

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ, ЖИВУЧЕСТИ И МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ АРМИРУЮЩИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЛОЖНЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ*

В.Э. Вильдеман, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
Д.С. Лобанов, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
Е.С. Спаскова, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
А.В. Бабушкин, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
А.В. Биккулова, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
А.В. Ильиных, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
С.В. Словигов, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
О.А. Староверов, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
М.С. Темерова, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
М.П. Третьяков, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
Т.В. Третьякова, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

Приведены результаты работы по гранту РФФИ № 13-08-96016, целью которого являлось получение новых данных о закономерностях механического поведения армирующих и композиционных материалов при сложных нестационарных и комбинированных квазистатических, динамических, циклических и ударных воздействиях в широком диапазоне температур для создания научных основ решения проблем прочности, живучести материалов, оценки опасности и предотвращения аварийных ситуаций, связанных с накоплением структурных повреждений и формированием условий разрушений элементов ответственных композитных конструкций.

В работе осуществлено развитие методов экспериментальных исследований свойств армирующих и композиционных материалов, элементов конструкций при сложных термомеханических воздействиях с использованием современных испытательных и измерительных систем, а также средств диагностики. Проведены исследования свойств вязкоупругих наполненных полимерных композитных материалов в условиях динамических бигармонических и бимодальных нагружений с вариацией частот воздействий и температуры. Получены новые данные о закономерностях накопления повреждений и разрушения углеродных композиционных материалов в зависимости от видов нагружения на основе регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии. Проведены исследования закономерностей процессов разрушения полунатурных образцов крупноячеистых композиционных материалов с коробчатым, сотовым и ячеистым наполнителем, влияния эксплуатационных повреждений на остаточные

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 13-08-96016.

прочностные свойства полунатурных образцов с дефектом в виде сквозного пробоа. Получены новые результаты исследования областей повреждений изделий и элементов конструкций из композиционных материалов, а также эффективности восстановительных технологических операций.

Выработаны рекомендации по совершенствованию методов испытаний, контроля, структуры и технологических режимов создания композиционных материалов и изделий из них с целью реализации требуемых деформационных и прочностных свойств.

Ключевые слова: экспериментальная механика, ударное нагружение, циклическое нагружение, корреляция цифровых изображений, акустическая эмиссия, армирующий материал, наномодифицированная матрица, прочность, живучесть, разрушение.

Среди современных конструкционных материалов, применяемых в машиностроении, все большую долю занимают композиционные материалы. Для расчетов конструкций из композиционных материалов необходимо всестороннее исследование свойств, в том числе в условиях сложных термомеханических воздействий. Получение новых знаний о закономерностях механического поведения армирующих и композиционных материалов при сложных термомеханических воздействиях с целью создания научных основ решения проблем прочности, живучести материалов, оценки опасности и предотвращения аварийных ситуаций, связанных с накоплением структурных повреждений и формированием условий разрушений элементов ответственных конструкций, является фундаментальной научной проблемой, на решение которой направлен проект.

Для реализации данного проекта осуществлено развитие методов экспериментальных исследований свойств армирующих и композиционных материалов (волокна, нити и ткани в исходном и пропитанном состоянии, образцы наполненных, волокнистых и тканых полимерных композиционных материалов, композитные панели с наполнителем), а также элементов конструкций (полунатурные композитные объекты с нанесенными и залеченными дефектами) при сложных термомеханических воздействиях с использованием современных испытательных и измерительных систем (рис. 1), а также средств диагностики

(видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций, систем регистрации сигналов акустической эмиссии и цифрового термосканирования).

Проведены исследования свойств вязкоупругих наполненных полимерных композитных материалов в условиях динамических бигармонических и бимодальных нагружений с вариацией частот воздействий и температуры.

Получены новые результаты исследования комплекса механических характеристик композиционных материалов с наномодифицированной полимерной матрицей при различном содержании наполнителя (рис. 2).

Получены новые данные о свойствах армирующих нитей, механизмах деформирования и разрушения образцов тканых материалов при проведении квазистатических и динамических испытаний

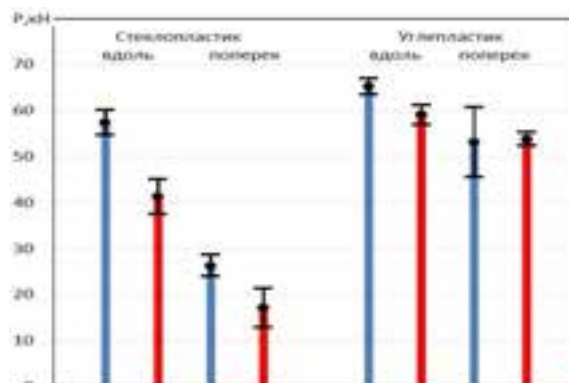


Рис. 1. Диаграмма распределения значений разрушающей нагрузки при испытаниях образцов-панелей на растяжение при нормальной 22°C (синие линии) и повышенной 100°C (красные линии) температурах

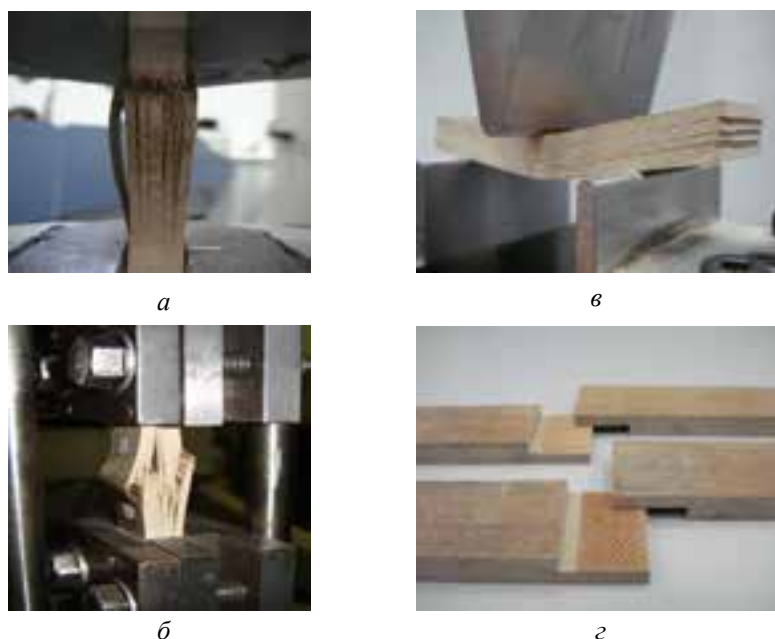


Рис. 2. Образцы нанокompозитов при испытаниях на одноосное растяжение (а), межслоевой сдвиг (по методу короткой балки) (б), сжатие (в), растяжение образцов с двухсторонними надрезами (г)

на растяжение, продавливание, вытягивание волокон из полотна (рис. 3, 4).

Получены новые данные о закономерностях накопления повреждений и разрушения углеродных композиционных материалов в зависимости от видов нагружения на основе регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии, выявлены диапазоны амплитуд и частот сигналов акустической эмиссии, характерные для расслоений, растрескиваний матрицы, разрывов волокон (рис. 5).

Проведены исследования закономер-

ностей процессов разрушения полунатурных образцов крупноячеистых композиционных материалов с коробчатым, сотовым и ячеистым наполнителем, влияния эксплуатационных повреждений на остаточные прочностные свойства полунатурных образцов с дефектом в виде сквозного пробоа. Получены новые результаты исследования областей повреждений изделий и элементов конструкций из композиционных материалов, а также эффективности восстановительных технологических операций (рис. 6).

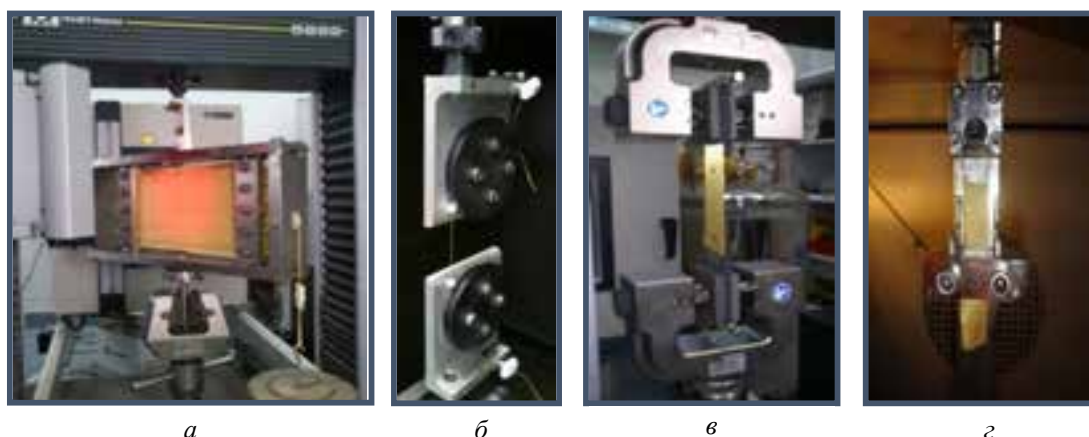


Рис. 3. Проведение механических испытаний арамидных нитей и тканей на вытягивание отдельных волокон из полотна (а), одноосное квазистатическое (б, в) и динамическое растяжение (г)

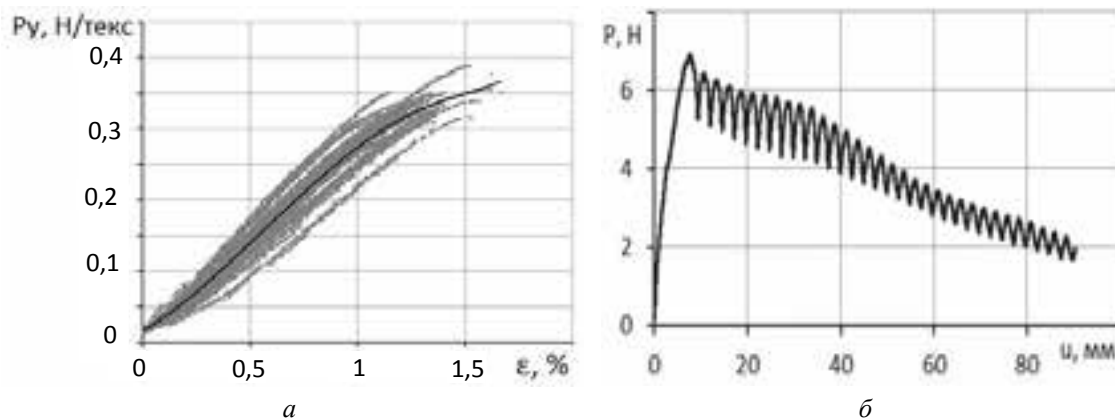


Рис. 4. Диаграммы деформирования стеклянных нитей при растяжении (а) и типовая диаграмма «нагрузка – перемещение» при вытягивании нити из полотна стеклоткани (б)

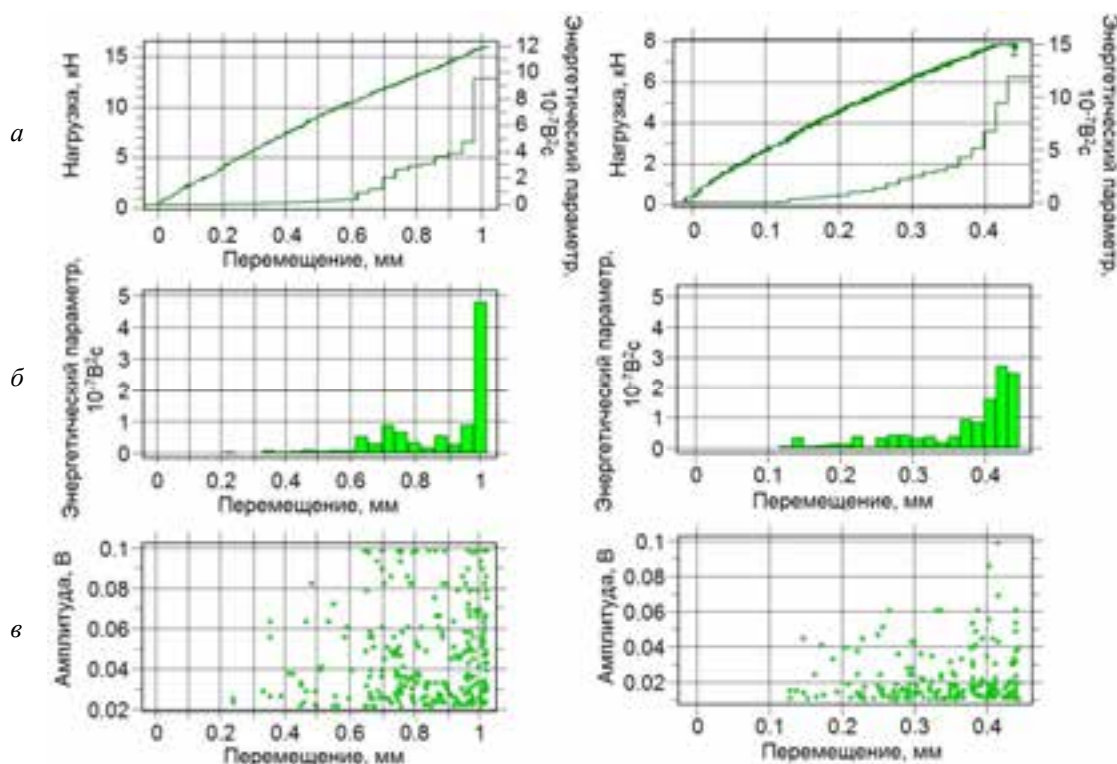


Рис. 5. Результаты испытаний образцов, изготовленных из композита на различных стадиях:
 а – диаграмма нагружения с зависимостью параметра поврежденности от перемещения;
 б – зависимость энергетического параметра сигнала акустической эмиссии от перемещения;
 в – зависимость амплитуды акустико-эмиссионного сигнала от перемещения

Получены результаты расчетно-экспериментальных исследований процессов деформирования и разрушения конструктивно подобных композитных элементов при совместном синхронизированном использовании нагружающих систем, бесконтактной оптической видеосистемы с расшифровкой данных по методу корреляции цифровых изображений, инфракрасной тепловизионной системы и аку-

стико-эмиссионной системы (рис. 7). Получены данные о закономерностях эволюции неоднородных полей деформаций и развитии повреждений.

Полученные экспериментальные данные использованы для уточнения разработанных ранее математических моделей неупругого деформирования композитов с учетом структурного разрушения. Выработаны рекомендации по совершенст-

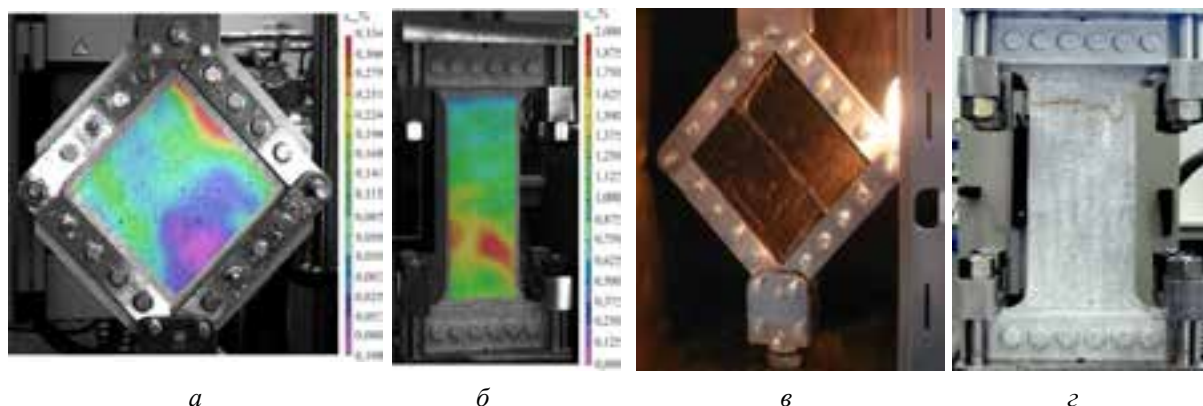


Рис. 6. Неоднородные поля сдвиговых деформаций на поверхности поврежденного образца при испытании на сдвиг (а) и продольных деформаций, соответствующих предельному состоянию образца при испытании на одноосное растяжение (б); характерный вид разрушенных образцов при сдвиге в термокамере (в) и при одноосном растяжении (г)

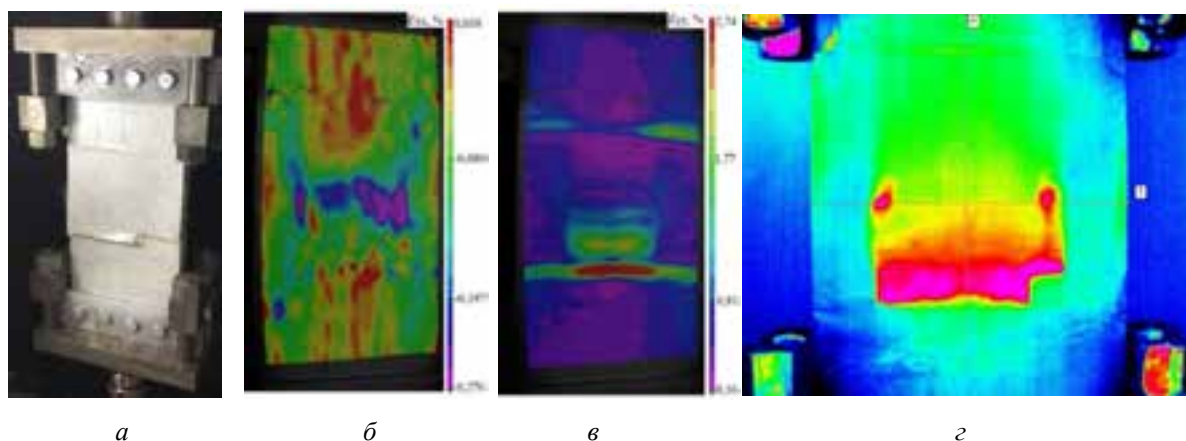


Рис. 7. Поля продольных (б) и поперечных деформаций (в) и термограмма (г) на поверхности образца (а) в ходе испытания на квазистатическое растяжение

вованию методов испытаний, контроля, структуры и технологических режимов создания композиционных материалов и изделий из них с целью реализации требуемых деформационных и прочностных свойств.

Таким образом, результаты фундаментальных исследований создают основу для развития моделей и методов прочностного анализа ответственных конструкций и соответствуют мировому уровню в области экспериментальной механики композитов. Данный вывод основывается на сопоставлении и анализе объектов исследований

(конструкционных композитов, армирующих элементов и конструктивно подобных композитных изделий сложной структуры), сложности поставленных задач (экспериментальные исследования поведения материалов в условиях комбинированных термомеханических воздействий), эффективного использования современного научного оборудования ведущих мировых производителей и современных, соответствующих мировым тенденциям в рассматриваемой области, методик комплексного экспериментального исследования материалов и процессов.

Библиографический список

1. Lobanov D.S., Vildeman V.E., Babin A.D., Grinev M.A. Experimental research into the effect of external actions and polluting environments on the serviceability of fiber-reinforced polymer composite materials // Mechanics of Composite Materials. – 2015. – Vol. 51. – № 1. – P. 69–76.

2. *Anoshkin A.N., Vildeman V.E., Lobanov D.S., Chikhachev A.I.* Evaluation of repair efficiency in structures made of fibrous polymer composite materials // *Mechanics of Composite Materials*. – 2014. – Vol. 50. – № 3. – P. 311–316.
3. *Янкин А.С., Бульбович Р.В., Словигов С.В., Вильдеман В.Э.* Методические вопросы экспериментальных исследований вязкоупругих наполненных полимерных композитов при сложных динамических циклических воздействиях // *Вест. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика*. – 2013. – № 4. – С. 180–192.
4. *Лобанов Д.С., Темерова М.С.* Особенности квазистатических испытаний нитей и тканей // Там же. – С. 96–109.
5. *Шилова А.И., Вильдеман В.Э., Лобанов Д.С., Лямин Ю.Б.* Исследование механизмов разрушения углеродных композиционных материалов на основе механических испытаний с регистрацией сигналов акустической эмиссии // Там же. – С. 169–179.
6. *Шилова А.И., Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., Лямин Ю.Б.* Экспериментальное исследование влияния высокотемпературной обработки тканого наполнителя на прочностные свойства углеродных композитов // *Вест. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика* – 2014. – № 4. – С. 221–239.
7. *Tretyakova T.V., Wildemann V.E.* Study of spatial-time inhomogeneity of serrated plastic flow Al-Mg alloy: using DIC-technique // *Frattura ed Integrita Strutturale*. – 2014. – № 27. – P. 83–97.
8. *Третьякова Т.В.* Особенности использования программного обеспечения Vic-3D, реализующего метод корреляции цифровых изображений, в приложении к исследованию полей неупругих деформаций // *Вычис. мех. сплош. сред.* – 2014. – Т. 7. – № 2. – С. 162–171.
9. *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.
10. *Янкин А.С., Бульбович Р.В., Словигов С.В.* Определение поведения низко модульных вязкоупругих материалов при сложных гармонических нагрузках // *Математическое моделирование в естественных науках*. – 2014. – С. 324–326.
11. *Лобанов Д.С.* Экспериментальное исследование влияния внешних воздействующих факторов и эксплуатационных загрязнений на работоспособность полимерных волокнистых композиционных материалов // *Математическое моделирование в естественных науках*. – 2014. – С. 147–149.
12. *Староверов О.А.* Экспериментальное исследование влияния предварительного ударного воздействия на остаточные прочностные характеристики композиционных материалов // *XXIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках»*. – Пермь, 7-10 окт. 2015 г. – С. 540.
13. *Темерова М.С.* Экспериментальное исследование армирующих элементов композиционных материалов // Там же. – С. 441.
14. *Лобанов Д.С.* Оценка влияния повышенных температур на механические свойства полимерных волокнистых композиционных материалов на основе стеклоорганоткани // *XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики*. – Казань, 20-24 авг. 2015 г. – С. 2327–2329.

**COMPREHENSIVE RESEARCH OF STRENGTH, VITALITY AND FRACTURE
MECHANISMS OF REINFORCING AND COMPOSITE MATERIALS UNDER COMPLEX
THERMO-MECHANICAL EFFECTS**

V.E. Wildemann, D.S. Lobanov, E.M. Spaskova, A.V. Babushkin, A.V. Bikkulova,
A.V. Ilinih, S.V. Slovikov, O.A. Staroverov, M.S. Temerova,
M.P. Tretyakov, T.V. Tretyakova

Perm National Research Polytechnic University

The article presents the results of RFBR grant № 13-08-96016, the purpose of which was to obtain new data about the regularities of mechanical behavior of reinforcing and composite materials under complex unsteady and combined quasi-static, dynamic, cyclic and shock effects in a wide range of temperatures to establish a scientific basis for solving strength and vitality problems of materials, risk assessment and prevention of emergency situations associated with the accumulation of structural damage and the formation of destruction conditions of the elements of important composite constructions.

In this work the development of experimental research methods of the properties of reinforcing and composite materials, structural elements under complex thermomechanical effects, using advanced tests and measurement systems, as well as diagnostic tools, is carried out. Investigations have been performed concerning the viscoelastic properties of filled polymer composite materials under dynamic biharmonic and bimodal loadings with variation in the frequency of impact and temperature. New data on the patterns of accumulation of damage and destruction of carbon composite materials, depending on the types of loading on the basis of registration and processing of acoustic emission signals. Investigations have also been carried out concerning the regularities of destruction processes of semi-natural coarse-cellular samples of composite materials with a box-shaped, cellular and cellular filler, the impact of operational damage on the residual strength properties of semi-natural samples with a defect in the form of a through breakdown. New results, of research of the damaged areas of products and structural elements made of composite materials, as well as the effectiveness of reducing technological operations, have been obtained.

Recommendations have been made on improving the methods of testing, control, structure and technological modes of creating composite materials and products from them in order to implement the required deformation and strength properties.

Keywords: experimental mechanics, shock loading, cyclic loading, digital image correlation, acoustic emission, reinforcing material, nano-modified matrix, strength, vitality, destruction.

Сведения об авторах

Вильдеман Валерий Эрвинович, доктор физико-математических наук, директор Центра экспериментальной механики, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: wildemann@pstu.ru

Лобанов Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, научный сотрудник Центра экспериментальной механики, ПНИПУ; e-mail: cem.lobanov@gmail.com

Спаскова Елена Михайловна, младший научный сотрудник Центра экспериментальной механики, ПНИПУ; e-mail: cem.spaskova@mail.ru

Бабушкин Андрей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры механики композиционных материалов и конструкций, старший научный сотрудник Центра экспериментальной механики, ПНИПУ; e-mail: bav651@yandex.ru

Биккулова Анастасия Владимировна, младший научный сотрудник Центра экспериментальной механики, ПНИПУ; e-mail: cem.bikkulova@gmail.com

Ильиных Артем Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механики композиционных материалов и конструкций, старший научный сотрудник Центра экспериментальной механики, ПНИПУ; e-mail: ilinich@yandex.ru

Словиков Станислав Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра экспериментальной механики, ПНИПУ; e-mail: ssllovikov@ya.ru

Староверов Олег Александрович, научный сотрудник Центра экспериментальной механики, ПНИПУ; e-mail: cem_staroverov@mail.ru

Темерова Мария Сергеевна, младший научный сотрудник Центра экспериментальной механики, ПНИПУ; e-mail: cem.temerova@gmail.com

Третьяков Михаил Павлович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Центра экспериментальной механики, ПНИПУ; e-mail: cem_tretyakov@mail.ru

Третьякова Татьяна Викторовна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Центра экспериментальной механики, ПНИПУ; e-mail: cem.lobanov@gmail.com

Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.