

Третьякова Т.В., Душко А.Н., Струнгарь Е.М., Зубова Е.М., Лобанов Д.С. Комплексный анализ механического поведения и процессов разрушения образцов пространственно-армированного углепластика в испытаниях на растяжение // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 173-183. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.15

Tretyakova T.V., Dushko A.N., Strungar E.M., Zubova E.M., Lobanov D.S. Comprehensive analysis of mechanical behavior and fracture processes of specimens of three-dimensional reinforced carbon fiber in tensile tests. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 173-183. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.15



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2019

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.15

УДК 620.1

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ И ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-АРМИРОВАННОГО УГЛЕПЛАСТИКА В ИСПЫТАНИЯХ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Т.В. Третьякова¹, А.Н. Душко², Е.М. Струнгарь¹, Е.М. Зубова¹, Д.С. Лобанов¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²ПАО «ОДК-Сатурн», Рыбинск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 11 февраля 2019 г.
Принята: 29 марта 2019 г.
Опубликована: 30 марта 2019 г.

Ключевые слова:

пространственно-армированный композит, механическое поведение, разрушение, прочность, инфракрасная термография, акустическая эмиссия, корреляция цифровых изображений.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена развитию методологии проведения экспериментальных исследований закономерностей неупругого поведения и разрушения пространственно-армированного композиционного материала с учетом влияния схем переплетения на основе совместного использования оптических методов анализа полей деформаций и температуры, а также метода регистрации сигналов акустической эмиссии.

Реализована серия механических испытаний на одноосное растяжение 6 групп образцов-полосок, преформы которых изготовлены с помощью технологии 3D-ткачества шестью различными способами переплетения. Отмечено, что образцы углепластика с ортогональной и ортогонально-комбинированной схемой переплетения отличаются высокими значениями предельной нагрузки по сравнению с образцами с межслойным армированием и слоистыми образцами. Проиллюстрирован подбор оптимальных параметров (величины подобласти и шага) корреляционной обработки цифровых изображений при исследовании образцов композиционного материала с учетом структурных особенностей материала. Проведен анализ изменения кумулятивной энергии сигналов акустической эмиссии (АЭ), получаемой путем суммирования значений энергетического параметра и отражающей интенсивность накопления дефектов в материале в процессе нагружения. Обнаружено, что образцы с ортогональной, ортогонально-комбинированной схемой переплетения, а также с попарно межслойным армированием характеризуются низкой скоростью накопления повреждений в материале, процесс инициирования и распространения дефектов протекает равномерно. Образцы с попарно межслойным комбинированным армированием, со сквозным межслойным армированием и слоистые образцы отличаются интенсивностью формирования трещин в материале в процессе нагружения.

Получены результаты качественного и количественного сравнения некоторых параметров (предельная нагрузка, предельное удлинение образцов, интенсивность локального разогрева материала в момент макроразрушения, максимальная величина кумулятивной энергии, достигнутая в момент разрушения, число зарегистрированных выбросов сигнала АЭ), полученных для групп образцов с различной схемой переплетения. Показано, что проведение многопараметрического анализа при экспериментальном изучении позволяет осуществлять подбор оптимальных свойств композиционного материала при его разработке в соответствии с требуемыми условиями эксплуатации.

© ПНИПУ

© Третьякова Татьяна Викторовна – к.ф.-м.н., с.н.с., e-mail: cem.tretyakova@gmail.com, [ID: 0000-0002-6072-3310](https://orcid.org/0000-0002-6072-3310).

Душко Андрей Николаевич – начальник инженерного центра, e-mail: andrey.dushko@gmail.com

Струнгарь Елена Михайловна – аспирантка, e-mail: cem.spaskova@mail.ru, [ID: 0000-0002-2246-8638](https://orcid.org/0000-0002-2246-8638)

Зубова Екатерина Михайловна – аспирантка, e-mail: cem.zubova@mail.ru, [ID: 0000-0001-8829-3546](https://orcid.org/0000-0001-8829-3546).

Лобанов Дмитрий Сергеевич – к.т.н., с.н.с., доц., e-mail: cem.lobanov@gmail.com, [ID: 0000-0003-1948-436X](https://orcid.org/0000-0003-1948-436X)

Tatyana V. Tretyakova – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher,

e-mail: cem.tretyakova@gmail.com, [ID: 0000-0002-6072-3310](https://orcid.org/0000-0002-6072-3310)

Andrey N. Dushko – Chief of Engineering Center, e-mail: andrey.dushko@gmail.com

Elena M. Strungar – PhD Student, e-mail: cem.spaskova@mail.ru, [ID: 0000-0002-2246-8638](https://orcid.org/0000-0002-2246-8638)

Ekaterina M. Zubova – PhD Student, e-mail: cem.zubova@mail.ru, [ID: 0000-0001-8829-3546](https://orcid.org/0000-0001-8829-3546)

Dmitry S. Lobanov – CSc in Technical Science, Senior Researcher, e-mail: cem.lobanov@gmail.com,

[ID: 0000-0003-1948-436X](https://orcid.org/0000-0003-1948-436X)



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)

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF MECHANICAL BEHAVIOR AND FRACTURE PROCESSES OF SPECIMENS OF THREE-DIMENSIONAL REINFORCED CARBON FIBER IN TENSILE TESTS

T.V. Tretyakova¹, A.N. Dushko², E.M. Strungar¹, E.M. Zubova¹, D.S. Lobanov¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²UEC-Saturn, Rybinsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 11 February 2019

Accepted: 29 March 2019

Published: 30 March 2019

Keywords:

three-dimensional reinforced composite, mechanical behavior, failure, strength, infrared thermography, acoustic emission, digital image correlation.

ABSTRACT

The aim of the work is to develop a procedure of an experimental study related to the inelastic behavior and failure process of a 3D reinforced composite material taking into account the influence of interweaving schemes based on a combined use of optical methods analyzing strain and temperature fields, as well as a method for recording acoustic emission signals.

Uniaxial tension tests were conducted for six groups of specimens which preforms were made with the 3D weaving technology in six different ways of weaving. It is noted that the CFRP-samples with the orthogonal and orthogonal conjoint weave scheme are characterized by high values of maximum load compared to the samples with the interlayer reinforcement and layered samples. The choice of the optimal parameters (subset and step) of the correlation processing of digital images in the study of the PEP samples is illustrated taking into account the structural features of the material. We carried out the analysis of changes in the cumulative energy of AE-signals obtained by summing the values of the energy parameter and reflecting the intensity of the accumulation of defects in the material during loading. It was found that the samples with the orthogonal, orthogonal-combined weave scheme, as well as with pairwise interlayer reinforcement, are characterized by a low damage accumulation rate in the material, the process of defect initiation and propagation proceed uniformly. The samples with the pairwise interlayer combined reinforcement with through interlayer reinforcement and layered samples are characterized by the intensity of the crack formation in the material during loading.

The results of the analysis and quantitative comparison of parameters (maximum load, ultimate elongation of samples, intensity of local heating of the material at the time of macrodestruction, the maximum value of the cumulative energy achieved at the time of failure, the number of recorded emissions of the AE signal) were obtained for groups of the samples with different weave patterns. It is shown that the multiparameter analysis of the experimental data allows selection of a composite optimal properties during its development in accordance with the required operating conditions.

© PNRPU

Введение

В аэрокосмической промышленности, машиностроении, авиа- и судостроении, металлургии и энергетике, где материал работает в сложных условиях воздействия, при наличии вибраций и высоких температур, используются пространственно-армированные композиционные материалы [1–3]. В научной литературе активно поднимаются вопросы, связанные с технологическими аспектами изготовления трехмерных тканей с заданными свойствами [2–4] и их применением. Формирование научно-технического задела для проектирования деталей и элементов конструкций из 3D-композитов [5–7] требует проведения комплексных экспериментальных исследований влияния типов переплетения на механические и прочностные характеристики при статических [8–13], циклических [14, 15] и динамических нагружениях [16]. Активно исследуется термомеханическое поведение в условиях пониженных и повышенных температур [12, 17], при термовлажностном старении [18].

В ходе нагружения деформирование композита сопровождается процессами накопления повреждений

(растрескивание матрицы, расслоение, разрыв волокон и т.д.), развитием дефектных структур и формированием разрушения [19]. Неоднородность процессов неупругого деформирования и особенность структуры материала обуславливают необходимость применения различных оптических методов экспериментальной механики с целью регистрации и идентификации закономерностей механического поведения и механизмов разрушения 3D-композитов.

В научной литературе неоднократно отмечалась высокая эффективность использования оптических методов экспериментальной механики совместно с методами неразрушающего контроля для решения задач механики композиционных материалов и конструкций [15, 20–25]. В частности, широкое применение нашли методы корреляции цифровых изображений [13, 20] и инфракрасной термографии [15, 25], а также метод акустической эмиссии [26–29]. Комплексное применение средств регистрации обеспечивает получение широкого спектра опытных данных в режиме *in situ* [19].

Таким образом, актуальным направлением является развитие методологии проведения экспериментальных

исследований закономерностей неупругого поведения и разрушения пространственно-армированных композиционных материалов с учетом влияния схем переплетения волокон на основе комплексного использования средств регистрации эволюции неоднородных полей деформаций и температур, а также сигналов акустической эмиссии. Этому и посвящена данная работа.

1. Материал и методы исследования

В качестве материала исследования выбран пространственно-армированный углепластик с различными схемами армирования (табл. 1). Проведена серия механических испытаний на одноосное растяжение 6 групп образцов-полосок, преформы которых изготовлены с помощью технологии 3D-ткачества шестью различными способами переплетения ($A-F$), а также из слоистых преформ (G) и слоистых преформ, усиленных в поперечном направлении методом прошивки (H). Номинальная ширина и толщина рабочей части составляли 25 и 2,8 мм соответственно. Нагружение реализовано на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5882 (± 100 кН) по стандарту ASTM D 3039 со скоростью подвижного захвата 2 мм/мин. Нагрузка регистрировалась динамометрическим датчиком мощностью до 100 кН с точностью измерения нагрузки 0,5 % от измеряемой величины.

Таблица 1

Группы композитных образцов-полосок с различными схемами переплетения

Table 1

Groups of composite specimens with different weaving scheme

| Шифр образца | Схемы переплетения ПКМ-образцов |
|--------------|---|
| <i>A</i> | Ортогональная |
| <i>B</i> | Ортогональная комбинированная |
| <i>C</i> | С попарно межслойным армированием |
| <i>D</i> | С попарно межслойным армированием и продольным слоем |
| <i>E</i> | С попарно межслойным комбинированным армированием |
| <i>F</i> | Со сквозным межслойным армированием |
| <i>G</i> | Слоистые образцы |
| <i>H</i> | Слоистые образцы, усиленные в поперечном направлении методом прошивки Tufting |

Для изучения акустико-эмиссионного отклика исследуемых образцов применялась система для регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) AMSY-6. Данная система является многоканальной и состоит из 8 параллельных полностью синхронизированных измерительных каналов. Аналоговая измерительная цепь каждого канала включает пьезоэлектрический датчик АЭ, предусилитель, предпроцессор акустического сигнала, расположенный в корпусе системы, а также специализированное программное обеспечение Vallen Systeme.

В работе использовано 2 датчика AE105A с частотным диапазоном 450–1150 кГц, усилители АЭ-сигналов АЕР4 с коэффициентом усиления 34 дБ. Для регистрации сигналов АЭ выбран непрерывный режим с оценкой истинной энергии и записью абсолютного времени записи. Методика проведения испытаний включала подготовительный этап, на котором осуществлялось закрепление датчиков АЭ на поверхности образцов в рабочей части с помощью высоковакуумной силиконовой смазки. Далее производилась калибровка АЭ-датчиков с использованием источника Су-Нильсена [3] и функции автоматической калибровки, по результатам которой устанавливались требуемые параметры (частота дискретизации, величина порога, параметры цифровых фильтров, время ограничения длительности, времени перевооружения) в программном обеспечении для регистрации сигналов АЭ. Необходимо отметить, что АЭ-датчики размещались на обратной стороне образца таким образом, чтобы их крепление не попадало в поле зрения оптических систем, съемка которыми осуществляется с лицевой стороны.

Регистрация эволюции неоднородных полей деформаций реализована с использованием бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы анализа полей перемещений и деформаций Vic-3D (Correlated Solutions) [30, 31]. В данной работе использован комплект цифровых черно-белых камер (Q-400) с разрешением 4.0 Мп и частотой съемки 15 Гц при полном разрешении кадра. В состав видеосистемы помимо камер входит система подсветки образца, набор калибровочных таблиц, блок синхронизации с контроллером испытательной системы NI USB-6251 (National Instruments). Программное обеспечение Vic-3D основано на методе корреляции цифровых изображений [19, 21, 30, 32], что требует нанесения контрастного мелкодисперсного покрытия на поверхность образца перед проведением испытания. Подготовка поверхности осуществляется путем нанесения белой основы и совокупности черных точек с помощью аэрозольной матовой акриловой краски.

При вычислении неоднородных полей продольных ε_{yy} , поперечных ε_{xx} и сдвиговых деформаций ε_{xy} использован тензор конечных деформаций в представлении Лагранжа: $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j})$. Ось Oy направлена вдоль образца (вдоль оси растяжения), ось Ox – перпендикулярно оси нагружения в плоскости образца. При построении диаграмм нагружения использован дополнительный модуль программного обеспечения видеосистемы «виртуальный экстензометр», принцип действия которого основан на отслеживании взаимного смещения между двумя точками поверхности образцов в соответствии с прикладываемым усилием [9].

Регистрация развития температурных полей и их анализ осуществлялись с помощью инфракрасной тепловизионной системы FLIR SC7700M, оснащенной

КРТ-детектором (кадмий-ртуть-теллур), с частотой съемки 25 Гц. Разрешение камеры составляет 640×512 пикселей, чувствительность менее 0,025 °С.

Использование нескольких систем регистрации требует синхронизации многопараметрического сбора опытных данных с процессом нагружения. К контроллеру испытательной системы подключался 16-битный высокоскоростной АЦП-блок NI USB-6251, на который

выводятся сигналы по нагрузке и перемещению траверсы (по встроенному датчику). К АЦП-блоку подключается видеосистема Vic-3D и тепловизор Flir SC7700. В данной работе синхронизация системы регистрации АЭ AMSY-6 и испытательной машины реализована с помощью блока регистрации и обработки сигналов АЭ. Схематическое расположение элементов оборудования и средств регистрации представлено на рис. 1.

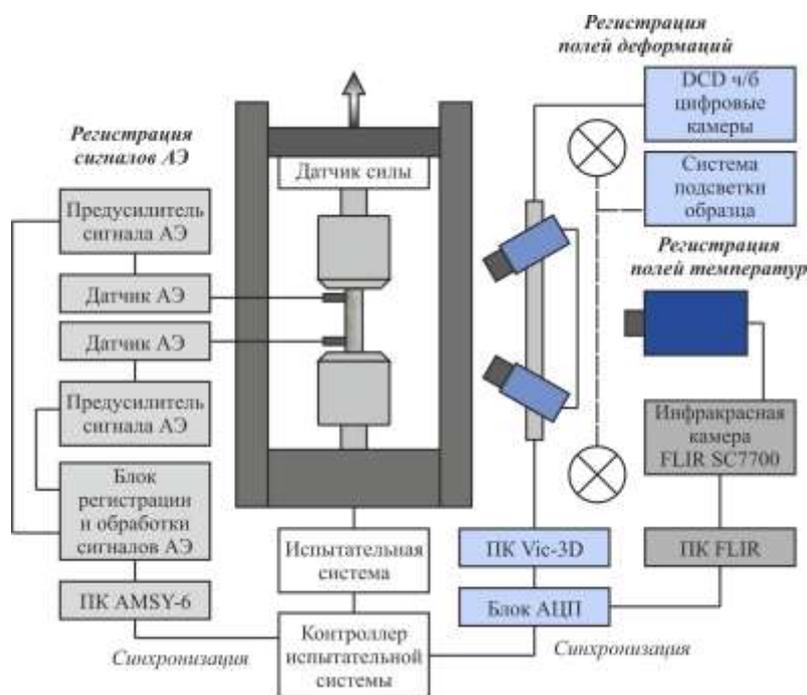


Рис. 1. Схематическое расположение элементов испытательного и измерительного оборудования при многопараметрической регистрации опытных данных

Fig. 1. Schema of the elements of testing and measuring equipment with multiparameter registration of experimental data

2. Особенности обработки методом корреляции цифровых изображений применительно к композиционным материалам

При корреляционной обработке цифровых фотографий вычисления векторов смещений производятся не в каждой отдельной точке изображения (в пикселе), а путем дискретизации области исследования на небольшие локальные подобласти или подмножества размером $X \times X$ пикселей (subset) [21, 30, 32]. Размер подмножества оказывает существенное влияние на точность корреляционного анализа, на степень детализации полей перемещений и деформаций по поверхности исследуемого объекта, а также на размер краевой зоны, возникающей на краю или вблизи концентраторов напряжений (отверстий, включений, трещин). Величина шага (step) задает расстояние в пикселях между точками (центральными пикселями подмножества), которые анализируются в процессе математической обработки.

Выбор величины подобласти (X) и шага (ΔX) осуществляется в соответствии с условиями произведенной съемки, результатами калибровки стереосистемы, а также в зависимости от геометрических параметров

объекта исследования и структурных особенностей материала образца. В программном обеспечении видеосистемы Vic-3D при установлении соответствия изображений для каждого подмножества вычисляется статистическая доверительная область – доверительный интервал соответствия (σ) в данной точке изображения (в пикселях) [21, 30]. В научной литературе отмечается, что размер подобласти является допустимым, если среднее значение доверительного интервала не превышает $\sigma \leq 0,01$ [5].

С целью подбора оптимальных параметров корреляционной обработки применительно к композиционным материалам, отличающимся значительными градиентами полей деформаций и неоднородностью структуры на поверхности, проведена серия вычислений полей перемещений и деформаций для одного кадра при значениях подобласти в интервале $X = 9...89$ пикселей и при фиксированном значении шага $\Delta X = 5$ для образца с «Е»-типом переплетения (с попарно межслойным комбинированным армированием). Результаты представлены в табл. 2, где приведены максимальные (σ_{\max}), средние (σ_{mean}) и минимальные (σ_{\min}) значения доверительного интервала, а N – количество точек в области исследования.

Из полученных данных следует, что подобласть размером 49×49 пикселей является оптимальной, для нее $\sigma_{\text{mean}} = 0,0065$, $\sigma_{\text{max}} = 0,0109$ и $\sigma_{\text{min}} = 0,0028$. Выбранный размер подобласти обладает достаточной уникальностью распределения пикселей для возможности осуществления однозначной идентификации локальных областей по изображению. При меньшем размере параметра X отмечаются недопустимые значения доверительного интервала соответствия.

Таблица 2

Результаты корреляционной обработки изображения при различных значениях подобласти и фиксированном значении шага $\Delta X = 5$

Table 2

Results of the digital image correlation with different size of the subset and fixed step $\Delta X = 5$

| X | N | σ_{mean} | σ_{max} | σ_{min} |
|-----------|--------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 9 | 11463 | 0,0209 | 0,0785 | 0,0049 |
| 15 | 12187 | 0,0160 | 0,0789 | 0,0037 |
| 19 | 13995 | 0,0130 | 0,0760 | 0,0034 |
| 29 | 13403 | 0,0097 | 0,0360 | 0,0028 |
| 39 | 12791 | 0,0078 | 0,0208 | 0,0027 |
| 49 | 12187 | 0,0065 | 0,0109 | 0,0028 |
| 59 | 11591 | 0,0056 | 0,0099 | 0,0026 |
| 69 | 11003 | 0,0049 | 0,0078 | 0,0026 |
| 79 | 10423 | 0,0043 | 0,0068 | 0,0025 |
| 89 | 9851 | 0,0039 | 0,0058 | 0,0024 |

Далее необходимо подобрать величину шага ΔX , при помощи которого варьируется степень детализации полей перемещений и деформаций. С этой целью проведена корреляционная обработка одного изображения

для образца с армированием типа «Е» при значениях шага в интервале $\Delta X = 1 \dots 15$ пикселей и при фиксированном значении подобласти 49×49 пикселей (табл. 3).

Таблица 3

Результаты корреляционной обработки изображения при различных значениях шага и фиксированном значении подобласти $X = 49$

Table 3

Results of the digital image correlation with different size of step and fixed subset $X = 49$

| ΔX | N | σ_{mean} | σ_{max} | σ_{min} |
|------------|--------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 304586 | 0,0065 | 0,0144 | 0,0028 |
| 3 | 33828 | 0,0065 | 0,0143 | 0,0028 |
| 5 | 12187 | 0,0065 | 0,0139 | 0,0028 |
| 7 | 6215 | 0,0065 | 0,0135 | 0,0028 |
| 9 | 3741 | 0,0065 | 0,0129 | 0,0028 |
| 11 | 2503 | 0,0065 | 0,0124 | 0,0028 |
| 13 | 1797 | 0,0065 | 0,0119 | 0,0028 |
| 15 | 1350 | 0,0065 | 0,0119 | 0,0030 |

Чем меньше значение шага (ΔX), тем более детализированным получается поле перемещений и деформаций за счет увеличения количества расчетных точек (N). В то же время большое число N приводит к существенному возрастанию времени корреляционного анализа в программном обеспечении видеосистемы. По мере увеличения параметра ΔX происходит сглаживание неоднородностей, наблюдается осреднение максимальных и минимальных величин, регистрируемых на поверхности образца, размытие структурных особенностей композиционного материала и увеличение краевой области (рис. 2).

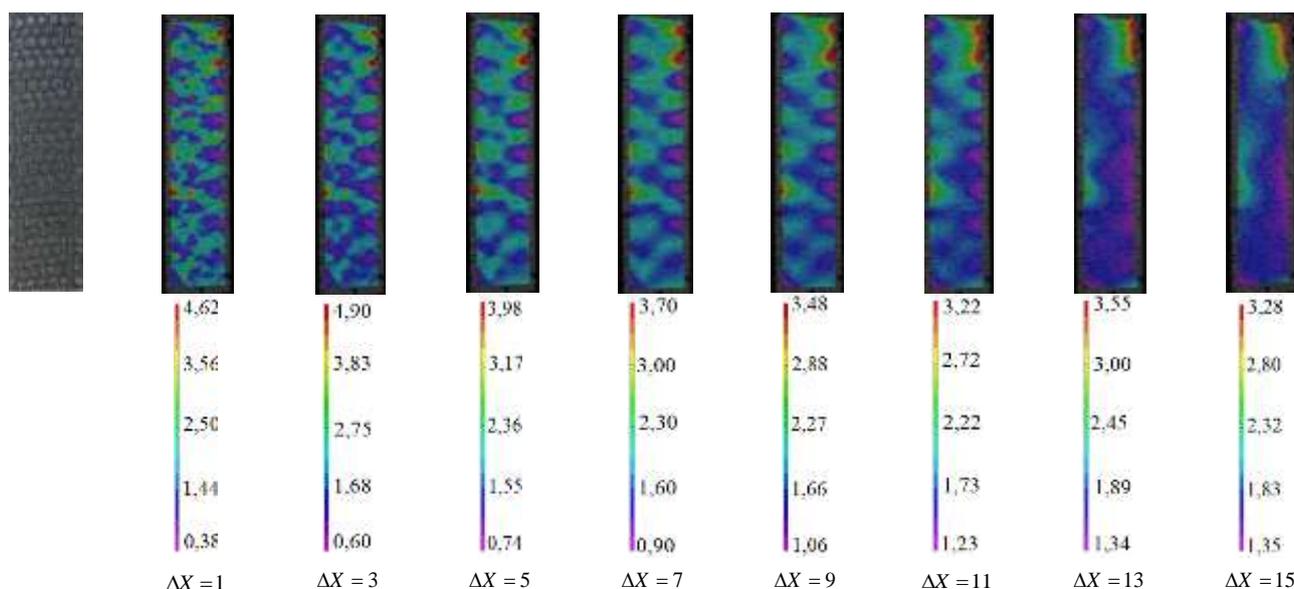


Рис. 2. Фотография поверхности образца «Е»-структуры и неоднородные поля продольных деформаций (ϵ_{yy}) при различной величине шага и фиксированном размере подмножества $X = 49$

Fig. 2. The image of specimen surface with E-weaving structure and inhomogeneous fields of longitudinal strain (ϵ_{yy}) at different step and fixed size of subset $X = 49$

При выборе оптимальной величины шага стоит учитывать задачу исследования. В частности, при использовании видеосистемы в качестве «виртуального» экстензометра или тензодатчика [30] для определения общих характеристик материала следует выбирать большие значения шага. С целью оценки структурных особенностей материала для изучения процессов возникновения и

развития дефектных структур и разрушения необходимо устанавливать более крупный шаг (ΔX). Таким образом, для рассмотренной схемы переплетения (тип «E») оптимальным размером шага является $\Delta X = 5$, так как данный размер шага позволяет учитывать структурные особенности композиционного материала и в значительной степени сокращает время расчета по сравнению с $\Delta X < 5$.

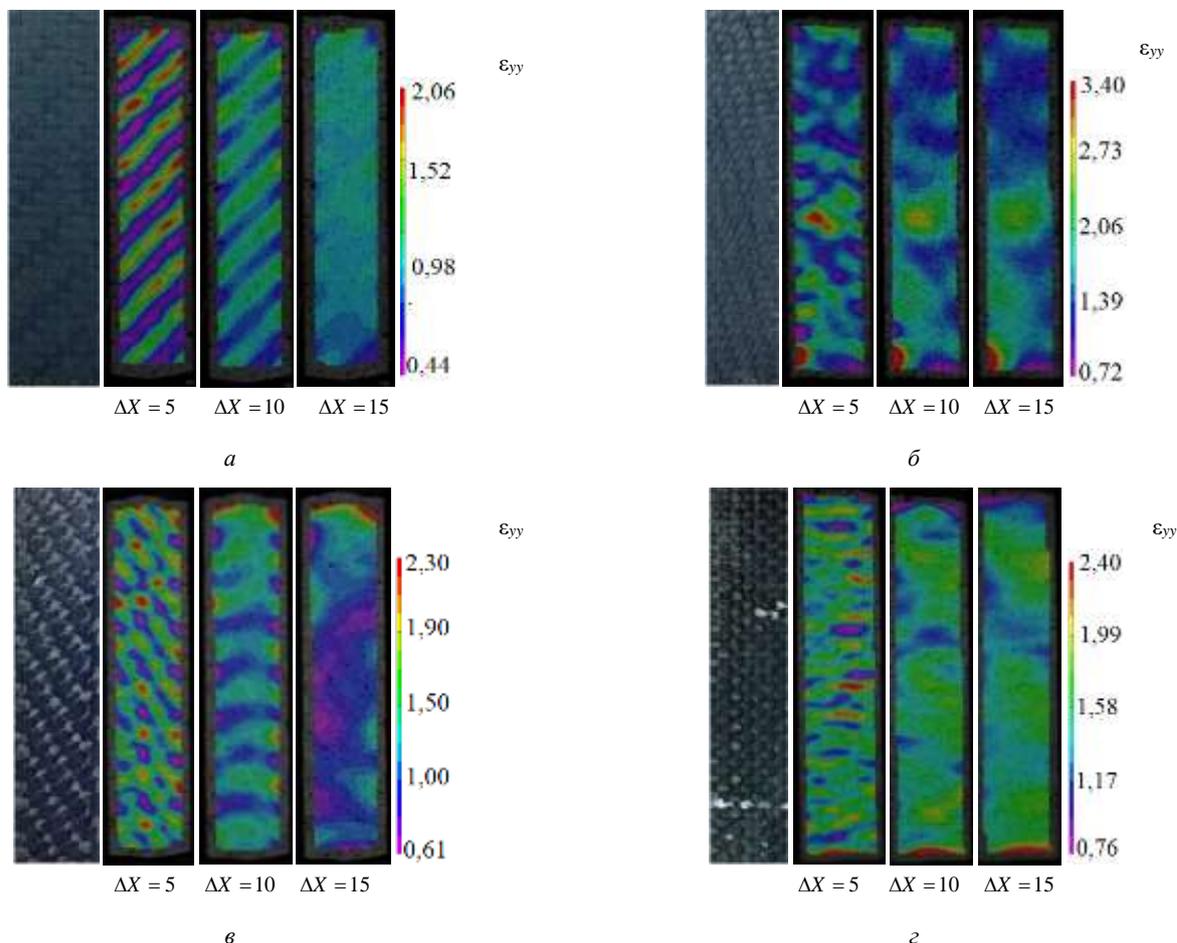


Рис. 3. Неоднородные поля продольных деформаций при фиксированном размере подобласти и различной величине шага для разных структур композиционных материалов: со схемами армирования G (а), F (б), C (в) и A (г)

Fig. 3. Inhomogeneous fields of longitudinal strain at fixed size of subset and different step for different weaving structures: G (a), F (b), C (c) and A (d)

Аналогичный подбор оптимальных параметров корреляционной обработки цифровых изображений выполнен для всех ПКП-образцов с различной схемой переплетения. В качестве примера на рис. 3 представлены неоднородные поля продольных деформаций при фиксированном размере подобласти и различной величине шага для разных структур композиционного материала.

В связи с тем что параметры численной обработки изображений оказывают существенное влияние на результаты построения полей перемещений и деформаций, при представлении результатов, полученных на основе применения метода корреляции цифровых изображений, следует указывать размер подмножества, величину шага, количество точек для области исследования (табл. 4).

Таблица 4

Оптимальные параметры корреляционного анализа для ПКМ-образцов с различными схемами переплетения

Table 4

Optimal parameters of digital image correlation for composite specimens with different weaving structures

| Шифр образца | X | ΔX | N |
|--------------|-----|------------|-------|
| A | 43 | 5 | 20383 |
| B | 47 | 5 | 21985 |
| C | 55 | 5 | 13650 |
| D | 51 | 5 | 19529 |
| E | 49 | 5 | 10622 |
| F | 49 | 5 | 12548 |
| G | 55 | 5 | 18500 |
| H | 51 | 5 | 17914 |

3. Комплексный анализ процессов деформирования в испытаниях на растяжение композитных образцов-полосок

С целью комплексного анализа механического поведения и выявления особенностей неупругого деформирования, накопления повреждений и разрушения композитных образцов-полосок реализована серия механических испытаний на одноосное растяжение группы образцов, представленных в табл. 4, с использованием дополнительных средств регистрации. Проведен анализ неоднородных полей деформаций и температур, сигналов акустической эмиссии в соответствии с процессом нагружения. На рис. 4 представлены диаграммы деформирования, которые являются характерными для каждой схемы переплетения углепластика (А–Н). ПКМ-образцы с ортогональной (А) и ортогонально-комбинированной (В) схемами переплетения отличаются высокими значениями предельной нагрузки по сравнению с образцами с межслойным армированием (С–F) и слоистыми образцами (G, H).

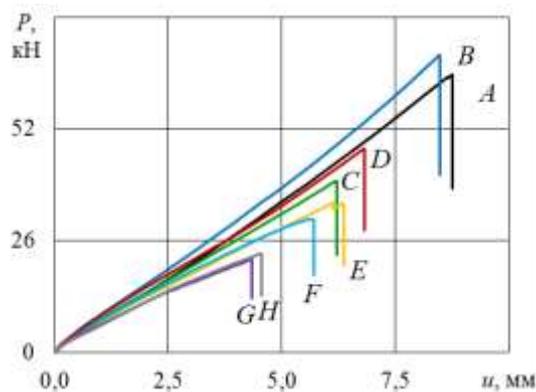


Рис. 4. Диаграммы нагружения образцов-полосок углепластика с различными схемами переплетения (А–Н)

Fig. 4. Loading diagrams of CFRP-specimens with different weaving structures (A–H)

В научной литературе неоднократно отмечалась высокая эффективность применения метода акустической эмиссии при изучении закономерностей накопления повреждений и развития дефектов в структурно-неоднородных материалах [22, 26–29]. В качестве информативных параметров акустической эмиссии применяется энергетический параметр (E , В²с) и число зарегистрированных АЭ-сигналов за время регистрации ($N_{\text{сумм}}$). Значение энергетического параметра вычисляется по формуле $E = \int_0^T U^2(t)dt$, где $U(t)$ – электрическое напряжение сигнала на выходе преобразователя акустической эмиссии [26]. В данной работе рассмотрено изменение кумулятивной энергии (КЭ) АЭ-сигналов, получаемой путем суммирования значений энергетического параметра и отражающей интенсивность накопления дефектов в материале в процессе нагружения. На рис. 5 про-

иллюстрированы временные зависимости КЭ для образцов углепластика с различными схемами переплетения (А–Н).

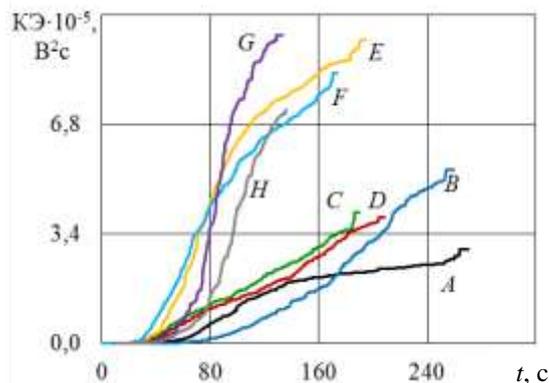


Рис. 5. Временные зависимости кумулятивной энергии для образцов с различными схемами переплетения композита (А–Н)

Fig. 5. Time curves of cumulative energy for specimens with different weaving structures (A–H)

Образцы с ортогональной (А), ортогонально-комбинированной (В) схемами переплетения, а также с попарно межслойным армированием (С и D) имеют меньший наклон кривых (см. рис. 5), что характеризует низкую скорость накопления повреждений в материале. Процесс инициирования и распространения дефектов протекает равномерно. Необходимо отметить, что увеличение наклона кривой на рис. 5 свидетельствует о высокой активности процесса накопления повреждений в материале, образец «трещит». Так, образцы с попарно межслойным комбинированным армированием E, со сквозным межслойным армированием F, слоистые образцы G и слоистые образцы, усиленные в поперечном направлении H, отличаются интенсивностью формирования трещин в материале в процессе нагружения.

Дополнительная информация о закономерностях накопления повреждений в пространственно-армированном углепластике при одноосном растяжении получены с использованием метода инфракрасной термографии. Проведен анализ эволюции неоднородных полей температур, получены данные о развитии дефектных структур в композиционном материале в зависимости от схемы переплетения. С целью оценки интенсивности процессов накопления повреждений рассмотрены зависимости изменения максимальной температуры ΔT от времени испытания. Величина ΔT получена путем вычитания первоначального кадра, снятого с помощью тепловизора, из последующих. На рис. 6 приведены полученные временные зависимости $\Delta T \sim t$.

Вследствие локальных разрушений элементов структуры композиционного материала (разрыв волокон, отслоение и растрескивание матрицы, развитие макроскопической трещины) наблюдается резкий нагрев материала в месте возникновения дефекта, на

кривой изменения температуры (см. рис. 6) формируются вертикальные скачки на кривой. Анализируя количество подобных скачков и их амплитуду, можно оценить интенсивность процесса накопления повреждений и

формирования макроразрушения образцов. Необходимо отметить, что образцы со схожей схемой переплетения (A и B, C и D, E и F, G и H) иллюстрируют аналогичный вид кривых $\Delta T \sim t$ (рис. 6, a–z).

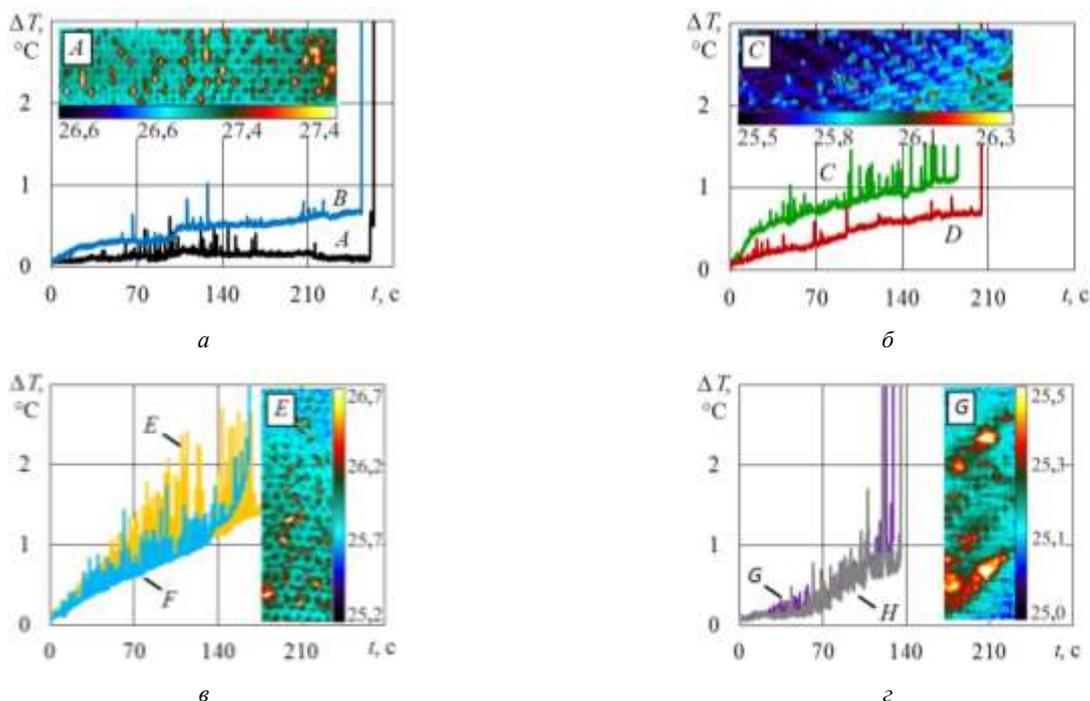


Рис. 6. Временные зависимости изменения максимальной температуры для образцов с различными схемами переплетения (A–H)

Fig. 6. The time curves of the maximum temperature change for specimens with different weaving structures (A–H)

Представляет интерес изучение механизмов неупругого деформирования и разрушения в зависимости от схемы армирования композиционного материала. Для визуализации мест локального разогрева на поверхности образцов-полосок (A–H) в процессе одноосного растяжения представлены картины полей температур T , °C, полученные путем «суммирования» с помощью дополнительного модуля программного обеспечения тепловизора ResearchIR Max. Функция «суммирования» осуществляется путем присваивания максимального значения температуры для данного пикселя на определенном временном интервале, таким образом осуществляется «запоминание» мест локального разогрева материала в процессе нагружения. На рис. 6 в качестве примера приведены полученные картины полей температур для ортогональной схемы переплетения (см. рис. 6, a), для образцов с попарно межслойным армированием (см. рис. 6, б) и с попарно межслойным комбинированным армированием (см. рис. 6, в), для слоистого образца (см. рис. 6, г).

С целью проведения качественного и количественного сравнения опытных данных, полученных для групп образцов с различной схемой переплетения проведен многопараметрический анализ механических и прочностных характеристик (табл. 5) на основе использования лепестковой диаграммы (спайдер-диаграммы).

Таблица 5

Параметры для анализа образцов с различными схемами переплетения

Table 5

Parameters for analysis of specimens with different weaving structures

| Шифр образца | P_{\max} , кН | U_{\max} , мм | ΔT_{\max} , °C | $N_{\text{сумм}}$, ед. | $KЭ_{\max} \cdot 10^{-5}$, В ² с |
|--------------|-----------------|-----------------|------------------------|-------------------------|--|
| A | 6,46 | 8,75 | 21,42 | 31325 | 2,94 |
| B | 6,92 | 8,48 | 25,11 | 26902 | 5,40 |
| C | 3,98 | 6,17 | 24,12 | 30970 | 4,07 |
| D | 4,75 | 6,82 | 23,33 | 27814 | 3,91 |
| E | 3,49 | 6,13 | 23,75 | 32100 | 9,41 |
| F | 3,10 | 5,65 | 26,03 | 34220 | 8,40 |
| G | 2,18 | 4,33 | 23,96 | 14512 | 9,57 |
| H | 2,31 | 4,54 | 25,09 | 15748 | 7,26 |

Рассмотрена предельная нагрузка P_{\max} , кН, предельное удлинение образца (U_{\max} , мм), разогрев материала в момент макроразрушения образца (ΔT_{\max} , °C), максимальная величина кумулятивной энергии, достигнутая в момент разрушения ($KЭ_{\max} \cdot 10^{-5}$, В²с), а также число зарегистрированных выбросов сигнала АЭ ($N_{\text{сумм}}$, ед.). Значения на рис. 7 представлены в относительных величинах.

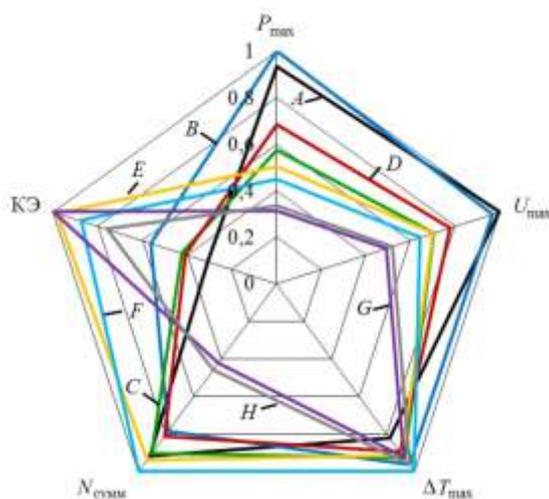


Рис. 7. Многопараметрический анализ влияния схем переплетения (А–Н) композитных образцов-полосок

Fig. 7. Multiparameter analysis of the effect of the weave structure (A–H) of composite specimens

Можно отметить, что образцы со схожей структурой группируются. Например, образцы со слоистой структурой *G* и *H* отличаются низкими значениями предельной нагрузки и относительно небольшим числом $N_{\text{сумм}}$. Образцы с ортогональным переплетением *A* и *B* характеризуются высокой прочностью, большими значениями $KЭ_{\text{max}}$ и $N_{\text{сумм}}$. На основе многопараметрического анализа можно подобрать оптимальный набор

Библиографический список

1. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites / A.P. Mouritz, M.K. Bannister, P.J. Falzon, K.H. Leong // *Composites: Part A*. – 1999. – Vol. 30. – Iss. 12. – P. 1445–1461. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00034-2
2. Bilisik K. Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review // *Textile Research Journal*. – 2012. – Vol. 82. – Iss. 7. – P. 725–743. DOI: 10.1177/0040517511435013
3. Bilisik K. Three dimensional braiding for composites: A review // *Textile Research Journal*. – 2013. – Vol. 83. – Iss. 13. – P. 1414–1436. DOI: 10.1177/0040517512450766
4. Automated manufacture of 3D reinforced aerospace composite structures / G. Dell'Anno, I. Partridge, D. Cartié [et al.] // *International Journal of Structural Integrity*. – 2012. – Vol. 3. – Iss. 1. – P. 22–40. DOI: 10.1108/17579861211209975
5. Spatiotemporal characterization of 3D fracture behavior of carbon-fiber-reinforced polymer composites / S. Pei, K. Wang, Y. Li, D. Zeng, X. Xiao // *Composite Structures*. – 2018. – Vol. 203. – P. 30–37. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.022
6. A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 1: Materials, methods and principal results / S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, D.S. Ivanov [et al.] // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2009. – Vol. 40. – Iss. 8. – P. 1134–1143.
7. A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 2: Comprehensive experimental results / D.S. Ivanov, S.V. Lo-

mov, A.E. Bogdanovich, M. Karahan, I. Verpoest // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2009. – Vol. 40. – Iss. 8. – P. 1144–1157.

свойств материала при его разработке в соответствии с требуемыми условиями эксплуатации.
В результате комплексного анализа механического поведения, закономерностей накопления повреждений и разрушения композитных образцов с использованием дополнительных средств регистрации в испытаниях на растяжение можно сделать вывод о высокой эффективности методики многопараметрического анализа. Комбинированное использование испытательного и диагностирующего оборудования позволяет существенно повысить информативность базы опытных данных, обеспечить точность результатов. Данное направление исследований является перспективным и требует дальнейшего изучения.

Благодарности

Работа выполнена в Центре экспериментальной механики ПНИПУ при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках выполнения проектов № 17-48-590158, № 18-31-00452 и 18-01-00763.

Acknowledgments

The work was performed at the Center for Experimental Mechanics, PNRPU, with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Perm kray as part of project No. 17-48-590158, No. 18-31-00452 and 18-01-00763.

8. Theoretical-experimental study of mechanical behavior in 3D composites under quasi-steady damage / M.V. Tsepennikov, A.A. Strom, I.A. Povyshev, O.Yu. Smetannikov // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2016. – Vol. 2. – P. 143–158. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.10.
9. Baucom J.N., Zikry M.A. Evolution of failure mechanisms in 2D and 3D woven composite systems under quasi-static perforation // *Journal of Composite Materials*. – 2003. – Vol. 38. – Iss. 6. – P. 535.
10. Huang G., Zhong Z. Tensile behavior of 3D woven composites by using different fabric structures // *Material Design*. – 2002. – Vol. 23. – Iss. 7. – P. 671–674. DOI: 10.1016/S0261-3069(02)00053-5
11. Tensile response of carbon-aramid hybrid 3D braided composites / Y. Zheng, Y. Sun, J. Li, L. Limin, S. Tian // *Materials & Design*. – 2017. – Vol. 116. – P. 246–252. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.11.082
12. Lobanov D.S., Babushkin A.V., Luzenin A.Yu. Effect of increased temperatures on the deformation and strength characteristics of a GFRP based on a fabric of volumetric weave // *Mechanics of Composite Materials*. – 2018. – Vol. 54. – Iss. 5 – P. 655–664.
13. Full-field analysis of shear test on 3D orthogonal woven C/C composites / L. Qin, Z. Zhang, X. Li [et al.] // *Composites: Part A*. – 2012. – Vol. 43. – P. 310–316. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.11.006

14. Fatigue behavior of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass reinforced composites / V. Carvelli, G. Gramellini, S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich [et al.] // *Composites Science and Technology*. – 2010. – Vol. 70. – Iss. 14. – P. 2068–2076. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.08.002

15. Dattoma, V., Giancane, S. Evaluation of energy of fatigue damage into GFRC through digital image correlation and thermography // *Composites Part B: Engineering*. – 2013. – Vol. 47. – P. 283–289.

16. Dau F., Kergomard Y.D. Study on interlock 3X damage mechanisms under impact loading using a deformable impactor // *EPJ Web of Conferences*. – 2010. – Vol. 6. – Paper 20012. DOI: 10.1051/epjconf/20100620012

17. Effect of temperature on bending properties and failure mechanism of three-dimensional braided composite / D. Li, D. Fang, G. Zhang, H. Hu // *Materials and Design*. – 2012. – Vol. 41. – P. 167–170.

18. Fan W., Li J., Guo D. Effect of thermo-oxidative aging on three-dimensional and four-directional braided carbon fiber/epoxy composite // *Journal of Composite Materials*. – 2015. – Vol. 49. – Iss. 25. – P. 3189–3202.

19. Экспериментальные исследования закритического деформирования и разрушения конструкционных материалов: моногр. / В.Э. Вильдеман, Е.В. Ломакин, М.П. Третьяков, Т.В. Третьякова, Д.С. Лобанов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – 156 с.

20. Use of diffuse approximation on DIC for early damage detection in 3D carbon/epoxy composites / P. Feissel, J. Schneider, Z. Aboura, P. Villon // *Composites Science and Technology*. – 2013. – Vol. 88. – P. 16–25. DOI: 10.1016/j.compscitech.2013.08.027

21. Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements. – University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. – 322 p.

22. 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. – P. 163–170. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.243.163

23. 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

24. Исследование деформации и разрушения по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии / С.В. Панин, А.В. Бяков, П.С. Любутин, О.В. Башков [и др.] // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2011. – Т. 77, № 9. – С. 50–59.

25. Comparison of infrared and 3D digital image correlation techniques applied for mechanical testing of materials / L. Krstulović-Opara, M. Surjak, M. Vesenjak, Z. Tonković, et al. // *Infrared Physics and Technology*. – 2015. – Vol. 73. – P. 166–174.

26. Шилова А.И. Метод регистрации сигналов акустической эмиссии применительно к исследованию процессов разрушения конструкционных материалов: учеб. пособие / А.И. Шилова; под ред. В.Э. Вильдемана. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 56 с.

27. Monitoring of acoustic emission damage during tensile loading of 3D woven carbon/epoxy composites. / S.V. Lomov, M. Karahan, A.E. Bogdanovich, I. Verpoest // *Textile Research Journal*. – 2014. – Vol. 84. – No. 13. – P. 1373–1384.

28. Acoustic emission characterization of matrix damage initiation in woven CFRP composites / M. Bourchack, A. Khan, S.A. Badr, W. Harasani // *Materials Sciences and Applications*. – 2013. – Vol. 4. – Iss. 9. – P. 509–515.

29. Grosse C.U. Ohtsu M. Acoustic emission testing. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. – 402 p. DOI: 10.1007/978-3-540-69972-9

30. Третьякова Т.В. Особенности использования программного обеспечения Vic-3D, реализующего метод корреляции цифровых изображений, в приложении к исследованию полей неупругих деформаций // *Вычисл. мех. сплош. сред*. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 162–171. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.2.17

31. Tretyakova T., Tretyakov M., Wildemann V. Stable crack growth in Al-Cu-Mg alloy under various stiffness of loading system in bodies with concentrators // *Procedia Structural Integrity*. – 2018. – Vol. 13. – P. 1774–1779. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.12.369

32. Панин С.В., Любутин П.С., Титков В.В. 32. Анализ изображений в оптическом методе оценки деформаций. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 288 с.

References

1. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites / A.P. Mouritz, M.K. Bannister, P.J. Falzon, K.H. Leong // *Composites: Part A*. – 1999. – Vol. 30, Issue 12. – P. 1445–1461. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00034-2.

2. Bilisik K. Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review // *Textile Research Journal*. – 2012. – Vol. 82, Issue 7. – P. 725–743. DOI: 10.1177/0040517511435013.

3. Bilisik K. Three dimensional braiding for composites: A review // *Textile Research Journal*. – 2013. – Vol. 83, Issue 13. – P. 1414–1436. DOI: 10.1177/0040517512450766.

4. Automated manufacture of 3D reinforced aerospace composite structures / G. Dell'Anno, I. Partridge, D. Cartié, etc. // *International Journal of Structural Integrity*. – 2012. – Vol. 3, Issue 1. – P. 22–40. DOI: 10.1108/17579861211209975.

5. Spatiotemporal characterization of 3D fracture behavior of carbon-fiber-reinforced polymer composites / S. Pei, K. Wang, Y. Li, D. Zeng, X. Xiao // *Composite Structures*. – 2018. – Vol. 203. – P. 30–37. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.022.

6. A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 1: Materials, methods and principal results / S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, D.S. Ivanov, et al. // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2009. – Vol. 40, Issue 8. – P. 1134–1143.

7. A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 2: Comprehensive experimental results / D.S. Ivanov, S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, M. Karahan, I. Verpoest // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2009. – Vol. 40, Issue 8. – P. 1144–1157.

8. Theoretical-experimental study of mechanical behavior in 3D composites under quasi-steady damage / M.V. Tsepennikov, A.A. Strom, I.A. Povyshev, O.Yu. Smetannikov // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2016. – Vol. 2. – P. 143–158. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.10.

9. *Baucom J.N., Zikry M.A.* Evolution of failure mechanisms in 2D and 3D woven composite systems under quasi-static perforation // *Journal of composite materials.* – 2003. – Vol. 38, Issue 6. – P. 535.
10. *Huang G., Zhong Z.* Tensile behavior of 3D woven composites by using different fabric structures // *Material Design.* – 2002. – Vol. 23, Issue 7. – P. 671–674. DOI: 10.1016/S0261-3069(02)00053-5.
11. Tensile response of carbon-aramid hybrid 3D braided composites / Y. Zheng, Y. Sun, J. Li, L. Limin, S. Tian // *Materials & Design.* – 2017. – Vol. 116. – P. 246–252. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.11.082.
12. *Lobanov D.S., Babushkin A.V., Luzenin A.Yu.* Effect of increased temperatures on the deformation and strength characteristics of a GFRP based on a fabric of volumetric weave // *Mechanics of Composite Materials.* – 2018. – Vol. 54, Issue 5 – P. 655–664.
13. Full-field analysis of shear test on 3D orthogonal woven C/C composites / L. Qin, Z. Zhang, X. Li, etc. // *Composites: Part A.* – 2012. – Vol. 43. – P. 310–316. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.11.006.
14. Fatigue behavior of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass reinforced composites / V. Carvelli, G. Gramellini, S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, etc. // *Composites Science and Technology.* – 2010. – Vol. 70, Issue 14. – P. 2068–2076. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.08.002
15. *Dattoma, V., Giancane, S.* Evaluation of energy of fatigue damage into GFRC through digital image correlation and thermography // *Composites Part B: Engineering.* – 2013. – Vol. 47. – P. 283–289.
16. *Dau F., Kergomard YD.* Study on interlock 3X damage mechanisms under impact loading using a deformable impactor // *EPJ Web of Conferences.* – 2010. – Vol. 6. – Paper 20012. DOI: 10.1051/epjconf/20100620012
17. Effect of temperature on bending properties and failure mechanism of three-dimensional braided composite / Li D., Fang D., Zhang G., Hu H. // *Materials and Design.* – 2012. – Vol. 41. – P. 167–170.
18. *Fan W., Li J., Guo D.* Effect of thermo-oxidative aging on three-dimensional and four-directional braided carbon fiber/epoxy composite // *Journal of Composite Materials.* – 2015. – Vol. 49, Issue 25. – P. 3189–3202.
19. Eksperimental'nye issledovaniya zakriticheskogo deformirovaniya i razrusheniya konstrukcionnykh materialov: monogr. / V.E. Vil'deman, E.V. Lomakin, M.P. Tret'yakov, T.V. Tret'yakova, D.S. Lobanov. – Perm': Izd-vo Perm. nac. issled. politekhn. unta, 2018. – 156 s.
20. Use of diffuse approximation on DIC for early damage detection in 3D carbon/epoxy composites / P. Feissel, J. Schneider, Z. Aboura, P. Villon // *Composites Science and Technology.* – 2013. – Vol. 88. – P. 16–25. DOI: 10.1016/j.compscitech.2013.08.027.
21. *Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier H.* Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. – University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. – 322 p.
22. *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. – P. 163–170 doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.243.163
23. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya defektov na prochnost' kompozitnykh panelej metodami korrelyatsii cifrovyykh izobrazhenij i infrakrasnoj termografii / D.S. Lobanov, V.E. Wildemann, E.M. Spaskova, A.I. Chihachev // *Vestnik PNIPU. Mekhanika.* – 2015. – № 4. – S. 159–170
24. Issledovanie deformatsii i razrusheniya po dannym akusticheskoy emissii, korrelyatsii cifrovyykh izobrazhenij i tenzometrii / S.V. Panin, A.V. Byakov, P.S. Lyubutin, O.V. Bashkov, dr. // *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov.* – 2011. – T. 77, № 9. – S. 50–59.
25. Comparison of infrared and 3D digital image correlation techniques applied for mechanical testing of materials / L. Krstulović-Opara, M. Surjak, M. Vesenjak, Z. Tonković, etc. // *Infrared Physics and Technology.* – 2015. – Vol. 73. – P. 166–174.
26. *Shilova A.I.* Metod registratsii signalov akusticheskoy emissii primenitel'no k issledovaniyu processov razrusheniya konstrukcionnykh materialov: ucheb. posobie / A.I. Shilova; pod red. V.E. Vil'demana. – Perm': Izd-vo Perm. nac. issled. politekhn. unta, 2015. – 56 s.
27. Monitoring of acoustic emission damage during tensile loading of 3D woven carbon/epoxy composites. / S.V. Lomov, M. Karahan, A.E. Bogdanovich, I. Verpoest // *Textile Research Journal.* – 2014. – Vol. 84, No. 13. – P. 1373–1384.
28. Acoustic Emission Characterization of Matrix Damage Initiation in Woven CFRP Composites / M. Bourchack, A. Khan, S.A. Badr, W Harasani // *Materials Sciences and Applications.* – 2013. – Vol. 4, Issue 9. – P. 509–515.
29. *Grosse C.U. Ohtsu M.* Acoustic Emission Testing. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. – p. 402. DOI: 10.1007/978-3-540-69972-9
30. *Tret'yakova T.V.* Osobennosti ispol'zovaniya programno-go obespecheniya Vic-3D, realizuyushchego metod korrelyatsii cifrovyykh izobrazhenij, v prilozhenii k issledovaniyu polej neuprugih deformatsij // *Vychisl. mekh. splosh. sred.* – 2014. – T. 7, № 2. – S. 162–171. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.2.17.
31. *Tret'yakova T., Tret'yakov M., Wildemann V.* Stable crack growth in Al-Cu-Mg alloy under various stiffness of loading system in bodies with concentrators // *Procedia Structural Integrity.* – 2018. – Vol. 13. – P. 1774–1779. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.12.369.
32. *Panin S.V., Lyubutin P.S., Titkov V.V.* Analiz izobrazhenij v opticheskom metode ocenki deformatsij. – Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 2017. – 288 s.