

УДК 539.42

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЕМПФИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Н. Федоренко, Б. Н. Федулов*, Е. В. Ломакин*,**

Центр по проектированию, производственным технологиям и материалам
Сколковского института науки и технологий, 121205 Москва, Россия

* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия

** Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
125993 Москва, Россия

E-mails: alexey.n.fedorenko@gmail.com, fedulov.b@mail.ru, evlomakin@yandex.ru

Разработана модель динамического деформирования и разрушения композитных материалов, в которой учитывается существенная нелинейность диаграмм ударного нагружения с упрочнением, зависящего от скорости деформирования. Используется подход, в котором в форме определяющих соотношений вводится зависимость предела прочности от параметров поврежденности и скорости их изменения. Предложенные соотношения аналогичны соотношениям модели Джонсона — Кука, но напряжения выражаются не через пластические деформации и скорость изменения пластических деформаций, а через параметры поврежденности и скорости их изменения. На основе разработанной модели выполнено численное моделирование ударного разрушения трубчатого профиля из композитного материала на основе углеродного волокна и полимерного связующего. Исследовано влияние ориентации однонаправленных слоев композита на удельную энергию поглощения.

Ключевые слова: композитные материалы, разрушение, параметры поврежденности, ударные нагрузки, демпфирование.

DOI: 10.15372/PMTF20210510

Введение. Применение полимерных композитов в конструкциях обусловлено не только их эффективностью в диапазоне эксплуатационных нагрузок, но и высокими демпфирующими характеристиками при ударах в аварийных ситуациях. При воздействии осевой ударной нагрузки в армированном волокном композите имеют место сложные механизмы разрушения, такие как расслоение, растрескивание связующего, фрагментация волокон и их отрыв от связующего. При таком разрушении единицей массы полимерного композита поглощается энергия, превышающая энергию, поглощаемую многими металлами [1]. Удельная энергия поглощения J (Дж/кг) является важной характеристикой материала, определяющей его демпфирующую эффективность и используемой при сравнении его с другими материалами. Для экспериментального определения J проводятся испытания, в ходе которых трубчатые образцы подвергаются удару по торцу [2–4]. Если жесткостные

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 20-11-20230).

© Федоренко А. Н., Федулов Б. Н., Ломакин Е. В., 2021

и прочностные характеристики материала, из которого изготовлен образец, зависят от скорости деформаций, то и удельная энергия поглощения будет изменяться в зависимости от скорости ударника в эксперименте. При этом результаты испытаний показывают, что свойства материала зависят от ориентации армирующих волокон и имеет место масштабный эффект при варьировании размеров образцов [5].

В данной работе предложена модель упрочнения ортотропного материала, которое зависит от скорости деформаций. В отличие от моделей кинематического упрочнения, содержащих явную зависимость напряжений от деформаций и скоростей деформаций (например, модель Джонсона — Кука [6]), предлагаемые определяющие соотношения представлены в виде зависимости между напряжениями, параметрами накопления поврежденности материала и скоростями их изменения. Параметры модели могут быть определены экспериментально с использованием методики стержня Гопкинсона — Кольского [7, 8] при динамическом нагружении на растяжение, сжатие и сдвиг в плоскости слоя композита. Численная реализация модели выполняется с использованием комплекса конечно-элементного моделирования Abaqus. Проводится численное моделирование удара по торцу трубчатых образцов на основе углеволокна и полимерного связующего с укладкой слоев под различными углами для получения оценки удельной энергии поглощения и выбора оптимальной укладки многослойного полимерного композитного материала (ПКМ).

Определяющие соотношения для ортотропного слоистого композита с учетом скоростного упрочнения. Поврежденность упругого ортотропного материала определим параметрами $0 \leq \psi_1 \leq 1$ и $0 \leq \psi_2 \leq 1$. Параметр ψ_1 характеризует поврежденность волокна, а ψ_2 — поврежденность связующего. При этом параметр $\psi_i = 0$ ($i = 1, 2$) соответствует полному разрушению, $\psi_i = 1$ — исходному материалу. Определяющие соотношения принимают следующий вид [9, 10]:

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

Предположим, что напряжения, при которых происходит накопление повреждения, в каждый момент времени определяются множеством параметров $[\psi_1, \psi_2, d\psi_1/dt, d\psi_2/dt]$, т. е. параметрами поврежденности и скоростью их изменения. Для ортотропного материала в качестве компонент тензора напряжений можно использовать предельные напряжения при растяжении и сжатии вдоль волокна (X_T и X_C соответственно), предельные напряжения при растяжении и сжатии в поперечном направлении (Y_T и Y_C) и предельные напряжения при сдвиге S :

$$\begin{aligned} X_T &= X_T(\psi_1, \psi_2, \dot{\psi}_1, \dot{\psi}_2), & X_C &= X_C(\psi_1, \psi_2, \dot{\psi}_1, \dot{\psi}_2), \\ Y_T &= Y_T(\psi_1, \psi_2, \dot{\psi}_1, \dot{\psi}_2), & Y_C &= Y_C(\psi_1, \psi_2, \dot{\psi}_1, \dot{\psi}_2), \\ S &= S(\psi_1, \psi_2, \dot{\psi}_1, \dot{\psi}_2). \end{aligned} \tag{1}$$

Предположим, что в случаях одноосного растяжения в направлении волокон X_T и растяжения в поперечном направлении Y_T предельные напряжения (1) не зависят от скорости нагружения. Это предположение подтверждается экспериментально для некоторых известных марок композитных материалов [11]. Функции X_C , Y_C и S представим в виде произведения двух функций, определяющих статическую и динамическую компоненты:

$$\begin{aligned} X_T &= X_T(\psi_1), & X_C &= X_C^{st}(\psi_1)X_C^{dyn}(\dot{\psi}_1), \\ Y_T &= Y_T(\psi_2), & Y_C &= Y_C^{st}(\psi_2)Y_C^{dyn}(\dot{\psi}_2), \\ S &= S^{st}(\psi_2)S^{dyn}(\dot{\psi}_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Конкретный вид функций X_T , X_C , Y_T , Y_C , S в (2) аналогичен виду функций в соотношениях Джонсона — Кука [6]:

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

Здесь 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 , $\dot{\psi}_i^0$ выбираются таким образом, чтобы обеспечить удовлетворительную аппроксимацию экспериментальных ударных и квазистатических диаграмм деформирования. Для этого при различных скоростях деформации v записываются соотношения, которые рассматриваются как обыкновенные дифференциальные уравнения для функций повреждений $\psi_i(t)$:

$$\begin{aligned} vt\psi_1(t)E_{11}^0 &= \frac{A_C^X}{1 + B_C^X/\psi_1(t)} \left(1 + C_X \left(-\frac{\dot{\psi}_1(t)}{\dot{\psi}_1^0} \right)^{N_X} \right), \\ vt\psi_2(t)E_{22}^0 &= (A_C^Y + B_C^Y(1 - \psi_2(t))^{n_C}) \left(1 + C_Y (\ln(-\dot{\psi}_2(t)/\dot{\psi}_2^0))^{N_Y} \right), \\ vt\psi_2(t)G_{12}^0 &= (A^S + B^S(1 - \psi_2(t))^{n^S}) \left(1 + (\sin h(C_S \ln(-\dot{\psi}_2(t)/\dot{\psi}_2^0)))^{N_S} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

В левой части уравнений (3) записаны выражения для напряжений, которые можно определить с использованием экспериментальных кривых динамического нагружения. На основе серии численных решений путем перебора определяются значения констант в правой части (3), обеспечивающие соответствие экспериментальным данным. Например, из результатов анализа диаграммы сдвигового нагружения с постоянной скоростью деформации v следует, что в момент времени t справедливо соотношение

$$\sigma_{12} = vt\psi_2(t)G_{12}^0 = (A^S + B^S(1 - \psi_2(t))^{n^S}) \left(1 + (\sin h(C_S \ln(-\dot{\psi}_2(t)/\dot{\psi}_2^0)))^{N_S} \right), \quad (4)$$

где G_{12}^0 — модуль сдвига неповрежденного материала. Выражение (4) рассматривается в качестве обыкновенного дифференциального уравнения относительно $\psi_2(t)$.

Постановка задачи о разрушении трубчатого образца. Схема эксперимента, в котором выполняется удар по трубчатому образцу из ПКМ, представлена на рис. 1. Рассмотрим тестовую задачу об ударе по свободному торцу композитного трубчатого образца длиной $L = 130$ мм и диаметром $D = 50$ мм груза массой $M = 100$ кг с начальной скоростью $V = 5$ м/с. Общая толщина стенки, состоящей из восьми слоев одинаковой толщины, для которых рассмотрены различные варианты ориентации волокон, равна $h = 1,92$ мм (см. рис. 1). Образец имеет скос на переднем крае (фаску) под углом $\varphi = 30^\circ$.

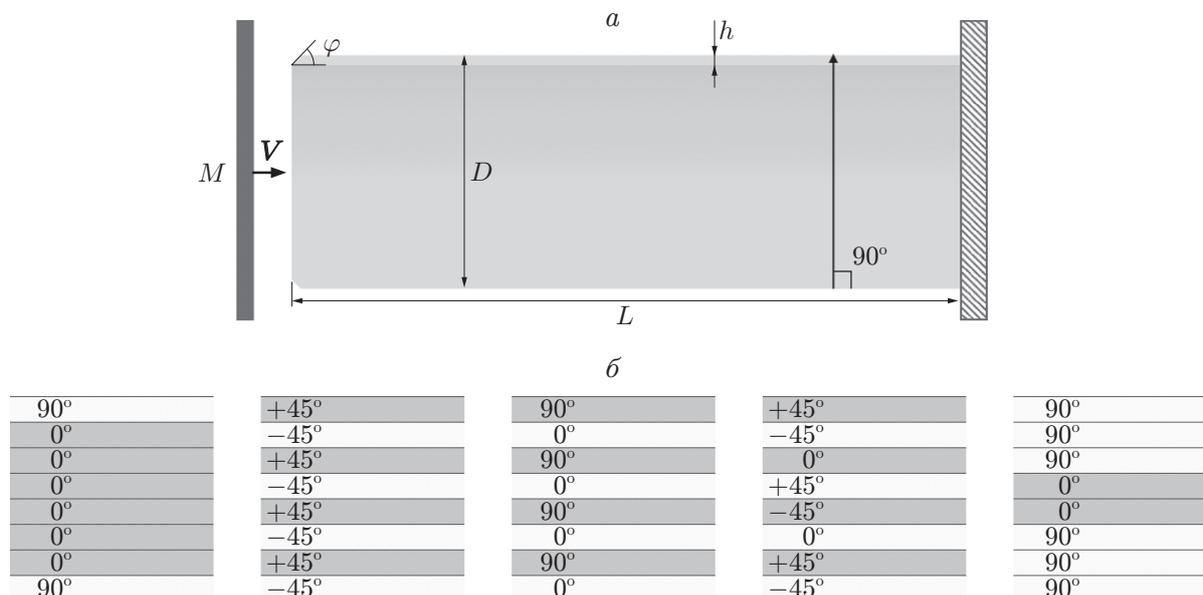


Рис. 1. Схема эксперимента, в котором выполняется удар по торцу трубчатого образца:

a — образец, *б* — варианты укладки слоев в образце

После соударения скорость ударника уменьшается под действием динамической силы реакции, возникающей при прогрессирующем разрушении образца в зоне контакта. Другой торец образца свободно прилегает к опорной поверхности. Образец состоит из армированного углеволокном слоистого ПКМ с эпоксидным связующим IM6G/3501-6. Прочностные и деформационные характеристики ПКМ зависят от скорости деформаций. Параметры модели рассматриваемого в данной работе материала IM6G/3501-6 определены в [12]. Для слоев композита рассматриваются несколько вариантов ориентации армирования (см. рис. 1). Выбор вариантов укладок $[0/90]_n$ и $[\pm 45]_n$ обусловлен их широким применением при проектировании демпфирующих элементов. Кроме того, представляется необходимым изучение целесообразности добавления дополнительных слоев с ориентацией 0° , определяющих жесткость и прочность в данном направлении, как в случае укладки $[90/0_6/90]$.

В процессе соударения регистрируется сила реакции F , которая может быть определена по ускорению ударника. Удельная энергия поглощения при перемещении фронта разрушения вдоль образца на величину l_C вычисляется по формуле

$$J = \frac{1}{m_{l_C}} \int_0^{l_C} F dx = \frac{\bar{F}l_C}{m_{l_C}}, \tag{5}$$

где m_{l_C} — масса разрушенного материала; \bar{F} — средняя сила реакции.

Численное моделирование процесса разрушения трубчатого композитного образца. На рис. 2 показаны образец, моделируемый в системе Abaqus, и соответствующая конечно-элементная сетка с элементами типа C3D8R, общее количество которых составляет 120 000. Размеры сетки варьируются в диапазоне от 0,4 мм в зоне, расположенной вблизи торца, по которому выполняется удар, до 3 мм в зоне, расположенной вблизи свободного торца. Заданы условия механического контакта поверхности ударника с элементами образца. Расчеты проводились с использованием модуля Abaqus Explicit с явной схемой интегрирования по временному шагу.



Рис. 2. Общий вид образца и конечно-элементная сетка

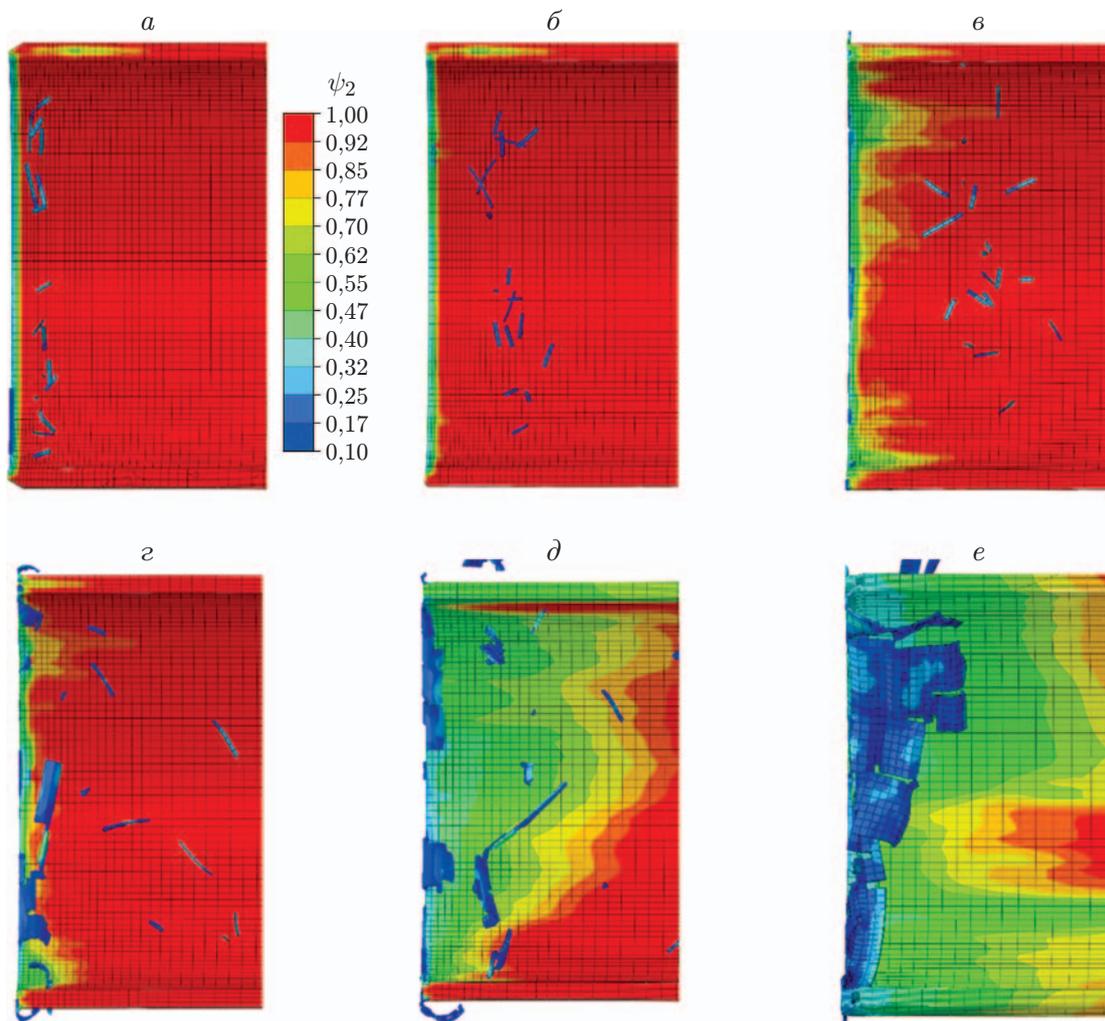


Рис. 3. Параметр поврежденности связующего ψ_2 в различные моменты времени при разрушении образца:
a — $t = 0,4$ мс, *б* — $t = 0,7$ мс, *в* — $t = 1$ мс, *г* — $t = 2$ мс, *д* — $t = 3$ мс, *е* — $t = 10$ мс

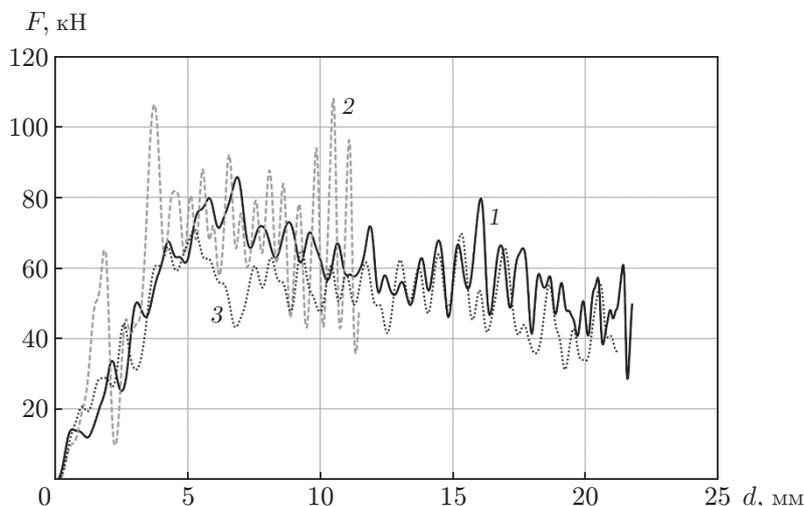


Рис. 4. Зависимость силы реакции от перемещения ударника для вариантов укладки $[0/90]_4$ (1), $[90/0_6/90]$ (2), $[\pm 45/0/\pm 45/0/\pm 45]$ (3)

В процессе моделирования поврежденные элементы после потери жесткости могут испытывать экстремальные деформации, что приводит к уменьшению шага, при котором схема интегрирования устойчива. Для решения этой проблемы удаляются элементы в соответствии со следующим критерием: достижение величины деформации в направлении вдоль волокна, равной 3 %, либо уменьшение жесткости вследствие повреждения связующего на 95 %, что может быть интерпретировано как практически полное разрушение.

Процесс разрушения образца с укладкой $[90/0_6/90]$ в различные моменты времени с начала контакта ($t = 0$) показан на рис. 3. Представлена только компонента поврежденности ψ_2 , характеризующая степень разрушения связующего. На рис. 3 видно, что зона повреждения связующего распространяется вглубь образца. Разрушение волокна является более хрупким, поэтому поврежденность, характеризуемая параметром ψ_1 , имеет место только в непосредственной близости контакта ударника с образцом и фронт разрушения распространяется на расстояние от контактной поверхности, равное размеру области, занимаемой несколькими элементами. Вследствие этого распределение ψ_1 не показано на рис. 3.

На рис. 4 представлены зависимости силы реакции от перемещения ударника. Закономерным результатом является увеличение амплитуды силы реакции при увеличении количества слоев с ориентацией вдоль оси трубки (0°), обладающих наибольшими жесткостью и прочностью. При этом происходит увеличение значения J , рассчитанного по формуле (5). Удельная энергия поглощения при различных конфигурациях слоев композита имела следующие значения: при укладке $[0/90]_4$ $J = 52,6$ Дж/г, при укладке $[\pm 45/0/\pm 45/0/\pm 45]$ $J = 53,4$ Дж/г, при укладке $[90/0_6/90]$ $J = 56,0$ Дж/г, при укладке $[\pm 45]$ $J = 45,3$ Дж/г, при укладке $[90_3/0_2/90_3]$ $J = 41,2$ Дж/г. Таким образом, при использовании ПКМ с преобладанием слоев с укладкой 0° энергия поглощения увеличивается, но при этом амплитуда нагрузки может достигнуть недопустимо больших значений.

На рис. 5 показано распределение параметра поврежденности ψ_2 (повреждение связующего) для образцов с укладками $[90/0_6/90]$ и $[0/90]_4$ после удара в момент времени $t = 10$ мс. Из рис. 5 следует, что в случае укладки $[90/0_6/90]$ повреждение слоев происходит на большом расстоянии от торца, по которому выполняется удар.

Выводы. Предложенная в работе модель позволяет учитывать зависимость прочностных и деформационных характеристик ортотропного слоистого композита от скорости

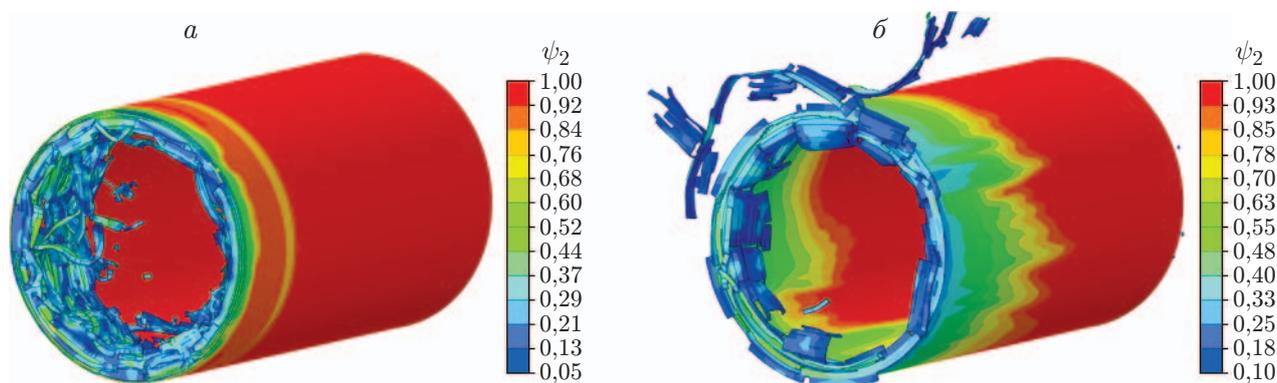


Рис. 5. Распределения параметра поврежденности ψ_2 в момент удара ($t = 10$ мс):
 а — вариант укладки $[0/90]_4$, б — вариант укладки $[90/0_6/90]$

деформации. Результаты численного решения рассмотренных задач о нагружении трубчатых образцов позволяют выбрать ориентацию слоев, при которой происходит увеличение удельной энергии поглощения. Показано, что увеличение числа слоев, ориентированных в направлении удара, способствует увеличению удельной энергии поглощения. При этом возрастают максимальные значения силы реакции. Разработанный подход позволяет проектировать демпфирующие композитные элементы с учетом предельно допустимого уровня нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lu G.** Energy absorption of structures and materials / G. Lu, T. X. Yu. Cambridge: Woodhead Publ. Ltd., 2003.
2. **Kim J. S., Yoon H. J., Shin K. B.** A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers // Intern. J. Impact Engng. 2011. V. 38, N 4. P. 198–207.
3. **Kakogiannis D., Chung Kim Yuen S., Palanivelu S., et al.** Response of pultruded composite tubes subjected to dynamic and impulsive axial loading // Composites. Pt B. Engineering. 2013. V. 55. P. 537–547.
4. **Ataabadi P. B., Karagiozova D., Alves M.** Crushing and energy absorption mechanisms of carbon fiber-epoxy tubes under axial impact // Intern. J. Impact Engng. 2019. V. 131. P. 174–189.
5. **Hull D.** A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes // Composites Sci. Technol. 1991. V. 40, N 4. P. 377–421.
6. **Johnson G. R., Cook W. H.** Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // Engng Fracture Mech. 1985. V. 21, N 1. P. 31–48.
7. **Bragov A. M., Lomunov A. K., Sergeichev I. V., et al.** Determination of physicomechanical properties of soft soils from medium to high strain rates // Intern. J. Impact Engng. 2008. V. 35, N 9. P. 967–976.
8. **Koerber H., Camanho P. P.** High strain rate characterisation of unidirectional carbon-epoxy IM7-8552 in longitudinal compression // Composites. Pt A. Appl. Sci. Manufactur. 2011. V. 42, N 5. P. 462–470.
9. **Fedulov B. N., Fedorenko A. N., Kantor M. M., Lomakin E. V.** Failure analysis of laminated composites based on degradation parameters // Meccanica. 2018. V. 53, N 1/2. P. 359–372.

10. **Fedorenko A. N., Fedulov B. N., Lomakin E. V.** Failure analysis of laminated composites with shear nonlinearity and strain-rate response // *Procedia Structur. Integrity*. 2019. V. 18. P. 432–442.
11. **Koerber H., Kuhn P., Ploeckl M., et al.** Experimental characterization and constitutive modeling of the non-linear stress-strain behavior of unidirectional carbon-epoxy under high strain rate loading // *Adv. Model. Simulat. Engng Sci.* 2018. V. 5. P. 1–24.
12. **Lomakin E. V., Fedulov B. N., Fedorenko A. N.** Strain rate influence on hardening and damage characteristics of composite materials // *Acta Mech.* 2021. V. 232, iss. 5. P. 1875–1887.

*Поступила в редакцию 26/V 2021 г.,
после доработки — 26/V 2021 г.
Принята к публикации 31/V 2021 г.*
