DOI: 10.15593/2224-9982/2017.51.10

УДК 620.16

О.А. Староверов, Е.М. Струнгарь, М.П. Третьяков, Т.В. Третьякова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Посвящено изучению методических вопросов экспериментальных исследований закономерностей деформирования и разрушения трубчатых образцов углепластика в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. В испытаниях используются образцы с концентратором напряжений в виде кругового отверстия. Рассматриваются методические аспекты проведения испытаний при совместном растяжении с кручением на основе комплексного использования универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системы Instron 8852 и бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы анализа полей перемещений и деформаций Vic-3D, математический аппарат которой основан на методе корреляции цифровых изображений. Особое внимание уделено выбору способов подготовки захватных частей и закрепления образцов в захватах испытательной машины, позволяющих проводить испытания при наличии осевой нагрузки и крутящего момента вплоть до полного разрушения. Использование видеосистемы позволяет проводить измерения перемещений и деформаций в рабочей части в области концентратора без применения дополнительных датчиков. Получены опытные данные о процессах разрушения образцов с концентратором и распределении неоднородных полей перемещений при пропорциональном растяжении с кручением. Использование данной методики позволяет получать опытные данные о закономерностях деформирования и разрушения композиционных материалов в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, которые необходимы для развития моделей механики композитов, широко применяемых в изделиях аэрокосмической техники.

Ключевые слова: композиционные материалы, испытания, сложное напряженное состояние, растяжение с кручением, трубчатые образцы, корреляция цифровых изображений.

O.A. Staroverov, E.M. Strungar, M.P. Tretyakov, T.V. Tretyakova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

FEATURES OF THE EXPERIMENTAL TEST OF TUBULAR SPECIMENS OF COMPOSITE MATERIALS UNDER COMPLEX STRESS STATE CONDITIONS

The work is devoted to studying of the methodological issues of experimental investigations of deformation and fracture of cylindrical samples of CFRP in the complex stress-strain conditions. The samples with a concentrator in the form of a hole were used in tests. The methodological aspects of tension-torsion tests with joint using of the universal biaxial servo-hydraulic test system Instron 8852 and the non-contact three dimension digital optical system Vic-3D, based on the digital image correlation technique, were considered. Particular attention is paid to the selection of the methods for preparing the gripping parts and fixing the specimens in the grips of the testing machine, permitted for providing tests under axial load and torque up to failure. Using of the video system allows to measure of displacement and deformation in the concentrator area of test part without applying of additional gauges. The experimental results of the failure processes of tubular specimens with a concentrator and the distribution of inhomogeneous displacement fields under proportional tension with torsion are obtained. The using of this procedure allows for obtaining the testing data of deformation regularities and failure of composite materials in the complex stress-strain conditions, which is required for the development of the mechanical models of composites widely used in aerospace engineering.

Keywords: composite materials, tests, complex stress-strain state, tension-torsion tests, tubular specimens, digital image correlation.

Введение

Широкое применение слоистых углепластиков в изделиях аэрокосмической техники определяется их высокими эксплуатационными и удельными механическими характеристиками, опытное изучение которых при различных видах напряженно-деформированного состояния крайне необходимо для развития соответствующих моделей механики. Исследованию механи-

ческого поведения слоистых волокнистых композитов при различных видах нагружения посвящено большое число работ [1–6], что обусловлено широким применением композиционных материалов при изготовлении ответственных конструкций в различных отраслях техники. Особое внимание направлено на экспериментальное изучение закономерностей деформирования и разрушения композитов и получение новых опытных данных в условиях сложного напряженного состояния [7–10], что необходимо для создания моделей и развития подходов к моделированию поведения композиционных материалов и конструкций из них в условиях сложных внешних воздействий, приближенных к реальным условиям эксплуатации [11–13].

В настоящее время активно исследуются методические вопросы изучения процессов деформирования и разрушения композиционных материалов как при одноосном, так и при двухосном нагружении в условиях плоского напряженного состояния. В зависимости от вида изделий, для изготовления которых используются композиционные материалы, наиболее распространенными методами являются совместное растяжение с кручением трубчатых образцов, двухосное растяжение крестообразных образцов и растяжение образцов с вырезами [14–19]. При этом практический интерес представляет изучение особенностей как квазистатического, так и циклического накопления повреждений композитов на образцах с концентраторами напряжений, что обусловлено наиболее частым возникновением зон повреждений и последующего разрушения в областях изменения геометрии изделий, крепежных узлов деталей и другого вида концентраторов.

Анализ современных методов и подходов опытного изучения процессов квазистатического и усталостного нагружения полимерных композитов позволяет сделать вывод о необходимости проведения комплексных экспериментальных исследований, которые направлены на получение не только характеристик упругости, прочности и числа циклов до разрушения, но и наиболее полной информации о протекающих процессах деформирования и накопления повреждений композиционных материалов. Для проведения таких исследований перспективным является совместное использование испытательных систем, обеспечивающих нагружение образца, и дополнительных средств регистрации протекающих в материале процессов, таких как системы акустической эмиссии, регистрации полей перемещений и деформаций, термосканирования [20, 21]. Получение данных при совместном использовании таких методов экспериментальной механики дает возможность изучения кинетики накопления повреждений и развития процессов разрушения в композитах, а также сопоставления различных подходов к оценке несущей способности и живучести элементов конструкций.

Настоящая работа направлена на развитие методик совместного использования испытательной системы и бесконтактной видеосистемы регистрации полей перемещений и деформаций, а также на решение методических вопросов закрепления трубчатых образцов углепластика при испытаниях на совместное растяжение и кручение.

Материал и оборудование

В результате анализа существующих методик изучения процессов накопления повреждений полимерных композитов отмечено, что совместное растяжение с кручением трубчатых образцов является одним из распространенных способов изучения механического поведения композитов в условиях плоского напряженного состояния. В рамках исследования отработана методика испытаний при совместном растяжении с кручением трубчатых образцов углепластика с концентраторами. Нагружение образцов производилось на универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850 (± 100 кН, ± 1000 Н·м, 30 Гц) с применением специализированных гидравлических захватов цангового типа, регистрация полей перемещений и деформаций производилась с использованием видеосистемы Vic-3D Correlated Solutions (рис. 1), математический аппарат которой основан на методе корреляции цифровых изображений. Съемка образцов реализована с помощью комплекта камер высокого разрешения (Prosilica, 16 Мп), скорость съемки составляла два кадра в секунду. Системы синхронизировались с использованием блока АЦП (NI USB-6251).

Рис. 1. Установка оборудования для испытаний на растяжение с кручением при совместном использовании испытательной системы Instron 8852 и видеосистемы Vic-3D

Для отработки методических вопросов экспериментального изучения деформирования и разрушения композитов в условиях плоского напряженного состояния при растяжении с кручением были использованы трубчатые образцы углепластика с номинальным внешним диаметром 26 мм и толщиной стенки 2 мм с концентратором в виде сквозного отверстия диаметром 5 мм, изготовленные на основе углеродного ровинга T700SC-12000-50C и связующего «Этал-Инжект SL/M».

Закрепление образцов осуществлялось с использованием захватов цангового типа с применением цанг с диапазоном рабочего диаметра 28–30 мм. На рис. 2 приведены цанга (рис. 2, *а*), прижимная гайка (рис. 2, *б*) для фиксации цанги в корпусе захвата и образец с установленными цангами (рис. 2, *в*). Для предотвращения разрушения образца при обжатии были реализованы различные способы подготовки захватных частей образцов и внутреннего заполнения на глубину захватных частей. Используемый тип захватов и способ установки обеспечивает равномерное обжатие основного материала композитного образца при нагружении. В зависимости от типа образца и прикладываемых нагрузок давление в контуре захватов может варьироваться в диапазоне от 40 до 200 бар.

Рис. 2. Разрезная цанга с номинальным рабочим диаметром 28–30 мм (*а*), прижимная гайка для фиксации цанги (*б*), трубчатый образец с установленными цангами (*в*)

Результаты испытаний

Одним из основных методических вопросов при испытаниях образцов композиционных материалов, и в особенности трубчатых образцов в условиях совместного растяжения с кручением, является способ закрепления образцов в захватах испытательной машины, позволяющий

реализовать нагрузки, необходимые для деформирования и разрушения образца в рабочей части, и не приводящий к разрушению образца в захватных частях. В работе реализовано три различных варианта подготовки захватных частей трубчатых образцов с использованием клеевого состава, выкладки стеклотканью и алюминиевых гильз, которые необходимы для получения требуемого диаметра захватных частей образцов, соответствующего диаметру цанги, и равномерного распределения нагрузок при обжатии и испытании.

Использование клеевого состава с последующим обтачиванием до нужного диаметра является технологически простым способом подготовки захватных частей образцов (рис. 3). Для этого использовался состав ВПЗ (внутренний полимерный наполнитель), состоящий из смолы ЭД-20 с наполнением полыми стеклянными микросферами. В этом случае во внутреннюю полость образца с натягом вставлялись сплошные металлические стержни на глубину, соответствующую длине цанги.

Рис. 3. Трубчатый композиционный образец с клеевыми накладками

Однако такой тип подготовки образца не позволил провести испытание на пропорциональное растяжение с кручением, так как происходило проскальзывание образца в продольном направлении, сопровождающееся падением осевой нагрузки. Значения растягивающей нагрузки, при которой образец начинал выскальзывать, отличались при разном давлении в захватах не более чем на 10 %, среднее значение нагрузки составляло 29 кН (рис. 4), и дальнейшего увеличения нагрузки не происходило, при этом величина крутящего момента продолжала увеличиваться.

Рис. 4. Диаграмма нагружения трубчатого образца с клеевыми накладками

Рис. 5. Диаграмма зависимости приложенного момента от угла закручивания трубчатого образца в испытании на кручение

В то же время использование клеевых накладок позволяет проводить испытание трубчатых образцов на кручение вплоть до полного разрушения. На рис. 5 представлена диаграмма нагружения образца при кручении с постоянной скоростью увеличения угла закручивания по встроенному датчику испытательной машины $\dot{\varphi} = 5$ град/мин.

Вторым вариантом подготовки образцов выбран метод выкладки стеклопластиком на основе препрега ВПС-48 и связующего ВСЭ 1212 (рис. 6). После выкладки образец отверждался в течение суток. Внутренняя полость образца в зоне захватов заполнялась клеевым составом ВПЗ. Данный способ подготовки образца позволил добиться увеличения максимальной достигаемой осевой нагрузки в среднем до 44 кН, после чего также происходило проскальзывание образца без дальнейшего увеличения нагрузки.

Рис. 6. Образец с накладками из стеклопластика на основе препрега ВПС-48 и связующего ВСЭ 1212

Следующим способом подготовки образцов являлось использование тонкостенных металлических гильз, изготовленных из алюминиевой трубы АД-31 с наружным диаметром 30 мм и толщиной стенки 2 мм, в которые клеивался образец (рис. 7), для чего использовался клей К-9 на основе эпоксидного связующего. Образец запрессовывался в гильзы с клеевым составом и отверждался в течение суток при температуре 80 °С. Во внутреннюю полость образца с натягом вставлялись сплошные металлические стержни на глубину, соответствующую длине цанги.

Рис. 7. Трубчатый композиционный образец с алюминиевыми гильзами

Указанный способ подготовки путем вклеивания образца в алюминиевые гильзы позволил провести испытание на пропорциональное растяжение с кручением до полного разрушения трубчатого углепластикового образца. На рис. 8 приведена зависимость изменения осевой нагрузки от перемещения, а на рис. 9 – изменение крутящего момента от угла закручивания по встроенным датчикам испытательной машины. Образец разрушился при значениях растягивающих усилий $P = 102$ кН и величине крутящего момента $M = 422$ Н·м.

Рис. 8. Зависимость изменения осевой нагрузки от перемещений при пропорциональном растяжении с кручением трубчатого образца

Рис. 9. Зависимость изменения крутящего момента от угла закручивания при пропорциональном растяжении с кручением трубчатого образца

С целью изучения закономерностей деформирования, анализа процессов инициирования и распространения дефектных структур, формирования условий разрушения трубчатых образцов композитного материала в условиях сложного напряженного состояния использована бесконтактная трехмерная цифровая оптическая система Vic-3D. Использование оптической видеосистемы дает возможность регистрации полей перемещений и деформаций на поверхности трубчатого образца в области концентратора и позволяет проводить анализ эволюции развития трещин в процессе испытаний при совместном растяжении с кручением.

На поверхность образцов предварительно наносилось мелкодисперсное контрастное покрытие (совокупность черно-белых точек) с помощью матовой акриловой краски. Постобработка осуществлялась с применением критерия нормированной суммы квадратов разностей

(NSSD – Normalized Sum of Squared Difference). В процессе корреляционной обработки устанавливались следующие параметры: размер подмножества (Subset) – 29×29 пикселей, значение шага (Step) – 5 пикселей.

На рис. 10, *а* приведена диаграмма нагрузка – время для трубчатого образца с концентратором, полученная в испытании с использованием приклеенных алюминиевых гильз. Для точек 1–6 (см. рис. 10, *а*) представлены фотографии поверхности, которые иллюстрируют процесс деформирования и разрушения трубчатого образца в испытании. Наблюдается растрескивание материала в области концентратора, с увеличением угла закручивания наблюдается смятие поверхности и потеря устойчивости образца ($P = 100$ кН, $M = 415$ Н·м) с последующим макроразрушением. На рис. 11, *а* приведена фотография разрушенного образца.

Рис. 10. Временная зависимость осевой нагрузки (*а*) и соответствующие фотографии поверхности трубчатого образца с концентратором (*б*)

Совместное испытание с использованием видеосистемы дает возможность проведения анализа неоднородных полей перемещений на поверхности трубчатого образца. Поля перемещений представлены в цилиндрической системе координат (рис. 11, *б*). Переход от декартовой системы координат выполнен в программном обеспечении видеосистемы с использованием закона преобразования координат [22]. В качестве примера на рис. 12 приведены поля перемещений dR , $d\theta$ и dz при нагрузке $P = 102$ кН.

Рис. 11. Фотография разрушенного образца (а) и цилиндрическая система координат, используемая для построения полей перемещений (б)

Рис. 12. Поля перемещений в цилиндрической системе координат на поверхности композитного трубчатого образца с концентратором

Приведенные поля перемещений в цилиндрической системе координат демонстрируют максимальные перемещения в области концентратора, где в результате формируется трещина, которая, в свою очередь, приводит к полному разрушению образца. Симметричность перемещений сохраняется вплоть до разрушения.

Заключение

В результате выполнения работы рассмотрены методические вопросы экспериментального изучения процессов деформирования и разрушения композиционного углепластика в условиях плоского напряженного состояния при совместном растяжении с кручением трубчатых образцов с концентраторами при комплексном использовании двухосевой сервогидравлической испытательной машины Instron 8852 и видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций Vic-3D. Предложены оптимальные методы подготовки захватных частей и закрепления образцов в захватах машины, которые позволяют проводить испытания трубчатых образцов вплоть до полного разрушения. Методика проведения испытаний при совместном использовании испытательной машины и видеосистемы дает возможность регистрации полей перемещений и деформаций непосредственно на поверхности рабочей части образцов в области концен-

тратора в процессе деформирования и разрушения. Получены картины эволюции разрушения образцов с концентратором и распределения полей перемещений в цилиндрической системе координат при пропорциональном растяжении с кручением. Данная методика будет использована при дальнейшем изучении закономерностей накопления повреждений и разрушения композиционных материалов, сопровождающих процессы распространения трещин в условиях сложного напряженного состояния при квазистатическом и циклическом растяжении с кручением трубчатых образцов.

Работа выполнена в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-41-590360, 17-48-590158, 17-48-590096).

Библиографический список

1. Vassilopoulos A.P. Fatigue life prediction of composites and composite structures. – 2010. – 576 p.
2. Spearing S.M., Beaumont P.W.R., Ashby M.F. Fatigue damage mechanics of composite materials. II. A damage growth model // Composites Science and Technology. – 1992. – Vol. 44. – P. 169–177.
3. Carraro P.A., Maragoni L., Quaresimin M. Prediction of the crack density evolution in multidirectional laminates under fatigue loading // Composites Science and Technology. – 2017. – Vol. 145. – P. 24–39. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.03.013
4. Sheafi E.M., Tanner K.E. Effects of test sample shape and surface production method on the fatigue behaviour of PMMA bone cement // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2014. – Vol. 29(1). – P. 91–102.
5. Maragoni L., Carraro P.A., Quaresimin M. Effect of voids on the crack formation in a [45/-45/0]_s laminate under cyclic axial tension // Composites: Part A. – 2016. – P. 493–500. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.02.018>
6. Quaresimin M., Susmel L., Talreja R. Fatigue behavior and live assessment of composite laminates under multiaxial loadings // International Journal of Fatigue. – 2010. – Vol. 32. – P. 2–16.
7. Жигун В.И., Плуме Э.З. Оценка несущей способности углерод-углеродных композитов при плоском напряженном состоянии // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 25–40.
8. Torsion fatigue behavior of unidirectional carbon/epoxy and glass/epoxy composites / T. Ogasawara, K. Ontab, S. Ogihara, T. Yokozeki, E. Harad // Composite Structures. – 2009. – Vol. 90, iss. 4. – P. 482–489.
9. Димитриенко Ю.И., Юрин Ю.В., Европин С.В. Прогнозирование долговечности и надежности элементов конструкций высокого давления. Ч. 1. Численное моделирование накопления повреждений // Известия вузов. Машиностроение. – 2013. – № 11. – С. 3–11.
10. Методика и экспериментальные исследования материалов при трехосном растяжении / С.В. Цветков, Г.Г. Кулиш, А.А. Смердов, А.Н. Барышев, С.В. Тащилов, И.В. Магитский, К.А. Пономарев // Вестник Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. – 2016. – № 5(110). – С. 76–88.
11. Махутов Н.А., Думанский А.М., Стрекалов В.Б. Расчетно-экспериментальное определение сопротивления усталости углепластиков и элементов конструкций из них // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 6. – С. 41–46.
12. Degrieck J., Van Paeppegem W. Fatigue damage modeling of fiber-reinforced composite materials: Review // Applied Mechanics Reviews. – 2001. – Vol. 5(4). – P. 279–300.
13. Житникова К.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Численное моделирование динамического нагружения композиционных материалов на основе органических волокон // Математическое моделирование в естественных науках. – 2015. – Т. 1. – С. 126–130.
14. Экспериментальное исследование жесткостных и прочностных характеристик углепластика / А.А. Смердов, О.А. Смердова, Л.П. Таирова, С.В. Цветков // Конструкции из композиционных материалов. – 2009. – № 3. – С. 68–82.
15. Шлянников В.Н., Иштыряков М.С., Яруллин Р.Р. Характеристики деформирования сплава Д16Т при совместном нагружении растяжением, сжатием, кручением и внутренним давлением // Труды Академэнерго. – 2014. – № 3. – С. 78–90.

16. Grédiac M. The use of full-field measurement methods in composite material characterization: interest and limitations // *Composites: Part A*. – 2004. – Vol. 35. – P. 751–761. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.01.019
17. Measuring how overlap affects the strength of composite tubes in bending-torsion / eds. S. Rohde, P. Ifju, W. Ralph, R. Singh, G. Tandon, P. Thakre, P. Zavattieri, Y. Zhu // *Mechanics of Composite and Multifunctional Materials. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. – 2017. – Vol. 7. – P. 115–121. DOI: 10.1007/978-3-319-41766-0_13
18. Experimental testing of bend-twist coupled composite shafts / S.E. Rohde, P.G. Ifju, B.V. Sankar, D.A. Jenkins // *Experimental Mechanics*. – 2015. – Vol. 55, № 9. – P. 1613–1625. DOI: 10.1007/s11340-015-0050-0
19. Экспериментальные исследования по определению деформаций образцов из полимерного композиционного материала с применением волоконно-оптических датчиков / Н.А. Кошелева, Г.С. Шипунов, А.А. Воронков, Н.П. Меркушева, А.А. Тихонова // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2017. – № 50. – С. 26–35.
20. Экспериментальное исследование влияния дефектов на прочность композитных панелей методами корреляции цифровых изображений и инфракрасной термографии / Д.С. Лобанов, В.Э. Вильдеман, Е.М. Спаскова, А.И. Чихачев // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2015. – № 4. – С. 159–170.
21. Wildemann V.E., Spaskova E.V., Shiloval A.I. Research of the damage and failure processes of composite materials based on acoustic emission monitoring and method of digital image correlation // *Solid State Phenomena*. – 2016. – Vol. 243. – P. 163–170.
22. Ильюшин А.А., Ленский В.С. Соппротивление материалов. – М.: Физматгиз, 1959. – 373 с.

References

1. Vassilopoulos A.P. Fatigue life prediction of composites and composite structures. 2010.
2. Spearing S.M., Beaumont P.W.R., Ashby M.F. Fatigue damage mechanics of composite materials. II. A damage growth model. *Composites Science and Technology*, 1992, vol. 44, pp. 169-177.
3. Carraro P.A., Maragoni L., Quaresimin M. Prediction of the crack density evolution in multidirectional laminates under fatigue loading. *Composites Science and Technology*. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.03.013
4. Sheafi E.M., Tanner K.E. Effects of test sample shape and surface production method on the fatigue behaviour of PMMA bone cement. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 29(1), pp. 91-102.
5. Maragoni L., Carraro P.A., Quaresimin M. Effect of voids on the crack formation in a [45/-45/0]s laminate under cyclic axial tension. *Composites: Part A*. 2016, pp. 493-500. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.02.018>
6. Quaresimin M., Susmel L., Talreja R. Fatigue behavior and live assessment of composite laminates under multiaxial loadings. *International Journal of Fatigue*, 2010, vol. 32, pp. 2-16.
7. Zhigun V.I., Plume E.Z. Otsenka nesushchey sposobnosti uglerod-uglerodnykh kompozitov pri ploskom napryazhennom sostoyanii [Estimation of the bearing capacity of carbon-carbon composites in the case of a plane stress state]. *Mehanika kompozitsionnykh materialov i konstrukcij*, 2017, no. 1, vol. 23, pp. 25-40.
8. Ogasawara T., Ontab K., Ogihara S., Yokozeki T., Harad E. Torsion fatigue behavior of unidirectional carbon/epoxy and glass/epoxy composites. *Composite Structures*, 2009, vol. 90, iss. 4, pp. 482-489.
9. Dimitrienko Yu.I., Yurin Yu.V., Evropin S.V. Prognozirovaniye dolgovechnosti i nadezhnosti elementov konstruktsiy vysokogo davleniya. Chast 1. Chislennoe modelirovaniye nakopleniya povrezhdeniy [Forecasting the longevity and reliability of elements of high-pressure structures. Part 1. Numerical simulation of damage accumulation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, 2013, no. 11, pp. 3-11.
10. Tsvetkov S.V., Kulish G.G., Smerdov A.A., Baryshev A.N., Tashchilov S.V., Magitskiy I.V., Ponomarev K.A. Metodika i jeksperimentalnye issledovaniya materialov pri trehosnom rastjazhenii [Technique and experimental studies of materials with triaxial stretching]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.Ie. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*, 2016, no. 5(110), pp. 76-88.
11. Makhutov N.A., Dumanskiy A.M., Strekalov V.B. Raschetno jeksperimentalnoye opredeleniye soprotivleniya ustalosti ugleplastikov i jelementov konstrukcij iz nih [Calculation of the experimental determination of fatigue resistance of carbon plastics and structural elements made of them]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov*, 2006, no. 6. 2006, vol. 72, pp. 41-46.

12. Degrieck J., Van Paepegem W. Fatigue damage modeling of fiber-reinforced composite materials: Review. *Applied Mechanics Reviews*, 2001, vol. 5(4), pp. 279-300.
13. Zhitnikova K.A., Bayandin Yu.V., Naymark O.B. Chislennoe modelirovanie dinamicheskogo nagruzheniya kompozitsionnykh materialov na osnove organicheskikh volokon [Numerical modeling of the dynamic loading of composite materials based on organic fibers]. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukakh*, 2015, vol. 1, pp. 126-130.
14. Smerdov A.A., Smerdova O.A., Tairova L.P., Tsvetkov S.V. Eksperimental'noe issledovanie zhestkostnykh i prochnostnykh kharakteristik ugleplastika [Experimental study of the stiffness and strength characteristics of CFRP]. *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov*, 2009, no. 3, pp. 68-82.
15. Shlyannikov V.N., Ishtyryakov M.S., Yarullin R.R. Harakteristiki deformirovaniya splava d16t pri sovmestnom nagruzhenii rastjazheniem, szhatiem, krucheniem i vnutrennim davleniem [Characteristics of deformation of alloy d16t under joint loading by stretching, compression, torsion and internal pressure]. *Trudy akademenergo*, 2014, no. 3, pp. 78-90.
16. Grédiac M. The use of full-field measurement methods in composite material characterization: interest and limitations. *Composites: Part A*, 2004, vol. 35, pp. 751-761. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.01.019
17. Measuring how overlap affects the strength of composite tubes in bending-torsion. Rohde S., Ifju P., Ralph W., Singh R., Tandon G., Thakre P., Zavattieri P., Zhu Y. (eds). *Mechanics of Composite and Multifunctional Materials. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2017, vol. 7, pp. 115-121. DOI: 10.1007/978-3-319-41766-0_13
18. Rohde S.E., Ifju P.G., Sankar B.V., Jenkins D.A. Experimental testing of bend-twist coupled composite shafts. *Experimental Mechanics*, 2015, vol. 55, no. 9, pp. 1613-1625. DOI: 10.1007/s11340-015-0050-0
19. Kosheleva N.A., Shipunov G.S., Voronkov A.A., Merkusheva N.P., Tikhonova A.A. Eksperimentalnye issledovaniya po opredeleniyu deformatsiy obraztsov iz polimernogo kompozitsionnogo materiala s primeneniem volokonno-opticheskikh datchikov [Determination of the stress-strain state fields of samples from a polymeric composite material using fiber optic sensors]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2017, no. 50, pp. 26-35.
20. Lobanov D.S., Vil'deman V.E., Spaskova E.M., Chikhachev A.I. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya defektov na prochnost kompozitnykh paneley metodami korrelyatsii tsifrovyykh izobrazheniy i infrakrasnoy termografii [Experimental study of the influence of defects on the strength of composite panels by methods of correlation of digital images and infrared thermography]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin. Mechanics*, 2015, no. 4, pp. 159-170.
21. Wildemann V.E., Spaskova E.V., Shilova A.I. Research of the damage and failure processes of composite materials based on acoustic emission monitoring and method of digital image correlation. *Solid State Phenomena*, 2016, vol. 243, pp. 163-170.
22. Ilyushin A.A., Lenskiy V.S. Soprotivlenie materialov [Resistance of materials]. Moscow: Fizmatgiz, 1959, 373 p.

Об авторах

Староверов Олег Александрович (Пермь, Россия) – научный сотрудник Центра экспериментальной механики ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: cem_staroverov@mail.ru).

Струнгарь Елена Михайловна (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник Центра экспериментальной механики ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: cem.spaskova@mail.ru).

Третьяков Михаил Павлович (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Центра экспериментальной механики ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: cem_tretyakov@mail.ru).

Третьякова Татьяна Викторовна (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Центра экспериментальной механики ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: cem.tretyakova@gmail.com).

About the authors

Oleg A. Staroverov (Perm, Russian Federation) – Researcher, Center of Experimental Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: cem_staroverov@mail.ru).

Elena M. Strungar (Perm, Russian Federation) – Junior Researcher, Center of Experimental Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: cem.spaskova@mail.ru).

Mikhail P. Tretyakov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Center of Experimental Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: cem_tretyakov@mail.ru).

Tatyana V. Tretyakova (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Center of Experimental Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: cem.tretyakova@gmail.com).

Получено 15.11.2017