

УДК 620.178.7

ВЛИЯНИЕ ИСКРИВЛЕНИЯ ВОЛОКОН НА ПРОЧНОСТЬ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ*

Бабайцев А.В.¹, Инюхин А.В.², Лисицын А.В.³, Моссаковский П.А.²,
Рабинский Л.Н.¹, Соляев Ю.О.^{1,4}

¹ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)», г. Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия

³ООО «НПО «Центротех», г. Новоуральск, Россия

⁴ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Непрямолинейная укладка армирующих волокон в полимерных композиционных материалах может быть как следствием технологических дефектов, так и целенаправленным конструктивным решением, направленным на оптимизацию локальных характеристик материала. Искривления волокон могут возникать, как технологические дефекты, в случае погрешностей выкладки, неравномерной пропитки и неправильных режимов полимеризации, неравномерной усадки и т.п. В данной работе представлены результаты экспериментального определения предела прочности и предельных деформаций при сжатии образцов однонаправленного углепластика с прямолинейной (обычной) и волнообразной укладкой волокон в условиях высокоскоростного нагружения. Динамические испытания проведены по методу Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона на высокоскоростной системе «StrainMaster High-Speed 3D DIC». Статические испытания проводились на универсальной испытательной машине Instron. Волнообразная укладка волокон создана целенаправленно для исследования влияния искривления волокон на механические свойства композита. Для каждого типа укладки волокон проведено испытание цилиндрических образцов, вырезанных в направлениях осей ортотропии материала. Для каждого типа и каждого направления было испытано три образца. Для сравнения определена прочность образцов в условиях квази-статического нагружения. В результате испытаний установлено снижение прочности композита при сжатии, при наличии искривления волокон на 5-32%, и повышение высокоскоростных характеристик прочности, по сравнению с квази-статическими, на 30-60%. Установлено повышение предельных деформаций композита с искривленными волокнами в условиях квази-статического нагружения. Исследовано изменение характера разрушения образцов при наличии искривления волокон при статическом и высокоскоростном нагружении.

Ключевые слова: углепластик; высокоскоростное нагружение; прямолинейная укладка; искривление волокон; метод Кольского

INFLUENCE OF FIBER CURVATION ON THE CARBON DURABILITY DURING HIGH-SPEED LOADING

Babaytsev A.V.¹, Inyukhin A.V.², Lisitsyn A.V.³, Mossakovskii P.A.²,
Rabinskiy L.N.¹, Solyaev Y.O.^{1,4}

* Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №17-79-20105 и гранта РФФИ №17-08-00334 А.

¹*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

³*LLC «Centrotech», Novouralsk, Russia*

⁴*Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

ABSTRACT

The indirect laying of reinforcing fibers in polymer composite materials can be both a consequence of technological defects and a targeted constructive solution aimed at optimizing the local characteristics of the material. Fiber curvatures can occur as technological defects in the case of lay-out errors, uneven impregnation and improper polymerization conditions, uneven shrinkage, etc. This paper presents the results of an experimental determination of the tensile strength and ultimate strains during compression of unidirectional carbon fiber specimens with straight-line (ordinary) and wave-like laying of fibers under high-speed loading. Dynamic tests were carried out according to the Kolsky method using a split Hopkinson rod on a high-speed system "StrainMaster High-Speed 3D DIC". Static tests were performed on an Instron universal testing machine. The wave-like laying of fibers was created purposefully to study the effect of fiber curvature on the mechanical properties of the composite. For each type of fiber laying, a test of cylindrical samples cut in the directions of the axes of orthotropy of the material was performed. Three samples were tested for each type and each direction. For comparison, the strength of the samples under quasi-static loading was determined. As a result of the tests, a decrease in the compressive strength of the composite, in the presence of fiber curvature by 5-32%, and an increase in the high-speed strength characteristics, in comparison with quasi-static, by 30-60% were found. An increase in the ultimate strains of a composite with curved fibers under quasi-static loading has been established. The change in the nature of the destruction of the samples in the presence of fiber curvature under static and high-speed loading is investigated.

Keywords: carbon fiber; high speed loading; straight laying; fiber curvature; Kolsky method

ВВЕДЕНИЕ

Непрямолинейная укладка армирующих волокон в полимерных композиционных материалах может быть как следствием технологических дефектов, так и целенаправленным конструктивным решением, направленным на оптимизацию локальных характеристик материала. Искривления волокон могут возникать, как технологические дефекты, в случае погрешностей выкладки, неравномерной пропитки и неправильных режимов полимеризации, неравномерной усадки и т.п. [1]. В случае наличия вырезов, отверстий или при необходимости повышения продольных и трансверсальных характеристик композита, целенаправленное создание изгибов и криволинейная выкладка волокон («обтекающая» концентраторы) являются необходимым решением для повышения несущей способности композиционного материала [2-5].

Одной из наиболее чувствительных характеристик к искривлению волокон, является предел прочности при сжатии в направлении вдоль выкладки волокон [6]. Наличие изгибов приводит к значительному снижению критической нагрузки, приводящей к потере устойчивости волокон внутри матрицы (micro-buckling) при сжатии [7]. Эффекты потери устойчивости волокнами даже в случае идеальной прямолинейной укладки приводит к снижению прочности при сжатии, по отношению к пределу прочности при растяжении, волокнистого композита

более чем в 1.5 раза [8]. Наличие изгибов волокон может снижать эту характеристике еще значительнее.

К настоящему времени проведено большое количество исследований по влиянию искривления волокон на прочность композиционных материалов. Получен большой объем экспериментальных данных [9-12]. Предложены аналитические и численные модели, позволяющие учитывать эффекты криволинейной укладки [13-16]. Некоторые прикладные модели, в том числе, используются в стандартных программных комплексах конечно-элементного моделирования. Однако, известные исследования выполнялись, преимущественно, для случая квазистатического нагружения материалов. Эффекты влияния скорости деформаций на прочность композитов с искривленными волокнами исследованы значительно в меньшей степени, хотя также рассматривались [17].

В настоящей работе рассматривается проблема определения прочности углепластика с искривленными волокнами в условиях высокоскоростного нагружения. Исследуется прочность при сжатии, так как, во-первых, эта характеристика, как было отмечено, наиболее чувствительна к искривлению волокон, во-вторых, потому что именно она определяет несущую способность некоторых типов композитных конструкций (колонн, опор, защитных оболочек и т.д.), и, в-третьих, локальная прочность при сжатии материала наиболее просто поддается определению в условиях стандартных высокоскоростных испытаний на образцах.

Испытания проведены по методу Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона [18]. Этот метод широко применяется для исследования высокоскоростных характеристик различных материалов и, в том числе, композитов [18-22]. В настоящей работе представлены результаты определения прочности углепластика с заранее спроектированной криволинейной укладкой волокон. Исследуются образцы цилиндрической формы, для которых с целью сравнения проводятся и квази-статические испытания. Выбранная форма образцов, вообще говоря, не является стандартной для испытания композитов на сжатие, однако, она диктуется возможностями применяемой установки для высокоскоростных испытаний.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы композиционного материала были изготовлены на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с армирующими волокнами марки Togeу T800. Объемное содержание волокон составило 60%, диаметр волокон – 5 мкм. Образцы были изготовлены на базе НПО Центротех. Рассматривались образцы двух типов: 1) квази-однородный слоистый композит с однонаправленной схемой армирования и 2) однонаправленный композит с волнообразной слоистой структурой. Характерная геометрия монослоя, реализующаяся в композите с волнообразной структурой, показана на рис.1. Для получения таких образцов на станке с ЧПУ была отфрезерована соответствующая оснастка, с регулярной волнообразной поверхностью. Образцы были изготовлены из однонаправленных препрегов методом прессования. Пример микроснимков поперечных сечений образцов с обычной и с волнообразной структурой представлен на рис.2. Характерное искривление волокон, реализовавшееся у образцов с волнообразной

структурой, составило порядка ~ 0.5 мм (амплитуда) с шагом ~ 10 мм («длина волны»).

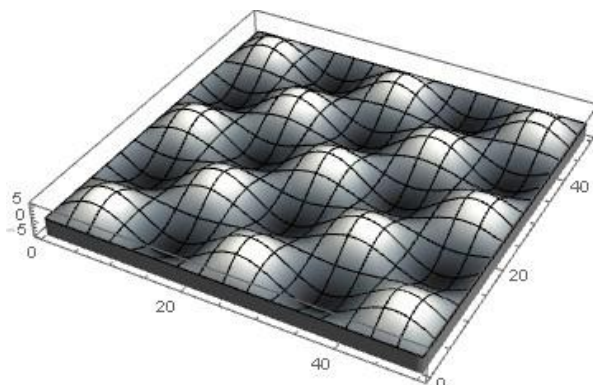
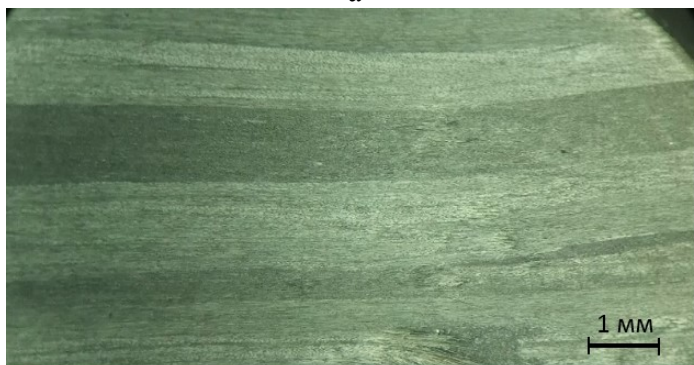


Рис.1. Схематичное изображение геометрии монослоя в композите с волнообразной схемой армирования.



а



б

Рис.2. Микроснимки поперечных сечений образцов с обычной (а) и волнистой (б) структурой.

Из заготовок композиционного материала были вырезаны образцы цилиндрической формы для проведения высокоскоростных испытаний на сжатие по методу Кольского. Исследовались две партии образцов с прямолинейной и волнистой структурой для статических испытаний и две партии таких же образцов для высокоскоростных испытаний. В каждой партии было 9 образцов по 3 одинаковых образца, вырезанных в каждом направлении укладки композитного материала: вдоль волокон (партия 1), поперек волокон (партия 2) и из плоскости монослоя композита (партия 3). Образцы имели цилиндрическую форму с диаметром 15 мм для волнистой структуры и диаметром 10 мм

для прямолинейной структуры с высотой каждого образца равной 10 мм. Пример фотографии партии образцов представлен на рис.3.



Рис.3. Партия образцов.

Динамические испытания на сжатие проводились на высокоскоростной системе «StrainMaster High-Speed 3D DIC» (LaVision) с визуализацией деформации методом коррекции цифровых изображений с регистрацией быстротекущих процессов деформации материалов по методу Кольского. Удар осуществлялся с использованием ударника диаметром 20 мм и длиной 300 мм из высокопрочной мартенситной стали. Испытание проводилось при скорости ударника равной 10-18 м/с. Скорость ударника выбиралась из результатов предварительных статических испытаний и опыта подобных высокоскоростных испытаний [1-3,6-9]. В проведенных испытаниях скорость деформации составляла $\sim 600 \text{ с}^{-1}$.

Статические механические испытания проводились на универсальных электрических установках Instron 5969 (50kN) и Instron 5982 (100kN) (Великобритания) с программным обеспечением Bluehill 3. Скорость движения траверсы в этих испытаниях составляла 1 мм/мин.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

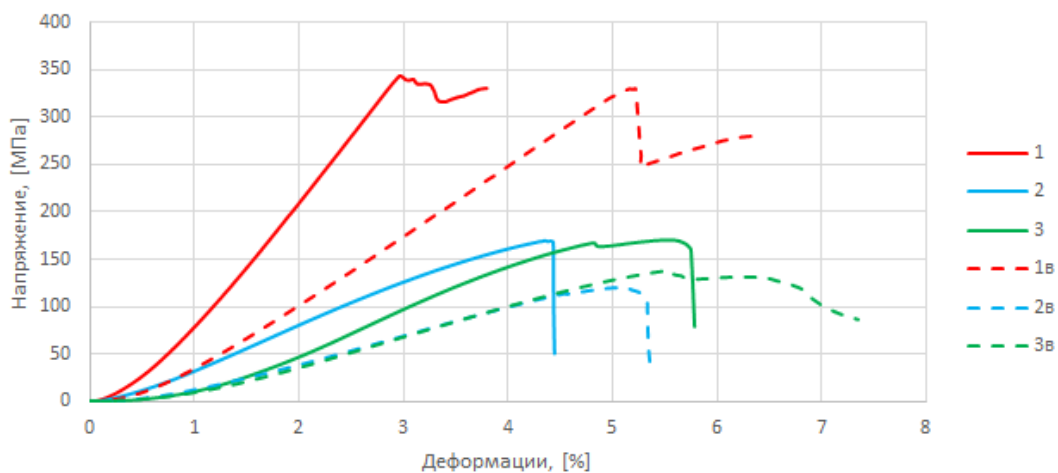
Характерные диаграммы напряжения-деформации, полученные в результате высокоскоростных и квази-статических испытаний образцов различных типов, представлены на рис.4. Определенные значения прочности и предельные деформации (то есть деформации, при которых в материале был достигнут предел прочности) представлены в таблице 1.

В высокоскоростных испытаниях, как и в статических, установлен эффект снижения прочности материала при сжатии во всех трех направлениях (вдоль, поперек волокон и из плоскости) при наличии искривления волокон. Это снижение проявляется для осредненного значения предела прочности для партии однотипных образцов, однако, как видно на рис.4а, в условиях квази-статического нагружения пределы прочности образцов с обычной и криволинейной укладкой могут быть близки. При этом предельные деформации образцов с криволинейной укладкой увеличиваются во всех трех направлениях проведенных испытаний.

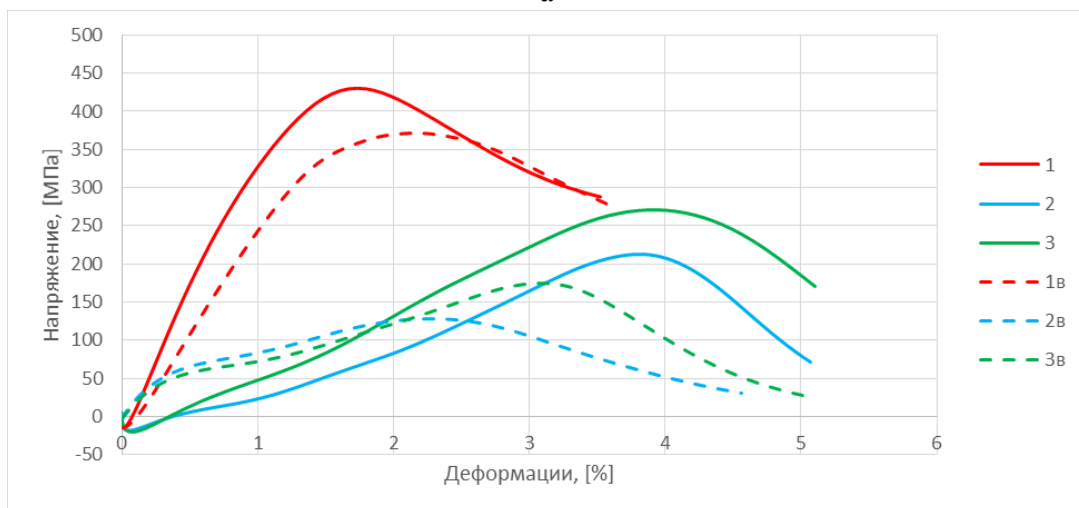
При высокоскоростных испытаниях предел прочности, как и у статических, в однонаправленной укладке выше, чем в волнистой укладке, однако если при статических испытаниях эта разница была не столь значительна (в направлении 1-5%, в направлении 2-32%, в направлении 3-23%), то при высокоскоростном

испытании разница существенно возросла в сравнении со статическими испытаниями (в направлении 1-15%, в направлении 2-38%, в направлении 3-37%). Повышение прочности материала при повышении скорости деформаций, является характерным для большинства конструкционных материалов, в которых в этом случае развитие деформаций происходит быстрее, чем развитие и распространение дефектов.

Предельные деформации образцов в условиях высокоскоростных испытаний образцов также снижаются, то есть, помимо, прочности происходит и повышение жесткости материала). Предельные деформации образцов с прямолинейной укладкой оказываются больше или сопоставимы с соответствующими характеристиками образцов с искривленными волокнами.



а



б

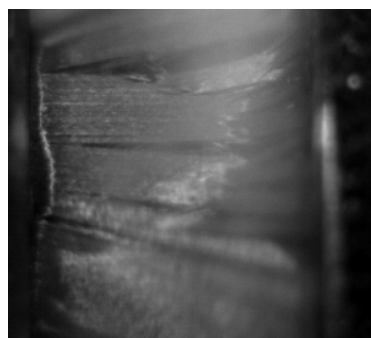
Рис.4. Характерные диаграммы для всех типов испытанных образцов: а – результаты статических испытаний, б – результаты высокоскоростных испытаний. Сплошные линии – обычная (прямолинейная) укладка волокон, пунктир – образцы с искривленными волокнами.

Таблица 1.

Механические свойства образцов

Партия	Предел прочности в статических испытаниях, [МПа] (Коэф. Вариаци., %)	Предельный деформации статические [%] (Коэф. Вариации, %)	Предел прочности в динамических испытаниях, [МПа] (Коэф. Вариаци., %)	Предельный деформации статические [%] (Коэф. Вариации, %)
1	332,93 (4,20%)	3,3 (10,9%)	424,07 (9,78%)	2,07 (4,04%)
2	166,10 (1,98%)	4,2 (8,25%)	211,81 (0,70%)	4,17 (15,24%)
3	177,33 (3,56%)	5 (7,87%)	286,82 (6,91%)	3,80 (4,56%)
1 (волнистый)	318,45 (5,53%)	6 (14,63%)	358,90 (3,15%)	2,50 (5,41%)
2 (волнистый)	110,43 (4,83%)	5 (2,98%)	131,87 (6,57%)	2,27 (2,55%)
3 (волнистый)	140,85 (1,96%)	5 (0,90%)	180,94 (4,96%)	3,65 (21,31%)

В процессе испытаний проводилась высокоскоростная съемка процесса разрушения образцов. Характер разрушения при статическом и динамическом нагружении представлен на рис.5. Отличие в характере разрушения возникло в образцах, армированных вдоль приложенной нагрузки (партия 1). При наличии искривления волокон, в этих образцах образовывались единичные трещины затем образец раскашивался на несколько, относительно крупных фрагментов (рис.5г). В случае прямолинейных волокон, происходило множественное растрескивание и расщепление образца (рис.5а). В направлении поперек волокон и «из плоскости» слоя характер разрушения оказывался примерно одинаковым. В первом случае образовывалось несколько косых пересекающихся трещин под углом $\sim 30-45^\circ$ к направлению действующей нагрузки. Во втором случае образец разрушался по диагонали под углом ~ 45 градусов.



а



б

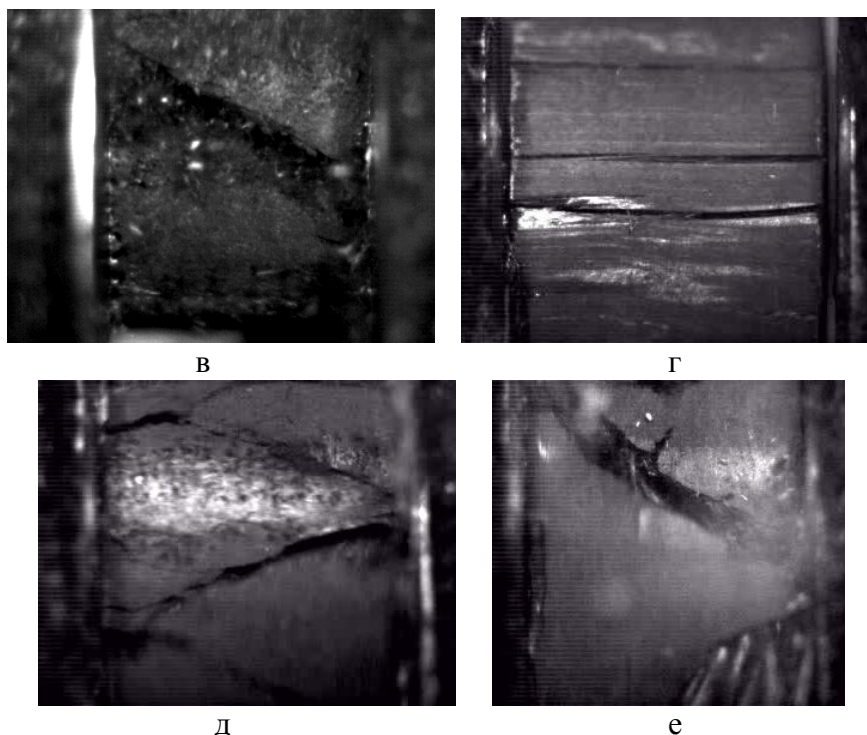


Рис.5. Характер разрушения образцов с прямолинейной (верхний ряд) и с криволинейной (нижний ряд) укладкой волокон; а, г – испытания вдоль волокон, б, д – испытания поперек волокон, в, е – испытания по нормали к плоскости слоев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены статические и высокоскоростные испытания однонаправленных образцов углепластика с прямолинейной и волнистой структурой. Исследовано влияние структуры и высокоскоростного нагружения на предел прочности и предельные деформации материала.

В результате статических испытаний получено, что предел прочности в однонаправленной укладке выше, чем в волнистой укладке. Аналогичный результат получен и при динамических испытаниях, в которых, однако, прочность при искривлении волокон снижается не столь значительно. Установлен эффект повышения предельных деформаций образцов с искривленными волокнами, что отмечалось ранее для случая испытаний на растяжение [4,5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Piggott M.R. *The effect of fibre waviness on the mechanical properties of unidirectional fibre composites: a review* // Composites Science and Technology. – 1995. – Vol.53. – No.2. – Pp.201-205.
2. Jumahat A. et al. *Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composites subjected to compressive loading* // Composite Structures. – 2010. – Vol.92. – No.2. – Pp.295-305.
3. Hyer M.W., Lee H.H. *The use of curvilinear fiber format to improve buckling resistance of composite plates with central circular holes* // Composite Structures. – 1991. – Vol.18. – No.3. – Pp.239-261.

4. Khattab I.A., Kreikemeier J., Abdelhadi N.S. *Manufacturing of CFRP specimens with controlled out-of-plane waviness* // CEAS Aeronautical J. – 2014. – Vol.5. – No.1. – Pp.85-93.
5. Сапожников С.Б., Херувимов А.В., Хоружий А.С. *Control of composite nonlinear deformation by local curvature of yarns* // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2019. – Т.11. – №1. – С.43-49.
6. Плитов И.С., Полилов А.Н., Татусь Н.А. *Компьютерное моделирование рациональной структуры криволинейного армирования профилированных композитных элементов* // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2013. – №4. – С.73-79.
7. Budiansky B., Fleck N.A. *Compressive kinking of fiber composites: a topical review* // Applied Mechanics Reviews. – 1994. – Vol.47. – No.6S. – Pp.S246-S250.
8. Vasiliev V.V., Morozov E.V. *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures*. – Elsevier, 2018. – 882 p.
9. Hsiao H.M., Daniel I.M. *Elastic properties of composites with fiber waviness* // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 1996. – Vol.27. – No.10. – Pp.931-941.
10. Wilhelmsson D. et al. *An experimental study of fibre waviness and its effects on compressive properties of unidirectional NCF composites* // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2018. – Vol.107. – Pp.665-674.
11. Zhang L. et al. *Compressive behavior of unidirectional FRP with spacial fibre waviness and non-uniform fibre packing* // Composite Structures. – 2019. – Pp.111082.
12. Mizukami K. et al. *Detection of in-plane and out-of-plane fiber waviness in unidirectional carbon fiber reinforced composites using eddy current testing* // Composites. Part B: Engineering. – 2016. – Vol.86. – Pp.84-94.
13. Shipsha A., Burman M., Ekh J. *Failure of cross-ply NCF composites under off-axis compressive loads-An experimental study and a new strength prediction model including fibre bundle waviness* // Composites. Part B: Engineering. – 2018. – Vol.153. – Pp.49-56.
14. Yushanov S.P., Bogdanovich A.E. *Fiber waviness in textile composites and its stochastic modeling* // Mechanics of Composite Materials. – 2000. – Vol.36. – No.4. – Pp.297-318.
15. Wisnom M.R. *The effect of fibre waviness on the relationship between compressive and flexural strengths of unidirectional composites* // J. of Composite Materials. – 1994. – Vol.28. – No.1. – Pp.66-76.
16. Васильев В.В. и др. *Композиционные материалы: Справочник* / Под общ. ред. Васильева В.В., Тарнопольского Ю.М. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
17. Hsiao H.M., Daniel I.M. *Effect of fiber waviness on the high-strain-rate behavior of composites* // J. of Thermoplastic Composite Materials. – 1999. – Т.12. – №5. – С.412-422.
18. Моссаковский П.А., Костырева Л.А. *О новом способе экспериментального исследования материалов на динамический сдвиг при высокоскоростном деформировании* // Проблемы прочности и пластичности. – 2018. – Т.80. – №1. – С.127-135.
19. Ochola R.O., Marcus K., Nurick G.N., Franz T. *Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates* // Composite Structures. – 2004. – Vol.63. – Iss.3-4. – Pp.455-467.

20. Guedes R.M., M.F.S.F. de Moura, Ferreira F.J. *Failure analysis of quasi-isotropic CFRP laminates under high strain rate compression loading* // Composite Structures. – 2008. – Vol.84. – Iss.4. – Pp.362-368.
21. Elanchezhian C., B.Vijaya Ramnath, Hemalatha J. *Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates and temperatures* // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol.6. – Pp.1405-1418.
22. Hosur M.V., Alexander J., Vaidya U.K., Jeelani S. *High strain rate compression response of carbon/epoxy laminate composites* // Composite Structures. – 2001. – Vol.52. – Iss.3-4. – Pp.405-417.

REFERENCES

1. Piggott M.R. *The effect of fibre waviness on the mechanical properties of unidirectional fibre composites: a review*. Composites Science and Technology, 1995, Vol.53, No.2, Pp.201-205.
2. Jumahat A. et al. *Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composites subjected to compressive loading*. Composite Structures. 2010, Vol.92, No.2, Pp.295-305.
3. Hyer M.W., Lee H.H. *The use of curvilinear fiber format to improve buckling resistance of composite plates with central circular holes*. Composite structures. 1991, Vol.18, No.3, Pp.239-261.
4. Khattab I.A., Kreikemeier J., Abdelhadi N.S. *Manufacturing of CFRP specimens with controlled out-of-plane waviness*. CEAS Aeronautical J., 2014, Vol.5, No.1, Pp.85-93.
5. Sapozhnikov S.B., Kheruvimov A.V., Khoruzhiy A.S. *Control of composite nonlinear deformation by local curvature of yarns*. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Matematika. Mekhanika. Fizika", 2019, T.11, №1, Pp.43-49.
6. Plitov I.S., Polilov A.N., Tatus' N.A. *Komp'yuternoe modelirovanie ratsional'noj struktury krivolinejnogo armirovaniya profilirovannykh kompozitnykh ehlementov [Computer modeling of the rational structure of curvilinear reinforcement of profiled composite elements]*. Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizatsii, 2013, No.4, Pp.73-79.
7. Budiansky B., Fleck N.A. *Compressive kinking of fiber composites: a topical review*. Applied Mechanics Reviews, 1994, Vol.47, No.6S, Pp.S246-S250.
8. Vasiliev V.V., Morozov E.V. *Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures*. Elsevier, 2018, 882 p.
9. Hsiao H.M., Daniel I.M. *Elastic properties of composites with fiber waviness*. Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing, 1996, Vol.27, No.10, Pp.931-941.
10. Wilhelmsson D. et al. *An experimental study of fibre waviness and its effects on compressive properties of unidirectional NCF composites*. Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, Vol.107, Pp.665-674.
11. Zhang L. et al. *Compressive behavior of unidirectional FRP with spacial fibre waviness and non-uniform fibre packing*. Composite Structures, 2019, Pp.111082.
12. Mizukami K. et al. *Detection of in-plane and out-of-plane fiber waviness in unidirectional carbon fiber reinforced composites using eddy current testing*. Composites. Part B: Engineering, 2016, Vol.86, Pp.84-94.

13. Shipsha A., Burman M., Ekh J. *Failure of cross-ply NCF composites under off-axis compressive loads-An experimental study and a new strength prediction model including fibre bundle waviness*. Composites. Part B: Engineering, 2018, Vol.153, Pp.49-56.
14. Yushmanov S.P., Bogdanovich A.E. *Fiber waviness in textile composites and its stochastic modeling*. Mechanics of Composite Materials, 2000, Vol.36, No.4, Pp.297-318.
15. Wisnom M.R. *The effect of fibre waviness on the relationship between compressive and flexural strengths of unidirectional composites*. J. of Composite Materials, 1994, Vol.28, No.1, Pp.66-76.
16. Vasiliev V.V. et al. *Kompozitsionnye materialy: Spravochnik [Composite materials: Reference book]*. Moskva, Mashinostroenie, 1990, 512 p.
17. Hsiao H.M., Daniel I.M. *Effect of fiber waviness on the high-strain-rate behavior of composites*. J. of Thermoplastic Composite Materials, 1999, Vol.12, No.5, Pp.412-422.
18. Mossakovsky P.A., Kostyreva L.A. *O novom sposobe ehksperimental'nogo issledovaniya materialov na dinamicheskij sdvig pri vysokoskorostnom deformirovanii [About a new method of experimental study of materials for dynamic shear during high speed deformation]*. Problemy Prochnosti i Plastichnosti, 2018, Vol.80, No.1, Pp.127-135.
19. Ochola R.O., Marcus K., Nurick G.N., Franz T. *Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates*. Composite Structures, 2004, Vol.63, Iss.3-4, Pp.455-467.
20. Guedes R.M., M.F.S.F. de Moura, Ferreira F.J. *Failure analysis of quasi-isotropic CFRP laminates under high strain rate compression loading*. Composite Structures, 2008, Vol.84, Iss.4, Pp.362-368.
21. Elanchezhian C., B.Vijaya Ramnath, Hemalatha J. *Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates and temperatures*. Procedia Materials Science, 2014, Vol.6, Pp.1405-1418.
22. Hosur M.V., Alexander J., Vaidya U.K., Jeelani S. *High strain rate compression response of carbon/epoxy laminate composites*. Composite Structures, 2001, Vol.52, Iss.3-4, Pp.405-417.

Поступила в редакцию 13 сентября 2019 года.

Сведения об авторах:

Бабайцев Арсений Владимирович – м.н.с., ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: ar77eny@gmail.com

Инюхин Александр Валерьевич – н.с., Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Лисицын Антон Владимирович – нач.производства, ООО «НПО «Центротех», г. Новоуральск, Россия

Моссаковский Павел Александрович – к.ф.-м.н., в.н.с., Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; e-mail: avel_mossakovsky@mail.ru

Рабинский Лев Наумович – д.ф.-м.н., зав.каф., Кафедра 903, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: rabinskiy@mail.ru

Соляев Юрий Олегович – к.ф.-м.н., с.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: yurysolyaev@yandex.ru