



Научная статья

УДК 620.179.16:620.179.143

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-39-47>

## Структурно-феноменологическая концепция мониторинга несущей способности элементов конструкций из композитных материалов

Ю.Г. Матвиенко<sup>1✉</sup>, И.Е. Васильев<sup>2</sup>, Д.В. Чернов<sup>3</sup><sup>1-3</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

**Резюме.** Целью представленной статьи является демонстрация возможностей разработанной в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН методологии мониторинга кинетики повреждений и оценки несущей способности высоконагруженных композитных элементов конструкций с применением метода акустической эмиссии. Предложенная методология реализована при усталостном испытании авиационной панели в виде сложной гибридной конструкции с обшивкой из слоистого композита и сотовой внутренней структурой из алюминиевой фольги с полимерным наполнителем, которая в зонах захватов имеет сплошную слоистую структуру. Усталостные испытания панели проведены при частоте 4 Гц отнулевого цикла нагружения с амплитудой 145 кН. Для регистрации процессов накопления повреждений использовали установленные на панели преобразователи R15 –AST фирмы «Mistral» (США) и восьмиканальную акустико-эмиссионную систему A-line 32D производства ООО «Интерюнис–ИТ». Сопоставление весового содержания локационных импульсов с их пороговыми значениями в энергетических кластерах, характеризующих кинетику микро-, мезо- и макроповреждений структуры композитного материала, позволило установить несущую способность авиационной панели на соответствующих стадиях кинетики повреждений данного материала. Приведены результаты акустико-эмиссионной диагностики исследованной авиационной панели в процессе циклического нагружения, включающие координатную локацию источников акустической эмиссии, накопление акустико-эмиссионных событий каналами, динамику изменения парциальной активности и весового содержания локационных импульсов на стадиях эволюции повреждений композитного материала. Таким образом, в процессе акустико-эмиссионной диагностики панели удалось не только установить зоны интенсивного накопления повреждений в гибридной структуре панели, но и контролировать фактический уровень несущей способности, определяя степень ее поврежденности на разных масштабно-структурных уровнях в процессе циклического нагружения. Рассмотренная в статье методология применения акустико-эмиссионной диагностики для мониторинга кинетики повреждений и контроля фактического состояния несущей способности высоконагруженных композитных элементов конструкций открывает новые возможности, существенно расширяющие исследовательский потенциал метода акустической эмиссии.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, структурно-феноменологическая концепция, кластерный анализ, весовое содержание, кинетика повреждений, разрушение

**Для цитирования:** Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Структурно-феноменологическая концепция мониторинга несущей способности элементов конструкций из композитных материалов // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 39–47. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-39-47>.

## MECHANICAL ENGINEERING

Original article

## Structural phenomenological concept of monitoring the load-bearing capacity of structural elements of composite materials

Yury G. Matvienko<sup>1✉</sup>, Igor E. Vasiliev<sup>2</sup>, Dmitry V. Chernov<sup>3</sup><sup>1-3</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

© Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., 2023

<https://ipolytech.ru>

**Abstract.** The authors demonstrate the potential of a methodological approach for monitoring the damage kinetics and evaluating the load-bearing capacity of composite structural elements based on the method of acoustic emission. This methodology was developed by specialists of the Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences. The methodology was implemented for a fatigue test of an aircraft panel represented by a complex hybrid structure with a lining made of layered composite and a cellular internal structure of aluminum foil with polymeric filler that has a continuous layered structure in the gripping area. Fatigue tests were carried out at 4 Hz from the zero-loading cycle with an amplitude of 145 kN. To record the accumulation of damages, R15 $\alpha$ -AST transducers by Mistral (USA) and an A-line 32D 8-channel acoustic emission system by Interunis-IT LLC were used. Comparing the weight content of location impulses with their threshold values in energy clusters characterizing the kinetics of micro-, meso-, and macro-damages of the composite material structure made it possible to determine the bearing capacity of the aircraft panel at respective stages of damage kinetics. The results of the acoustic emission diagnostics are given for the examined aircraft panel during cyclic loading, including the coordinate location of acoustic emission sources, accumulation of acoustic emission events by channels, the dynamics of partial activity changes, and weight content of location impulses at damage evolution stages of a composite material. Therefore, the acoustic emission diagnostics of the aircraft panel made it possible to identify the areas of intensive damage accumulation in the hybrid structure of the panel and control the actual bearing capacity by defining the extent of its damages at various scale and structural levels during cyclic loading. The described methodology of using acoustic emission diagnostics for monitoring the damage kinetics and actual bearing capacity of highly loaded composite elements extends the research potential of the acoustic emission method.

**Keywords:** acoustic emission, structural and phenomenological concept, cluster analysis, weight content, damage kinetics, failure

**For citation:** Matvienko Y.G., Vasiliev I.E., Chernov D.V. Structural phenomenological concept of monitoring the load-bearing capacity of structural elements of composite materials. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):39-47. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-39-47>.

## ВВЕДЕНИЕ

Существующие теории поврежденности конструкционных материалов [1–8], как и современные риск-ориентированные подходы [9–11], не позволяют учесть влияние рассеянных структурных повреждений, остаточных напряжений, особенностей эксплуатации и деградации свойств материала на снижение несущей способности конструкций. Возникла актуальная необходимость разработки методологии, позволяющей контролировать фактическое состояние поврежденности высоконагруженных элементов конструкций и оценивать текущий уровень их несущей способности в процессе эксплуатации или испытаний. Особенно актуальна такая разработка для мониторинга эволюции разрушений конструкций из композитных материалов, в которых структурные повреждения возникают уже на ранней стадии нагружения в процессе распрямления армирующих волокон<sup>4</sup>, а окончательное их разрушение происходит при составляющих порядка 1,5–2% деформациях<sup>4</sup> [12–16].

Как хорошо известно, применение полимерных композитных материалов (ПКМ) значительно увеличивает прочность и жесткость

конструкций от действия растягивающих нагрузок, снижая при этом их вес и повышая коррозионную устойчивость. Рациональное их применение позволяет при обеспечении требуемых прочностных характеристик планера снизить на 20–30% его массу, что дает возможность повысить грузоподъемность летательного аппарата, увеличивая при этом дальность перелета за счет сокращения расхода топлива. В беспилотных летательных аппаратах и в малой авиации доля композитных материалов может превышать 65%, а металлические сплавы используют в основном только для изготовления стоек шасси и высоконагруженных деталей двигателя. Поэтому тенденция увеличения доли композитных материалов в конструкциях современных планеров будет только нарастать. Это требует широкого применения средств неразрушающего контроля и технической диагностики не только при проведении стендовых испытаний авиационных конструкций, но и их внедрения в системы авионики для мониторинга текущего состояния накопления повреждений и контроля фактического состояния высоконагруженных элементов конструкций.

<sup>4</sup>Полилов А.Н. Экспериментальная механика композитов: учеб. пособ. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 376 с.

## СТРУКТУРНО-ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ И МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Для осуществления указанных выше целей в Институте машиноведения разработаны структурно-феноменологическая концепция и модель эволюции разрушения твердого тела на разных масштабных уровнях, связывающих несущую способность изделия с кинетикой перераспределения весового содержания микро-, мезо- и макроповреждений в структуре конструкционного материала, подробно изложенной в [17–20]. Применялась акустическая эмиссия (АЭ) – диагностика, методология применения которой, а также алгоритм и разработанное программное обеспечение рассмотрены в публикации [20].

С целью облегчения восприятия дальнейшего содержания статьи дадим некоторые пояснения часто используемых терминов:

**Локационные импульсы** – сигналы АЭ, по разности времени прихода которых на приемные преобразователи АЭ локационной группы определяют координаты источника АЭ.

**Кластеры нижнего (Н), среднего (С), верхнего (В) энергетического уровня** – представляют зоны разделения регистрируемых импульсов в поле дескрипторов относительной энергии ( $E_u$ ) и усредненной частоты выбросов ( $N_u/T_u$ , где  $N_u$  – количество выбросов, а именно – пересечений фронтом волны порога дискриминации сигналов  $U_{th}$ ,  $T_u$  – длительность импульса, т.е. разность между моментами времени, в течение которого фронт нарастающей волны превышает порог  $U_{th}$ , а затем уходит под него).

**Параметры ( $W_i$ ) весового содержания локационных импульсов** в Н, С, В кластерах:

$$W_H = (NH/N\Sigma) \cdot 100\%;$$

$$W_C = (NC/N\Sigma) \cdot 100\%;$$

$$W_B = (NB/N\Sigma) \cdot 100\%,$$

где  $NH$ ,  $NC$ ,  $NB$  – кумулятивные значения локационных импульсов, регистрируемые в нижнем, среднем и верхнем кластерах;

$N\Sigma = NH + NC + NB$  – суммарное их количество.

**Парциальная активность АЭ ( $\dot{N}_i$ )** – количество локационных импульсов, регистрируемых ежесекундно в Н, С, В кластерах ( $\dot{N}\Sigma = \dot{N}_H + \dot{N}_C + \dot{N}_B$ ).

**Несущая способность конструкционного материала** – определяется сопоставлением текущих и пороговых значений весового содержания локационных импульсов в кластерах Н и С по следующим формулам:

$$B_{W_H} = \frac{W_H - [W_H]}{(W_H)_{max} - [W_H]} \cdot 100\%;$$

$$B_{W_C} = \frac{[W_C] - W_C}{[W_C] - (W_C)_{min}} \cdot 100\%,$$

где  $(W_H)_{max}$ ,  $(W_C)_{min}$  – экстремальные значения весового содержания локационных импульсов, регистрируемые в энергетических кластерах при переходе от рассеянного повреждения к локальному накоплению АЭ событий [20].

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

С целью апробации предложенной методологии АЭ диагностики контроля накопления повреждений в структуре конструкционного материала и оценки текущего уровня несущей способности изделий в режиме их нагружения были проведены усталостные испытания элемента перспективной конструкции крыла самолета. Исследуемая панель представляла собой сложную гибридную конструкцию с обшивкой из слоистого композита и сотовой внутренней структурой из алюминиевой фольги с полимерным наполнителем, которая в зонах захватов имеет сплошную слоистую структуру. На рис. 1 показаны форма и основные размеры панели, а также места установки преобразователей R15 $\alpha$ –AST фирмы «Mistral» (США). Усталостные испытания авиационной панели проводились при частоте отнулевого цикла  $f = 4$  Гц и амплитуде  $P_a = 145$  кН.

Для регистрации процессов накопления повреждений использовалась восьмиканальная акустико-эмиссионная система A-line 32D



Рис. 1. Форма, габаритные размеры (а) и зона разрушения панели (b);  
1–6 – места установки преобразователей R15α-SMA

Fig. 4. Shape, outside dimensions (a) and panel destruction area (b); 1–6 – transducer locations

производства ООО «Интерюнис–ИТ», которая имела следующие настройки: порог дискриминации сигналов  $U_{th} = 42$  дБ, полосу пропускания цифровых фильтров  $\Delta f = 100\text{--}300$  кГц, расчетную групповую скорость импульсов, установленную по результатам тестирования панели  $V_g = 29$  мм/мкс.

#### ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДИАГНОСТИКИ МОНИТОРИНГА КИНЕТИКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ПАНЕЛИ

На рис. 2 приведены результаты АЭ диагностики, зарегистрированные в ходе циклического нагружения панели, включающие координатную локацию источников АЭ (а), накопление АЭ событий каналами (b), динамику изменения парциальной активности (с) и весового содержания локационных импульсов (d) на стадиях эволюции конструкционного материала, в том числе рассеянного накопления повреждений  $\tau_0 = 0\text{--}1050$  с, образования локальных зон «in situ» повреждений  $\tau_1 = 1050\text{--}3000$  с, устойчивого их роста  $\tau_2 = 3000\text{--}4300$  с и достижения предельного состояния  $\tau_3 = 4300\text{--}4624$  с.

Наибольшая плотность индикаций источников АЭ (график 2 а) при циклическом нагружении регистрировалась в зонах стыков слоистой и ячеистой структур панели, отмеченных стрелками на рис. 2 а. В области «сварного шва», расположенного в центре панели, плотность индикаций источников АЭ была на порядок ниже. Всего в ходе АЭ диагностики при усталостных испытаниях панели было зарегистрировано  $N_{\Sigma n} = 16088$  ед. индикаций источников АЭ.

На стадии  $\tau_0$  в течение первых 600 с или 2400 циклов нагружения локация источников отсутствовала, после чего, как следует из графика 5 с, регистрировалась низкая прерывистая парциальная активность АЭ в энергетических кластерах  $H$  и  $C$ , не превышающая, соответственно,  $\dot{N}_H = 5\text{--}8$  им/с и  $\dot{N}_C = 1\text{--}2$  им/с. Такая типичная для стадии рассеянного накопления повреждений активность локационных импульсов в ПКМ, характеризующаяся экстремальными значениями весового содержания локационных импульсов в  $H$  и  $C$  кластерах, составляла  $(W_H)_{\max} = 96\text{--}100\%$ ,  $(W_C)_{\min} = 0\text{--}4\%$ , что свидетельствовало о снижении уровня несущей способности панели в течение первых 4200 циклов испытания примерно на  $\Delta B_W = 5\%$ .

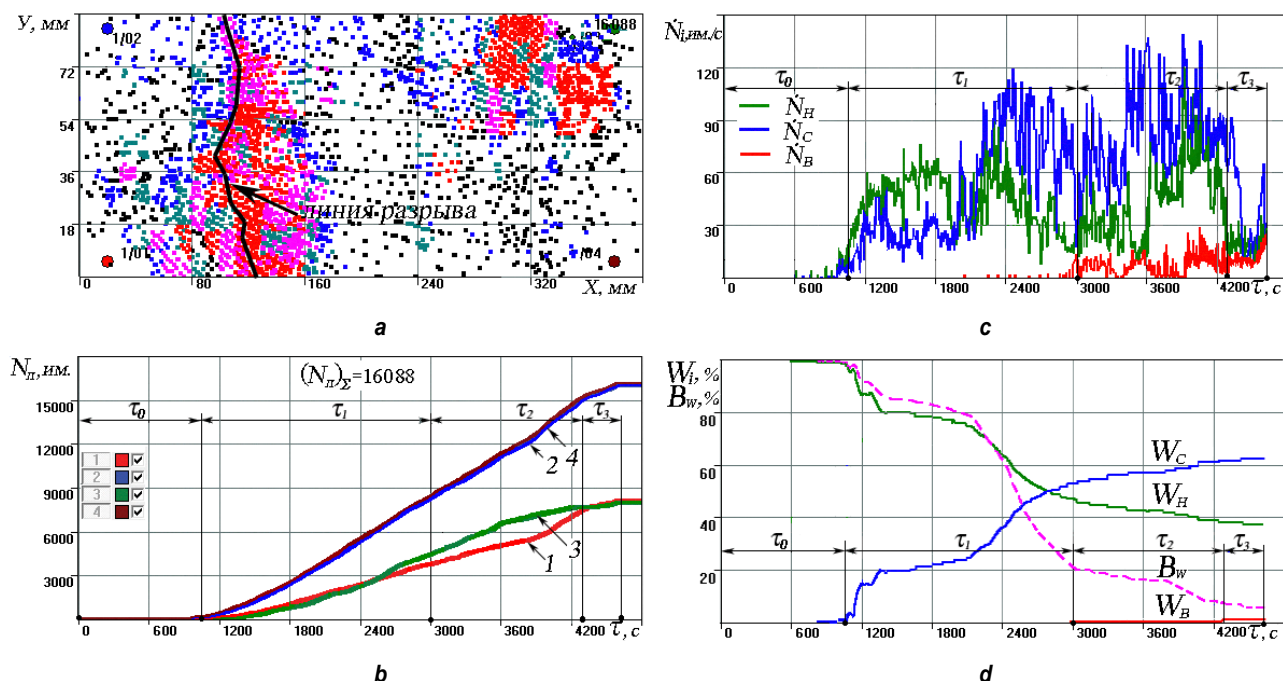


Рис. 2. Результаты акустической эмиссии диагностики, зарегистрированные при проведении испытаний панели на циклическое нагружение: а – координатная локация источников акустической эмиссии; б – накопление локационных импульсов каналами акустической эмиссии системы; с – парциальная активность акустической эмиссии в энергетических кластерах; д – динамика изменения весового содержания локационных импульсов в Н, С, В кластерах

Fig. 2. Acoustic emission diagnostic results registered when testing a panel under cyclic loading: a – coordinate location of acoustic emission sources; b – accumulation of location pulses by acoustic emission system channels; c – partial activity of acoustic emission in energy clusters; d – dynamics of weight content variation of location pulses in H, C and B clusters

В течение стадий  $\tau_1$  и  $\tau_2$  регистрировался практически линейный рост накопления локационных импульсов каналами АЭ системы (график 2 б), хотя изменение значений парциальных параметров  $\dot{N}_i$  и  $W_i$  в Н и С кластерах, особенно на стадии  $\tau_1$ , как видно из графиков 2 с и 2 д, существенно отличался от линейного.

На стадии  $\tau_1$  рассеянное накопление источников АЭ сменилось регулярной их локацией в зонах потенциальных разрушений, расположенных в области стыков слоистой и сотовой структур панели. При этом резко на порядок возросла активность АЭ в Н и С кластерах, которая к 1200 с испытания достигла, соответственно,  $\dot{N}_H = 60$  им/с и  $\dot{N}_C = 40$  им/с. В период 1200–2100 с испытания активность локационных импульсов стабилизировалась и составляла  $\dot{N}_H = 60$ –75 им/с и  $\dot{N}_C = 30$ –50 им/с. Дальнейшее нагружение образца панели в период 2100–2400 с испытания сопровождалось более чем двукратным повышением активности в среднем кластере, достигающим  $\dot{N}_C = 100$ –120 им/с, и заметно меньшим

ростом в нижнем кластере, не превышающим  $\dot{N}_H = 75$ –90 им/с. На заключительной стадии  $\tau_1$  в период 2400–3000 с нагружения активность в энергетических кластерах синхронно снижалась, соответственно, до  $\dot{N}_H = 15$ –30 им/с и  $\dot{N}_C = 30$ –60 им/с. Несмотря на такие колебания активности АЭ, тренд изменения весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах был достаточно устойчив. В этот период отмечалось резкое снижение параметра  $W_H$  до 44%, сопровождаемое синхронным повышением параметра  $W_C$  до 56%. С учетом динамики изменения экстремальных и пороговых значений параметра  $W_H$ , принятых равными  $(W_H)_{max} = 100\%$  и  $[W_H] = 32\%$  при вычислении характеристики  $B_{WH}$ , несущая способность панели на стадии  $\tau_1$  снизилась на  $\Delta B_W = 75\%$  с 95 до 20%.

На стадии  $\tau_2$ , как видно из графика 2 с, наибольший рост активности АЭ во всех энергетических кластерах отмечался в течение 3600–4000 с испытания, когда ее уровень в Н, С и В кластерах достигал следующих значений:  $\dot{N}_H = 110$  им/с,  $\dot{N}_C = 130$  им/с и  $\dot{N}_B = 25$



им/с. В заключительный период стадии  $\tau_2$  активность АЭ в энергетических кластерах синхронно снижалась до уровней:  $\dot{N}_H = 45$  им/с,  $\dot{N}_C = 90$  им/с и  $\dot{N}_B = 20$  им/с. Такое синхронное снижение парциальной активности локационных импульсов сказалось и на динамике параметров  $W_i$  в  $H$ ,  $C$ ,  $B$  кластерах, которая в этот период усталостных испытаний заметно замедлилась: параметр  $W_H$  снижался с 44 до 38%,  $W_C$  повышался от 56 до 61%, а  $W_B$  возрастал до 1%. Как следует из рис. 2 *d*, уровень несущей способности панели на стадии  $\tau_2$ , определяемый при характерных значениях параметров  $(W_H)_{max} = 100\%$  и  $[W_H] = 32\%$ , снизился на  $\Delta B_W = 12\%$  с 20 до 8%.

На стадии  $\tau_3$  после 17200 циклов нагружения (4300 с испытания) накопление локационных импульсов каналами АЭ системы (график 2 *b*) заметно замедлилось. При этом отмечалось синхронное снижение активности АЭ во всех энергетических кластерах (график 2 *c*), уровень которой в течение 4400–4500 с испытания изменялся в следующих пределах:  $\dot{N}_H = 15$ –35 им/с,  $\dot{N}_C = 30$ –65 им/с и  $\dot{N}_B = 10$ –25 им/с. Наблюдаемое перед завершением усталостных испытаний повышение активности АЭ существенным образом не отразилось на весовом содержании локационных импульсов в энергетических кластерах, составивших при остановке нагружающего стенда следующие значения:  $W_H = 35\%$ ,  $W_C = 63\%$ ,  $W_B = 2\%$ .

В заключительный период усталостных испытаний после 18000 циклов нагружения несущая способность панели снизилась до близкого к предельному состояния. Как видно из рис. 1 *b*, трещина в зоне разрушения обшивки панели распространилась по всей ее ширине. При этом из-за потери несущей способности

наблюдалась повышенная вибрация нагружающего стенда, сопровождаемая резким снижением максимальной амплитуды в циклах нагружения панели. Поэтому после 18496 циклов нагружения на 4624 с АЭ диагностики усталостные испытания были прекращены. Как следует из рис. 2 *d*, уровень несущей способности панели на стадии  $\tau_3$  снизился на  $\Delta B_W = 3\%$  с 8 до 5%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью демонстрации разработанной методологии применения АЭ диагностики для мониторинга кинетики микро-, мезо- и макроповреждений и оценки текущего уровня несущей способности изделия рассмотрены усталостные испытания авиационной панели со слоистой композитной обшивкой и ячеистой внутренней структурой с полимерным сотовым наполнителем. Приведенное на графиках рис. 2 *d* изменение параметров  $W_i$  в  $H$ ,  $C$ ,  $B$  кластерах отображает кинетику микро-, мезо- и макроповреждений в структуре материала панели в процессе усталостных испытаний, сопровождаемую снижением ее несущей способности от 100 до 5% в течение 18464 отнулевых циклов нагружения, выполняемых с частотой  $f = 4$  Гц и максимальной амплитудой  $P_a = 145$  кН.

Рассмотренная в статье методология применения АЭ диагностики для мониторинга кинетики повреждений в структуре конструкционного материала и контроля фактического состояния несущей способности высоконагруженных элементов конструкций открывает новые возможности, существенно расширяющие исследовательский потенциал метода акустической эмиссии.

## Список источников

1. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. 2-е изд., стереотип. М.: Наука, 2014. 752 с.
2. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
3. Kukudzhnikov V.N. Numerical continuum mechanics. Berlin, 2021. 447 p.
4. Murakami S. Continuum damage mechanics: a continuum mechanics approach to the analysis of damage and fracture // Engineering, Engineering (R0). Dordrecht: Springer, 2012. Vol. 92. Iss. 6. P. 402. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2666-6>.
5. Czichos H. Handbook of technical diagnostics: fundamentals and application to structures and systems // Engineering, Engineering (R0). Berlin – Heidelberg: Springer – Verlag, 2013. 560 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25850-3>.
6. Cherepanov G.P. Invariant Integrals in Physics // Physics and Astronomy. Cham: Springer, 2019. 259 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28337-7>.
7. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе

// Успехи физических наук. 2012. Vol. 182. P. 1351–1357. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201212i.1351>.

8. Егорюшкин В.Е., Панин В.Е., Панин А.В. О физической природе пластичности // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 2. С. 5–14. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-12001>.

9. Makhutov N., Nadein V., Gadenin M., Reznikov D., Risk and industrial safety // Reliability: Theory & Applications. 2022. Vol. 17. № 3. P.138–143. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-366-138-143>.

10. Лепихин А.М., Морозов Е.М., Махутов Н.А., Лещенко В.В. Возможности оценки вероятностей разрушения и допустимый размеров дефектов элементов конструкций по критериям механики разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 3. С. 41–50. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-3-41-50>.

11. Лепихин А.М., Махутов Н.А., Шокин Ю.И., Юрченко А.В. Концепция риск-анализа технических систем с использованием цифровых двойников / Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 4. С. 99 –113. <https://doi.org/10.25743/ICT.2020.25.4.009>.

12. Yi Xiao-Su, Du Shanyi, Zhang Litong. Composite materials engineering // Fundamentals of Composite Materials. Vol. 1. Singapore: Springer, 2018. 786 p.

13. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. Damage and failure of unidirectional laminate by acoustic emission combined with video recording // Acta Mechanica. 2021. Vol. 232. P. 1889–1900. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02866-6>.

14. Олейников А.И., Кузьмина Т.А. Упруго-прочностные характеристики монослоев in situ в композиционном пакете // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. №

7. С. 4–14. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-1996>.

15. Ono K., Gallego A. Research and applications of AE on advanced composites // Acoustic Emission: Springer Handbook of Acoustics / eds. T.D. Rossing. New York: Springer, 2014. P. 1209–1229.

16. Sause M.G.R. In situ monitoring of fiber-reinforced composites // Chemistry and Materials Science. Cham: Springer, 2016. P. 242. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30954-5>.

17. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Исследование кинетики разрушения однонаправленного ламината с применением акустической эмиссии и видеорегистрации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 11. С. 45–61. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-11-45-61>.

18. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. Damage and failure of unidirectional laminate by acoustic emission combined with video recording // Acta Mechanica. 2021. Vol. 232. P. 1889–1900. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02866-6>.

19. Махутов Н.А., Матвиенко Ю.Г., Иванов В.И., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Исследование на разрыв армирующих волокон и однонаправленного ламината с применением акустической эмиссии // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 2. С. 109–117. <https://doi.org/10.31857/S003281622202001X>.

20. Матвиенко Ю.Г., Махутов Н.А., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Иванов В.И., Елизаров С.В. Оценка остаточной прочности композитных изделий на основе структурно-феноменологической концепции повреждений и акустико-эмиссионной диагностики // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 1. С. 69–81. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-I-69-81>.

## References

1. Rabotnov Yu.N. *Creep flow of structural elements*. Moscow: Nauka; 2014, 752 p. (In Russ.).

2. Matvienko Yu.G. *Models and criteria of fracture mechanics*. Moscow: Fizmatlit; 2006, 328 p. (In Russ.).

3. Kukudzhnikov V.N. *Numerical continuum mechanics*. Berlin; 2021, 447 p. (In Russ.).

4. Murakami S. Continuum damage mechanics: a continuum mechanics approach to the analysis of damage and fracture. In: *Engineering, Engineering (R0)*. Dordrecht: Springer; 2012, vol. 92, Iss. 6, p. 402. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2666-6>.

5. Czichos H. Handbook of technical diagnostics: fundamentals and application to structures and systems. In: *Engineering, Engineering (R0)*. Berlin – Heidelberg: Springer – Verlag; 2013, 560 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25850-3>.

6. Cherepanov G.P. Invariant Integrals in Physics. In: *Physics and Astronomy*. Cham: Springer; 2019, 259 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28337-7>.

7. Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V. Nonlinear wave processes in a deformable solid as in a multiscale hierarchically organized system. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*. 2012;182:1351-1357.

<https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201212i.1351>.

8. Egorushkin V.E., Panin V.E., Panin A.V. The physical nature of plasticity. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2020; 23(2):5-14. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-12001>.

9. Makhutov N., Nadein V., Gadenin M., Reznikov D. Risk and industrial safety. *Reliability: Theory & Applications*. 2022;17(3):138-143. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-366-138-143>.

10. Lepikhin A.M., Morozov E.M., Makhutov N.A., Leschenko V.V. Assessment of failure probabilities and the allowable size of defects in structural elements using the criteria of fracture mechanics. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2022;88(3):41-50. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-3-41-50>.

11. Lepikhin A.M., Makhutov N.A., Shokin Y.I., Yurchenko A.V. Analysis of risk concept for technical systems using digital twins. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies*. 2020;25(4):99-113. <https://doi.org/10.25743/ICT.2020.25.4.009>.

12. Yi Xiao-Su, Du Shanyi, Zhang Litong. Composite materials engineering. *Fundamentals of Composite Materials*. Vol. 1. Singapore: Springer; 2018, 786 p.

13. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. Damage and failure of unidirectional laminate by acoustic emission

combined with video recording. *Acta Mechanica*. 2021;232:1889-1900. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02866-6>.

14. Oleinikov A.I., Kuzmina T.A. The in situ PLY elasticity and strength in laminated composites. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii = Engineering Journal: Science and Innovation*. 2020;7:4-14. (In Russ.).

<https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-7-1996>.

15. Ono K., Gallego A. Research and applications of AE on advanced composites. In: Rossing T.D. (eds.). *Acoustic Emission: Springer Handbook of Acoustics*. New York: Springer; 2014, p. 1209-1229.

16. Sause M.G.R. In situ monitoring of fiber-reinforced composites. In: *Chemistry and Materials Science*. Cham: Springer; 2016, p. 242. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30954-5>.

17. Matvienko Yu.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. Study of the fracture kinetics of a unidirectional laminate using acoustic emission and video recording. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2019;85(11):45-61. (In Russ.).

<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-11-45-61>.

18. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. Damage and failure of unidirectional laminate by acoustic emission combined with video recording. *Acta Mechanica*. 2021;232:1889-1900. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02866-6>.

19. Makhutov N.A., Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I. Tensile creep rupture tests of reinforcing fibers and a unidirectional laminate using acoustic emission. *Pribory i tekhnika eksperimenta = Instruments and Experimental Techniques*. 2022;2:109-117.

<https://doi.org/10.31857/S003281622202001X>.

20. Matvienko Yu.G., Makhutov N.A., Vasil'ev I.E., Chernov D.V., Ivanov V.I., Elizarov S.V. Evaluation of the residual strength of composite products based on the structural-phenomenological concept of damage and acoustic-emission diagnostics. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2022;88(1):69-81. (In Russ.).

<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-69-81>.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### Матвиенко Юрий Григорьевич,

д.т.н., профессор,  
заведующий отделом прочности, живучести и  
безопасности машин,  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
РАН,  
101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4,  
Россия  
✉ [ygmatvienko@gmail.com](mailto:ygmatvienko@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-3189-1438>

#### Васильев Игорь Евгеньевич,

к.т.н., с.н.с. лаборатории моделирования  
повреждений и разрушений,  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
РАН,  
101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4,  
Россия  
[vie03@mail.ru](mailto:vie03@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-0304-1436>

#### Чернов Дмитрий Витальевич,

к.т.н.,  
с.н.с. лаборатории моделирования повреждений и  
разрушений,  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
РАН,  
101000, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4,  
Россия  
[chernovdv@inbox.ru](mailto:chernovdv@inbox.ru)

### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в  
подготовку публикации.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### Yury G. Matvienko,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Machinery Strength, Durability  
and Safety,  
Mechanical Engineering Research Institute of the  
Russian Academy of Sciences,  
4, Malyi Kharitonievsky per., Moscow 101000, Russia  
✉ [ygmatvienko@gmail.com](mailto:ygmatvienko@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-3189-1438>

#### Igor E. Vasiliev,

Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher of the Laboratory of Fracture and  
Destruction Modeling,  
Mechanical Engineering Research Institute of the  
Russian Academy of Sciences,  
4, Malyi Kharitonievsky per., Moscow 101000, Russia  
[vie03@mail.ru](mailto:vie03@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-0304-1436>

#### Dmitry V. Chernov,

Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher of the Laboratory of Fracture and  
Destruction Modeling,  
Mechanical Engineering Research Institute of the  
Russian Academy of Sciences,  
4, Malyi Kharitonievsky per., Moscow 101000, Russia  
[chernovdv@inbox.ru](mailto:chernovdv@inbox.ru)

### Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the  
article.



**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Conflict of interests**

The authors declare no conflicts of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 22.12.2022; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 03.03.2023.

**Information about the article**

The article was submitted 22.12.2022; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 03.03.2023.