1,208**	1,100	1,138	**1,151**
«Циклика», «статика», вибрации	P_B, кН	35,55	36,63	**40,84**	34,41	–	**40,84**	36,32
	k	0,459	0,417	**0,611**	0,392	–	**0,611**	0,49
	r	**1,273**	1,166	1,270	1,269	–	1,270	1,169

Заключение

Проведено исследование процессов деформирования и разрушения ПКМ при квазистатическом растяжении с дополнительными вибрациями на кручение, а также с предварительным циклическим накоплением повреждений в условиях растяжения. Рассмотрено влияние начальной усталостной повреждённости и дополнительных вибраций кручения с различными параметрами на деформирование и разрушение образцов углепластика со схемой армирования [0] и [± 45] и образцов стеклопластика. Показана возможность положительного влияния способов нагружения и наличия дополнительных воздействий на устойчивость процессов закритического поведения образцов композиционных материалов с концентраторами и начальными трещинами.

В результате определены следующие основные выводы:

1. Образцы ВКУ-60 [0] разрушались без реализации закритической стадии деформирования (значение коэффициента k от 0 до 0,15), что говорит о высокой степени опасности разрушения такого материала, сопровождающимся лавинообразным ростом магистральной трещины. Реализация закритической стадии деформирования наблюдалась в образцах ВКУ-60 [± 45] и СТЭФ, при этом для ВКУ-60 [± 45] стадия была наиболее выражена.

2. Начальная усталостная повреждённость оказала следующее влияние на процесс деформирования и разрушения образцов:

– ВКУ-60 [± 45]: при увеличении числа циклов предварительного циклического нагружения продолжительность равновесного развития повреждений возрастала (увеличение коэффициентов k и r), что говорит об увеличении безопасности разрушения такого материала. В условиях реализации вибрационных воздействий катастрофичность разрушения такого материала снижалась (снижение коэффициентов k и r относительно испытаний без вибраций);

– СТЭФ: начальная усталостная трещина малой длины оказала положительное влияние на равновесный рост дальнейших повреждений при квазистатическом растяжении, что выражается в росте коэффициента реализации закритической стадии k при практически неизменном коэффициенте равновесности развития повреждений r.

3. Дополнительные вибрации кручения при растяжении образцов из ВКУ-60 [± 45] и СТЭФ способствовали увеличению вычисленного коэффициента реализации закритической стадии k, при этом определение параметров вибраций, которые наиболее эффективны с точки зрения снижения опасности разрушения, требует проведения дополнительных испытаний с расширением диапазона параметров.

Библиографический список

1. Stability of Postcritical Deformation of CFRP under Static ± 45° Tension with Vibrations / V. Wildemann [et al.] // Polymers. – 2022. – Vol. 14, no. 21. – P. 4502.

2. Гурджиев, А.В. Исследование влияния дополнительных вибраций кручения на закритическую стадию деформирования волокнистого полимерного композиционного материала / А.В. Гурджиев, М.П. Третьяков, В.Э. Вильдеман // Master's Journal. – 2023. – № 1. – Art. № 11.

3. Вильдеман, В.Э. Эффект вибрационной стабилизации процесса закритического деформирования / В.Э. Вильдеман, Е.В. Ломакин, М.П. Третьяков // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 467, № 3. – С. 284.

4. Effects of vibration direction on the mechanical behavior and microstructure of a metal sheet undergoing vibration-assisted uniaxial tension / X. Zhao [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 743. – P. 472–481.

5. The effect of superimposed ultrasonic vibration on tensile behavior of 6061-T6 aluminum alloy / B. Wu [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 116. – P. 1843–1854.

6. Равновесные внутренние трещины в упругих телах, подкреплённых тонкими гибкими покрытиями / Б.В. Соболь, Е.В. Рашидова, П.В. Васильев, А.И. Новикова // Вестник ДГТУ. Технические науки. – 2020. – Т. 47, № 3. – С. 111–121.

7. Fatigue crack retardation by the application of hard damping coating to blades under resonance / Zhu, Qing-yu [et al.] // Journal of Central South University. – 2023. – Vol. 30.4 – P. 1095–1106.

8. Влияние жесткости нагружающей системы на равновесный рост трещин при квазистатическом нагружении / П.С. Бажуков, В.Э. Вильдеман, А.В. Ильиных, М.П. Третьяков // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – № 2. – С. 7–20.

9. Вильдеман, В.Э. Анализ влияния жесткости нагружающей системы на стадию закритического деформирования материалов / В.Э. Вильдеман, М.П. Третьяков // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 3. – С. 49–57.

10. Чаусов, Н.Г. Полная диаграмма деформирования как источник информации о кинетике накопления повреждений и трещиностойкости материалов / Н.Г. Чаусов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – № 7, Т. 70. – С. 42–49.

11. Стружанов, В.В. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций / В.В. Стружанов, В.И. Миронов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1995. – 191 с.

12. Влияние последовательности нагружения на кинетику роста трещины: теория, модель, эксперимент / А.Н. Савкин, Р. Сундер, Д.С. Денисевич [и др.] // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2018. – № 4. – С. 246–255.

13. Шлянников, В.Н. Характеристики циклической трещиностойкости стали ст-3 при двухосном нагружении / В.Н. Шлянников, А.П. Захаров, А.А. Герасименко // Труды Академэнерго. – 2013. – № 4. – С. 91–101.

14. Вансович, К.А. Двухосные испытания металлических образцов на испытательных машинах с одной осью нагружения / К.А. Вансович, В.И. Ядров // Омский научный вестник. – 2020. – № 5(173). – С. 10–16.

15. Шлянников, В.Н. Образцы для испытаний при двухосном циклическом нагружении / В.Н. Шлянников, А.П. Захаров // Труды Академэнерго. – 2013. – № 3. – С. 70–79.

16. 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, № 1. – С. 63–67.

17. Маклакова, С.Н. Исследование прочности бетона при двухосном сжатии / С.Н. Маклакова, М.А. Галкина, В.Н. Бровкин // Вестник ТГТУ. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. – 2022. – № 1(13). – С. 23–28.

18. Multiaxial loading on a 3D woven carbon fiber reinforced plastic composite using tensile-torsion tests: Identification of the first damage envelope and associated damage mechanisms / N. Tableau [et al.] // Composite Structures. – 2019. – Vol. 227. – P. 111305.

19. Долгих, Д.А. Исследование закономерностей накопления повреждений и развития расслоения в полимерных композиционных материалах на основе двухуровневых моделей разрушения / Д.А. Долгих, М.А. Ташкинов // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2020. – № 4. – С. 74–85.

20. Armanfard, A. Experimental evaluation of carbon fibre, fibreglass and aramid tubular braided composites under combined tension–torsion loading / A. Armanfard, G.W. Melenka // Composite Structures. – 2021. – Vol. 269. – P. 114049.

21. Шлянников, В.Н. Характеристики деформирования сплава Д16Т при совместном нагружении растяжением, сжатием, кручением и внутренним давлением / В.Н. Шлянников, И.С. Иштыряков, Р.Р. Яруллин // Труды Академэнерго. – 2014. – № 3. – С. 78–90.

22. Староверов, О.А. Оценка степени поврежденности углепластиковых композиционных материалов при ударном воздействии / О.А. Староверов, А.В. Бабушкин, С.М. Горбунов // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – № 1. – С. 163–174.

23. Chen, Jiwei Compressive fatigue response and reliability analysis of thermoplastic composite with low-velocity impact damage / Jiwei Chen, Weixing Yao, Hanyu Lin // Polymer Composite. – 2021. – Vol. 42(11). – P. 5678–5690.

24. Sapozhnikov, S.B. 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.

25. Обзор публикаций по разработкам лопаток из полимерных композиционных материалов для вентилятора авиационного двигателя / М.И. Валуева, И.В. Зеленина, К.С. Мишуров, И.Н. Гуляев // Вестник машиностроения. – 2019. – № 2. – С. 34–41.

26. Amoo, Leye M. On the design and structural analysis of jet engine fan blade structures / M.L. Amoo // Progress in Aerospace Sciences. – 2013. – Vol. 60. – P. 1–11.

27. Review of damage mechanism and protection of aeroengine blades based on impact properties / Pingping Yang [et al.] // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Vol. 140. – P. 106570.

28. Hastie, J.C. Failure analysis of thermoplastic composite pipe (TCP) under combined pressure, tension and thermal gradient for an offshore riser application / J.C. Hastie, M. Kashtalyan, I.A. Guz // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2019. – Vol. 178. – P. 103998.

29. Игнатик, А.А. Характеристика НДС стенки трубопровода под воздействием внутреннего давления, изгиба и кручения / А.А. Игнатик // Газовая промышленность. – 2020. – № 4(799). – С. 102–107.

30. Жихарев, М.В. Влияние предварительного нагружения на баллистические свойства стеклопластиковых панелей / М.В. Жихарев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 82–90.

31. Усталостная чувствительность стеклопластиков в условиях пропорционального циклического растяжения с кручением / В.Э. Вильдеман, О.А. Староверов, А.И. Мугатаров, А.М. Кучуков // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2023. – № 6. – С. 29–40.

32. Анализ остаточных напряжений в слоистых композитах на примере симметричной схемы армирования [0°/90°] / Д.А. Бондарчук, Б.Н. Федулов, А.Н. Федоренко, Е.В. Ломакин // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. – №3. – С. 17–26.

References

1. Wildemann V. et al. Stability of Postcritical Deformation of CFRP under Static ±45° Tension with Vibrations. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 21, 4502 p.

2. Gurdzhiev A.V. Tret'iakov M.P., Vil'deman V.E. Issledovanie vliianiia dopolnitel'nykh vibratsii krucheniia na zakriticheskuiu stadiiu deformirovaniia voloknistogo polimernogo kompozitsionnogo materiala [Investigation of the effect of additional torsional vibrations on the supercritical stage of deformation of a polymer composite material]. *Master's Journal*, 2023, no. 1, Art. No. 11.

3. Vil'deman V.E., Lomakin E.V., Tret'iakov M.P. Effekt vibratsionnoi stabilizatsii protsessa zakriticheskogo deformirovaniia [The effect of vibration stabilization of the process of supercritical deformation]. *Doklady Akademii nauk*, 2016, vol. 467, no. 3, 284 p.

4. Zhao X. et al. Effects of vibration direction on the mechanical behavior and microstructure of a metal sheet undergoing vi-

bration-assisted uniaxial tension. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 743, pp. 472-481.

5. Wu B. et al. The effect of superimposed ultrasonic vibration on tensile behavior of 6061-T6 aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 116, pp. 1843-1854.

6. Sobol' B.V., Rashidova E.V., Vasil'ev P.V., Novikova A.I. Ravnovesnye vnutrennie treshchiny v uprugikh telakh, podkreplennykh tonkimi gibkimi pokrytiiami [Equilibrium internal cracks in elastic bodies supported by thin flexible coatings]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2020, vol. 47, no. 3, pp. 111-121.

7. Zhu Qing-yu et al. Fatigue crack retardation by the application of hard damping coating to blades under resonance. *Journal of Central South University*, 2023, vol. 30.4, pp. 1095-1106.

8. Bazhukov P.S., Vil'deman V.E., Il'inykh A.V., Tret'iakov M.P. Vliianie zhestkosti nagruzhaiushchei sistemy na ravnovesnyi rost treshchin pri kvazistaticheskom nagruzhenii [The effect of the rigidity of the loading system on the equilibrium crack growth under quasi-static loading]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2013, no. 2, pp. 7-20.

9. Vil'deman V.E., Tret'iakov M.P. Analiz vliianiia zhestkosti nagruzhaiushchei sistemy na stadiiu zakriticheskogo deformirovaniia materialov [Analysis of the effect of the rigidity of the loading system at the stage of supercritical deformation of materials]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin*, 2013, no. 3, pp. 49-57.

10. Chausov N.G. Polnaia diagramma deformirovaniia kak istochnik informatsii o kinetike nakopleniia povrezhdenii i treshchinostoikosti materialov [A complete deformation diagram as a source of information on the kinetics of damage accumulation and crack resistance of materials]. *Zavodskaia laboratoriia. Diagnostika materialov*, 2004, no. 7, vol. 70, pp. 42-49.

11. Struzhanov V.V., Mironov V.I. Deformatsionnoe razuprochnenie materiala v elementakh konstruktsii [Deformation softening of the material in structural elements]. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 1995, 191 p.

12. Savkin A.N., Sunder R., Denisevich D.S. et al. Vliianie posledovatel'nosti nagruzheniia na kinetiku rosta treshchiny: teoriia, model', eksperiment [Influence of the loading sequence on the kinetics of crack growth: theory, model, experiment]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no. 4, pp. 246-255.

13. Shliannikov V.N., Zakharov A.P., Gerasimenko A.A. Kharakteristiki tsiklicheskoi treshchinostoikosti stali st-3 pri dvukhosnom nagruzhenii [Characteristics of cyclic crack resistance of st-3 steel under biaxial loading]. *Trudy Akademenergo*, 2013, no. 4, pp. 91-101.

14.Vansovich K.A., Iadrov V.I. Dvukhosnye ispytaniia metallicheskikh obraztsov na ispytatel'nykh mashinakh s odnoi os'iu nagruzheniia [Biaxial testing of metal samples on testing machines with one loading axis]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2020, no. 5(173), pp. 10-16.

15. Shliannikov V.N. Zakharov, A.P. Obraztsy dlia ispyta-nii pri dvukhosnom tsiklicheskom nagruzhenii [Test samples for biaxial cyclic loading]. *Trudy Akademenergo*, 2013, no. 3, pp. 70-79.

16. Panteleev I.A. Mubassarova V.A., Zaitsev A.V. et al. Effekt Kaizera pri mnogoosnom neproportsional'nom szhatii peschanika [The Kaiser effect in multiaxial disproportionate compression of sandstone]. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki*, 2020, vol. 495, no. 1, pp. 63-67.

17. Maklakova S.N., Galkina M.A., Brovkin V.N. Issledovanie prochnosti betona pri dvukhosnom szhatii [Investigation of concrete strength under biaxial compression]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskie tekhnologii*, 2022, no. 1(13), pp. 23-28.

18. Tableau N. et al. Multiaxial loading on a 3D woven carbon fiber reinforced plastic composite using tensile-torsion tests: Identification of the first damage envelope and associated damage mechanisms. *Composite Structures*, 2019, vol. 227, 111305 p.

19. Dolgikh D.A., Tashkinov M.A. Issledovanie zakonomernostei nakopleniia povrezhdenii i razvitiia rassloeniia v polimernykh kompozitsionnykh materialakh na osnove dvukhurovnevykh modelei razrusheniia [Investigation of patterns of damage accumulation and delamination development in polymer composite materials based on two-level fracture models]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, no. 4, pp. 74-85.

20. Armanfard A., Melenka G.W. Experimental evaluation of carbon fibre, fibreglass and aramid tubular braided composites under combined tension-torsion loading. *Composite Structures*, 2021, vol. 269, 114049 p.

21. Shliannikov V.N., Ishtyriakov I.S., Iarullin R.R. Kharakteristiki deformirovaniia splava D16T pri sovmestnom nagruzhenii rastiazheniem, szhatiem, krucheniem i vnutrennim davleniem [Deformation characteristics of the D16T alloy under combined stress by stretching, compression, torsion and internal pressure]. *Trudy Akademenergo*, 2014, no. 3, pp. 78-90.

22. Staroverov O.A., Babushkin A.V., Gorbunov S.M. Otsenka stepeni povrezhdennosti ugleplastikovykh kompozitsionnykh materialov pri udarnom vozdeistvii [Assessment of the degree of damage to carbon fiber composite materials during impact]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 163-174.

23. Chen Jiwei, Yao Weixing, Lin Hanyu. Compressive fatigue response and reliability analysis of thermoplastic composite with low-velocity impact damage. *Polymer Composite*, 2021, vol. 42 (11), pp. 5678-5690.

24. 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.

25. Valueva M.I., Zelenina I.V., Mishurov K.S., Guliaev I.N. Obzor publikatsii po razrabotkam lopatok iz polimernykh kompozitsionnykh materialov dlia ventiliatora aviatsionnogo dvigatelia [Review of publications on the development of blades made of polymer composite materials for an aircraft engine fan]. *Vestnik mashinostroeniia*, 2019, no. 2, pp. 34-41.

26. Amoo Leye M. On the design and structural analysis of jet engine fan blade structures. *Progress in Aerospace Sciences*, 2013, vol. 60, pp. 1-11.

27. Yang Pingping et al. Review of damage mechanism and protection of aero-engine blades based on impact properties. *Engineering Failure Analysis*, 2022, vol. 140, 106570 p.

28. Hastie J.C., Kashtalyan M., Guz I.A. Failure analysis of thermoplastic composite pipe (TCP) under combined pressure, tension and thermal gradient for an offshore riser application. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2019, vol. 178, 103998 p.

29. Ignatik A.A. Kharakteristika NDS stenki truboprovoda pod vozdeistviem vnutrennego davleniia, izgiba i krucheniia [Characteristics of the VAT of the pipeline wall under the influence of internal pressure, bending and torsion]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2020, no. 4 (799), pp. 102-107.

30. Zhikharev M.V. Vliianie predvaritel'nogo nagruzheniia na ballisticheskie svoistva stekloplastikovykh panelei [The effect of preloading on the ballistic properties of fiberglass panels]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Mashinostroenie*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 82-90.

31. Vil'deman V.E., Staroverov O.A., Mugatarov A.I., Kuchukov A.M. Ustalostnaia chuvstvitel'nost' stekloplastikov v usloviiakh proportsional'nogo tsiklicheskogo rastiazheniia s krucheniem [Fatigue sensitivity of fiberglass in conditions of proportional cyclic tension with torsion]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2023, no. 6, pp. 29-40.

Bondarchuk D.A., Fedulov B.N., Fedorenko A.N., Lomakin E.V. Analiz ostatochnykh napriazhenii v sloistykh kompozitakh na primere simmetrichnoi skhemy armirovaniia [0°/90°] [Analysis of residual stresses in layered composites using the example of a symmetrical reinforcement scheme [0°/90°]]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 3, pp. 17-26.

Финансирование. Исследования по изучению влияния дополнительных вибрационных воздействий и их параметров на катастрофичность разрушения выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM- 2024-0013).

Испытания по выращиванию начальной усталостной трещины и изучению влияния длины предварительно выращенных трещин на процессы закритического деформирования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-19-00765).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Funding. The studies on the influence of additional vibration effects and their parameters on the catastrophic nature of destruction were carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSNM-2024-0013).

Tests on growing an initial fatigue crack and studying the influence of the length of pre-grown cracks on the processes of postcritical deformation were carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00765).

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

The contribution of the authors is equivalent.