Моделирование скоростного упрочнения полимерного композитного материала при нагружении вдоль направления армирования / Б.Н. Федулов, А.Ю. Константинов, А.Н. Федоренко, И.В. Сергеичев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 1. – С. 105–111. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.1.09

Perm Polytech Style: Fedulov B.N., Konstantinov A.Y., Fedorenko A.N., Sergeichev I.V. Modeling of high-rate hardening of a polymer composite material under loading along the reinforcement direction. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 1, pp. 105-111. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.1.09

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 1, 2024
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2024.1.09
УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ НАГРУЖЕНИИ ВДОЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ АРМИРОВАНИЯ

Б.Н. Федулов[1,3], А.Ю. Константинов[2,3], А.Н. Федоренко[1,3], И.В. Сергеичев[3]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
[2]Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация
[3]Сколковский институт науки и технологий (Сколтех), Москва, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 18 августа 2023 г.
Одобрена: 26 ноября 2023 г.
Принята к публикации: 12 марта 2024 г.

Ключевые слова:

динамическая прочность, напряжение, деформация, скорость деформации, композиты, метод Кольского, модель.

АННОТАЦИЯ

В промышленности наблюдается интерес к возможности моделирования скоростного воздействия на композитные конструкции. Причем некоторые процессы, такие как аварии, взрывы, и возможные вопросы пробивания требуют анализа композитных материалов при существенно больших скоростях деформаций. В работе рассматривается возможность построения модели деформирования композитного материала на основе полимерного связующего и углеродного волокна, учитывающей скоростное упрочнение. Особенностью исследования является построение модели, которая учитывает широкий диапазон скоростей деформации от статики до нескольких тысяч обратных секунд. В связи с чем были проведены испытания со специальной оснасткой и образцами, которые позволяют получить данные со столь высокими скоростями нагружения. За основу построения модели взят подход, рассматривающий использование параметров поврежденности, так называемый класс моделей с прогрессирующим разрушением. Основным отличием выбранной модели является формализации скорости воздействия на материал через параметр поврежденности, то есть рассматривается скорость изменения значений поврежденности. Такой подход позволяет составлять определяющие соотношения, основанные только на основе параметров поврежденности, которые видоизменяют жесткостные и прочностные характеристики композитов, что существенно упрощает моделирование и анализ деформирования материала.

© ПНИПУ

© **Федулов Борис Никитович** – д.ф.-м.н., проф. каф. теории пластичности мех.-мат. факультета, e-mail: fedulov.b@mail.ru.
Константинов Александр Юрьевич – д.ф.-м.н., проф. каф. теоретической, компьютерной и экспериментальной механики, e-mail: constantinov.al@yandex.ru.
Федоренко Алексей Николаевич – к.т.н., с.н.с. Центра технологий материалов, e-mail: mail@anfedorenko.ru.
Сергеичев Иван Валерьевич – к.ф.-м.н., доц. Центра технологий материалов, e-mail: i.sergeichev@skoltech.ru.

Boris N. Fedulov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, professor of Theory of plasticity department, e-mail: fedulov.b@mail.ru.
Alexander Y. Konstantinov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor of Research Institute of Mechanics, e-mail: constantinov.al@yandex.ru.
Aleksei N. Fedorenko – PhD in Technical Sciences, senior research scientist of Center for Material Technologies, e-mail: mail@anfedorenko.ru.
Ivan V. Sergeichev – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate professor of Center for Material Technologies, e-mail: i.sergeichev@skoltech.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)

MODELING OF HIGH-RATE HARDENING OF A POLYMER COMPOSITE MATERIAL UNDER LOADING ALONG THE REINFORCEMENT DIRECTION

B.N. Fedulov[1,3], A.Y. Konstantinov[2,3], A.N. Fedorenko[1,3], I.V. Sergeichev[3]

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
[2]Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation
[3]Skoltech, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 18 August 2023
Approved: 26 November 2023
Accepted for publication: 12 March 2024

Keywords:
dynamic strength, stress, deformation, strain rate, composite, dynamic tests, Kolsky method, model of material.

ABSTRACT

Modeling the high-rate deformation of composite structures is of great interest in the industry. Moreover, some processes such as accidents, explosions and possible impact issues require analysis of composite materials at significantly high deformation rates. The paper considers the possibility of developing a model of deformation of a composite material based on a polymer matrix and carbon fiber taking into account high-rate hardening. A feature of the study is the development of a model that takes into account a wide range of deformation rates from static to several thousand reverse seconds. Thus, tests were carried out with special equipment and samples that allow us to obtain data with such high loading speeds. The model is based on an approach considering the use of damage parameters, the so-called class of models with progressive degradation. The main innovative part of the chosen model is the formalization of the rate of deformation on the material through the damage parameter, that is, the rate of change in damage values is considered. This approach makes it possible to make constitutive relations based only on the damage parameters, which modify the stiffness and strength characteristics of composites, which greatly simplifies the modeling and analysis of material deformation.

© PNRPU

Введение

В последние годы проявляется все больший интерес к использованию композитных материалов в конструкциях, где в экстремальных ситуациях возможно высокоскоростное деформирование. Примерами таких ситуаций могут быть определенные аварийные случаи с сосудами высокого давления, аварийная посадка самолетов, работающих на сниженном топливе [1–4].

Кроме того, существует потребность моделирования пробивания композитной брони, где деформации композитного материала также предельно высоки [5].

Направление работ по экспериментальному исследованию высокоскоростных деформационных характеристик композитных материалов в основном связана с использованием методов на основе метода разрезного стержня Кольского. Многие эффекты скоростного упрочнения показаны, но для относительно небольших скоростей деформирования, что во многом связано с малыми размерами стандартных образцов [6–11].

Другая актуальная тема, где вопросы скоростного деформирования актуальны, это низкоскоростной удар по композиту. При эксплуатации композитных конструкций одним из наиболее уязвимых мест является случайное повреждение ударом (падение инструмента). Притом, что скорости удара низкие, локальные деформации могут быть высоки. В этой области много работ по моделированию и возможность моделировать скоростное упрочнения композитного материала наиболее востребована [12–16]. Во многих работах по моделированию используется понятие поврежденности [17; 18]. В данной работе мы будем использовать именно такой подход, и в качестве параметра повреждения рассматривается степень изменения жесткости материала. Пластическое деформирование предполагается незначительным и не используется в предложенных соотношениях. После любого воздействия материал разгружается в нулевые деформации, хотя при высокой степени поврежденности с очень низким значением модуля упругости.

За основу взята модель, предложенная коллективом авторов в работах [19–21], при этом в работе [22] представлена модель именно для скоростного разрушения. Основная цель работы – использовать соотношения из работы [22] для нагружения однонаправленного композита вдоль армирования в более высоком диапазоне скоростей деформирования. В качестве исследуемого материала используется композит на основе связующего фирмы Huntsman LY516 и волокна T700. Образцы были созданы технологией намотки с процентным содержанием волокна 50 %.

1. Экспериментальное исследование

Исследования динамического деформирования и разрушения композитного материала проводилось с использованием классического варианта метода Кольского в условиях сжатия. Для возможности нагрузить образец более высокими скоростями деформирования использовалась специальная геометрия образцов и соответствующая оснастка (рис. 1, 2).

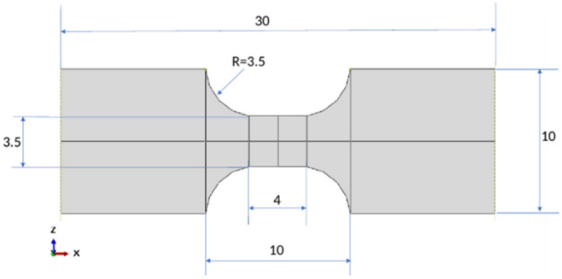


Рис. 1. Схема образца

Fig. 1. Scheme of the sample

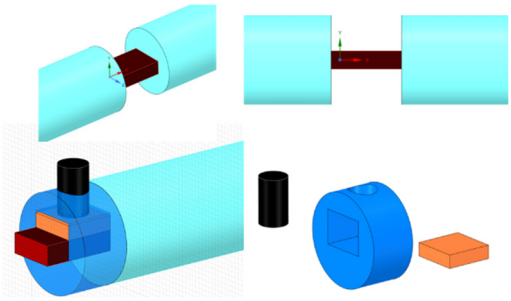


Рис. 2. Схема оснастки

Fig. 2. Scheme of fixture

На рис. 3 показаны результаты высокоскоростной фотосъемки во время деформирования образца. Примеры полученных временных зависимостей напряжений показаны на рис. 4.

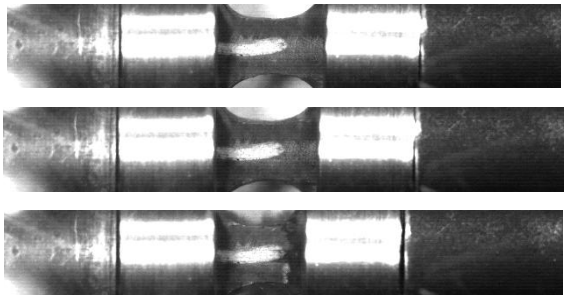


Рис. 3. Процесс деформирования и разрешения образца в оснастке

Fig. 3. The process of deformation and resolution of the sample in the fixture

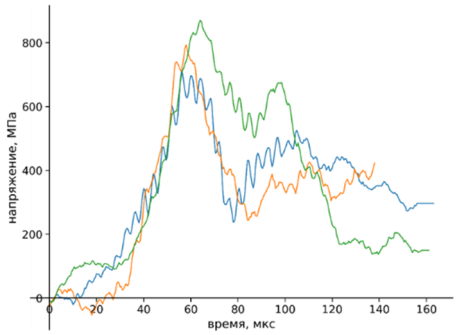


Рис. 4. Временные зависимости напряжений, полученные в экспериментах

Fig. 4. Time dependences of stresses obtained in experiments

2. Описание модели

Для построения модели будем использовать подход, предложенный в работе [22]. Определяющие соотношения приведены в уравнениях (1).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\psi_1 E_{11}} & -\frac{\psi_2 \nu_{21}}{E_{22}} & -\frac{\psi_2 \nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\psi_2 \nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{\psi_2 E_{22}} & -\frac{\psi_2 \nu_{32}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\psi_2 \nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\psi_2 \nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{\psi_2 E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\psi_2 G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\psi_2 G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\psi_2 G_{23}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

Видно, что соотношения (1) являются стандартной связью напряжений и деформаций для линейно упругого ортотропного тела, в которые входят множители ψ_i. Упомянутые множители являются параметрами поврежденности и снижают жесткость материала в процессе его деградации при деформировании. При этом множитель ψ_1 отвечает за разрушение волокна, а множитель ψ_2 связан с разрушением матрицы композита. В начале моделирования оба множителя равны единице ψ_i=1, что соответствует идеальному неповрежденному материалу. Нулевые значения соответствуют полному разрушению соответствующей составляющей.

В данной работе нас интересует случай одноосного сжатия вдоль направления армирования, что сводит соотношения (1) к формуле (2):

$$\varepsilon_{11} = \sigma_{11} / \psi_1 E_{11}. \quad (2)$$

Далее необходимо задать закон деградации материала, то есть закон изменения параметра ψ_1. Для этого выберем соотношения, которые реализуют следующую схему деформирования, представленную на рис. 5.

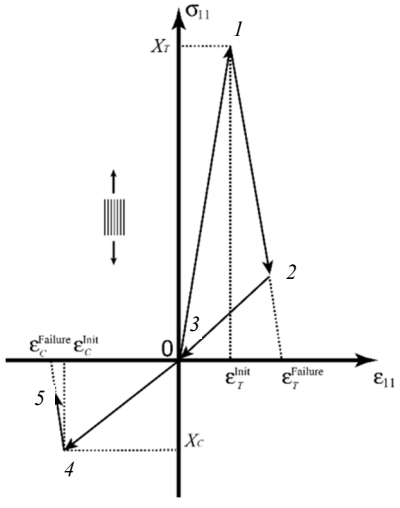


Рис. 5. Схема продольного нагружения

Fig. 5. The scheme of longitudinal loading

Любая диаграмма нагружения при разгрузке возвращается в ноль, на участках *1–2* в случае растяжения и *4–5* в случае сжатия происходит рост параметра поврежденности ψ_1, при этом диаграмма линейно падает вниз. Параметры X_T и X_C отвечают напряжениям разрушения вдоль армирования в случае растяжения и сжатия соответственно. Параметры ε_T^{Init}, $\varepsilon_T^{Failure}$, ε_C^{Init}, $\varepsilon_C^{Failure}$ отвечают деформациям начала разрушения и полного разрушения для растяжения и сжатия соответственно.

В случае активного процесса разрушения напряжения находятся на поверхности разрушения, которая, в свою очередь, зависит от параметров поврежденности. В случае разрушения при сжатии можно записать следующее выражение:

$$\sigma_{11} = X_C(\psi_1) . \quad (3)$$

Диаграмму, представленную на рис. 5, можно реализовать, используя зависимость для X_C в следующем виде:

$$X_C(\psi_1) = \frac{\dfrac{X_C \varepsilon_C^{Failure}}{\varepsilon_C^{Failure} - \varepsilon_C^{Init}}}{1 + \dfrac{\dfrac{X_C}{E_{11}\psi_1}}{\varepsilon_C^{Failure} - \varepsilon_C^{Init}}} . \quad (4)$$

Здесь X_C и E_{11} – начальные параметры прочности и жесткости, до начала процесса деградации или изменения параметра ψ_1. Влияние скорости деформирования согласно [22] можно учесть, вводя в зависимость параметра прочности X_C параметр скорости поврежденности $\dot{\psi}_1$, что в общем случае приводит к зависимости прочностной характеристики от двух параметров, а условие активного разрушения в случае одноосного сжатия может быть сформулировано следующим образом:

$$\sigma_{11} = X_C(\psi_1, \dot{\psi}_1). \quad (5)$$

При этом статическую часть зависимости можно рассмотреть в виде (4), а динамическую часть учесть, как специальный множитель по аналогии с работами Джонсона Кука. В качестве динамического множителя предлагается использовать степенную зависимость от скорости роста повреждения, что окончательно приводит к выражению для условия прочности:

$$X_C(\psi_1, \dot{\psi}_1) = X_C^{St}(\psi_1) X_C^{Dyn}(\dot{\psi}_1) = \left(\frac{\dfrac{X_C \varepsilon_C^{Failure}}{\varepsilon_C^{Failure} - \varepsilon_C^{Init}}}{1 + \dfrac{\dfrac{X_C}{E_{11}\psi_1}}{\varepsilon_C^{Failure} - \varepsilon_C^{Init}}} \right) \left(1 - C \left(\frac{\dfrac{d}{dt}\psi_1}{\psi_0} \right)^N \right). \quad (6)$$

Параметры C, N, ψ_0 – константы, определяемые экспериментально. Предполагается, что если скорость повреждений $\dot{\psi}_1$ оказывается меньше ψ_0, то $X_C^{Dyn}(\dot{\psi}_1) \equiv 1$ и анализ происходит под влиянием только статической составляющей $X_C^{St}(\psi_1)$.

3. Получение параметров на основе экспериментальных данных

Используя соотношения (5) совместно с (6), условие активного разрушения можно записать в следующем виде:

$$\sigma_{11} = \psi_1 E_{11} \varepsilon_{11} = X_C(\psi_1, \dot{\psi}_1) . \quad (7)$$

При этом предположим, что скорость деформирования постоянная $\dot{\varepsilon}_{11} = v$, тогда:

$$\psi_1 E_{11} v t = X_C(\psi_1, \dot{\psi}_1) . \quad (8)$$

Соотношение (8) является обыкновенным дифференциальным уравнением относительно параметра ψ_1, которое можно решать самыми стандартными способами. Окончательно имеем:

$$\psi_1 E_{11} v t = \left(\frac{\dfrac{X_C \varepsilon_C^{Failure}}{\varepsilon_C^{Failure} - \varepsilon_C^{Init}}}{1 + \dfrac{\dfrac{X_C}{E_{11}\psi_1}}{\varepsilon_C^{Failure} - \varepsilon_C^{Init}}} \right) \left(1 - C \left(\frac{\dfrac{d}{dt}\psi_1}{\psi_0} \right)^N \right) \quad (9)$$

при начальных условиях $\psi_1(\varepsilon_C^{Init}/v)=1$, так как вначале материал не повреждён.

Уравнения (8) и (9) по форме схожи с моделями, предлагаемыми для параметров поврежденности основателями данного направления исследований – Л.М. Качановым [23] и Ю.Н. Работновым [24], при этом материал находится не в условиях ползучести, а претерпевает высокоскоростное деформирование.

Уравнение (9) является основой для получения констант C, N, ψ_0 из экспериментальных данных.

Типовое решение уравнения (9) показано на рис. 6.

В табл. 1 приведены упругие и прочностные характеристики материала в случае одноосного сжатия, полученные экспериментально.

На рис. 7 показаны диаграммы напряжений и деформаций, полученные с использованием модели, соответствующие константы приведены в табл. 2. На рис. 8 показаны экспериментально полученные максимумы напряжений совместно с предсказаниями модели. В табл. 2 приведены константы, использованные для получения диаграмм.

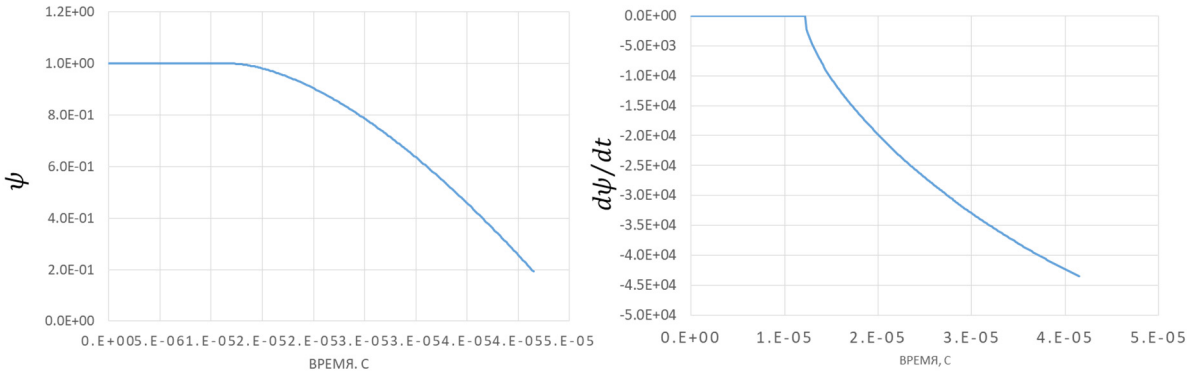


Рис. 6. Зависимость параметра повреждения и скорости повреждения от времени

Fig. 6. Dependence of the damage parameter and the damage rate on time

Таблица 1

Механические характеристики материала в условиях статики

Table 1

Mechanical characteristics of the material under static conditions

E_{11}, МПа	Xc, МПа	εc^{Init}	$\varepsilon c^{Failure}$
115000	600	0,0052	0,06

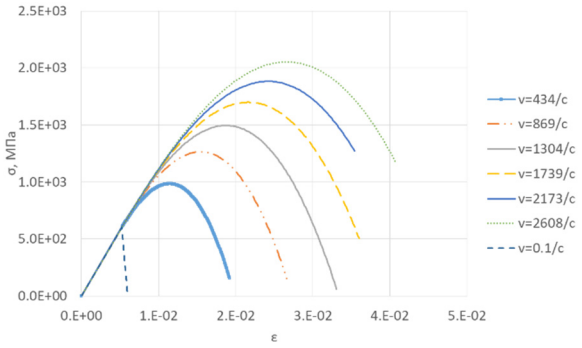


Рис. 7. Диаграммы нагружения материала при разных скоростях деформирования

Fig. 7. Diagrams of material loading at different deformation rates

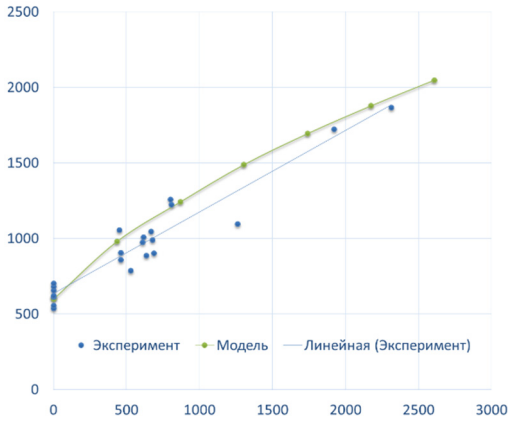


Рис. 8. Максимумы напряжений достигнутые при различных скоростях деформирования

Fig. 8. Maximum stress at different deformation rates

Таблица 2

Данные для модели скоростного упрочнения

Table 2

Data for the model of rate-dependent hardening

C	N	ψ_0
2.30E-07	1,5	0,2e-4

4. Анализ результатов

Стоит отметить, что в моделировании неявно предполагалось постоянство упругих характеристик. Проблема состоит в отсутствии надежной методики измерения жесткости при рассматриваемых скоростях деформирования. С другой стороны, правомерность такого предположения подтверждается незначительным изменениями модуля (+1,2 %) при продольном деформировании до 100 c^{-1} в работе [6]. Также можно воспользоваться температурной аналогией [25] и рассмотреть изменение продольного модуля при сверхнизких температурах [26], которые также дают небольшое изменение модуля (< 15 %).

Образцы были получены методом намотки, что изначально вносит некоторый дефект и определенную кривизну в их форму. Этот факт существенно влияет именно на свойства при сжатии образца. Тем не менее статическую прочность можно скорректировать по результатам других испытаний, а вот динамическая составляющая определена корректно, так как она по сути просто масштабирует статическое поведение.

Заключение

В работе представлен подход, позволяющий моделировать разрушение композитного материала при высоких скоростях деформирования. Использован материал, полученный методом намотки. Показано, что предложенный подход позволяет моделировать разрушение в широком диапазоне скоростей деформирования, начиная от статического нагружения до 2500 обратных секунд. Модель ограничена процессом нагружения в условиях одноосного сжатия. С учетом рассеяния экспери-

ментальных данных результаты моделирования имеют хорошее соответствие.

Для моделирования реальных конструкций в будущих работах данного направления необходимо аналогичным образом рассмотреть другие виды нагрузок. Также стоит развивать экспериментальные методики для снижения рассеяния результатов и получения большего числа измеряемых характеристик материала.

Библиографический список

1. Lavrov N. A., Igumenov M. S. A technique for production of high-pressure vessels from polymer-composite materials // Polymer Science, Series D. – 2018. – Vol. 11. – P. 113-116. DOI: 10.1134/S1995421218010100

2. Liu P., Xu P., Zheng J. Artificial immune system for optimal design of composite hydrogen storage vessel // Computational Materials Science. – 2009. – Vol. 47. – No. 1. – P. 261-267. DOI: 10.1016/j.commatsci.2009.07.015

3. Vasiliev V. V. Composite pressure vessels: Analysis, design, and manufacturing. – Bull Ridge Corporation, 2009.

4. Verstraete D. Long range transport aircraft using hydrogen fuel // International journal of hydrogen energy. – 2013. – Vol. 38. – No. 34. – P. 14824-14831. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.09.021

5. Hsiao H. M., Daniel I. M. Strain rate behavior of composite materials // Composites Part B: Engineering. – 1998. – Vol. 29. – No. 5. – P. 521-533. DOI: 10.1016/S1359-8368(98)00008-0

6. Hsiao H. M., Daniel I. M., Cordes R. D. Dynamic compressive behavior of thick composite materials // Experimental Mechanics. – 1998. – Vol. 38. – No. 3. – P. 172-180. DOI: 10.1007/BF02325740

7. Vogler T.J., Kyriakides S. Inelastic behavior of an AS4/PEEK composite under combined transverse compression and shear. Part I: experiments // International Journal of Plasticity. – 1999. – Vol. 15. – No. 8. – P. 783–806. DOI: 10.1016/S0749-6419(99)00011-X

8. Koerber H., Xavier J., Camanho P. P. High strain rate characterisation of unidirectional carbon-epoxy IM7-8552 in transverse compression and in-plane shear using digital image correlation // Mechanics of Materials. – 2010. – Vol. 42. – No. 11. – P. 1004–1019. DOI: 10.1016/j.mechmat.2010.09.003

9. Koerber H., Camanho P. P. High strain rate characterisation of unidirectional carbon–epoxy IM7-8552 in longitudinal compression // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2011. – Vol. 42. – No. 5. – P. 462–470. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.01.002

10. Kuhn P. et al. Fracture toughness and crack resistance curves for fiber compressive failure mode in polymer composites under high rate loading // Composite Structures. – 2017. – Vol. 182. – P. 164–175. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.040

11. Seifoori S., Izadi R., Yazdinezhad A. R. Impact damage detection for small-and large-mass impact on CFRP and GFRP composite laminate with different striker geometry using experimental, analytical and FE methods // Acta Mechanica. – 2019. – Vol. 230. – No. 12. – P. 4417–4433. DOI: 10.1007/s00707-019-02506-8

12. González E. V. et al. Simulation of drop-weight impact and compression after impact tests on composite laminates // Composite Structures. – 2012. – Vol. 94. – No. 11. – P. 3364–3378. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.05.015

13. Hongkarnjanakul N., Bouvet C., Rivallant S. Validation of low velocity impact modelling on different stacking sequences of CFRP laminates and influence of fibre failure // Composite Structures. – 2013. – Vol. 106. – P. 549–559. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.07.008

14. Tan W. et al. Predicting low velocity impact damage and Compression-After-Impact (CAI) behaviour of composite laminates // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2015. – Vol. 71. – P. 212–226. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.01.025

15. Thiruppukuzhi S. V., Sun C. T. Models for the strain-rate-dependent behavior of polymer composites // Composites Science and Technology. – 2001. – Vol. 61. – No. 1. – P. 1–12. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00133-0

16. Vogler M., Rolfes R., Camanho P. P. Modeling the inelastic deformation and fracture of polymer composites–Part I: Plasticity model // Mechanics of Materials. – 2013. – Vol. 59. – P. 50–64. DOI: 10.1016/j.mechmat.2012.12.002

17. Koerber H. et al. Experimental characterization and constitutive modeling of the non-linear stress–strain behavior of unidirectional carbon–epoxy under high strain rate loading // Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences. – 2018. – Vol. 5. – No. 1. – P. 1–24. DOI: 10.1186/s40323-018-0111-x

18. Vasiukov D., Panier S., Hachemi A. Non-linear material modeling of fiber-reinforced polymers based on coupled viscoelasticity–viscoplasticity with anisotropic continuous damage mechanics // Composite Structures. – 2015. – Vol. 132. – P. 527–535. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.05.027

19. Fedulov B. N. et al. Failure analysis of laminated composites based on degradation parameters // Meccanica. – 2018. – Vol. 53. – P. 359–372. DOI: 10.1007/s11012-017-0735-9

20. Fedorenko A. N., Fedulov B. N., Lomakin E. V. Failure analysis of laminated composites with shear nonlinearity and strain-rate response // Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 18. – P. 432–442. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.185

21. Федоренко А. Н., Федулов Б. Н., Ломакин Е. В. Моделирование ударного разрушения трубчатых образцов из композитного материала, зависящего от скорости нагружения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. – № 3. – С. 96–102. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.3.09

22. Lomakin E., Fedulov B., Fedorenko A. Strain rate influence on hardening and damage characteristics of composite materials // Acta Mechanica. – 2021. – T. 232. – P. 1875-1887. DOI: 10.1007/s00707-020-02806-4

23. Fedorenko A. et al. Exploding wire method for the characterization of dynamic tensile strength of composite materials //International Journal of Impact Engineering. – 2023. – Vol. 180. 104704. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104704

24. Kachanov L. Introduction to continuum damage mechanics. – Springer Science & Business Media, 1986. – Vol. 10.

25. Rabotnov Y. N. Creep rupture // Applied Mechanics: Proceedings of the Twelfth International Congress of Applied Mechanics, Stanford University, August 26–31, 1968. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. – P. 342–349.

26. Gruzdkov A.A., Petrov Y.V. On temperature-time correspondence in high-rate deformation of metals //Doklady Physics. – 1999. – Vol. 44. – P. 114–116.

27. Gates T. S. et al. Thermal/mechanical durability of polymer-matrix composites in cryogenic environments: 44th Annual AIAA. – ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics (Norfolk, VA, 2003.)

References

1. Lavrov N. A., Igumenov M. S. A technique for production of high-pressure vessels from polymer-composite materials //Polymer Science, Series D. – 2018. – Vol. 11. – P. 113-116. DOI: 10.1134/S1995421218010100
2. Liu P., Xu P., Zheng J. Artificial immune system for optimal design of composite hydrogen storage vessel //Computational Materials Science. – 2009. – Vol. 47. – №. 1. – P. 261-267. DOI: 10.1016/j.commatsci.2009.07.015
3. Vasiliev V. V. Composite pressure vessels: Analysis, design, and manufacturing. – Bull Ridge Corporation, 2009.
4. Verstraete D. Long range transport aircraft using hydrogen fuel //International journal of hydrogen energy. – 2013. – Vol. 38. – №. 34. – P. 14824-14831. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.09.021
5. Hsiao H. M., Daniel I. M. Strain rate behavior of composite materials //Composites Part B: Engineering. – 1998. – Vol. 29. – №. 5. – P. 521-533. DOI: 10.1016/S1359-8368(98)00008-0
6. Hsiao H. M., Daniel I. M., Cordes R. D. Dynamic compressive behavior of thick composite materials //Experimental Mechanics. – 1998. – Vol. 38. – №. 3. – P. 172-180. DOI: 10.1007/BF02325740
7. Vogler T. J., Kyriakides S. Inelastic behavior of an AS4/PEEK composite under combined transverse compression and shear. Part I: experiments //International Journal of Plasticity. – 1999. – Vol. 15. – №. 8. – P. 783-806. DOI: 10.1016/S0749-6419(99)00011-X
8. Koerber H., Xavier J., Camanho P. P. High strain rate characterisation of unidirectional carbon-epoxy IM7-8552 in transverse compression and in-plane shear using digital image correlation //Mechanics of Materials. – 2010. – Vol. 42. – №. 11. – P. 1004-1019. DOI: 10.1016/j.mechmat.2010.09.003
9. Koerber H., Camanho P. P. High strain rate characterisation of unidirectional carbon–epoxy IM7-8552 in longitudinal compression //Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2011. – Vol. 42. – №. 5. – P. 462-470. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.01.002
10. Kuhn P. et al. Fracture toughness and crack resistance curves for fiber compressive failure mode in polymer composites under high rate loading //Composite Structures. – 2017. – Vol. 182. – P. 164-175. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.040
11. Seifoori S., Izadi R., Yazdinezhad A. R. Impact damage detection for small-and large-mass impact on CFRP and GFRP composite laminate with different striker geometry using experimental, analytical and FE methods //Acta Mechanica. – 2019. – Vol. 230. – №. 12. – P. 4417-4433. DOI: 10.1007/s00707-019-02506-8
12. González E. V. et al. Simulation of drop-weight impact and compression after impact tests on composite laminates //Composite Structures. – 2012. – Vol. 94. – №. 11. – P. 3364-3378. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.05.015
13. Hongkarnjanakul N., Bouvet C., Rivallant S. Validation of low velocity impact modelling on different stacking sequences of CFRP laminates and influence of fibre failure //Composite Structures. – 2013. – Vol. 106. – P. 549-559. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.07.008
14. Tan W. et al. Predicting low velocity impact damage and Compression-After-Impact (CAI) behaviour of composite laminates //Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2015. – Vol. 71. – P. 212-226. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.01.025
15. Thiruppukuzhi S. V., Sun C. T. Models for the strain-rate-dependent behavior of polymer composites //Composites Science and Technology. – 2001. – Vol. 61. – №. 1. – P. 1-12. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00133-0
16. Vogler M., Rolfes R., Camanho P. P. Modeling the inelastic deformation and fracture of polymer composites–Part I: Plasticity model //Mechanics of Materials. – 2013. – Vol. 59. – P. 50-64. DOI: 10.1016/j.mechmat.2012.12.002
17. Koerber H. et al. Experimental characterization and constitutive modeling of the non-linear stress–strain behavior of unidirectional carbon–epoxy under high strain rate loading //Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences. – 2018. – Vol. 5. – №. 1. – P. 1-24. DOI: 10.1186/s40323-018-0111-x
18. Vasiukov D., Panier S., Hachemi A. Non-linear material modeling of fiber-reinforced polymers based on coupled viscoelasticity–viscoplasticity with anisotropic continuous damage mechanics //Composite Structures. – 2015. – Vol. 132. – P. 527-535. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.05.027
19. Fedulov B. N. et al. Failure analysis of laminated composites based on degradation parameters //Meccanica. – 2018. – Vol. 53. – P. 359-372. DOI: 10.1007/s11012-017-0735-9
20. Fedorenko A. N., Fedulov B. N., Lomakin E. V. Failure analysis of laminated composites with shear nonlinearity and strain-rate response //Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol. 18. – P. 432-442. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.185
21. Fedorenko, A. N., Fedulov, B. N., & Lomakin, E. V. (2021). Modelirovanie udarnogo razrusheniia trubchatykh obraztsov iz kompozitnogo materiala, zavisiashchego ot skorosti nagruzheniia [Simulation of impact failure of tubular samples made of composite material, depending on the loading rate]. PNRPU Mechanics Bulletin. – 2021. – №. 3. – P. 96-102. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.3.09
22. Lomakin E., Fedulov B., Fedorenko A. Strain rate influence on hardening and damage characteristics of composite materials //Acta Mechanica. – 2021. – Vol. 232. – P. 1875-1887. DOI: 10.1007/s00707-020-02806-4
23. Fedorenko A. et al. Exploding wire method for the characterization of dynamic tensile strength of composite materials //International Journal of Impact Engineering. – 2023. – Vol. 180. – 104704. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104704
24. Kachanov L. Introduction to continuum damage mechanics. – Springer Science & Business Media, 1986. – Vol. 10.
25. Rabotnov Y. N. Creep rupture //Applied Mechanics: Proceedings of the Twelfth International Congress of Applied Mechanics, Stanford University, August 26–31, 1968. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1969. – P. 342-349.
26. Gruzdkov A. A., Petrov Y. V. On temperature-time correspondence in high-rate deformation of metals //Doklady Physics. – 1999. – Vol. 44. – P. 114-116.
27. Gates T. S. et al. Thermal/mechanical durability of polymer-matrix composites in cryogenic environments: 44th Annual AIAA. – ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics (Norfolk, VA, 2003.)

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-19-00563.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Financing. The research was supported by Russian Science Foundation № 21-19-00563.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The contribution of the authors is equivalent.