



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2021

PNRPU MECHANICS BULLETIN

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



DOI: 10.15593/perm.mech/2021.3.09

УДК 539.42

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА, ЗАВИСЯЩЕГО ОТ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ

А.Н. Федоренко¹, Б.Н. Федулов^{1,2}, Е.В. Ломакин²

¹Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 9 ноября 2021 г.

Принята: 9 июня 2021 г.

Опубликована: 22 октября 2021 г.

Ключевые слова:

композитные материалы, поврежденность, критерий разрушения, механические характеристики, параметры поврежденности, ударные нагрузки, демпфирование, скорость деформации, связующее, волокно.

АННОТАЦИЯ

Для моделирования ударного разрушения композитных материалов рассмотрена модель, учитывающая зависимость прочностных свойств от скорости повреждения. На основе экспериментальных диаграмм ударного нагружения сжатия и сдвига однонаправленных слоистых композитов, проявляющих нелинейную зависимость от скорости деформаций, определены константы модели материала. Предложенная модель реализована в комплексе конечно-элементного моделирования Abaqus для случая трехмерного напряженного состояния. В качестве объекта численного моделирования рассмотрены трубчатые композитные образцы из углеволокна с эпоксидным связующим со слоями разной ориентации, испытания которых распространены на практике для определения количественных характеристик поглощения ударной энергии. Построены диаграммы ударного нагружения рассматриваемых трубчатых образцов. Исследовано влияние фаски (сужения сечения образца) на крае трубчатого образца, инициирующей разрушение, на диаграмму ударного нагружения в начальной стадии процесса. Предложенный подход позволяет оценивать величину пика амплитуды, связанного с разрушением фаски. Кроме того, на начальном этапе нагружения реализуются максимальные скорости деформации, что влечет за собой наибольшее упрочнение материала, также выраженное на диаграмме нагружения в виде увеличения амплитуды. В расчетах в случае пренебрежения эффектами, связанными со скоростным упрочнением материала и геометрией фаски, результат может выражаться в недооценке реакции, в особенности на начальном этапе процесса. Отсутствие описанных эффектов в модели композитных конструкций может привести к существенно некорректным результатам, вплоть до полного разрушения при отсутствии какой-либо реакции. Разработанный подход эффективен при проектировании и испытаниях демпфирующих элементов из композиционного материала со свойствами, чувствительными к скорости нагружения.

© ПНИПУ

© Федоренко Алексей Николаевич – к.т.н., с.н.с., e-mail: alexey.n.fedorenko@gmail.com, [ID: 0000-0002-3260-7531](https://orcid.org/0000-0002-3260-7531).

Федулов Борис Никитович – д.ф.-м.н., в.н.с., e-mail: fedulov.b@mail.ru, [ID: 0000-0002-6797-2424](https://orcid.org/0000-0002-6797-2424).

Ломакин Евгений Викторович – д.ф.-м.н., зав. каф., e-mail: evlomakin@yandex.ru, [ID: 0000-0002-8716-5363](https://orcid.org/0000-0002-8716-5363).

Alexey N. Fedorenko – CSc in Technical Sciences, Senior Research, e-mail: alexey.n.fedorenko@gmail.com,

[ID: 0000-0002-3260-7531](https://orcid.org/0000-0002-3260-7531).

Boris N. Fedulov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Research, e-mail: fedulov.b@mail.ru,

[ID: 0000-0002-6797-2424](https://orcid.org/0000-0002-6797-2424).

Evgeny V. Lomakin – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department,

e-mail: evlomakin@yandex.ru, [ID: 0000-0002-8716-5363](https://orcid.org/0000-0002-8716-5363).



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)

SIMULATION OF IMPACT FAILURE OF TUBULAR SAMPLES MADE OF COMPOSITE MATERIAL, DEPENDING ON THE LOADING RATE

A.N. Fedorenko¹, B.N. Fedulov^{1, 2}, E.V. Lomakin²

¹Skolkovo institute of science and technology, Moscow, Russian Federation

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 9 November 2021
Accepted: 9 June 2021
Published: 22 October 2021

Keywords:

composite materials, damage, failure criterion, mechanical characteristics, damage parameters, impact loads, damping, strain rate, matrix, fiber.

ABSTRACT

In this paper, a model that takes into account the dependence of strength properties on the damage rate is considered for modelling of the impact failure of composite materials. The constants of the material model are determined on the basis of experimental diagrams to compression and shear impact loading of unidirectional composite, which exhibit a nonlinear dependence on the strain rate. The proposed model is implemented to the Abaqus finite element modeling software for the case of a three-dimensional stress state. As an example of numerical modeling, we consider tubular composite specimens made of carbon fiber with an epoxy matrix and layers of different orientations, which are commonly used for determining of characteristics of impact energy absorption. Diagrams of impact loading of the considered tubular specimens are obtained. The influence of the chamfer (taper of the cross-section) on the edge of a tubular specimen on the impact loading diagram at the initial stage of the process, which serves as the initiator of crushing, is studied. The proposed approach allows us to estimate the magnitude of the peak of the amplitude associated with the crushing of the chamfer. In addition, at the initial stage of loading, maximum strain rates occur, which entails the hardening of the material, also expressed in the loading diagram as an increase in the amplitude. If the analysis neglects the effects associated with the strain hardening of the material and the geometry of the chamfer, the result may be expressed in an underestimation of the reaction, especially at the initial stage of the process. The absence of the described effects in the model of composite structures may lead to significantly incorrect results with complete failure with zero reaction. The developed approach is effective in the design and testing of damping elements made of composite material with properties that are sensitive to the loading rate.

© PNRPU

Введение

Помимо эффективных упругопрочностных характеристик многие полимерные композитные материалы (ПКМ) обладают высоким удельным поглощением энергии при ударном разрушении. Это свойство важно в специальных демпфирующих элементах конструкций, которые в процессе разрушения поглощают кинетическую энергию. Удельное поглощение энергии является важным и достаточно общим параметром материала, оцениваемым на практике [1–3].

При проектировании зачастую пренебрегают зависимостью жесткостных и прочностных свойств полимерных композитов от скорости деформации, которая, однако, часто обнаруживается в экспериментальных исследованиях и рассматривается в моделях [4–15]. В результатах экспериментальных исследований по ударам в торец трубчатых образцов из слоистых композитов можно найти довольно противоречивые выводы для разных скоростей ударника. В работах [16, 17] отмечается обратная связь удельной поглощенной энергии и скорости удара, в то время как результаты [18, 19] говорят об ее увеличении со скоростью, а в [1, 20] изменения оказались незначительными. Результаты испытаний также чувствительны к ориентации армирующих волокон и проявляют масштабный эффект при варьировании размеров образца [21]. Таким обра-

зом, возникает потребность в модели, позволяющей учесть описанные эффекты при различных скоростях деформации, что позволит сократить объем экспериментальных исследований.

1. Определяющие соотношения для ортотропного слоистого композита с учетом скоростного упрочнения

Определяющие соотношения для ортотропного композитного материала с повреждением волокна и связующего могут быть представлены в следующей форме [22–26]:

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

где параметры поврежденности $0 \leq \psi_1 \leq 1$ и $0 \leq \psi_2 \leq 1$ соответствуют формам повреждения, ассоциированным

с волокном и матрицей. Индекс “0” означает использование констант неповрежденного материала. При этом $\psi_i = 0$ ($i = 1, 2$) соответствует полному разрушению, $\psi_i = 1$ – исходному материалу.

Будем использовать критерий максимальных напряжений, для которого в случае статического нагружения материал остается неповрежденным внутри заданной области и повреждается на ее границе:

$$\begin{aligned} -X_C &\leq \sigma_{11} \leq X_T; \\ -Y_C &\leq \sigma_{22} \leq Y_T, -Y_C \leq \sigma_{33} \leq Y_T; \\ |\sigma_{12}| &\leq S, |\sigma_{13}| \leq S, |\sigma_{23}| \leq S, \end{aligned} \quad (2)$$

где X_C – предельные напряжения разрушения при сжатии в направлении волокна, получаемые из стандартных механических испытаний; X_T – предельные напряжения при растяжении в направлении волокна; Y_C – предельные напряжения при сжатии в поперечном направлении; Y_T – предельные напряжения при растяжении в поперечном направлении; S – предельные напряжения сдвига, которые предполагаются равными для всех компонент сдвиговых напряжений. Отметим, что предельные значения для σ_{22} и σ_{33} приняты равными, что не будет ограничивать последующие рассуждения. При имеющихся экспериментальных данных для σ_{22} и σ_{33} могут быть приняты различные предельные напряжения. То же касается и предположения о пределах сдвиговых напряжений, одинаковых для всех компонент. При достижении одной из компонент напряжений предельных значений (2) начинается процесс накопления повреждений, который описывается диаграммами нагружения (рис. 1).

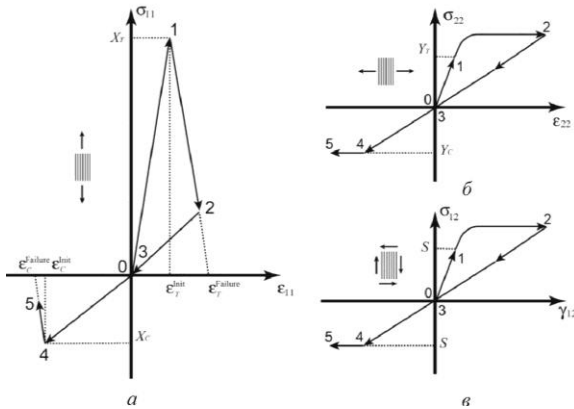


Рис. 1. Общий вид диаграмм нагружения: а – вдоль волокна; б – в поперечном направлении; в – сдвиг

Fig. 1. General form of loading diagrams, (a) along the fiber, (b) across the fiber, (c) shear

В случае нагружения вдоль волокна после достижения предельных напряжений происходит резкое падение кривой, отражающее хрупкость разрушения, которое определяется разницей между деформациями ини-

циации повреждений $\varepsilon_{T,C}^{Init}$ и полным разрушением $\varepsilon_{T,C}^{Failure}$ (рис. 1, а). В случае нагружения в поперечном направлении и сдвига участок кривой 1–2 становится параллельным оси абсцисс (рис. 1, б), что соответствует способности связующего воспринимать нагрузку после достижения предельных напряжений, наблюдаемое экспериментально [24]. Диаграммы для компонент σ_{33} , σ_{13} и σ_{23} аналогичны представленным на рис. 1, б и рис. 1, в.

Для перехода к случаю динамического нагружения, когда проявляется скоростное упрочнение материала, вводится зависимость предельных напряжений (2) от параметров $\{\psi_1, \psi_2, d\psi_1/dt, d\psi_2/dt\}$, т.е. от параметров поврежденности и скорости их изменения:

$$\begin{aligned} X_T &= X_T(\psi_1, \psi_2, \dot{\psi}_1, \dot{\psi}_2); \\ X_C &= X_C(\psi_1, \psi_2, \dot{\psi}_1, \dot{\psi}_2); \\ Y_T &= Y_T(\psi_1, \psi_2, \dot{\psi}_1, \dot{\psi}_2); \\ Y_C &= Y_C(\psi_1, \psi_2, \dot{\psi}_1, \dot{\psi}_2); \\ S &= S(\psi_1, \psi_2, \dot{\psi}_1, \dot{\psi}_2). \end{aligned} \quad (3)$$

Предположим отсутствие зависимости от скорости нагружения предельных напряжений при одноосном растяжении в направлении волокон X_T и поперечном растяжении Y_T , выявленной в [27, 28]. Каждую из функций X_C , Y_C и S представим в виде произведения двух множителей, отвечающих за статическую и динамическую компоненту:

$$\begin{aligned} X_T &= X_T(\psi_1); \\ X_C &= X_C^{St}(\psi_1) X_C^{Dyn}(\dot{\psi}_1); \\ Y_T &= Y_T(\psi_2); \\ Y_C &= Y_C^{St}(\psi_2) Y_C^{Dyn}(\dot{\psi}_2); \\ S &= S^{St}(\psi_2) S^{Dyn}(\dot{\psi}_2). \end{aligned} \quad (4)$$

Точный вид функций X_T , X_C , Y_T , Y_C и S из (3) имеет сходство с соотношениями скоростного упрочнения Джонсона–Кука [29], однако представлены они не через деформации и скорость деформации, а через параметры поврежденности и скорость их изменения:

$$\begin{aligned} X_T &= \frac{A_T^X}{1 + B_T^X / \psi_1}; \\ X_C &= \left(\frac{A_C^X}{1 + B_C^X / \psi_1} \right) \left(1 + C_X \left(-\frac{\dot{\psi}_1}{\dot{\psi}_1^0} \right)^{N_X} \right); \\ Y_T &= A_T^Y + B_T^Y (1 - \psi_2)^{n_T}; \\ Y_C &= \left(A_C^Y + B_C^Y (1 - \psi_2)^{n_C} \right) \left(1 + C_Y \left(\ln \left(-\frac{\dot{\psi}_2}{\dot{\psi}_2^0} \right) \right)^{N_Y} \right); \\ S &= \left(A^S + B^S (1 - \psi_2)^{n^S} \right) \left(1 + \left(\sin h \left[C_S \ln \left(-\frac{\dot{\psi}_2}{\dot{\psi}_2^0} \right) \right] \right)^{N_S} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

где параметры $A_T^i, B_T^i, A_C^i, B_C^i, n_T^i, n_C^i, A^S, B^S, n^S, C_i, N_i$ и $\dot{\psi}_i^0$ (индекс i соответствует рассматриваемому виду нагружения: X, Y, S) подбираются таким образом, чтобы обеспечить удовлетворительное приближение к экспериментальным ударным и квазистатическим диаграммам деформирования. Для этого для различных скоростей деформаций v записываются соотношения, которые рассматриваются как обыкновенные дифференциальные уравнения на функции поврежденности $\psi_i(t)$:

$$v\tau\psi_1(t)E_{11}^0 = \left(\frac{A_C^X}{1 + \frac{B_C^X}{\psi_1(t)}} \right) \left(1 + C_X \left(-\frac{\dot{\psi}_1(t)}{\dot{\psi}_1^0} \right)^{N_X} \right);$$

$$v\tau\psi_2(t)E_{22}^0 = \left(A_C^Y + B_C^Y (1 - \psi_2(t))^{n_C^Y} \right) \left(1 + C_Y \left(\ln \left(-\frac{\dot{\psi}_2(t)}{\dot{\psi}_2^0} \right) \right)^{N_Y} \right); \quad (6)$$

$$v\tau\psi_2(t)G_{12}^0 = \left(A^S + B^S (1 - \psi_2(t))^{n^S} \right) \left(1 + \left(\sin h \left[C_S \ln \left(-\frac{\dot{\psi}_2(t)}{\dot{\psi}_2^0} \right) \right] \right)^{N_S} \right);$$

где верхний индекс “0” у упругих констант означает использование исходного значения неповрежденного материала. В левой части уравнений (6) записаны выражения для напряжений, которые можно определить из экспериментальных кривых, а справа – функции, которыми предлагается их описать. Путем серии численного решения перебором определяются значения констант из правой части, которые обеспечивают соответствие экспериментальным кривым.

При численном решении динамической задачи из (6) после каждого шага по времени определены параметры $\psi_1(t)$ и $\psi_2(t)$, которые используются в (1) для определения приращения деформаций.

2. Моделирование ударного нагружения трубчатого композитного образца

Представленная в предыдущем разделе модель была реализована в комплексе конечно-элементного моделирования Abaqus для численного решения практических задач. В качестве примера тестовой задачи рассмотрим композитный трубчатый образец, ударяемый по свободному краю грузом массой 200 кг с начальной скоростью 5 м/с. Общая толщина стенки составляет 1,92 мм и состоит из восьми слоев равной толщины с ориентацией $[90^\circ/0^\circ/90^\circ]$ (рис. 2), так что ось цилиндра направлена вдоль оси X , а слои материала укладываются по нормали к поверхности Z . Таким образом, слои с ориентацией 0° направлены вдоль оси образца, а слои с ориентацией 90° направлены по окружности. Образец имеет скос на переднем крае (фаску) под углом 30° .

Слои образованы композитом на основе углеволокна и эпоксидного связующего IM6G/3501-6, параметры для определяющих соотношений (5) которого были подобраны в [30] и представлены в табл. 1–3.

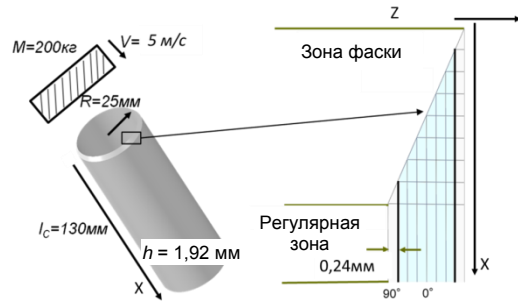


Рис. 2. Схема эксперимента по удару в торец трубчатого образца

Fig. 2. Scheme of the impact experiment to the end of the tubular specimen

Таблица 1

Параметры модели для нагружения сдвига $S(\psi, \dot{\psi})$

Table 1

Parameters of the model for shear $S(\psi, \dot{\psi})$

$A_S, \text{МПа}$	$B_S, \text{МПа}$	n_S	C_S	$\dot{\psi}_2^0, \text{s}^{-1}$	N_S	$G_{12}^0, \text{МПа}$
75	76	1,5	0,06	2×10^{-5}	1,5	7500

Таблица 2

Параметры модели для сжатия в поперечном направлении $Y_C(\psi, \dot{\psi})$

Table 2

Parameters of the model for transverse compression $Y_C(\psi, \dot{\psi})$

$A_C^Y, \text{МПа}$	$B_C^Y, \text{МПа}$	n_C^Y	C_Y	$\dot{\psi}_2^0, \text{s}^{-1}$	N_Y	$E_{22}^0, \text{МПа}$
155,2	135	0,2	10^{-8}	2×10^{-6}	5,9	13 500

Таблица 3

Параметры модели для сжатия в продольном направлении $X_C(\psi, \dot{\psi})$

Table 3

Parameters of the model for longitudinal compression $X_C(\psi, \dot{\psi})$

$A_C^X, \text{МПа}$	B_C^X	C_X	$\dot{\psi}_1^0, \text{s}^{-1}$	N_X	$E_{11}^0, \text{МПа}$
14295	13,5	$6,2 \times 10^{-6}$	2×10^{-5}	0,11	171000

На рис. 3 показан общий вид объектов моделирования в Abaqus и трехмерные конечные элементы типа C3D8R, общее количество которых составляет 120 000. Одному слою по толщине (1,92 мм) соответствует один элемент. При этом два других размера элемента варьируются от 0,4 мм в зоне вблизи ударяемого края до 3 мм с обратной стороны. Между поверхностью ударника и элементами образца заданы условия механического контакта. Расчеты проводились с использованием модуля Abaqus Explicit с явной схемой интегрирования по временному шагу.

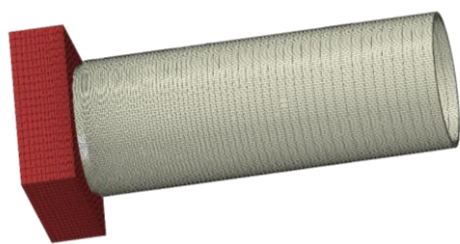


Рис. 3. Общий вид разбиения объекта на конечные элементы

Fig. 3. General view of the finite element mesh

В процессе моделирования поврежденные элементы после потери жесткости могут испытывать экстремальные деформации, что влечет за собой уменьшение устойчивого шага интегрирования. Чтобы избежать этой проблемы, используется критерий удаления элемента: достижение 3 % деформаций по направлению вдоль волокна либо потеря 95 % жесткости из-за повреждения связующего, что может быть интерпретировано как почти полное разрушение. Кроме того, имеет место вырожденность соотношений (1) при нулевых значениях параметров поврежденности, которая также разрешается введением численного ограничения на их минимальное значение.

На рис.4 показано распределение параметра ψ_2 после прохождения ударником 3,2 мм с момента удара, что соответствует размеру фаски вдоль оси цилиндра.

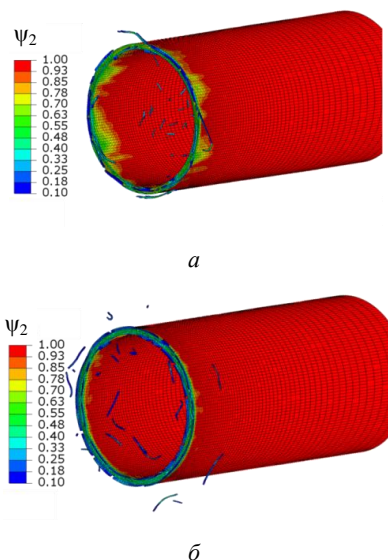


Рис. 4. Параметр поврежденности связующего ψ_2 после прохождения ударником 3,2 мм после контакта с образцом: а – образец с фаской; б – образец без фаски

Fig. 4. Damage parameter to the matrix ψ_2 after the impactor passing of 3.2 mm after the contact with the sample, (a) the sample with a chamfer, (b) the sample without a chamfer

Как можно заметить, для образца с фаской повреждение распространяется существенно дальше перед фронтом разрушения, чем для образца с фаской. Это

может объяснять снижение силы реакции при ударе у образца с фаской, так как у такого образца происходит большее повреждение материала перед фронтом разрушения, что снижает жесткость. Распределение ψ_1 не показано, так как повреждение волокна затрагивает лишь несколько элементов перед поверхностью ударника.

На рис. 5 показаны диаграммы ударного нагружения для образца с концевой фаской, а для сравнения проведено моделирование образца без фаски. Как можно заметить, отсутствие фаски вызывает достижение силы реакции, более чем в два раза превышающее среднее значение после стабилизации процесса. В то же время разрушение образца без фаски происходит вблизи контакта с ударником, и сила реакции довольно быстро стабилизируется и осциллирует примерно около одинаковых значений с образцом с фаской.



Рис. 5. Сила реакции в зависимости от перемещения ударника

Fig. 5. Reaction intensity depending on the impactor displacement

Удельное поглощение энергии на основе перемещения ударника на длину l_c , при котором разрушается материал массой m_c , рассчитывается по формуле

$$J = \frac{1}{m_c} \int_0^{l_c} F dx, \text{ где } F = M(\bar{a} + \bar{g}) - \text{ сила реакции; } M -$$

масса ударника; $\bar{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ и \bar{g} – ускорение ударника

и ускорение свободного падения соответственно. При использовании образца со скосом на свободном крае удельная энергия, рассчитанная для $l_c = 14$ мм, равна 103 Дж/г, а для образца без скоса – 117 Дж/г.

Заключение

В работе было проведено моделирование ударного нагружения трубчатых образцов из слоистых композитов с учетом зависимости прочностных характеристик от скорости деформирования. Отмечено влияние скоса на ударяемом крае образца в момент удара, которое, однако, уменьшается после стабилизации процесса разрушения.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (грант № 20-11-20230).

Библиографический список

1. The inextensional collapse of grooved thin-walled cylinders of PVC under axial loading / A.G. Mamalis [et al.] // *International Journal of Impact Engineering*. – 1986. – Vol. 4, no. 1. – P. 41–56.
2. Lu G., Yu T. X. Energy absorption of structures and materials. – Elsevier, 2003.
3. Boria S., Obradovic J., Belingardi G. Experimental and numerical investigations of the impact behaviour of composite frontal crash structures // *Composites Part B: Engineering*. – 2015. – Vol. 79. – P. 20–27.
4. Fedorenko A.N., Fedulov B.N. Effect of elastic properties dependence of the stress state in composite materials // *Aerospace Systems*. – 2019. – Vol. 2, no. 2. – P. 105–109.
5. Fedorenko A.N., Fedulov B.N., Lomakin E.V. Buckling problem of composite thin-walled structures with properties dependent on loading types // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2019. – No. 3. – P. 104–111.
6. Kim J.S., Yoon H.J., Shin K.B. A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers // *International Journal of Impact Engineering*. – 2011. – Vol. 38, no. 4. – P. 198–207.
7. Investigation into laminate design of open carbon-fibre/epoxy sections by quasi-static and dynamic crushing / A. Jackson [et al.] // *Composite Structures*. – 2011. – Vol. 93, no. 10. – P. 2646–2654.
8. David M., Johnson A.F., Voggenreiter H. Analysis of crushing response of composite crashworthy structures // *Applied Composite Materials*. – 2013. – Vol. 20, no. 5. – P. 773–787.
9. Mamalis A.G., Yuan Y.B., Viegela G.L. Collapse of thin-wall composite sections subjected to high speed axial loading // *International Journal of Vehicle Design*. – 1992. – Vol. 13, no. 5-6. – P. 564–579.
10. Ataabadi P.B., Karagiozova D., Alves M. Crushing and energy absorption mechanisms of carbon fiber-epoxy tubes under axial impact // *International Journal of Impact Engineering*. – 2019. – Vol. 131. – P. 174–189.
11. Fracture toughness and crack resistance curves for fiber compressive failure mode in polymer composites under high rate loading / P. Kuhn [et al.] // *Composite Structures*. – 2017. – Vol. 182. – P. 164–175.
12. Hsiao H.M., Daniel I.M. Strain rate behavior of composite materials // *Composites Part B: Engineering*. – 1998. – Vol. 29, no. 5. – P. 521–533.
13. Hsiao H.M., Daniel I.M., Cordes R.D. Strain rate effects on the transverse compressive and shear behavior of unidirectional composites // *Journal of Composite Materials*. – 1999. – Vol. 33, no. 17. – P. 1620–1642.
14. Sierakowski R.L. Strain rate effects in composites // *Appl. Mech. Rev.* – 1997. – Vol. 50. – P. 741–61.
15. Strain rate effects on the mechanical properties of polymer composite materials / G.C. Jacob, J.M. Starbuck, J.F. Fellers, S. Simunovic, R.G. Boeman // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2004. – Vol. 94. – P. 296–301.

Acknowledgements

This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (grant no. 20-11-20230)

16. Effects of fiber orientation and wall thickness on energy absorption characteristics of carbon-reinforced composite tubes under different loading conditions / Y. Wang [et al.] // *Composite Structures*. – 2016. – Vol. 153. – P. 356–368.
17. Thornton P.H. The crush behavior of pultruded tubes at high strain rates // *Journal of Composite Materials*. – 1990. – Vol. 24, no. 6. – P. 594–615.
18. Farley G.L. The effects of crushing speed on the energy-absorption capability of composite tubes // *Journal of Composite Materials*. – 1991. – Vol. 25, no. 10. – P. 1314–1329.
19. Experimental study on the axial crushing behaviour of pultruded composite tubes / S. Palanivelu [et al.] // *Polymer Testing*. – 2010. – Vol. 29, no. 2. – P. 224–234.
20. Crush responses of composite cylinder under quasi-static and dynamic loading / L.N.S. Chiu [et al.] // *Composite Structures*. – 2015. – Vol. 131. – P. 90–98.
21. Hull D. A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes // *Composites Science and Technology*. – 1991. – Vol. 40, no. 4. – P. 377–421.
22. Failure analysis of laminated composites based on degradation parameters / B.N. Fedulov [et al.] // *Meccanica*. – 2018. – Vol. 53, no. 1-2. – P. 359–372.
23. 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.
24. Zinoviev P.A. [et al.] The strength of multilayered composites under a plane-stress state // *Composites Science and Technology*. – 1998. – Vol. 58, no. 7. – P. 1209–1223.
25. Nonlinear shear behavior and failure of composite materials under plane stress conditions / B. Fedulov [et al.] // *Acta Mechanica*. – 2017. – Vol. 228, no. 6. – P. 2033–2040.
26. Lomakin E.V., Fedulov B.N., Fedorenko A.N. Nonlinear effects in the behavior and fracture of composite materials // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 581, no. 1. – P. 012015.
27. 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.
28. Experimental characterization and constitutive modeling of the non-linear stress-strain behavior of unidirectional carbon-epoxy under high strain rate loading / H. Koerber [et al.] // *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*. – 2018. – Vol. 5, no. 1. – P. 1–24.
29. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1985. – Vol. 21, no. 1. – P. 31–48.
30. Lomakin E., Fedulov B., Fedorenko A. Strain rate influence on hardening and damage characteristics of composite materials // *Acta Mechanica*. – 2020. – P. 1–13.

References

1. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Viegelaahn G.L., Vaxevanidis N.M., Johnson W. The inextensional collapse of grooved thin-walled cylinders of PVC under axial loading. *International Journal of Impact Engineering*, 1986, vol. 4, no. 1, pp. 41-56.
2. Lu G., Yu T.X. Energy absorption of structures and materials. *Elsevier*, 2003.
3. Boria S., Obradovic J., Belingardi G. Experimental and numerical investigations of the impact behaviour of composite frontal crash structures. *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 79, pp.20-27.
4. Fedorenko A.N., Fedulov, B.N. Effect of elastic properties dependence of the stress state in composite materials. *Aerospace Systems*, 2019, no. 2, pp.105-109.
5. Fedorenko A.N., Fedulov B.N., Lomakin, E.V. Buckling Problem of Composite Thin-Walled Structures with Properties Dependent on Loading Types. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 3, pp.104-111.
6. Kim J.S., Yoon H.J., Shin, K.B. A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, no. 4, pp.198-207.
7. Jackson A., Dutton S., Gunnion A.J., Kelly D. Investigation into laminate design of open carbon-fibre/epoxy sections by quasi-static and dynamic crushing. *Composite Structures*, 2011, vol 93, no. 10, pp. 2646-2654.
8. David M., Johnson A.F., Voggenreiter H. Analysis of crushing response of composite crashworthy structures. *Applied Composite Materials*, 2013, vol. 20, no. 5, pp.773-787.
9. Mamalis A.G., Yuan Y.B., Viegelaahn G.L. Collapse of thin-wall composite sections subjected to high speed axial loading. *International journal of vehicle design*, 1992, vol.13, no. 5-6, pp. 564-579.
10. Ataabadi P.B., Karagiozova D., Alves M. Crushing and energy absorption mechanisms of carbon fiber-epoxy tubes under axial impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 131, pp.174-189.
11. Kuhn P., Catalanotti G., Xavier J., Camanho P.P., Koerber H. Fracture toughness and crack resistance curves for fiber compressive failure mode in polymer composites under high rate loading. *Composite Structures*, 2017, 182, pp.164-175.
12. Hsiao H.M., Daniel I.M. Strain rate behavior of composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 1998, 29(5), pp.521-533.
13. Hsiao H.M., Daniel I.M., Cordes R.D. Strain rate effects on the transverse compressive and shear behavior of unidirectional composites. *Journal of Composite Materials*, 1999, 33(17), pp.1620-1642.
14. Sierakowski R.L. Strain rate effects in composites. *Appl Mech Rev*, 1997; 50, pp.741-61.
15. Jacob G.C., Starbuck J.M., Fellers J.F., Simunovic S., Boeman R.G. Strain rate effects on the mechanical properties of polymer composite materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 94(1), pp.296-301.
16. Wang Y., Feng J., Wu J. and Hu D. Effects of fiber orientation and wall thickness on energy absorption characteristics of carbon-reinforced composite tubes under different loading conditions. *Composite Structures*, 2016, 153, pp.356-368.
17. Thornton P.H. The crush behavior of pultruded tubes at high strain rates. *Journal of Composite Materials*, 1990, 24(6), pp.594-615.
18. Farley G.L. The effects of crushing speed on the energy-absorption capability of composite tubes. *Journal of Composite Materials*, 1991, 25(10), pp.1314-1329.
19. Palanivelu S., Van Paepegem W., Degrieck J., Van Ackeren J., Kakogiannis D., Van Hemelrijck D., Wastiels J., Vantomme J. Experimental study on the axial crushing behaviour of pultruded composite tubes. *Polymer testing*, 2010, 29(2), pp.224-234.
20. Chiu L.N., Falzon B.G., Ruan D., Xu S., Thomson R.S., Chen B., Yan, W., 2015. Crush responses of composite cylinder under quasi-static and dynamic loading. *Composite Structures*, 131, pp.90-98.
21. Hull D. A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes. *Composites science and technology*, 1991, 40(4), pp.377-421.
22. Fedulov B.N., Fedorenko A.N., Kantor M.M., Lomakin, E.V. Failure analysis of laminated composites based on degradation parameters. *Meccanica*, 2018, 53(1-2), pp.359-372.
23. 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, 18, pp.432-442.
24. Zinoviev P.A., Grigoriev S.V., Lebedeva O.V., Tairova L.P. The strength of multilayered composites under a plane-stress state. *Composites science and technology*, 1998, 58(7), pp.1209-1223.
25. Fedulov B.N, Fedorenko A.N, Safonov A. A, Lomakin E.V. Nonlinear shear behavior and failure of composite materials under plane stress conditions. *Acta Mechanica*, 2017, 228(6), pp.2033-2040.
26. Lomakin E.V., Fedulov B.N., Fedorenko A.N. Nonlinear Effects in the Behavior and Fracture of Composite Materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 581, no. 1, p. 012015.
27. 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, 42(11), pp.1004-1019.
28. Koerber H., Kuhn P., Ploeckl M., Otero F., Gerbaud P.W., Rolfes R., Camanho, P.P. 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, 5(1), pp.1-24.
29. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering fracture mechanics*, 1985, 21(1), pp.31-48.
30. Lomakin E.V., Fedulov B.N, Fedorenko A.N. Strain rate influence on hardening and damage characteristics of composite materials. *Acta Mechanica*, 2020, pp.1-13.