

Староверов О.А., Бабушкин А.В., Горбунов С.М. Оценка степени поврежденности углепластиковых композиционных материалов при ударном воздействии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 161-172. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.14

Staroverov O.A., Babushkin A.V., Gorbunov S.M. Evaluation of the damage degree to carbon-fiber composite materials under impact. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 161-172. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.14



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2019

PNRPU MECHANICS BULLETIN

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



DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.14

УДК 620.16, 620.17

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

О.А. Староверов¹, А.В. Бабушкин¹, С.М. Горбунов²

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:

композиционные материалы, ударные воздействия, повреждения, терпимость к повреждениям, сжатие после удара.

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты экспериментального исследования изменения остаточных механических свойств образцов углепластиковых композитов различной структуры в условиях комбинированных ударных и статических воздействий. Данное исследование ставило целью получение новых экспериментальных данных о процессах деформирования и разрушения образцов углепластиковых композиционных материалов в условиях воздействия ударных и статических нагрузок, а также разработку методики анализа степени поврежденности и терпимости к повреждениям после ударных нагрузок при использовании различных вариантов неразрушающего контроля. Для исследования было выбрано восемь типов структур армирования. Экспериментальная часть выполнена на базе Центра экспериментальной механики ПНИПУ с использованием испытательных систем с падающим грузом Instron CEAST 9350 и электромеханической – Instron 5982. Методика испытаний основывалась на стандартах ASTM D7136 и D7137 – удар и сжатие после удара. После ударных воздействий измерялись глубина вмятин и с помощью неразрушающего контроля методом шерографии – размер несплошности образцов. Терпимость к повреждениям оценивалась с помощью введенной величины степени поврежденности после удара. Представлена процедура расчета работы разрушения в процессе ударного воздействия. Дана оценка перспективности использования введенных значений для проектирования и изготовления изделий из углепластиковых композиционных материалов с разной структурой армирования. Процесс ударного низкоскоростного воздействия отражен на диаграммах зависимости силы от перемещений при различных уровнях воздействий. Результаты испытаний представлены в виде диаграмм максимальной разрушающей нагрузки при сжатии, описывающих изменение остаточных механических свойств после ударного воздействия. Отмечены особенности использования прямых и косвенных методик оценки эксплуатационных характеристик поврежденных образцов. Проанализировано влияние ударного воздействия на характер разрушения и деформационные свойства образцов углепластиковых композиционных материалов.

© ПНИПУ

© Староверов Олег Александрович – н.с., e-mail: cem_staroverov@mail.ru, [ID: 0000-0001-6095-0962](https://orcid.org/0000-0001-6095-0962).

Бабушкин Андрей Викторович – к.т.н., доц., e-mail: bav651@yandex.ru, [ID: 0000-0001-8411-757X](https://orcid.org/0000-0001-8411-757X).

Горбунов Степан Михайлович – начальник инженерного центра, e-mail: stepan.gorbunov@perm.npo-saturn.ru.

stepan.gorbunov@mail.ru, [ID: 0000-0003-3125-5009](https://orcid.org/0000-0003-3125-5009)

Oleg A. Staroverov – Researcher, e-mail: cem_staroverov@mail.ru, [ID: 0000-0001-6095-0962](https://orcid.org/0000-0001-6095-0962)

Andrey V. Babushkin – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: bav651@yandex.ru,

[ID: 0000-0001-8411-757X](https://orcid.org/0000-0001-8411-757X).

Stepan M. Gorbunov – Head of the Engineering Center, e-mail: stepan.gorbunov@perm.npo-saturn.ru.

stepan.gorbunov@mail.ru, [ID: 0000-0003-3125-5009](https://orcid.org/0000-0003-3125-5009)



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)

EVALUATION OF THE DAMAGE DEGREE TO CARBON-FIBER COMPOSITE MATERIALS UNDER IMPACT

O.A. Staroverov¹, A.V. Babushkin¹, S.M. Gorbunov²

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:

composite materials, impact, damage, tolerance for damage, compression after impact.

ABSTRACT

The work presents the results of an experimental research of changes in the residual mechanical properties of the samples of carbon-fiber composites of various structures under combined low-velocity impact and static loads. The main objectives of this study were to obtain new experimental data on the processes of deformation and fracture of carbon-plastic composite materials under shock impact and static loads, as well as the creation of methods analyzing the degree of damage and tolerance to damage after shock loads using different non-destructive testing. Eight types of reinforcement structures were selected for the research. The experimental part was carried out at PNRPU Experimental Mechanics Center using the CEAST 9350 drop-weight test systems and the electromechanical Instron 5982. The test method was based on the standards ASTM D7136 and D7137. After the impact, the depth of the dents and, using non-destructive testing by the sherography method, the size of the discontinuity of the samples were measured. Damage tolerance was assessed using the magnitude of damage after impact. An assessment of the prospects of using the entered values for the design and manufacture of products from carbon-fiber composite materials of various reinforcement structures is given. The calculation of the destruction as a result of the impact was made. The process of the low-velocity impact is described in the diagrams of the dependence of force on displacements at various energy levels. The test results are presented in the form of diagrams of the maximum breaking load under compression describing the change in residual mechanical properties after the impact. The features of using direct and indirect methods of assessing the performance characteristics of the damaged samples are noted. The effect of the impact on the nature of fracture and deformation properties of the samples of carbon-fiber composite materials is analyzed.

© PNRPU

Введение

Проблема экспериментального определения необходимого набора характеристик полимерных композиционных материалов (ПКМ) имеет важное значение для проектирования изделий и конструкций из ПКМ. Для армирования полимерных композиционных материалов все большее применение находят многослойные углеродные ткани объемного плетения. На сегодняшний день многослойные углеродные ткани объемного плетения используются в качестве армирующего материала углепластиков, работающих в сложных и жестких условиях воздействия высокоскоростных аэродинамических потоков, вибрации, при наличии высоких температур. Обзор технологических и структурных аспектов, а также современное состояние и перспективы применения трехмерных тканей в полимерных композитах приведены в [1–4]. Трехмерные пространственно-армирующие наполнители или 3D-структуры используются для высокоэффективных композитных материалов в различных областях промышленности при проектировании и производстве ответственных деталей и конструктивных элементов [1, 2]. При этом реализуется основное преимущество многослойных тканей – их значительная прочность в трансверсальном (перпендикулярном слоям) направлении, что обеспечивает нерасслаиваемость волокнистых пластиков в процессе их эксплуатации [3, 4].

Наряду с использованием новых технологий производства возникают проблемы в области получения знаний о процессах деформирования и разрушения, снижения прочностных и жесткостных характеристик при случайных ударно-волновых воздействиях в процессе эксплуатации изделий из композиционных материалов, требующие комплексных методик экспериментальных исследований. Существующие методы теоретического и экспериментального предсказания упругих и прочностных характеристик ПКМ по свойствам компонентов пока не дают надежных результатов из-за трудности учета большого числа существенных факторов. Экспериментальные работы, направленные на мониторинг процессов деформирования и разрушения с использованием современного испытательного оборудования, позволяют получать новые экспериментальные данные, необходимые для верификации моделей поведения композитов при низкоскоростных ударных воздействиях [5–11]. Большинство исследователей используют модели повреждаемости композиционных материалов при низкоскоростном ударе. В работе [12] авторы используют методику, основанную на применении критерия разрушения монослоя и последующего расчета повреждаемости материала с учетом взаимодействия различных механизмов эволюции повреждений. Данный метод полезен при проектировании, но требует достоверных экспериментальных данных. Многие расчетно-

экспериментальные работы основываются на создании расчетной модели композита с заданными свойствами для каждого слоя [15–17]. Поврежденность и дефектность структуры в таких расчетных моделях сводятся к созданию эквивалентного концентратора напряжений в образце, чаще всего в виде сквозного отверстия, однако такие расчеты не учитывают вклад поврежденной структуры образца в процесс деформирования. Работы, ориентированные на моделирование взаимодействия ударника и образца ПКМ [18–22], встречаются крайне редко. Каждая такая модель взаимодействия является оригинальной и не может быть унифицирована для исследования всех видов композитов. Исследования, направленные на изучение низкоскоростного ударного воздействия, включающие в себя моделирование процесса деформирования и разрушения, подкрепленные экспериментальными данными с использованием систем неразрушающего контроля [23–31], позволяют получать достоверные результаты, необходимые для проектирования композиционных материалов и изделий из них ответственного назначения.

Данное исследование ставило целью получение новых экспериментальных данных о процессах деформирования и разрушения образцов углепластиковых композиционных материалов в условиях воздействия ударных и статических нагрузок, а также разработку методики анализа степени поврежденности и терпимости к повреждениям после ударных нагрузок при использовании различных вариантов неразрушающего контроля.

1. Материал

Для проведения испытаний были взяты 8 серий образцов. Образцы, изготовленные по 6 различным схемам переплетения 3D тканых преформ методом Resin Transfer Molding (RTM) (рис. 1):

- серия «А» – ортогональная (Orthogonal);
- серия «В» – ортогональная комбинированная (Orthogonal conjoint);
- серия «С» – с попарно межслойным армированием (Layer-to-layerinterlocked);
- серия «D» – с попарно межслойным армированием и продольным слоем (Layer-to-layerinterlocked with warp);
- серия «E» – с попарно межслойным комбинированным армированием (Layer-to-layerinter lockedconjoint);
- серия «F» – со сквозным межслойным армированием (Angleinterlocked).

А также слоистые образцы из 2D тканых преформ (рис. 2):

- серия «G» – слоистые образцы;
- серия «H» – слоистые образцы, усиленные в поперечном направлении методом прошивки Tufting.

На рис. 3 приведены иллюстрации, отражающие сущность технологического метода Tufting.

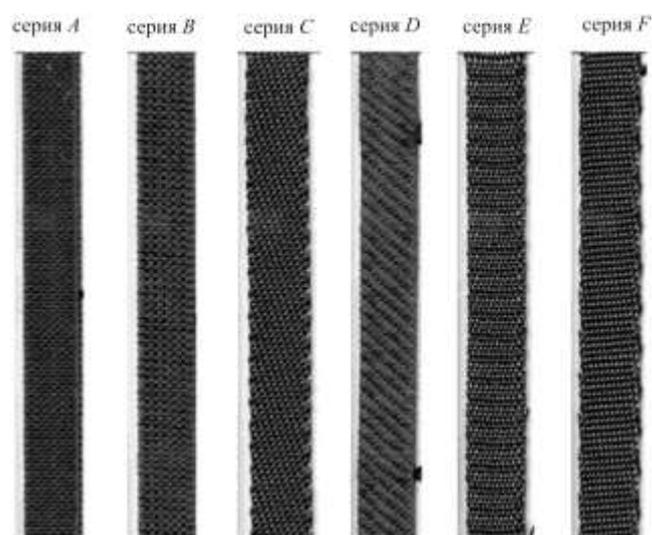


Рис. 1. Образцы 3D тканых преформ

Fig. 1 Samples of 3D woven preforms

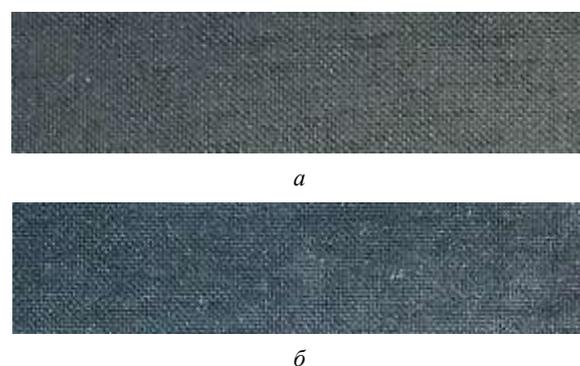


Рис. 2. Фотографии поверхности образцов структур серии «G» (а) и серии «H» (б)

Fig. 2. Photos of the surface of specimens of the "G" (a) series structures and "H" (b)



Рис. 3 Изготовление слоистых преформ, усиленных методом Tufting

Fig. 3. Production of layered preforms reinforced by the Tufting method

2. Методические особенности проведения экспериментального исследования и анализа поврежденности углепластиковых композитов

В данной работе был реализован следующий алгоритм исследования:

– нанесение повреждений при ударе образцов-пластин с различными уровнями воздействий (ASTM D7136) [32];

- оценка повреждения образцов путем измерения глубины впадины;
- оценка степени повреждения через процедуру дефектоскопии методом шерографии;
- оценка степени повреждения образцов путем проведения испытаний на сжатие в специальном приспособлении (ASTM D7137).

Базовое номинальное значение разрушающей нагрузки сжатия определялось при испытании образцов без ударных повреждений каждого вида материала. Для нанесения ударных повреждений на поверхность образцов исследуемых материалов использовался копер вертикального типа Instron CEAST 9350. Данная испытательная машина оснащена системой сбора и обработки данных DAS 16k, которая позволяет обрабатывать сигналы динамического воздействия. Энергия удара составляла 30, 40 и 50 Дж при постоянной массе груза. Минимальная энергия удара 30 Дж была выбрана согласно стандарту ASTM D7136, она соответствовала появлению видимых повреждений на поверхности образца и рассчитана следующим образом:

$$E = C_E h, \quad (1)$$

где E – потенциальная энергия бойка до испытания, Дж; C_E – указанное отношение энергии удара к толщине образца, 6,7 Дж/мм; h – номинальная толщина образца, мм.

Максимальная энергия удара 50 Дж соответствовала значительным повреждениям, но не сквозному пробою.

Образцы устанавливались на жесткое основание с зажимным приспособлением (рис. 4). Размер выреза в пластине (75 ± 1) мм \times (125 ± 1) мм.

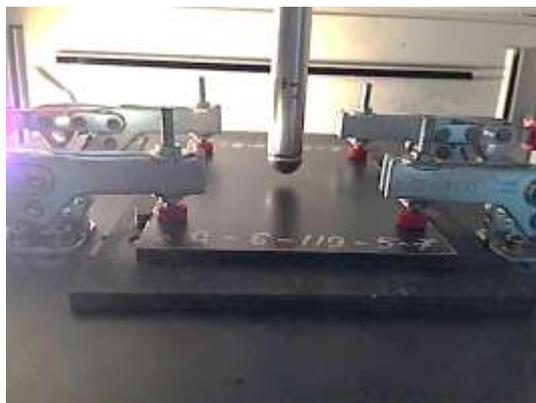


Рис. 4. Фотография образца-пластины, установленного в приспособлении для испытаний на удар испытательной системы Instron CEAST 9350

Fig. 4. Photo of a sample plate installed in an Instron CEAST 9350 testing device for impact testing

Удар производился полусферическим наконечником диаметром 16 мм перпендикулярно плоскости образца по геометрическому центру. Оснащение испытательного оборудования позволяло исключать повторные удары при испытаниях. Глубина вмятины фиксировалась сразу же после удара образца с помощью щупа электронного штангенциркуля. Для опреде-

ления «релаксации» вмятины замеры проводились через 7 суток после удара. Глубина вмятины определялась как максимальное расстояние в направлении нормали к поверхности образца от самой низкой точки вмятины до поверхности, на которой вмятины нет.

Оценка пятна повреждения после испытаний на удар также проводилась с использованием установки для проведения дефектоскопии методом шерографии Steinbichler ISIS mobile 3100 (рис. 5). При неразрушающем контроле определялся размер повреждения, возникшего в результате удара, методом шерографии, который основан на принципе сравнения интерференционных образов двух состояний поверхности объекта: начального и измененного (смещенного или деформационного).



Рис. 5. Система шерографии Steinbichler ISIS mobile 3100 при проведении исследования

Fig. 5. Sterebichler ISIS mobile 3100 sherography system during the research

Данный метод позволяет обнаруживать дефекты типа «нарушение сплошности» в многослойных конструкциях, отслоение оболочки от сотового или трубчатого наполнителя, непрочлеи, неприклеи и тому подобные дефекты (рис. 6). Для определения распространения внутренних дефектов были выбраны по три образца каждого материала, испытанных на каждом из трех уровней потенциальной энергии ударника, всего 24 шт.

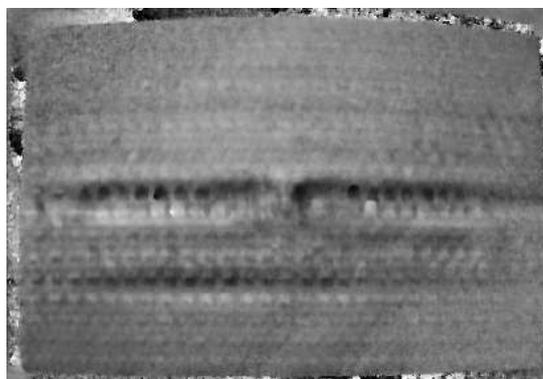
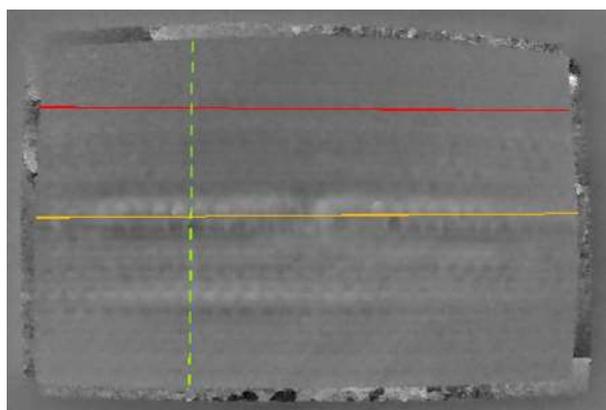
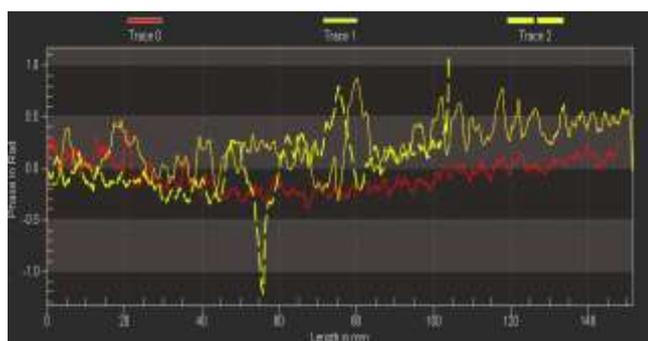


Рис. 6. Изображение образца-пластины после удара, полученное с помощью шерографа

Fig. 6. The image of the sample plate after the impact obtained using a sherograph



а



б

Рис. 7. Определение размера дефекта с использованием шерографа

Fig. 7. Defect sizing using shero-graph

Получив изображения (рис. 7, а), необходимо провести калибровку по образцу с использованием виртуальной линейки. При дальнейшей обработке изображения можно установить номинальные стробы перемещения (красная линия) на поверхности в бездефектной зоне образца. Стробы перемещений, обозначенные желтым и зеленым цветами, соответствуют зонам с наибольшими несплошностями образца. После того как зафиксированы области с дефектами образца, производится замер несплошности с помощью виртуальной линейки. На рис. 7, б представлены стробы перемещений после обработки изображения образца. Максимальное отклонение продольной стробы (желтой) от номинальной (красной) стробы являлось значением пятна повреждения в продольном направлении. Аналогичным образом определялись значения для поперечного пятна повреждения.

Квазистатическое сжатие после удара выполнялось на электромеханической испытательной системе Instron 5982. Испытания на одноосное сжатие проводились при скорости перемещения нагружающей траверсы $v = 2$ мм/мин до разрушения или потери устойчивости образца с использованием стандартного зажимного приспособления (рис. 8).

Часть испытаний была проведена в рамках государственного задания Минобрнауки России (9.7526.2017/9.10).



Рис. 8. Фото зажимного приспособления для испытания на остаточную прочность при сжатии с установленным образцом

Fig. 8. Photo of the clamping device for the residual strength testing with the specimen installed

3. Анализ и обсуждение результатов экспериментального исследования

В результате испытаний углепластиковых пластин при ударном воздействии различной интенсивности были получены диаграммы зависимости силы от времени $F(t)$. Сигнал изменения силы во время контакта ударника с образцом записывался с помощью встроенного тензометрического датчика, находящегося в нагружающей схеме испытательной системы. На рис. 9 изображены диаграммы зависимости силы от времени при испытаниях с различными уровнями энергии удара.

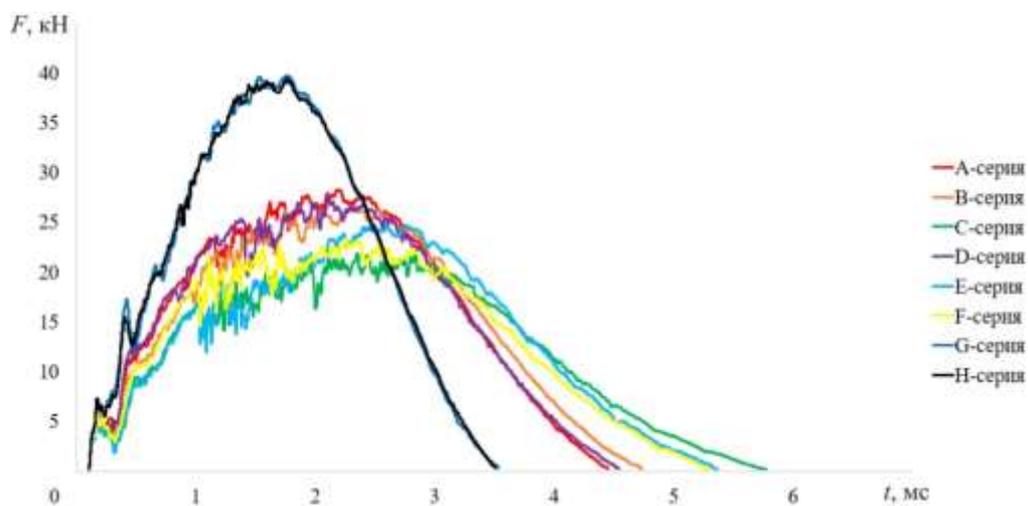
Использование встроенного датчика и системы сбора и обработки данных позволяло получать информацию о работе разрушения образцов. Для получения значения работы разрушения в программном обеспечении Visual Impact проводилась следующие процедуры:

$$D_i = \int \int_i \frac{F(t) - gM}{M} dt^2, \quad (2)$$

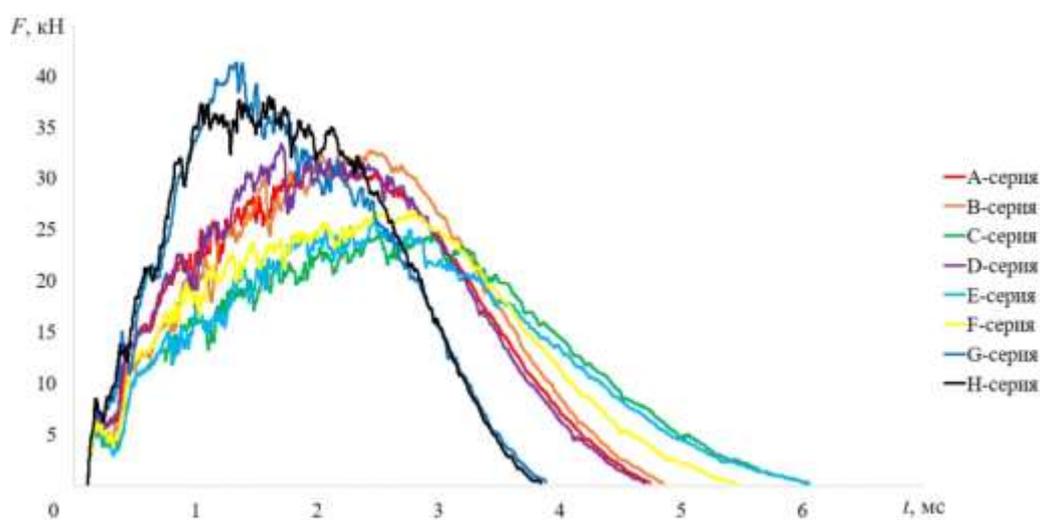
где D_i – перемещения (рассчитанная деформация) образца в точках; $F(t)$ – сигнал зависимости силы от времени, получаемый системой сбора данных; g – ускорение свободного падения; M – полная масса ударника; t – время; i – номер точки. Каждый номер точки соответствует значению силы, полученному системой сбора информации (DAS 16k).

Перемещения образца рассчитываются по формуле

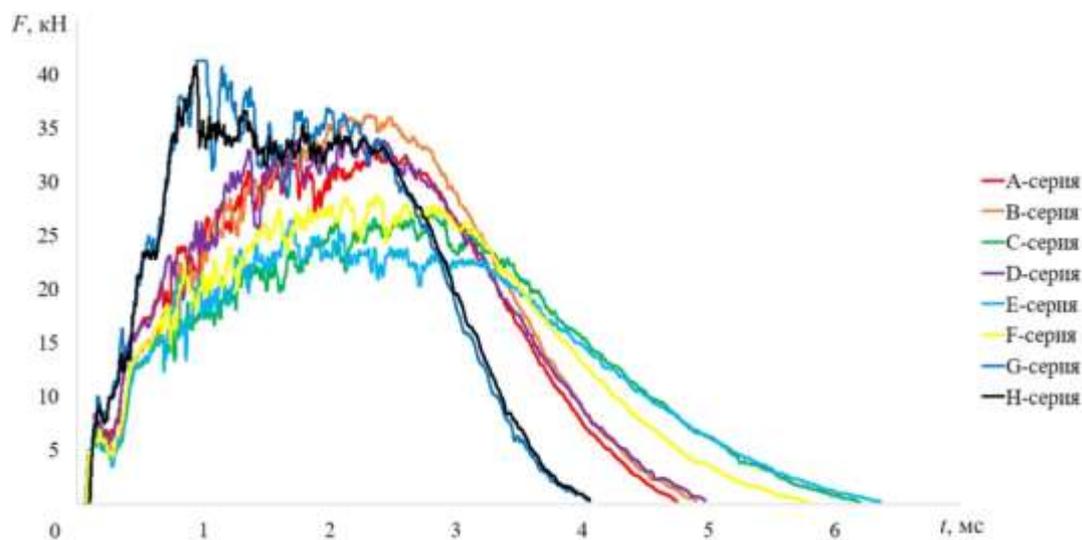
$$u = \sum_{i=0}^{i-1} u_i + t_{\text{sampling}} \frac{v_i + v_{i-1}}{2}, \quad (3)$$



a



б



в

Рис. 9. Зависимости силы от времени при различных потенциальных энергиях ударного воздействия на углепластиковые образцы: а – 30 Дж; б – 40 Дж; в – 50 Дж

Fig. 9. The dependence of force on time at various potential energies of impact on carbon-fiber specimens: a – 30 J; b – 40 J; c – 50 J

$$t_{\text{sampling}} = t_i - t_{i-1},$$

где t_{sampling} – время забора данных; v – скорость деформирования,

$$v_i = \int_i \frac{F(t) - gM}{M}. \quad (4)$$

Расчет энергии разрушения (работы) производился с помощью уравнения

$$A_i = \int_i F(u) du, \quad (5)$$

где A_i – работа разрушения в каждой точке функции деформации; $F(u)$ – кривая функции деформации.

При анализе поглощенная энергия рассчитывалась по формуле

$$A = \sum_{i=0}^{i-1} A_i + t_{\text{sampling}} \frac{F_i v_i + F_{i-1} v_{i-1}}{2}. \quad (6)$$

Расчет энергии повреждения позволял оценить степень поглощения ударного воздействия образцов-пластин углепластиковых композитов,

$$A_{\%} = \frac{A}{E} 100\%. \quad (7)$$

Стоит отметить, что практически для всех образцов степень поглощения при энергии удара 30 Дж составляла 82 %, при 40 Дж – 88 %, при 50 Дж – 91 %. Исключение составляет серия образцов «А» при энергии удара 40 Дж, у которой степень поглощения составляла 83 %, что почти на 6 % меньше других серий (рис. 10).

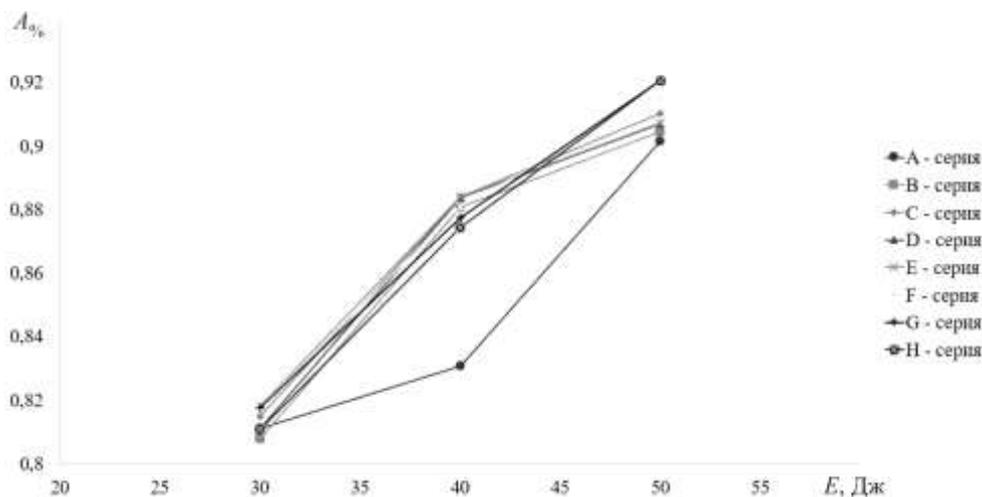


Рис. 10. Диаграмма степени поглощения удара углепластиковых образцов

Fig. 10. The diagram of the absorption degree of the impact against carbon-fiber samples

В результате замеров глубины участков повреждения (впадин) сразу после испытания h и через 7 сут h' [32], а также определения характерного размера несплошности методом шерографии D были получены линейные геометрические характеристики вмятин.

Целью измерения размеров участков повреждения материала после воздействия ударных нагрузок (измерение глубины вмятины и параметров шерографии) являлась оценка поврежденности материала после удара неразрушающими методами.

Каждый из описанных методов оценки поврежденности при неразрушающем контроле обладает определенной субъективностью и недостатками. Для увеличения объективности оценки поврежденности неразрушающими методами введем геометрическую характеристику Q , отражающую степень поврежденности образца после ударного воздействия с учетом всех данных неразрушающего контроля, – объем условного сегмента сферы-вмятины:

$$Q = \pi \cdot h_d'^2 \left(\frac{D}{2} - \frac{h_d'}{3} \right), \quad (8)$$

где Q – геометрический аналог степени поврежденности образца, мм^3 ; h_d' – глубина вмятины через 7 сут после удара, мм; D – размер несплошности образца, полученный методом шерографии, мм.

Влияние интенсивности ударного воздействия на геометрический аналог степени поврежденности представлено в виде диаграммы (рис. 11).

Рассматриваемые характеристики, $A_{\%}$ – степень поглощения удара и Q – геометрический аналог поврежденности материала, можно учитывать при анализе работоспособности материала конструкции после ударного воздействия, когда разрушающий контроль невозможен. Однако возникает вопрос, насколько эти величины реально отражают степень снижения несущей способности материала в конструкции и насколько они коррелируют? Ведь если подобная корреляция существует, то появляется возможность, проведя ограниченный объем испытаний образцов материала, достаточно надежно, по результатам неразрушающих методов контроля (обмеров глубины впадины, шерографии и пр.), делать прогноз поглощенной энергии и несущей способности конструкции из композиционных материалов в «полевых» условиях эксплуатации.

Для выявления наличия или отсутствия функциональной зависимости была построена диаграмма «степень поглощения удара от геометрического аналога поврежденности» углепластиковых образцов (рис. 12). На диаграмме у образцов серии «B» и «F» при относительно близких значениях поврежденности может быть различная степень поглощения удара при различной интенсивности удара. Однако для остальных серий материалов зависимость поглощенной энергии от фиксируемого объема нанесенного повреждения вполне может быть аппроксимирована прямой линией. И, по нашему мнению, можно ожидать, что при наработке необходимой статистики для каждого материала между этими параметрами будет возникать зависимость, близкая к линейной.

Для последующей оценки несущей способности необходимы сведения о сопротивлении поврежденного материала, например, при сжатии. Поэтому данное исследование согласно стандартным рекомендациям завершалось испытаниями на сжатие образцов композитных материалов (разрушающий контроль).

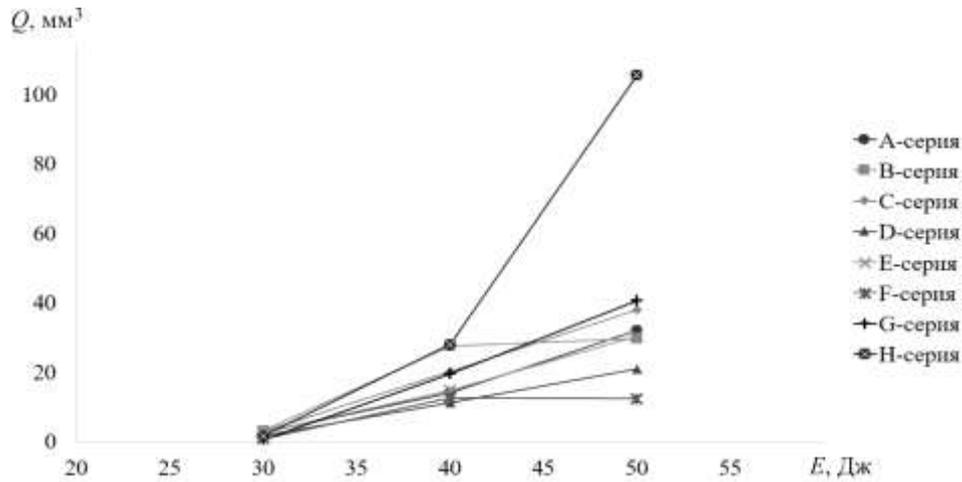


Рис. 11. Диаграмма зависимости поврежденности от потенциальной энергии удара углепластиковых образцов

Fig. 11. The diagram of damage-potential impact energy of the carbon-fiber specimens

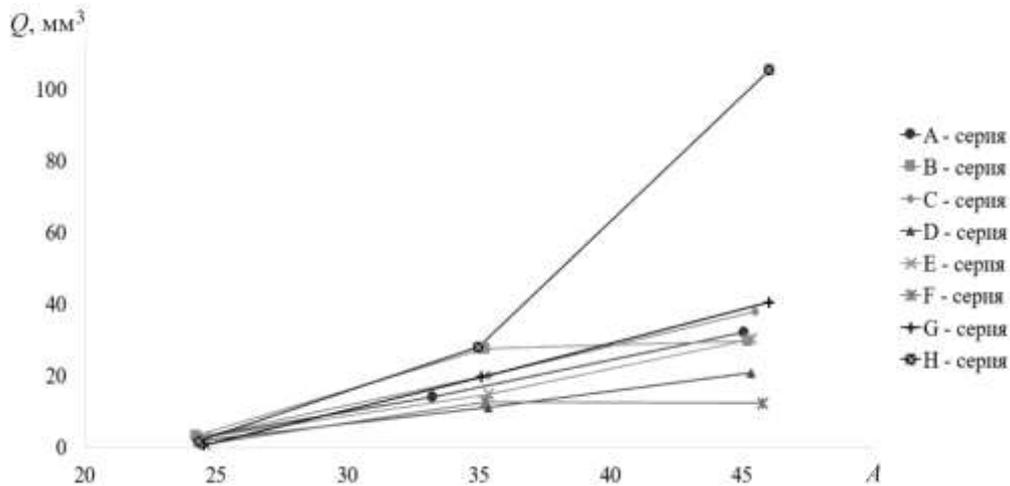


Рис. 12. Диаграмма зависимости геометрического аналога поврежденности углепластиковых образцов от степени поглощения удара

Fig. 12. The relation of the geometric analogue of the damage of carbon-fiber specimens on the degree of the impact absorption

Влияние интенсивности ударного воздействия на остаточные прочностные характеристики углепластиковых образцов-пластин отражает диаграмма зависимости относительных значений максимальной нагрузки при сжатии от энергии удара (рис. 13). При сжатии неповрежденные образцы серии «G» и «H» из 2D тканых преформ обладали более высокими характеристиками по сравнению с 3D-образцами. Однако после нанесения

повреждений благодаря наличию трансверсально ориентированных волокон в структуре материала образцов A- и B-серий снижение остаточных характеристик происходило менее чем на 20 % от номинальных значений при потенциальной энергии удара 50 Дж. У слоистых 2D-образцов снижение составляло более 60 % в аналогичных условиях воздействий. Образцы серии «C», «E», «F», в отличие от остальных, в процессе сжатия теряли

устойчивость и сминались, причем уровень несущей способности (самый низкий из представленных материалов) практически не менялся.

Для косвенной оценки остаточной прочности поврежденной зоны конструкции предлагается использовать диаграммы зависимостей остаточной относитель-

ной максимальной нагрузки при сжатии от работы поглощения удара углепластиковых образцов.

Линейные зависимости на диаграммах (рис. 14) с пространственными схемами армирования свидетельствуют о том, что вся энергия удара была поглощена образцом без механизмов расслаивания, за исключением образцов с слоистыми типами армирования.

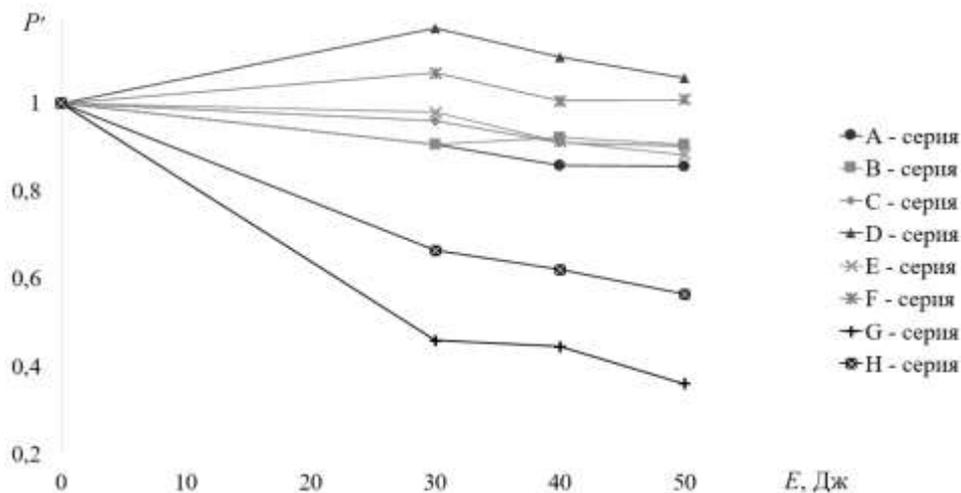


Рис. 13. Диаграмма зависимости относительных значений максимальной нагрузки при сжатии от энергии удара углепластиковых образцов

Fig. 13. The relation of the relative maximum load values in compression-impact energy of the carbon-fiber specimens

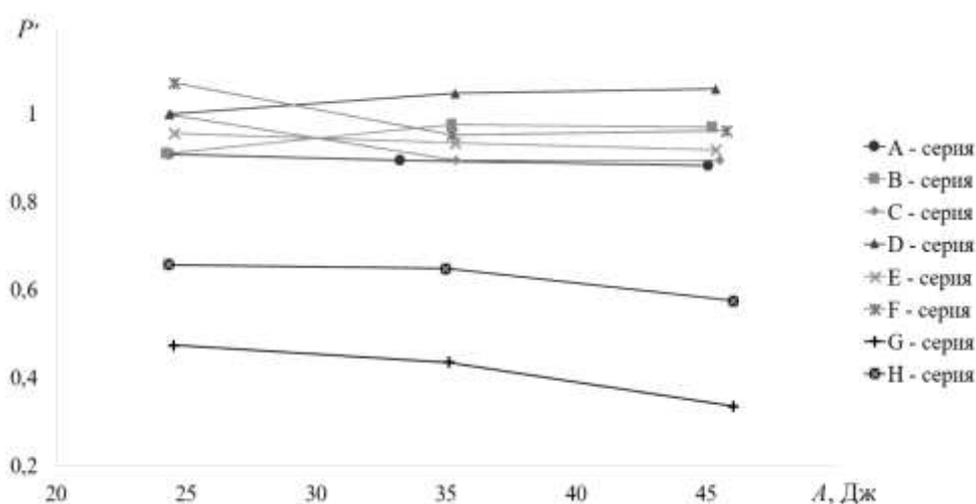


Рис. 14. Диаграмма зависимости относительных значений нагрузки при сжатии от работы поглощения удара

Fig. 14. The diagram of the load relative values under compression from the work of the impact absorption

Теперь, с учётом найденных функциональных зависимостей Q от A , можно однозначно определять несущую способность поврежденного участка конструкции из данного композиционного материала.

В рамках исследования было выявлено влияние предварительного ударного воздействия на деформационные свойства углепластиковых образцов. Для примера на рис. 15 представлена диаграмма нагружения образцов-пластин серии «А» при сжатии.

Предварительное ударное воздействие значительно влияет на поведение образцов-пластин компози-

онного материала на закритической стадии деформирования в процессе разрушения. Несмотря на то что ударное воздействие снижает значение максимальной разрушающей нагрузки (P , кН) при сжатии, протяженность участка равновесного деформирования имеет более выраженный характер. Предварительное ударное воздействие интенсивностью 30 Дж позволяет получать более протяженную кривую нагружения на стадии закритического деформирования без срывов, связанных с переходом к динамическому разрушению (см. рис. 15, кривая 2).

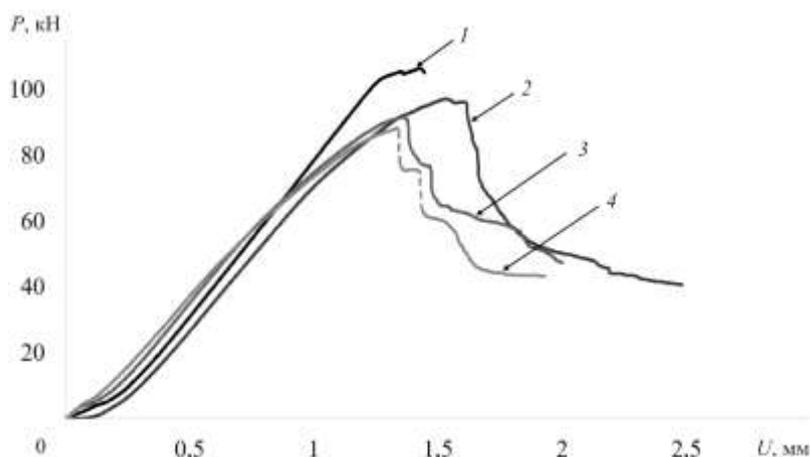


Рис. 15. Характерные диаграммы нагружения образцов-пластин при сжатии после удара: 1 – без ударного воздействия; 2 – удар с энергией 30 Дж; 3 – 40 Дж; 4 – 50 Дж; штриховой линией обозначены зоны динамического разрушения

Fig. 15. Characteristic loading diagrams of the sample plates under compression after the impact: 1 – without impact; 2 – impact with an energy of 30 J; 3 – 40 J; 4 – 50 J; the dashed line indicates the zones of dynamic fracture

Выводы

Таким образом, в рамках исследования предложена и апробирована методика оценки остаточной прочности углепластиковых композиционных материалов различной структуры с использованием системы неразрушающего контроля методом шерографии.

Предложен метод оценки несущей способности элементов конструкций при использовании геометрического аналога поврежденности. Введенная характеристика степени поврежденности, подкрепленная экспериментальными данными на сжатие, может быть использована для косвенной оценки остаточных механических свойств углепластиковых конструкций.

В результате реализации методики оценки поврежденности отмечено, что поврежденные углепластиковые образцы с пространственными схемами армирования при увеличении интенсивности ударного воздействия способны сохранять значение нагрузки при сжатии (несущая способность) по сравнению с слоистыми углепластиковыми образцами.

Рассчитана степень поглощения ударного воздействия образцов-пластин углепластиковых композитов. Проведен анализ влияния предварительного ударного

воздействия на остаточные прочностные и деформационные характеристики углепластиков. С повышением энергии удара происходит деградация остаточных прочностных свойств. Отмечено, что ударное воздействие влияет на характер разрушения образцов, появляется участок равновесного (стадийного) деформирования.

Благодарности

Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете с использованием оборудования ЦКП «Центр экспериментальной механики» (<http://www.ckp-rf.ru/ckp/353547/>) при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-01-00763 А).

Acknowledgements

The work was performed at Perm National Research Polytechnic University using the facilities of the Center for Experimental Mechanics (<http://www.ckp-rf.ru/ckp/353547/>) with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 18-01-00763 A).

Библиографический список

1. Bilisik K. Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review // *Textile Research Journal*. – 2012. – Vol. 82. – No. 7. – P. 725–743.
2. 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: Applied Science and Manufacturing*. – 1999. – Vol. 30. – No. 12. – P. 1445–1461.
3. Халиулин В.И., Батраков В.В. Анализ применения инновационных методов для производства интегральных конструкций из композитов // *Изв. высш. учеб. заведений. Авиационная техника*. – 2016. – № 3. – С. 129–133.

4. Полимерные композиционные материалы / С.Л. Баженов, А.А. Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян. – Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2010. – 352 с.
5. Garcia-Castillo Sh.K., Navarro C., Barbero E. Damage in preloaded glass/vinylester composite panels subjected to high-velocity impacts // *Mechanics Research Communications*. – 2014. – Vol. 55. – P. 66–71.
6. Impact response of thick composite plates under uniaxial tensile preloading / N. Guillaud, C. Froustey, F. Dau, P. Viot // *Composite Structures*. – 2015. – Vol. 121. – P. 172–181.
7. High velocity impact on preloaded composite plates / S. Heimbs, T. Bergmann, D. Schueler, N. Toso-Pentecôte // *Composite Structures*. – 2014. – Vol. 111. – P. 158–168.

8. Moallemzadeh A.R., Sabeta S.A.R., Abedini H. Preloaded composite panels under high velocity impact // *International Journal of Impact Engineering*. – 2018. – Vol. 114. – P. 153–159.

9. Lopresto V., Langella A., Papa I. Residual Strength evaluation after impact tests in extreme conditions on CFRP laminates // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 167. – P. 138–142.

10. Saghafi H., Minak G., Zucchelli A. Effect of preload on the impact response of curved composite panels // *Composites: Part B*. – 2014. – Vol. 60. – P. 74–81.

11. Martins R.D., Donadon M.V., Muller S.F. The effects of curvature and internal pressure on the compression-after-impact strength of composite laminates. de Almeida // *Journal of Composite Materials*. – 2016. – Vol. 50(6). – P. 825–848.

12. Оценка остаточной прочности элементов композитных конструкций после низкоскоростного удара / И.В. Сергеевичев, Ф.К. Антонов, А.А. Сафонов, А.Е. Ушаков // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2013. – № 1. – С. 36–44.

13. A Numerical Study on the impact behaviour of an all-Composite Wing-box / A. Riccio, R. Ricchiuto, M. Damiano, F. Scaramuzzino // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 88. – P. 54–61.

14. Analytical model to describe damage in CFRP specimen when subjected to low velocity impacts / M. Salvetti, A. Gilioli, C. Sbarufatti, K. Dragan, M. Chalimoniuk, A. Manes, M. Giglio // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 167. – P. 2–9.

15. Romano F., Di Caprio F., Mercurio U. Compression after impact analysis of composite panels and equivalent hole method // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 167. – P. 182–189.

16. Singh H., Hazarika B.Ch., Dey S. Low velocity impact responses of functionally graded plates // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 173. – P. 264–270.

17. Kursun A., Senel M., Enginsoy Halil M. Experimental and numerical analysis of low velocity impact on a preloaded composite plate // *Advances in Engineering Software*. – 2015. – Vol. 90. – P. 41–52.

18. Khan Sanan H., Sharma Ankush P., Parameswaran V. An Impact induced damage in composite laminates with intralayer and inter-laminate damage // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 173. – P. 409–416.

19. Singht H., Hazarika B.Ch., Dey S. Low velocity impact responses of functionally graded plates // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 173. – P. 264–270.

20. Ait-Mohammed M., Tarfaoui M., Hassoon O. Numerical investigation of the damage in composite materials under dynamic loads using a combination of intralaminare and interlaminare model // *American Society for Composites 31st Technical Conference and ASTM Committee D30 Meeting*

21. Heimbs S., Bergmann T. High-Velocity impact behaviour of prestressed composite plates under bird strike loading //

References

1. Bilisik K. Multiaxial three-dimensional weaving for composites: A review // *Textile Research Journal*. – 2012. – Vol. 82. – №7. – P. 725–743.

2. Mouritz A.P., Bannister M.K., Falzon P.J., Leong K.H. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 1999. – Vol.30. – № 12. – P. 1445–1461.

3. Analysis of innovative methods application for production of composite integral parts. Khaliulin V.I., Batrakov V.V. *Russian Aeronautics*. 2016. Vol. 59(3). pp. 433–437.

International Journal of Aerospace Engineering. – 2012. – P. 1–11. DOI: 10.1155/2012/372167

22. The effects of pressure dependent constitutive model to simulate concrete structures failure under impact loads / S.N Mokhtar, Y. Sonoda, A.F. Kamarudin, M.S. Md Noh, S. Tokumaru // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 995. – 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/995/1/012029

23. A repair criterion for impacted composite structures based on the prediction of the residual compressive strength / R. Borrelli, S. Franchitti, F. Di Caprio, U. Mercurio, A. Zallo // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 88. – P. 117–124.

24. Nikfar B., Njuguna J. Compression-after-impact (CAI) performance of epoxy-carbon fibre-reinforced nanocomposites using nanosilica and rubber particle enhancement // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 64. – 2014. – 012009 DOI: 10.1088/1757-899X/64/1/012009

25. Caminero M.A., García-Moreno I., Rodríguez G.P. Experimental study of the influence of thickness and ply-stacking sequence on the compression after impact strength of carbon fibre reinforced epoxy laminates // *Polymer Testing*. – 2018. – Vol. 66. – P. 360–370.

26. Compression after impact of flax/PLA biodegradable composites // *Polymer Testing*. – 2017. – Vol. 59. – P. 127–135.

27. Lemanle Sanga R.P., Garnier C., Pantalé O. Approaches to simulate impact damages on aeronautical composite structures // *AIP Conf. Proc.* – 1932, 030024-1–030024-11. DOI: 10.1063/1.5024174

28. Stacking sequence effects on damage onset in composite laminate subjected to low velocity impact / A. Riccio, G. Di Felice, S. Saputo, F. Scaramuzzino // *Procedia Engineering*. – 2014. – Vol. 88. – P. 222–229.

29. Воронов Л.В., Coles L.A., Нихамкин М.Ш. Экспериментальное исследование баллистического повреждения углепластика, используемого в авиационной технике // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2018. – № 54. – С. 5 16. DOI: 10.15593/2224-9982/2018.54.01

30. Experimental analysis of CFRP laminates subjected to compression after impact: The role of impact-induced cracks in failure / S. Rivallant, C. Bouvet, E. Abi Abdallah, B. Broll, J.-J. Barrau // *Composite Structures*. – 2014. – Vol. 111. – P. 147–157.

31. Numerical prediction of the low-velocity impact damage and compression after impact strength of composite laminates / W. Tan, B.G. Falzon, L.N.S. Chiu, M. Price // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 74. – 2015. – 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/74/1/012015

32. ASTM D7137 / D7137M – 17. Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates.

4. Polimernye kompozicionnye materialy: Nauchnoe izdanie / Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kul'kov A.A., Oshmyan V.G. – Dolgoprudnyj: Izdatel'skij dom «Intellekt», 2010. – 352 s.

5. Damage in preloaded glass/vinylester composite panels subjected to high-velocity impacts. Shirley K. Garcia-Castillo, Carlos Navarro, Enrique Barbero. *Mechanics Research Communications* Vol. 55. 2014. pp. 66 – 71.

6. Impact response of thick composite plates under uniaxial tensile preloading. N. Guillaud, C. Froustey, F. Dau, P. Viot. *Composite Structures*. Vol. 121. 2015. pp. 172 – 181.

7. High velocity impact on preloaded composite plates. S. Heimbs, T. Bergmann, D. Schueler, N. Toso-Pentecôte. *Composite Structures*. Vol. 111. 2014. pp. 158 – 168.
8. Preloaded composite panels under high velocity impact. A.R. Moallemzadeh, S.A.R. Sabeta, H. Abedini. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 114. 2018. pp. 153 – 159.
9. Residual Strength evaluation after impact tests in extreme conditions on CFRP laminates. V.Lopresto, A. Langella, I. Papa. *Procedia Engineering*. Vol. 167. 2016. pp. 138 – 142.
10. Effect of preload on the impact response of curved composite panels. H. Saghafi, G. Minak, A. Zucchelli. *Composites: Part B*. Vol. 60. 2014. pp. 74 – 81.
11. The effects of curvature and internal pressure on the compression-after-impact strength of composite laminates. R.D. Martins, M.V. Donadon, S.F. Muller de Almeida. *Journal of Composite Materials*. Vol. 50(6). 2016. pp. 825 – 848.
12. Estimation of residual strength of components of composite constructions after low-speed impact. Sergeichev I.V., Antonov F.K., Safonov A.A., Ushakov A.E. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. Vol. 42.(1). 2013. pp. 29-35.
13. A Numerical Study on the impact behaviour of an all-Composite Wing-box. A. Riccio, R. Ricchiuto, M. Damiano, F. Scaramuzzino. *Procedia Engineering*. Vol. 88. 2014. pp. 54 – 61.
14. Analytical model to describe damage in CFRP specimen when subjected to low velocity impacts. M. Salvetti, A. Gilioli, C. Sbarufatti, K. Dragan, M. Chalimoniuk, A. Manes, M. Giglio. *Procedia Engineering*. Vol. 167. 2016. pp. 2 – 9.
15. Compression After Impact Analysis of Composite Panels and Equivalent Hole Method. Fulvio Romano, Francesco Di Caprio, Umberto Mercurio. *Procedia Engineering*. Vol. 167. 2016. pp. 182 – 189.
16. Low velocity impact responses of functionally graded plates. H. Singh, B. Ch. Hazarika, S. Dey. *Procedia Engineering*. Vol. 173. 2017. pp. 264 – 270.
17. Experimental and numerical analysis of low velocity impact on a preloaded composite plate. Ali Kursun, Mehmet , Senel, Halil M. Enginsoy. *Advances in Engineering Software*. Vol. 90. 2015. pp. 41 – 52.
18. An Impact induced damage in composite laminates with intra-layer and inter-laminate damage. Sanan H Khan, Ankush P Sharma, Venkitanarayanan Parameswaran. *Procedia Engineering*. Vol. 173. 2017. pp. 409 – 416.
19. Low velocity impact responses of functionally graded plates. Hariveer Singht, Bulon Ch. Hazarika, Sudip Dey. *Procedia Engineering*. Vol. 173. 2017. pp. 264 – 270.
20. Numerical Investigation of the Damage in Composite Materials Under Dynamic Loads Using a Combination of Intralaminare and Interlaminare Model. M. Ait-Mohammed, M. Tarfaoui, O. Hassoon. *American Society for Composites 31st Technical Conference and ASTM Committee D30 Meeting*
21. High-Velocity Impact Behaviour of Prestressed Composite Plates under Bird Strike Loading. S.Heimbs, T. Bergmann. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2012. pp. 1 – 11. doi:10.1155/2012/372167
22. The effects of pressure dependent constitutive model to simulate concrete structures failure under impact loads. S.N Mokhtar, Y. Sonoda, A.F Kamarudin, M.S Md Noh, S. Tokumaru. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 995. 2018. doi:10.1088/1742-6596/995/1/012029
23. A Repair Criterion for Impacted Composite Structures Based on the Prediction of the Residual Compressive Strength. R. Borrelli, S. Franchitti, F. Di Caprio, U. Mercurio, A. Zallo. *Procedia Engineering*. Vol. 88. 2014. pp. 117 – 124.
24. Compression-after-impact (CAI) performance of epoxy-carbon fibre-reinforced nanocomposites using nanosilica and rubber particle enhancement. B Nikfar, and J Njuguna. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 64 (2014) 012009 DOI:10.1088/1757-899X/64/1/012009
25. Experimental study of the influence of thickness and ply-stacking sequence on the compression after impact strength of carbon fibre reinforced epoxy laminates. Caminero, M.A., García-Moreno, I., Rodríguez, G.P. *Polymer Testing*. Vol. 66. 2018. pp. 360-370.
26. Compression after impact of flax/PLA biodegradable composites. *Polymer Testing*. Vol. 59. 2017. pp. 127 – 135.
27. Approaches to simulate impact damages on aeronautical composite structures. R.P. Lemanle Sanga, C. Garnier, O. Pantalé. *AIP Conf. Proc.* 1932, 030024-1–030024-11. DOI: 10.1063/1.5024174
28. Stacking sequence effects on damage onset in composite laminate subjected to low velocity impact. A. Riccio, G. Di Felice, S. Saputo, F. Scaramuzzino. *Procedia Engineering*. Vol. 88. 2014. pp. 222 – 229.
29. Experimental study of impact damage of carbon-epoxy plastic for aviation structures. Voronov L.V., Coles L.A., Nikhamkin M. Sh., Silberschmidt V.V., Semenov S.V., Bolotov B.P. *Bulletin of the perm national research polytechnic university. Aerospace engineering*. Vol. 54. 2018. pp. 5 – 16. DOI: 10.15593/2224-9982/2018.54.01
30. Experimental analysis of CFRP laminates subjected to compression after impact: The role of impact-induced cracks in failure. S. Rivallant, C. Bouvet, E. Abi Abdallah, B. Broll, J.-J. Barrau. *Composite Structures* Vol. 111. 2014. pp. 147 – 157.
31. Numerical prediction of the low-velocity impact damage and compression after impact strength of composite laminates. W. Tan, B.G. Falzon, L.N.S. Chiu, M. Price. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 74 (2015) 012015. DOI:10.1088/1757-899X/74/1/012015
32. ASTM D7137 / D7137M – 17. Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates.