

Received: 24.04.2022

Revised: 22.07.2022

Accepted: 26.08.2022

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.4.037-049

COMPREHENSIVE EVALUATION OF FATIGUE DAMAGE ACCUMULATION AND FAILURE OF SPECIMENS WITH OPERATIONAL STRESS CONCENTRATORS

E. M. Strungar^{a)*}, O. A. Staroverov^{b)}, E. M. Lynegova^{c)}

*Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolskiy Ave., Perm, 614990, Russian Federation*

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0002-2246-8638>  cem.spaskova@mail.ru;

^{b)}  <https://orcid.org/0000-0001-6095-0962>  cem_staroverov@mail.ru;

^{c)}  <https://orcid.org/0000-0001-8829-3546>  cem.zubova@mail.ru

*Corresponding author. E-mail: cem.spaskova@mail.ru

Address for correspondence: Komsomolsky prospekt, 29, Perm, 614990, Russian Federation

Tel.: +7(342)219 87 34

The paper presents the results of studying the mechanical behavior of laminated carbon-fiber-reinforced plastic under complex low-velocity impact three-point bending followed by cyclic tension. An integrated approach to studying damage accumulation patterns is implemented with the use of state-of-the-art testing and diagnostic equipment. The residual fatigue life of the composite is related to the intensity of preliminary impact bending. The fields of temperature distribution in the active zone of the samples during the tests are shown. Data on damage accumulation obtained by recording acoustic emission signals are presented. Relation of the change in the recorded acoustic response signals to infrared thermal scanning data has been detected, which is supported by the results of an experimental study. The use of additional equipment for infrared thermal scanning and recording of acoustic emission signals gives a complete picture of damage accumulation and failure in composite materials, with a good agreement with experimental data.

Keywords: experimental mechanics, low-velocity impact, cyclic bending, fatigue life, acoustic emission, infrared thermal scanning.

Acknowledgment

The experimental study was performed in the Perm National Research Polytechnic University and financially supported by a grant of the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists (grant No. MK-1545.2022.4).

The experimental investigations on estimating fatigue damage accumulation were made under the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FSNM-2020-0027).

References

1. Bogenfeld R., Schmiedel P., Kuruvadi N., Wille T., & Kreikemeier J. An experimental study of the damage growth in composite laminates under tension-fatigue after impact. *Composites Science and Technology*, 2020, 108082. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.10.
2. Kang K.W., Kim J.K., & Kim H.S. Fatigue Behavior of Impacted Plain-Weave Glass/Epoxy Composites under Tensile Fatigue Loading. *Key Engineering Materials*, 2005, vols. 297–300, pp. 1291–1296. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.297-300.1291.

3. Feng Y., He Y., Tan X., An T., & Zheng J. Investigation on impact damage evolution under fatigue load and shear-after-impact-fatigue (SAIF) behaviors of stiffened composite panels. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 100 (1), pp. 308–321. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.03.046.
4. Cantwell W.J., Morton J. The impact resistance of composite materials – a review. *Composites*, 1991, vol. 22 (5), pp. 347–362. DOI: 10.1016/0010-4361(91)90549-V.
5. Staroverov O.A., Strungar E.M., Wildemann V.E. Evaluation of the survivability of CFRP honeycomb-cored panels in compression after impact tests. *Frattura ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity)*, 2021, vol. 15 (56), pp. 115. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.56.01.
6. Tai N., Yip M., & Lin J. Effects of low-energy impact on the fatigue behavior of carbon/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 1998, vol. 58 (1), pp. 1–8. DOI: 10.1016/S0266-3538(97)00075-4.
7. 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. (In Russian).
8. Suh S.S., Han N.L., Yang J.M., Hahn H.T. Compression behavior of stitched stiffened panel with a clearly visible stiffener impact damage. *Composite Structures*, 2003, vol. 62, No. 2, pp. 213–221. DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00116-8.
9. 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. (In Russian).
10. Tsigkourakos G., Silberschmidt Vadim V., Ashcroft Ian A. Damage analysis of CFRP under impact fatigue. *Shock and Vibration*, 2012, vol. 19, pp. 573–584. DOI 10.3233/SAV-2011-0651.
11. Lobanov D.S., Wildemann V.E., Spaskova E.M., Chikhachev A.I. Experimental investigation of the defects influence on the composites sandwich panels strength with use digital image correlation and infrared thermography methods. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, No. 4. pp. 159–170. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.10. (In Russian).
12. Staroverov O., Tretyakov M., Wildemann V. Tests features of composite materials under complex mechanical loads. *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 918. DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012115.

Подана в журнал: 24.04.2022

УДК 620

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.4.037-049

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ УСТАЛОСТНОГО НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ХАРАКТЕРА

Е. М. Струнгарь^{а)*}, О. А. Староверов^{б)}, Е. М. Лунегова^{в)}

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
д. 29, Комсомольский проспект, г. Пермь, Пермский край, 614990, Российская Федерация*

^{а)}  <https://orcid.org/0000-0002-2246-8638>  cem.spaskova@mail.ru;

^{б)}  <https://orcid.org/0000-0001-6095-0962>  cem_staroverov@mail.ru;

^{в)}  <https://orcid.org/0000-0001-8829-3546>  cem.zubova@mail.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: cem.spaskova@mail.ru

Адрес для переписки: пр. Комсомольский, д. 29, г. Пермь, 614990, Пермский край, Российская Федерация
Тел.: +7(342)219–87–34

В работе представлены результаты исследования механического поведения слоисто-волокнутого углепластика при комплексном низкоскоростном ударном трехточечном изгибе и последующем циклическом растяжении. Реализован комплексный подход при изучении закономерностей процессов накопления повреждений с использованием современного испытательного и диагностического оборудования. Установлена зависимость остаточной усталостной долговечности исследуемого композита от интенсивности предварительного ударного изгиба. Показаны поля распределения температур в рабочей зоне образцов в ходе испытаний. Приведены данные о процессах накопления повреждений, полученные при регистрации сигналов акустической эмиссии. Выявлена связь изменения регистрируемых сигналов акустического отклика и данных инфракрасного термосканирования, подкрепленная результатами экспериментального исследования. Использование дополнительной аппаратуры инфракрасного термосканирования и регистрации сигналов акустической эмиссии дает полную картины накопления повреждений и разрушения композиционных материалов при хорошей корреляции с экспериментальными данными.

Ключевые слова: экспериментальная механика, низкоскоростной удар, циклический изгиб, усталостная долговечность, акустическая эмиссия, инфракрасное термосканирование.

1. Введение

Композиты замещают традиционные металлы и сплавы во многих отраслях, включая авиационную, космическую, строительную, автомобильную, нефтехимическую и т. п., за счет меньшего удельного веса при относительно равных физико-механических характеристиках, что позволяет внедрять их в ответственные высоконагруженные конструкции и детали. Данные об изменении остаточных механических характеристик, допустимых повреждениях позволяют увеличивать ресурс эксплуатации, живучесть и безопасность разрушения конструкций из композитов. Одними из самых опасных воздействий, которые могут возникнуть при эксплуатации, являются низкоскоростные удары, ориентированные в перпендикулярном направлении относительно ориентации армирующих слоев. Данные виды нагрузок способствуют возникновению межслоевых трещин в структуре материала, что впоследствии может привести к расслоению и снижению эксплуатационных характеристик конструкций из композитов [1–4]. Основными методами исследований при таких видах воздействий являются испытания на локальный удар падающим грузом с полусферическим наконечником и сжа-

тие после удара с оценкой остаточной прочности композиционных ламинатов [5–9]. При этом зафиксировать наличие новых дефектов при визуальном осмотре без специализированной аппаратуры затруднительно. В работах, которые ориентированы на материалы, используемые в гражданской авиации, к таким видам воздействий относят крупный град, падающий на наружную обшивку фюзеляжа, лед и камни на полосе, попадающие в двигатель самолета на взлете, случайно брошенный инструмент при монтаже звукопоглощающих панелей.

В литературе отмечается перспективность комплексного подхода с использованием обширного спектра испытательного и диагностического оборудования при изучении механического поведения композитов [10]. Например, в работе [11] проведен анализ возможностей и ограничений рентгеновского микро-КТ-сканирования для оценки ударных повреждений, вызванных циклическими испытаниями. В работе [12] объектами исследования являются конструктивно подобные элементы – образцы звукопоглощающих панелей с искусственно нанесенным дефектом типа сквозного пробоя – после локального ремонта. Для контроля внутренней геометрии образца и оценки возможных дефектов осуществлялась тепловая дефектоскопия с помощью инфракрасной тепловизионной системы.

Использование дополнительной аппаратуры инфракрасного термосканирования, регистрации сигналов акустической эмиссии, контроля полей перемещений и деформаций, подкрепленные результатами микроструктурного анализа, дают полноту картины накопления повреждений и разрушения композиционных материалов при хорошей корреляции с экспериментальными данными.

Главной целью данной работы является получение новых опытных данных, отражающих закономерности изменения остаточной усталостной долговечности углепластиков после предварительных ударов различной интенсивности, а также оценка процессов усталостного накопления повреждений и разрушения поврежденных образцов с использованием результатов инфракрасного термосканирования, регистрации сигналов акустической эмиссии и микроструктурного анализа картин изломов.

2. Материал и методика

Объектом исследования являлись углепластиковые композиты в форме прямоугольных полос, изготовленных на основе препрега ВКУ-39 и связующего ВСЭ 1212 со схемой армирования $[0^\circ/90^\circ]_n$ методом автоклавного формования.

Для реализации режимов предварительного удара различной интенсивности использовался электродинамический копер Instron CEAS 9350 с диапазоном потенциальной энергии воздействия от 0,7 до 1800 Дж. Циклические испытания проведены на сервогидравлической испытательной системе Instron 8850, которая позволяла нагружать образцы с растягивающими усилиями до 100 кН и частотой до 100 Гц. Номинальные значения предела прочности определялись из испытаний на квазистатическое растяжение с использованием электромеханической системы Instron 5882.

Также в данной работе использованы системы регистрации сигналов акустической эмиссии AMSY-6 и инфракрасного термосканирования Flir SC 7700 M.

Запись сигналов осуществлялась с помощью многоканальной системы AMSY-6 фирмы Vallen GmbH (Германия) от начала испытания до полного разрушения образца. Использовались широкополосные пьезоэлектрические датчики AE105A (частотный диапазон 450–1150 кГц) и усилитель (коэффициент усиления 34 дБ). Датчики крепились на образцы с помощью высоковакуумной силиконовой смазки Wacker Silicon и резинок. Частота дискретизации данных 10 МГц, пороговое значение при регистрации сигналов АЭ составляло 40 дБ.

Метод инфракрасной термографии широко применяется при проведении механических исследований с целью получения детальной информации о закономерностях накопления энергии в процессе деформирования материалов.

В процессе циклического растяжения для контроля изменения температуры на поверхности рабочей части образцов использовалась инфракрасная тепловизионная система FLIR SC7700M. Тепловизор оснащен детектором типа «кадмий–ртуть–теллур», обладает разрешением 640×512 пикселей, скоростью регистрации 115 Гц (при полном разрешении) и чувствительностью <math><0,025\text{ }^\circ\text{C}</math>. Для полимерных композиционных материалов крайне необходимо отслеживать температуру образцов в процессе циклического нагружения, так как внутренний саморазогрев образцов существенно сказывается на значении усталостной долговечности. Синхронизация акустической и тепловизионной систем с контроллером испытательной машины в процессе испытания осуществлялась посредством блока АЦП (NI USB-6251). На рис. 1 представлена фотография испытательного и диагностического оборудования, используемого в исследовании.



Рис. 1. Фотографии диагностических систем и испытательной машины (а) и образца, установленного в захваты испытательной системы, с датчиком регистрации сигналов акустической эмиссии (б)

Исследование проведено при реализации предварительного поперечного удара падающим грузом по схеме трехточечного изгиба и последующего циклического растяжения. Удары производились падающим грузом с наконечником конической формы, соизмеримым с шириной образца [13].



Рис. 2. Фотографии установленного образца (а) и образца после проведения испытания на удар падающим грузом по схеме трехточечного изгиба (б)

В соответствии с разработанной методикой определено значение временного сопротивления разрыву (σ_B) исследуемого углепластика из испытаний на квазистатическое растя-

жение. Номинальное значение усталостной долговечности (N_{max}) получено из испытаний при параметрах с максимальным значением напряжений в цикле $\sigma_{max} = 0,75 \cdot \sigma_B$, коэффициентом асимметрии $R = 0,1$ и частотой $\nu = 20$ Гц. При установочных испытаниях частота и амплитуда нагружения подбирались таким образом, чтобы разогрев образца не превышал 20°C относительно температуры начала испытания. Из опытов на ударный изгиб определена потенциальная энергия (E_{max}), при которой происходило разрушение образцов. В дальнейшем испытания на предварительный удар по схеме трехточечного изгиба (рис. 2) проводились в диапазоне от 0,3 до 0,9 от энергии разрушения ($e' = E_{уд}/E_{max}$).

Однократные удары производились по всей ширине образцов. На каждом уровне воздействия, включая испытания на ударный изгиб и циклическое растяжение до разрушения, было испытано по 3 образца. Всего было испытано 24 образца.

3. Результаты и обсуждение

В соответствии с предложенной методикой исследования были проведены испытания на квазистатическое и циклическое растяжение, а также ударный изгиб для определения номинальных значений механических характеристик исследуемого углепластикового композита, которые были использованы при установке параметров предварительного воздействия.

В результате испытаний на трехточечный удар падающим грузом и последующее циклическое растяжение получены опытные зависимости остаточной усталостной долговечности от энергии предварительного ударного изгиба, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний

Энергия удара $E_{уд}$, Дж	Усталостная долговечность N_{max} , цикл		
	Среднее \bar{X}	Среднеквадратическое отклонение S_{n-1}	Коэффициент вариации CV
0	1156336	31849	2,75
1,00	1104153	24722	2,24
1,50	833894	51730	6,20
2,00	475088	87876	18,50
2,25	80304	61486	76,57
2,50	14615	13748	94,07
2,75	5916	9677	163,58

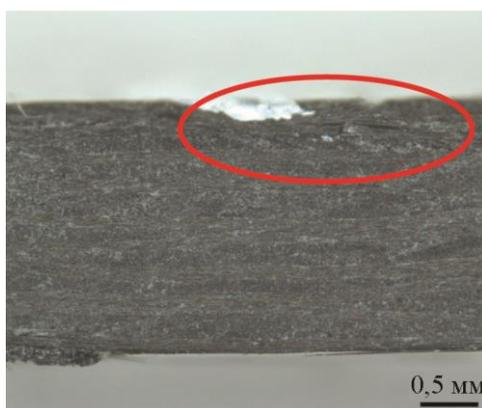


Рис. 3. Фотография углепластикового образца после удара падающим грузом с энергией $e' = 0,33$

При анализе данных можно отметить, что остаточная долговечность исследуемых углепластиковых образцов значительно, более чем на 10 % от номинального значения, снижалась при ударах свыше 1 Дж, что соответствовало $e' = 0,33$. При ударах с энергиями $e' = 0,33$ вблизи поверхности, по которой наносился удар, образовывались трещины от контакта с ударником, при этом на лицевой и тыльной сторонах образцов трещин, вмятин, сколов и других видов повреждений, которые можно обнаружить при визуальном осмотре, не наблюдалось (рис. 3).

Воздействие с энергиями удара в диапазоне от $e' = 0,5$ до $e' = 0,66$ приводили к появлению трещин вблизи тыльной стороны по отношению к месту удара. При увеличении энергии удара образовывались дефекты в виде расслоений (рис. 4).

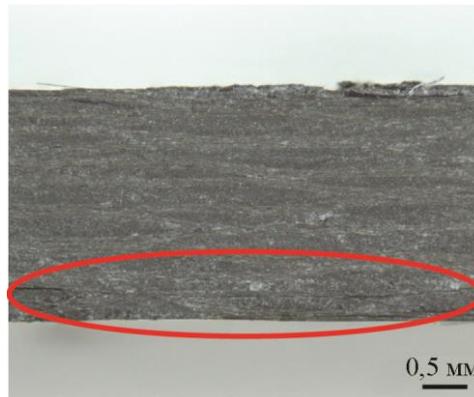


Рис. 4. Фотография углепластикового образца после удара падающим грузом с энергией $e' = 0,5$

В дальнейшем падение груза с интенсивностью в диапазоне от $e' = 0,75$ до $e' = 0,9$ способствовали смешанным типам повреждений в виде расслоений и трещин в поперечном направлении с локальным разрушением волокон (рис. 5).

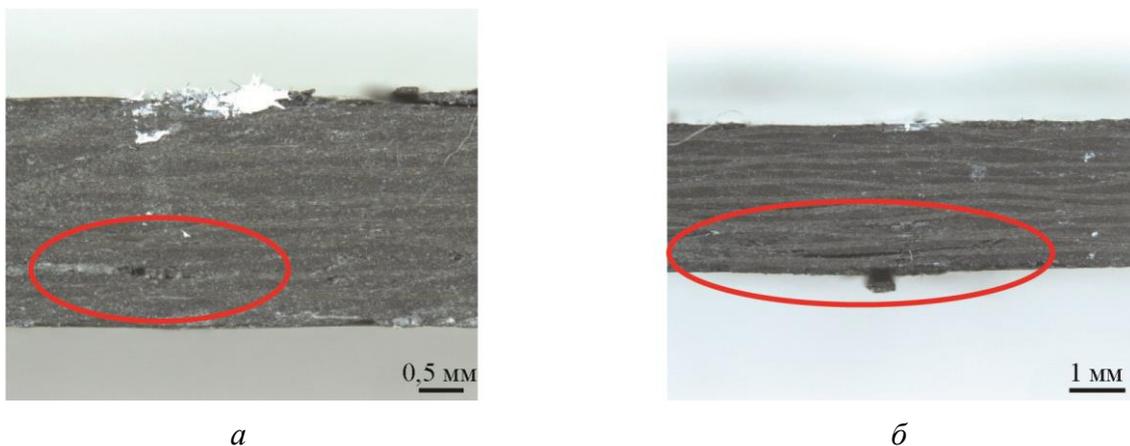


Рис. 5. Фотографии углепластиковых образцов после удара падающим грузом с энергией $e' = 0,75$ (а) и $e' = 0,9$ (б)

Анализ изломов углепластиковых образцов при усталостном разрушении без предварительного ударного изгиба позволяет сделать вывод, что механизмы накопления повреждений и разрушения были без локализации по всей рабочей зоне образцов (рис. 6 а). Разрушение образцов после удара и последующего циклического воздействия происходило с поперечным разрывом армирующих волокон и межслоевыми трещинами (рис. 6 б).

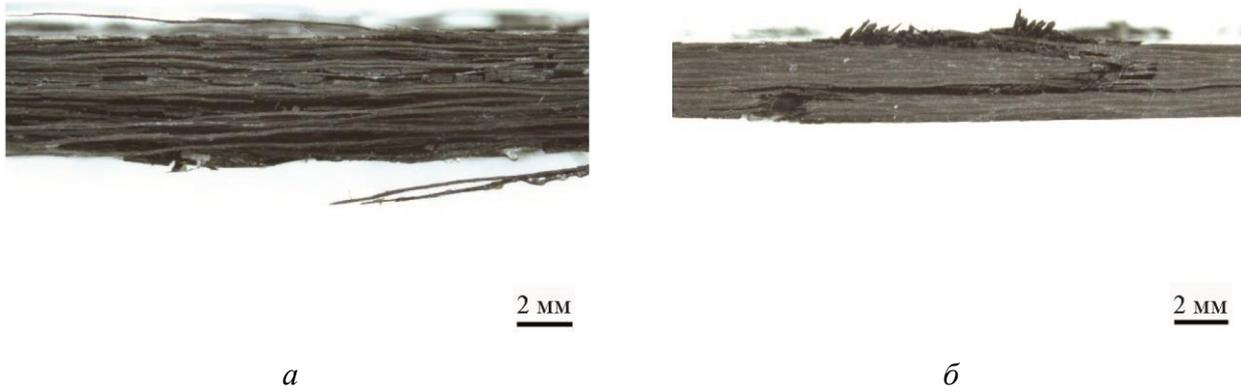


Рис. 6. Фотографии углепластиковых образцов после усталостного разрушения без предварительного удара (а) и с ударом $e' = 0,9$ (б)

С целью оценки интенсивности процессов накопления повреждений рассмотрены зависимости изменения максимальной температуры ΔT от времени циклического воздействия. Значение ΔT определялось как разница между текущим значением максимальной температуры образца в процессе циклического нагружения и начальным.

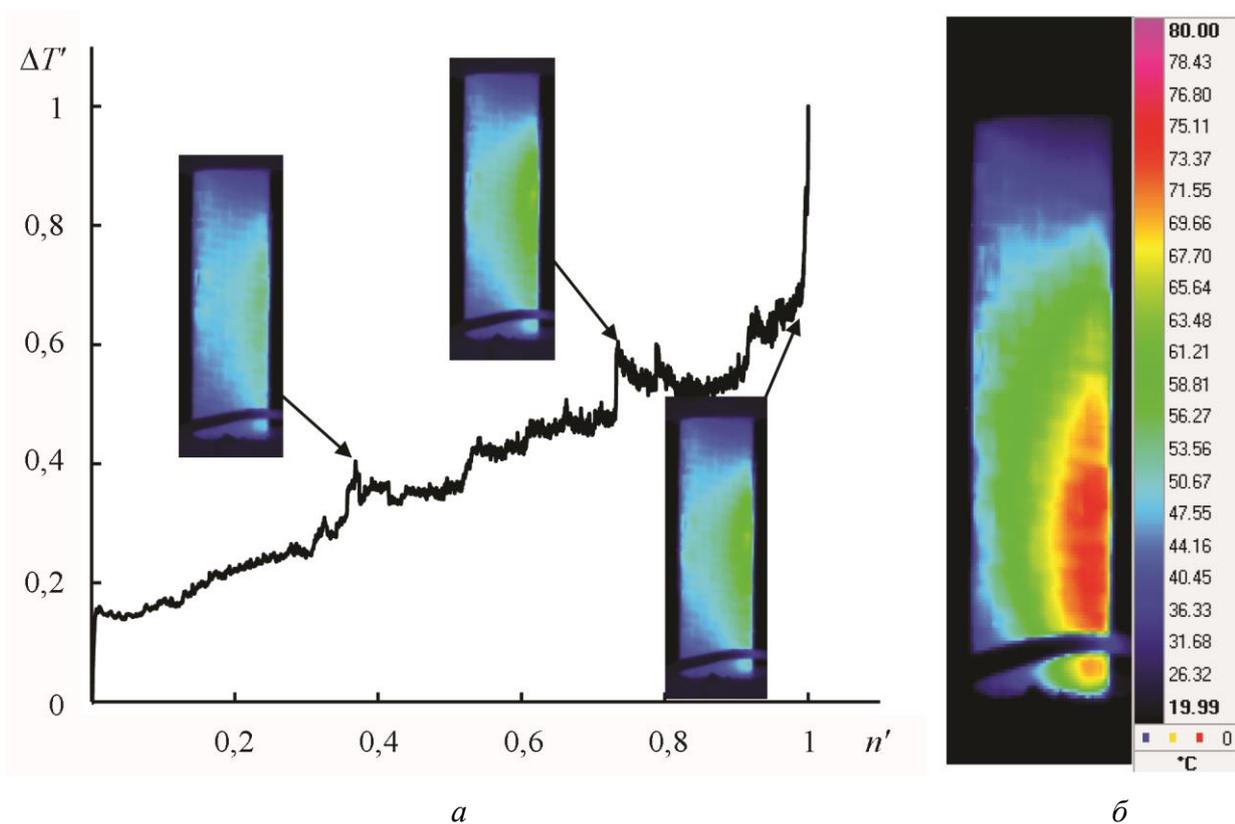


Рис. 7. Диаграмма зависимости изменения относительного значения максимальной температуры образца от продолжительности циклического растяжения (а) и распределение температурных полей в рабочей зоне образца (б)

В качестве информативного параметра сигналов АЭ использовался энергетический параметр (E , eu), где $1 \text{ eu} = 10^{-14} \text{ В}^2\text{с}$. Путем суммирования данного параметра были получены значения кумулятивной энергии (E_{cum}), отражающие степень накопления дефектов в материале под действием нагрузки в течение всего испытания.

Для удобства анализа зависимость изменения максимальной температуры ΔT , кумулятивная энергия E_{cum} и продолжительность циклического растяжения n были представлены в относительных единицах: $\Delta T'$, E'_{cum} , n' .

Полученные опытные данные приведены в виде зависимостей изменения относительного значения максимальной температуры образца $\Delta T'$ от продолжительности циклического растяжения (рис. 7 а). Изображение распределения температурных полей в рабочей зоне образца приведено на рисунке 7 б.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что кривая, описывающая изменение значения максимальной температуры, имеет монотонный характер. В процессе циклического нагружения на поверхности образца наблюдалось равномерное распределение полей температур вплоть до появления локализованного разогрева, предшествующего усталостному разрушению (рис. 7 а).

При ударах с энергиями в диапазоне от $e' = 0,50$ до $e' = 0,66$ процессы усталостного накопления повреждений происходили в несколько стадий (рис. 8 и 9), что подтверждалось качественным совпадением результатов. В данном случае наблюдается, что рост кумулятивной энергии сигналов АЭ начинается тогда, когда образец выдержал 40 % от предельного количества циклов нагружения. Активный рост энергии регистрируется до момента, когда образец простоял приблизительно 65 % от предельного количества циклов нагружения. Затем рост кумулятивной энергии уменьшается, о чем говорит изменение наклона кривой $E'_{cum} \sim n'$ при $0,65 < n' < 1$. Вид кривой кумулятивной энергии качественно соотносится с видом кривой зависимости изменения относительного значения максимальной температуры образца $\Delta T'$ от продолжительности циклического растяжения.

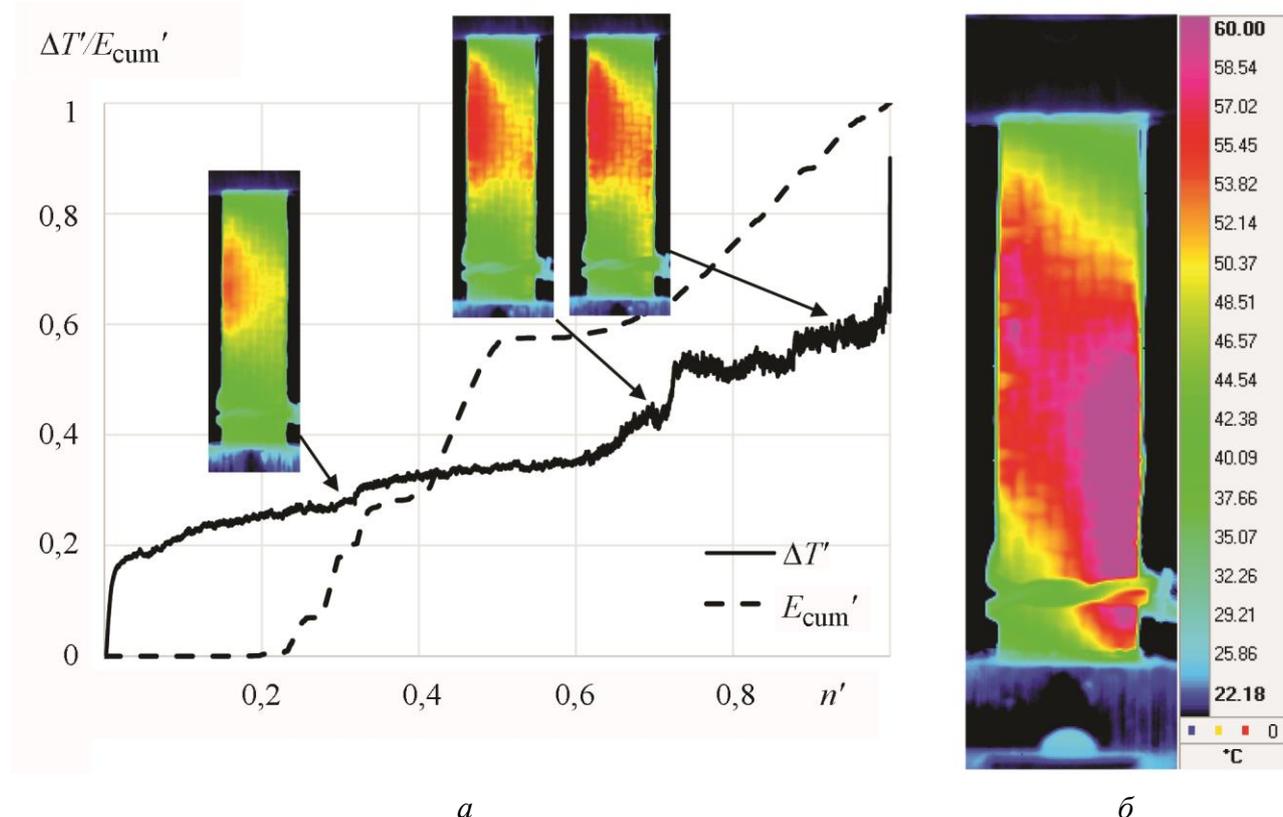


Рис. 8. Совмещенная диаграмма зависимости изменения относительного значения максимальной температуры образца и изменения кумулятивной энергии сигналов АЭ от продолжительности циклического растяжения с предварительным ударом $e' = 0,50$

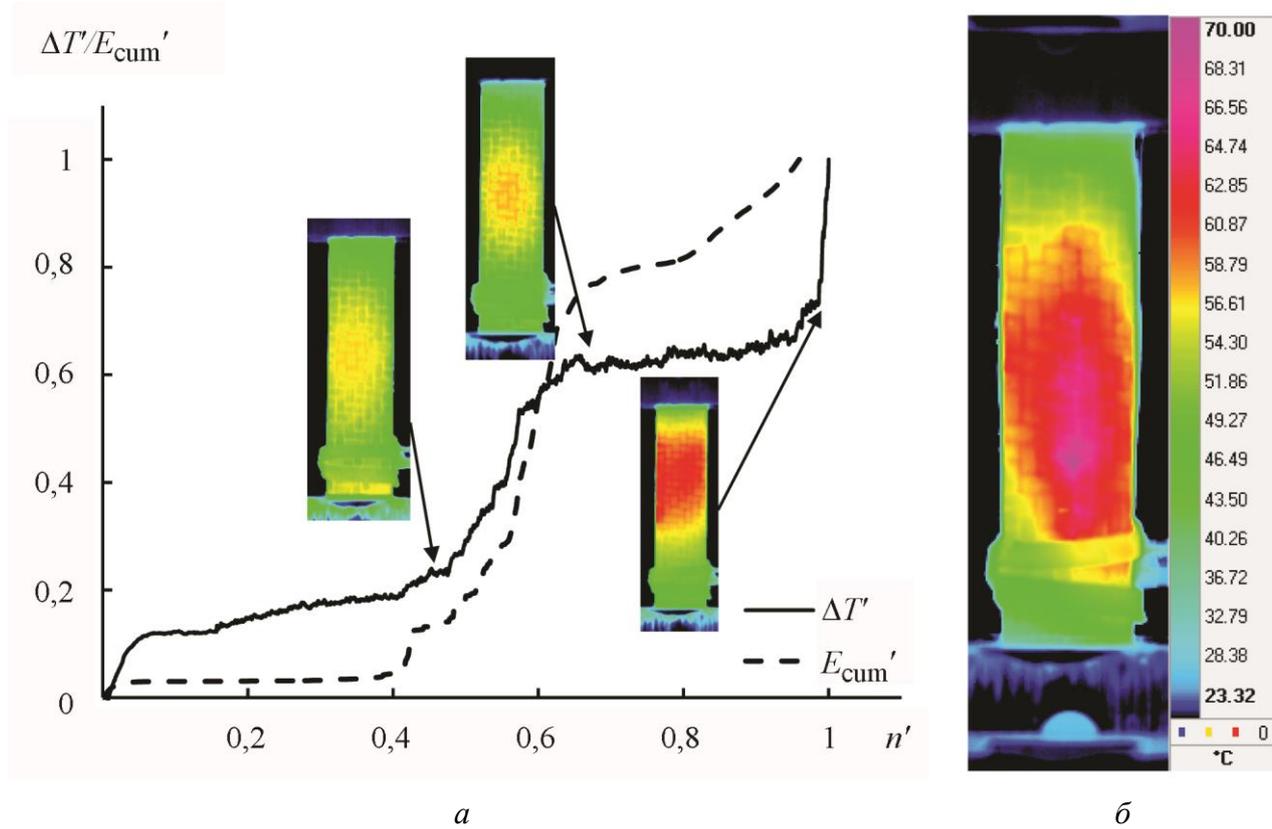


Рис. 9. Совмещенная диаграмма зависимости изменения относительного значения максимальной температуры образца и изменения кумулятивной энергии сигналов АЭ от продолжительности циклического растяжения с предварительным ударом $e' = 0,66$

Предварительные удары с энергиями в диапазоне от $e' = 0,75$ до $e' = 0,9$ (рис. 10 и 11) приводили к значительному разогреву на стадии первых циклов. Локализованное повышение температуры наблюдалось в зоне удара. Для данного образца (рис. 10) можно отметить, что интенсивный рост кумулятивной энергии сигналов АЭ, в отличие от образца, подвергнутого предварительному удару $e' = 0,66$, начинается с самого начала циклического нагружения. Активный рост энергии регистрируется до момента, когда образец простоял приблизительно 40 % от предельного количества циклов нагружения. Затем рост кумулятивной энергии уменьшается, о чем говорит изменение наклона кривой $E'_{cum} \sim n'$ при $0,4 < n' < 1$. Вид кривой кумулятивной энергии качественно соотносится с видом кривой зависимости изменения относительного значения максимальной температуры образца $\Delta T'$ от продолжительности циклического растяжения.

В результате сопоставления данных эксперимента, термографии и сигналов акустической эмиссии выявлено, что изменение характера усталостного накопления повреждений и последующего разрушения связано с дефектами, образованными после предварительного удара. Удары с энергиями, превышающими порог ударной чувствительности, способствовали возникновению межслоевых трещин в структуре материала, что, в свою очередь, приводило к ступенчатому характеру накопления повреждений.

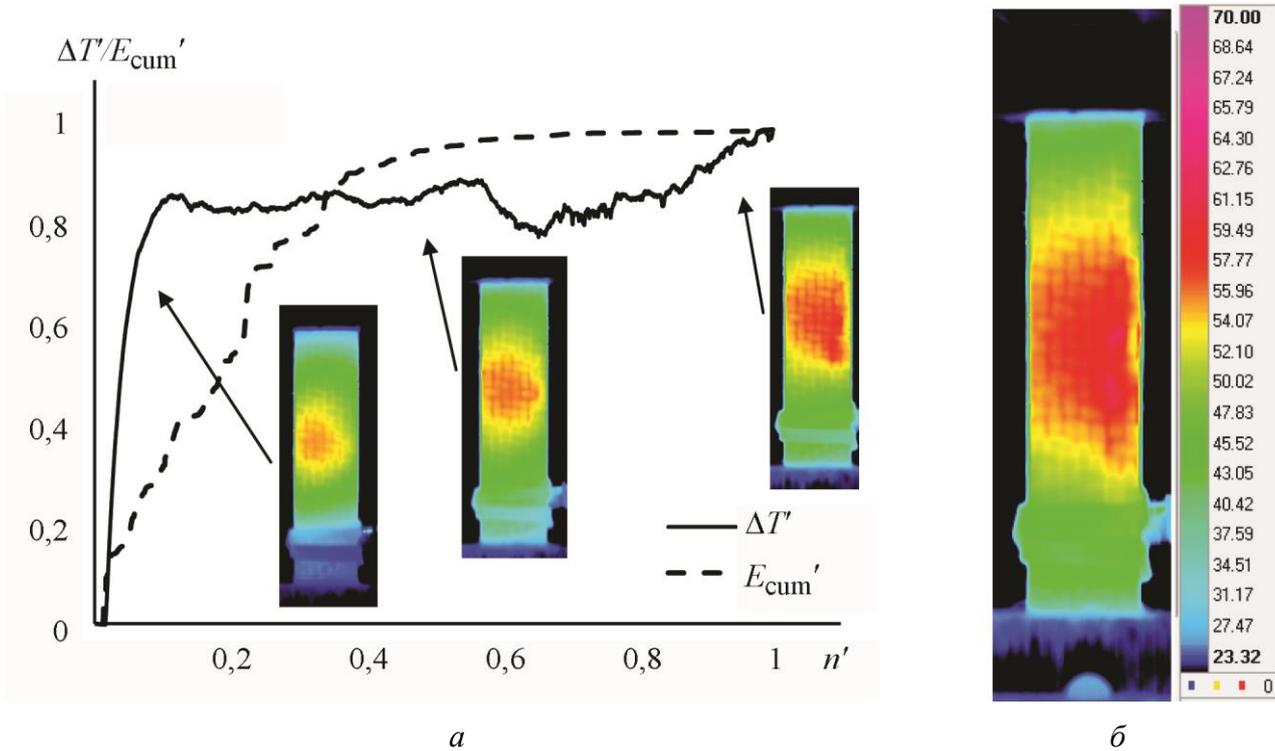


Рис. 10. Совмещенная диаграмма зависимости изменения относительного значения максимальной температуры образца и изменения кумулятивной энергии сигналов АЭ от продолжительности циклического растяжения с предварительным ударом $e' = 0,75$

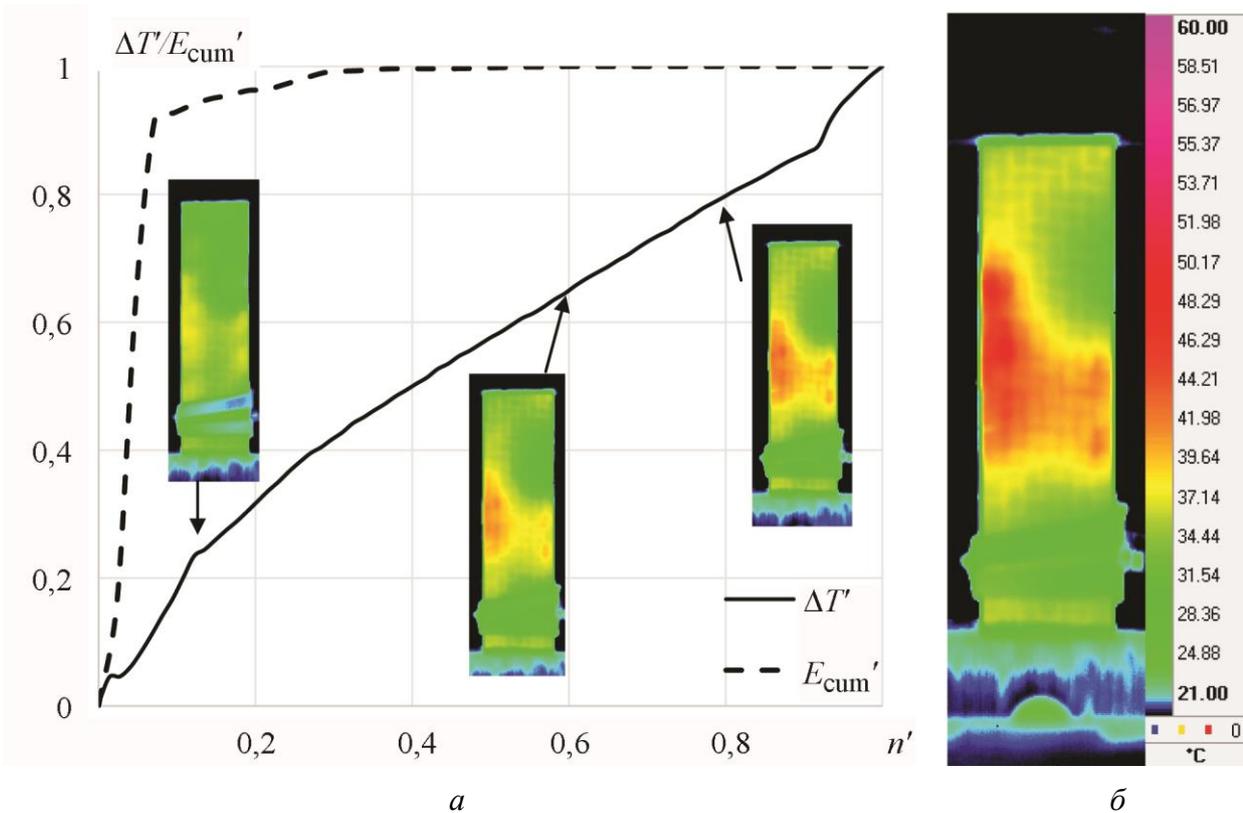


Рис. 11. Совмещенная диаграмма зависимости изменения относительного значения максимальной температуры образца и изменения кумулятивной энергии сигналов АЭ от продолжительности циклического растяжения с предварительным ударом $e' = 0,90$

4. Заключение

В результате получены экспериментальные зависимости влияния различной интенсивности ударного изгиба на остаточную усталостную долговечность углепластиковых образцов. Установлено, что изменение характера усталостного накопления повреждений и последующего разрушения связано с дефектами, образованными после предварительного удара. Предварительное ударное воздействие способствовало возникновению межслоевых трещин в структуре материала, что, в свою очередь, приводило к ступенчатому характеру накопления повреждений. При энергиях удара, близких к энергиям разрушения, в структуре материала наблюдался локальный разрыв волокон, характер усталостного накопления повреждений был интенсивным с самого начала, что подтверждается распределением полей температур в виде локализованного разогрева и видом кривых, описывающих изменение относительного значения максимальной температуры и изменение кумулятивной энергии сигналов АЭ. В работе показана корреляция опытных данных по изменению механических характеристик с результатами обработки данных из систем регистрации сигналов акустической эмиссии и инфракрасного термосканирования, подкрепленная микроструктурным анализом изломов образцов. С помощью инфракрасной тепловизионной системы зарегистрированы внутренняя структура, процессы развития дефектов, а также распределение температур на поверхности испытываемого образца. В результате комплексного анализа механического поведения углепластиковых образцов с использованием дополнительных средств регистрации при циклических испытаниях можно сделать вывод о высокой эффективности комбинированного использования испытательного и диагностирующего оборудования.

Благодарность

Результаты экспериментального исследования выполнены в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (Грант МК-1545.2022.4).

Экспериментальные исследования в рамках оценки процессов усталостного накопления повреждений проводились в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSNM-2020-0027).

Литература

1. An experimental study of the damage growth in composite laminates under tension-fatigue after impact / R. Bogenfeld, P. Schmiedel, N. Kuruvadi, T. Wille, & J. Kreikemeier // *Composites Science and Technology*. – 2020. – 108082. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.10.
2. Kang K. W., Kim J. K., & Kim H. S. Fatigue Behavior of Impacted Plain-Weave Glass/Epoxy Composites under Tensile Fatigue Loading // *Key Engineering Materials*. – 2005. – Vols. 297–300. – P. 1291–1296. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.297-300.1291.
3. Investigation on impact damage evolution under fatigue load and shear-after-impact-fatigue (SAIF) behaviors of stiffened composite panels / Y. Feng, Y. He, X. Tan, T. An, & J. Zheng // *International Journal of Fatigue*. – 2017. – Vol. 100 (1). – P. 308–321. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.03.
4. Cantwell W. J., Morton J. The impact resistance of composite materials - a review // *Composites*. – 1991. – Vol. 22 (5). – P. 347–362. – DOI: 10.1016/0010-4361(91)90549-V.
5. Staroverov O. A., Strungar E. M., Wildemann V. E. Evaluation of the survivability of CFRP honeycomb-cored panels in compression after impact tests // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2021. – Vol. 15 (56). – P. 1–15. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.56.01.
6. Tai N., Yip M., & Lin J. Effects of low-energy impact on the fatigue behavior of carbon/epoxy composites // *Composites Science and Technology*. – 1998. – Vol. 58 (1). – P. 1–8. – DOI: 10.1016/s0266-3538(97)00075-4.

7. 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. 163–174. – DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.14.
8. Compression behavior of stitched stiffened panel with a clearly visible stiffener impact damage / S. S. Suh, N. L. Han, J. M. Yang, H. T. Hahn // Composite Structures. – 2003. – Vol. 62, No. 2. – P. 213–221. – DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00116-8.
9. Комплексный анализ механического поведения и процессов разрушения образцов пространственно-армированного углепластика в испытаниях на растяжение / Т. В. Третьякова, А. Н. Душко, Е. М. Струнгарь, Е. М. Зубова, Д. С. Лобанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 173–183. – DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.15.
10. Tsigkourakos G., Silberschmidt V. V., Ashcroft I. A. Damage analysis of CFRP under impact fatigue // Shock and Vibration. – 2012. – Vol. 19. – P. 573–584. – DOI 10.3233/SAV-2011-0651.
11. Experimental investigation of the defect influence on the composites sandwich panels strength with use digital image correlation and infrared thermography methods / D. S. Lobanov, V. E. Wildemann, E. M. Spaskova, A. I. Chikhachev // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2015. – No. 4. – P. 159–170. – DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.10.
12. Staroverov O., Tretyakov M., Wildemann V. Tests features of composite materials under complex mechanical loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 918. – DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012115.