

УДК 620.17

DOI: 10.32326/1814-9146-2026-88-2-109-122

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ПОЛИМЕРНОГО СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА  
ПОСЛЕ НАНЕСЕНИЯ ВМЯТИН РАЗНЫХ РАЗМЕРОВ\***

© 2026 г. **Чеботарева Е.А., Лобанов Д.С., Мельникова В.А.**

*Центр экспериментальной механики Пермского национального  
исследовательского политехнического университета,  
Пермь, Российская Федерация*

*sem.chebotareva@mail.ru*

*Поступила в редакцию 30.11.2025*

Представлены результаты комплексного исследования влияния наружных дефектов различной величины на механические характеристики и процессы разрушения полимерного композиционного материала. Экспериментальные исследования проводились на образцах с искусственно нанесенными дефектами-вмятинами при фиксированной нагрузке с использованием инденторов разного диаметра. После нанесения дефектов образцы были испытаны на квазистатическое одноосное растяжение. Проведен анализ типов разрушения образцов, согласно нормативной документации, установлено влияние величины дефекта на прочностные характеристики материала. В процессе исследований использованы трехмерная видеосистема и система регистрации акустической эмиссии. Проведен анализ механизмов разрушения материала на основе сигналов акустической эмиссии. Анализ включал в себя как характеристики энергетического параметра и пиковых частот, так и параметры формы сигнала с учетом времени нарастания, длительности и амплитуды сигналов. Выявлены закономерности в результатах, полученных при регистрации сигналов акустической эмиссии, включая три характерных диапазона частот сигналов акустической эмиссии, связанных с различными типами повреждений материала и их сменами в зависимости от величины предварительно нанесенного дефекта. Проведены оценки жесткости материала при нагрузке, а также локализации напряжений у образцов с поверхностными дефектами. Метод корреляции цифровых изображений позволил изучить эволюцию неоднородных полей деформаций на поверхности образцов. Исследование позволило установить закономерности влияния наружных дефектов на прочностные характеристики и механизмы разрушения полимерного композиционного материала, что имеет значение для оценки работоспособности композитных конструкций при наличии поверхностных повреждений.

*Ключевые слова:* экспериментальная механика, акустическая эмиссия, параметрический анализ, композиционные материалы, метод цифровой корреляции изображений.

---

\* Выполнено за счет гранта РФФИ №25-29-00188 (<https://rscf.ru/project/25-29-00188/>).

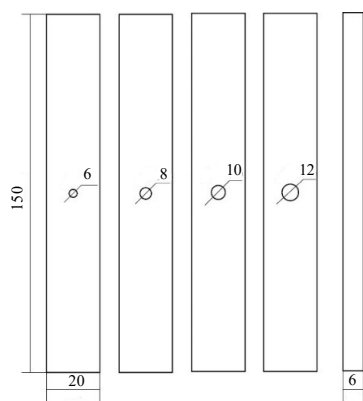
## Введение

В настоящее время возрастает роль полимерных композиционных материалов (ПКМ) в современной промышленности. Такие материалы широко применяются в высокотехнологичных отраслях промышленности, где необходимо наличие сведений о надежности и долговечности материалов и конструкций. Исследования в области механики материалов показывают, что наличие поверхностных дефектов существенно влияет на прочностные характеристики композитов, однако из-за анизотропной структуры ПКМ возникают сложности с анализом механизмов разрушения и в последствии с проектированием конструкций из таких материалов. Экспериментальные исследования указывают на необходимость комплексного подхода к изучению влияния наружных дефектов на механические свойства композитов. Вопрос влияния величины дефектов и обнаружение критических значений также является одной из задач исследователей [1–7]. Современная экспериментальная механика широко использует методы неразрушающего контроля, такие как метод акустической эмиссии и метод корреляции цифровых изображений, для более детального анализа поведения материала под нагрузкой [8–11]. Метод акустической эмиссии (АЭ) позволяет оценить повреждения материала в процессе нагружения. Существует множество подходов для интерпретации сигналов АЭ, однако все исследователи сходятся на необходимости использования нескольких параметров сигналов. Наиболее распространены подходы по анализу энергии импульсов и пиковых частот сигналов, также применяются методы по идентификации на основе формы сигнала с использованием времени нарастания, амплитуды и длительности отдельных сигналов [12–19]. Еще одним современным перспективным методом для определения внутренних и внешних повреждений является метод корреляции цифровых изображений. Особенно эффективен этот метод при совместном использовании с другими методами диагностики и неразрушающего контроля [20–22]. Цель настоящего исследования заключается в комплексном изучении влияния наружных дефектов различной величины на механические характеристики и процессы разрушения ПКМ при одноосном квазистатическом растяжении с применением современных методов диагностики. Исследование проведено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете с использованием уникальной научной установки «Комплекс испытательного и диагностического оборудования для исследования свойств конструкционных и функциональных материалов при сложных термомеханических воздействиях» (<http://ckp-rf.ru/usu/501309/>).

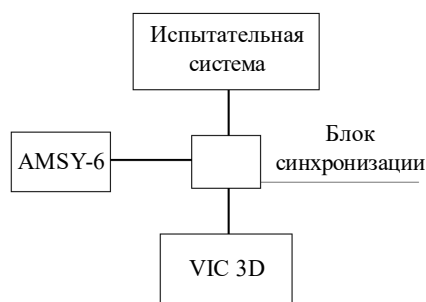
## Методика проведения исследования

Была разработана и реализована программа экспериментальных исследований на образцах стеклопластика СТЭФ в виде полосок с размерами 150×20×6 мм (рис. 1). СТЭФ – это слоистый армированный стеклопластик, полученный методом горячего прессования стеклотканей, пропитанных термореактивным связующим на основе совмещенных эпоксидной и фенолформальдегидной смол. Этот материал используется в качестве модельного, так как обладает высокими физико-механическими свойствами при нормальной температуре. Были разработаны и успешно применены методики нанесения поверхностных повреждений при контролируемых параметрах нагружения (сила, перемещение). Суть методики нанесения дефекта «вмятина» заключалась в приложении фиксированной нагрузки 15 кН (значение

нагрузки определено экспериментально для исследуемого материала) при помощи испытательной системы Instron 5982 (100 кН) к образцу стеклопластика в поперечном направлении через стальные валы с полусферическими наконечниками с разными диаметрами 6, 8, 10 и 12 мм. Далее поврежденные образцы испытывались на одноосное растяжение. Всего было испытано по 4 образца в каждой группе. Скорость подвижного захвата составляла 2 мм/мин, деформации измерялись на образцах при помощи видеосистемы VIC-3D и метода корреляции цифровых изображений.



а)



б)

Рис. 1. Вид испытываемых образцов (а), схема проведения испытания с дополнительными системами (б)

Испытания по нанесению дефектов и последующему квазистатическому растяжению сопровождались регистрацией сигналов АЭ с применением многоканальной системы AMSY-6. Был использован широкополосный датчик AE144A с диапазоном частот 100–500 кГц и предусилитель с коэффициентом усиления 34 дБ. Частота дискретизации данных составляла 10 МГц, пороговое значение установлено на величине 40 дБ.

Для расчета продольной деформации использовались дополнительные модули программного обеспечения видеосистемы: «виртуальный экстензометр», область, точка (рис. 2а). Анализируя полученные данные с помощью различных способов замера деформации, можно сделать вывод, что наличие нанесенных дефектов не повлияло на результаты расчета (рис. 2б). Отклонение по значениям продольной деформации составило менее 0,1%, что видно по увеличенному фрагменту кривой «напряжение–деформация» (рис. 2в). Для дальнейшего расчета продольной дефор-

мации использовались данные, полученные с помощью двух «виртуальных экстензометров».

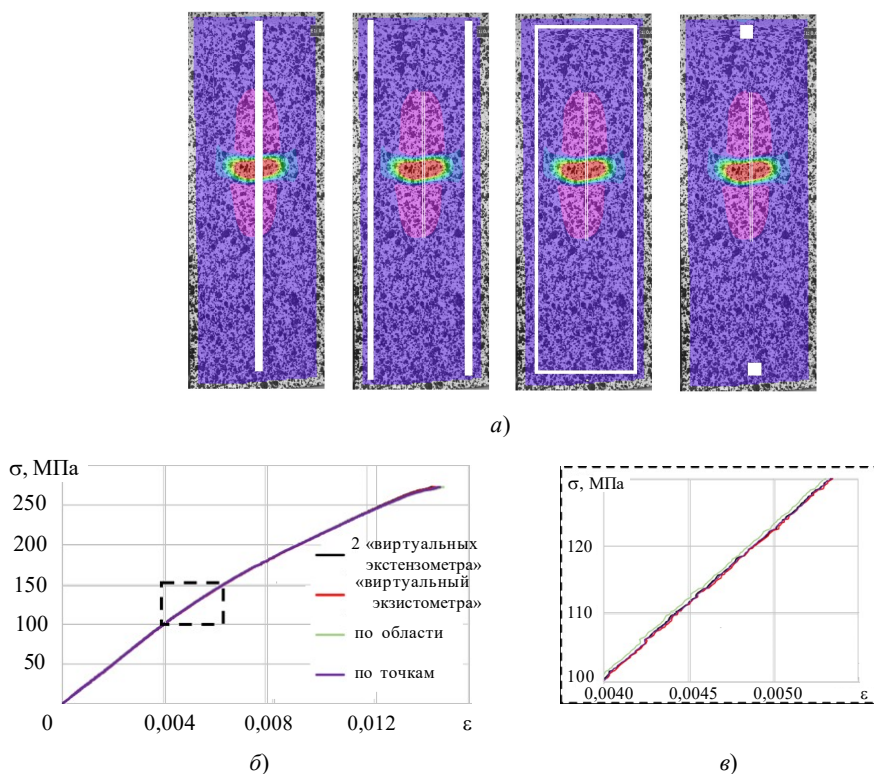


Рис. 2. Схема расположения дополнительных инструментов видосистемы на поверхности образца (а), кривые «напряжение–деформация» (б), увеличенный фрагмент кривой (в)

### Результаты и обсуждения

На рис. 3 представлены полученные экспериментально диаграммы нагружения образцов стеклопластика, кривые «напряжение–деформация». На рисунке красная линия соответствует образцу без дефекта, черная сплошная линия – образцу с дефектом 12 мм, черная пунктирная линия – образцу с дефектом 10 мм, черная штриховая линия – образцу с дефектом 8 мм, черная штрихпунктирная линия – образцу с дефектом 6 мм. Основные величины сведены в таблицу 1. Анализируя диаграммы нагружения, кривые «напряжение–деформация» и табличные данные, можно сделать вывод, что диаметр индентора (вмятины) не влияет на статическую прочность материала при заданном режиме нанесения эксплуатационного дефекта, однако сам режим вдавливания индентора при 15 кН приводит к снижению средних значений напряжений на 7–10% относительно значений, полученных на образцах без предварительно нанесенных дефектов.

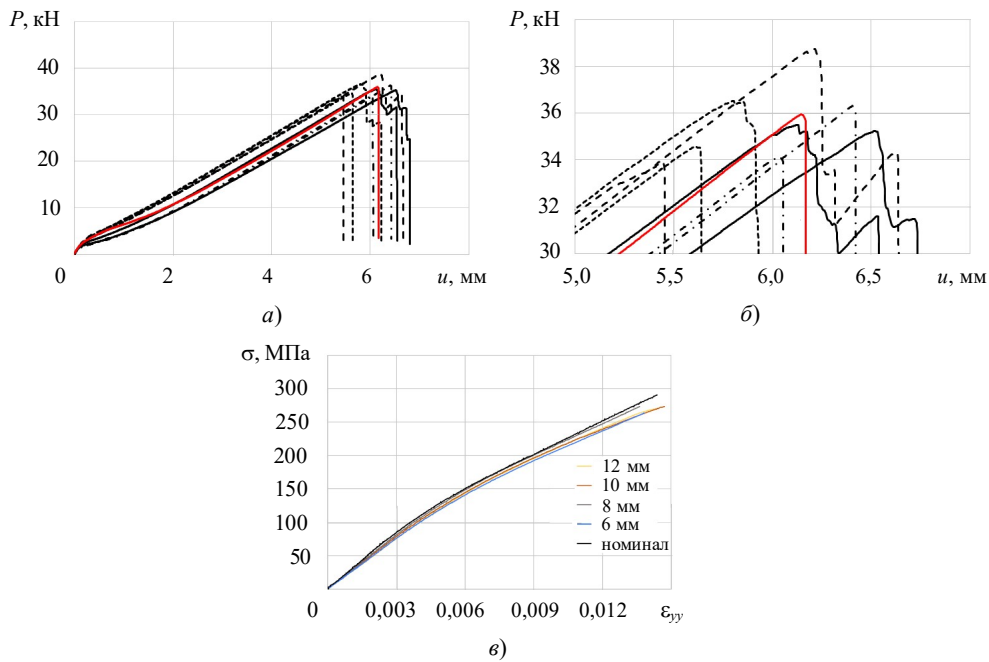


Рис. 3. Характерные диаграммы нагружения образцов стеклопластика с предварительно нанесенными дефектами «вмятина»

Таблица 1

**Результаты механических испытаний образцов  
стеклопластика с нанесенными дефектами «вмятина»**

№	Дефект «вмятина» от индентора диаметром, мм	Максим. нагрузка, кН	Максимальные напряжения, МПа	Жесткость образцов*, ГПа
1	без дефекта	38,2±3,2	311±27	21,1±0,6
2	12	35,3±0,2	287±3	21,2±0,3
3	10	35,5±1,3	285±11	20,8±0,2
4	8	36,3±3,4	290±29	21,5±0,3
5	6	35,2±1,5	283±15	20,3±0,4

\*Под жесткостью образцов понимается и определяется характеристика, аналогичная модулю упругости, но для элементов конструкций с концентратором.

После проведения анализа разрушений по испытанным образцам в соответствии с ГОСТ Р 56785-2015 были установлены характерные типы разрушения образцов. Образцам, приведенным на рис. 4, были присвоены коды разрушения: *a*, *b* – код РРС (продольное расщепление в средней части образца), *в* – код РРН (продольное расщепление в нижней части образца), *г* – код ГЗН (горизонтальное разрушение в нижней части образца). На образцы наносились дефекты «вмятина» инденторами разных диаметров: *a* – 12 мм, *b* – 10 мм, *в* – 8 мм, *г* – 6 мм.

При параметрическом анализе сигналов АЭ были использованы энергетический параметр сигналов, пиковые частоты, а также характеристики формы сигнала, такие как время нарастания, медианная частота сигнала и амплитуда сигнала. При анализе проводилась оценка кумулятивной энергии сигналов АЭ. Кумулятивная энергия представляет собой суммарную энергию отдельных энергетических сигналов за прой-

денный отрезок времени. Для количественной оценки энергии акустических импульсов значения представлены в размерности энергетических единиц.

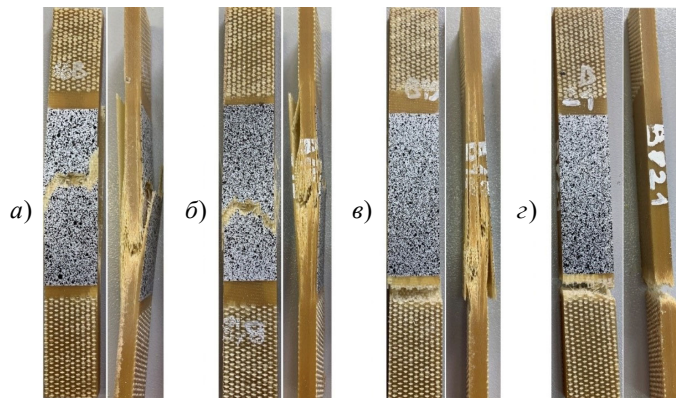


Рис. 4. Характерный вид разрушения образцов стеклопластика после испытаний на растяжение с предварительно нанесенными дефектами «вмятина»

Были построены зависимости кумулятивной энергии от времени (рис. 5). При нанесении дефектов максимальное количество энергии было зафиксировано при минимальном диаметре индентора. При деформировании инденторами в 8, 10 и 12 мм значения кумулятивной энергии близки друг к другу. Это можно объяснить более глубоким вдавливанием индентора с наименьшим диаметром в материал и, как следствие, повреждением большего количества слоев. При последующем растяжении суммарная энергия сигналов увеличивается при увеличении диаметра дефекта. У образцов с дефектами диаметром 10 и 12 мм разрушение происходило послойно, начиная с зоны дефекта, этим можно объяснить более высокий уровень кумулятивной энергии у образцов таких типов. В материале происходило расслоение, а затем и разрыв волокон, сопровождаемый растрескиванием матрицы. У образцов с меньшим диаметром дефекта разрушение происходило более локализовано и менее продолжительно, что можно наблюдать на диаграммах кумулятивной энергии, имеющих только одну «ступень».

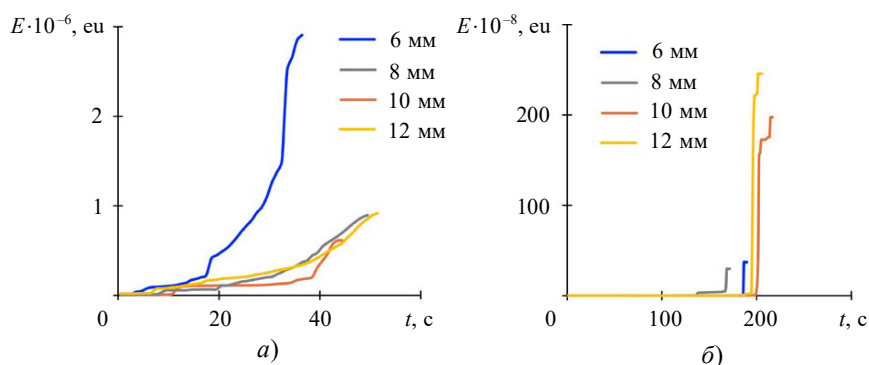


Рис. 5. Диаграммы зависимости кумулятивной энергии сигналов АЭ от времени при нанесении дефектов на образцы (а) и при испытаниях на растяжение (б)

Были построены диаграммы распределения пиковых частот в зависимости от количества сигналов  $N$  при нанесении дефектов и испытаниях на растяжение (рис. 6). С учетом материала и частотного диапазона используемого датчика были выделе-

ны 3 диапазона частот: 0–110, 110–200 и 200–400 кГц. При нанесении дефектов свыше 90% сигналов было зафиксировано в низкочастотном диапазоне, что может указывать на повреждения матрицы материала, при этом зафиксирован небольшой процент (от 9 до 3% сигналов) в диапазоне высоких частот, что указывает на повреждения волокон. Стоит отметить, что сигналы в высокочастотном диапазоне зафиксированы при диаметре инденторов 10 и 12 мм.

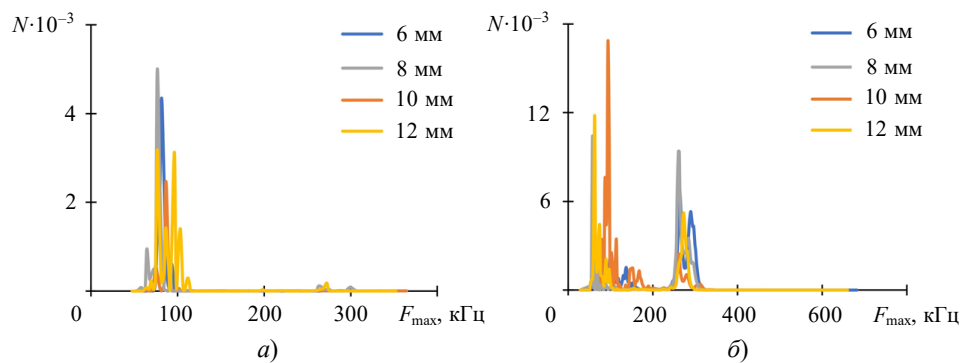


Рис. 6. Частоты спектрального максимума в материале при нанесении дефектов на образцы (а) и при испытаниях на растяжение (б)

При последующем квазистатическом растяжении у испытываемых образцов зафиксированы сигналы во всех трех диапазонах, включая среднечастотный; эти сигналы могут свидетельствовать о расслоении в материале. Кроме оценки количества сигналов в каждом диапазоне были оценены значения кумулятивной энергии сигналов при соответствующих частотах (таблица 2). Из таблицы видно, что при увеличении диаметра дефекта сигналы в среднечастотном диапазоне имеют большее значение энергии. На фотографиях разрушенных образцов (см. рис. 4) тоже наблюдается расслоение у образцов с диаметрами дефектов 10 и 12 мм. Также снижается процентная составляющая сигналов в высокочастотном диапазоне, что указывает на повреждения волокон при нанесении дефектов.

Таблица 2

**Значения кумулятивной энергии сигналов АЭ в зависимости от диапазона пиковых частот при испытаниях на квазистатическое растяжение**

Диаметр дефекта, мм	Значение кумулятивной энергии, $e_u \cdot 10^{-8}$		
	$F_{\max} = 0-110$ кГц	$F_{\max} = 110-200$ кГц	$F_{\max} = 200-400$ кГц
6	2,0115	0,0167	26,3450
8	16,1994	0,3129	9,2826
10	55,3699	13,4073	6,7899
12	62,5490	15,1457	4,6703

Были построены зависимости параметров, характеризующих форму сигнала АЭ, таких как время нарастания сигнала, медианная частота и пиковая амплитуда. В каждом сигнале АЭ устанавливается пороговое значение – критический уровень амплитуды, относительно которого система разделяет регистрируемые колебания на «сигналы» и «шумы». Пересечение порога – это момент, когда амплитуда регистрируемого сигнала превышает или опускается ниже заранее установленного порогового значения. На основе пересечения порога определяются основные характеристики сигнала: амплитуда, энергия, длительность, время нарастания и количество выбросов [23]. Количество отсчетов – количество раз в пределах длительности сигнала, когда

один сигнал (форма волны) превышает текущее пороговое значение;  $AF$  – средняя частота сигнала, отношение количества отсчетов или пересечений порога и длительности сигнала,  $RA$  – отношение времени нарастания к пиковой частоте.

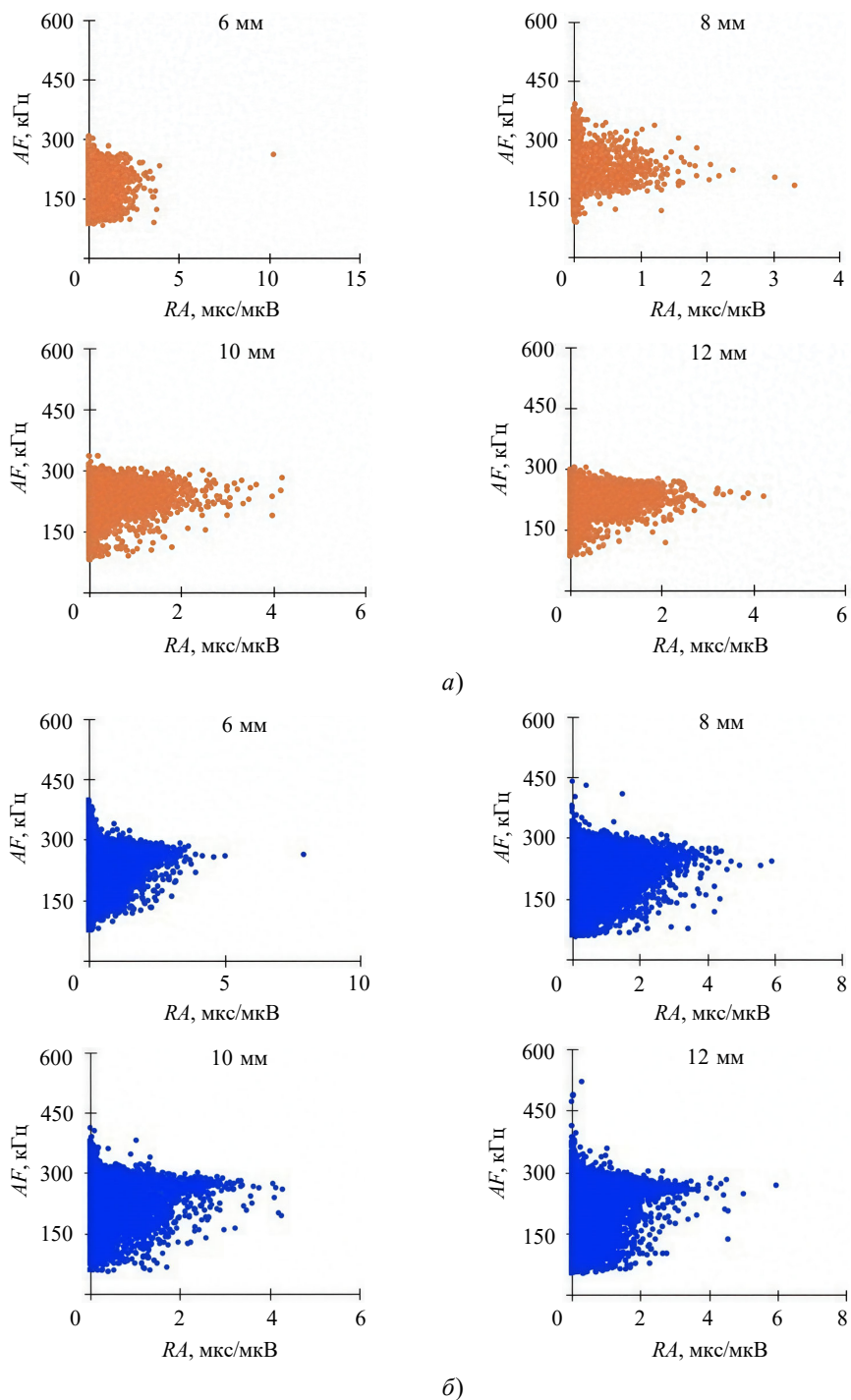


Рис. 7. Зависимость между параметрами  $AF$  и  $RA$  при нанесении дефектов (а) и испытаниях на растяжение (б)

Параметр  $RA$  является показателем угла нарастания сигнала АЭ, характеризующим передний фронт импульса. Соотношение этих параметров также может указывать на характер повреждений в материале. Во время нанесения дефектов (рис. 7а) при увеличении диаметра индентора значения по оси  $AF$  практически не изменяются, тогда как по оси  $RA$  значения увеличиваются, что может указывать на развитие трещин в материале.

При растяжении (рис. 7б) диапазон значений  $AF$  увеличивается, зафиксированы сигналы с высокими  $AF$  и низкими  $RA$ , что также указывает на межслоевое разрушение материала, а увеличение диапазона  $AF$  при неизменных  $RA$  свидетельствует об образовании микротрещин в образцах. Полученные результаты качественно повторяют зависимости других исследователей. Так, в статье [9] были получены схожие диапазоны пиковых частот и выявлены закономерности в механизмах разрушения материала. Также в [13] был применен параметрический анализ и получены схожие данные АЭ, а именно связь видов разрушения материала с параметрами формы сигнала.

Для анализа полученных данных с видеосистемы были построены поля продольных деформаций для каждого образца при соответствующем уровне нагрузки (25, 50% от максимальных напряжений и в момент перед разрушением). В качестве примера на рис. 8 представлены поля продольных деформаций для образцов с диаметрами дефектов 6 и 12 мм.

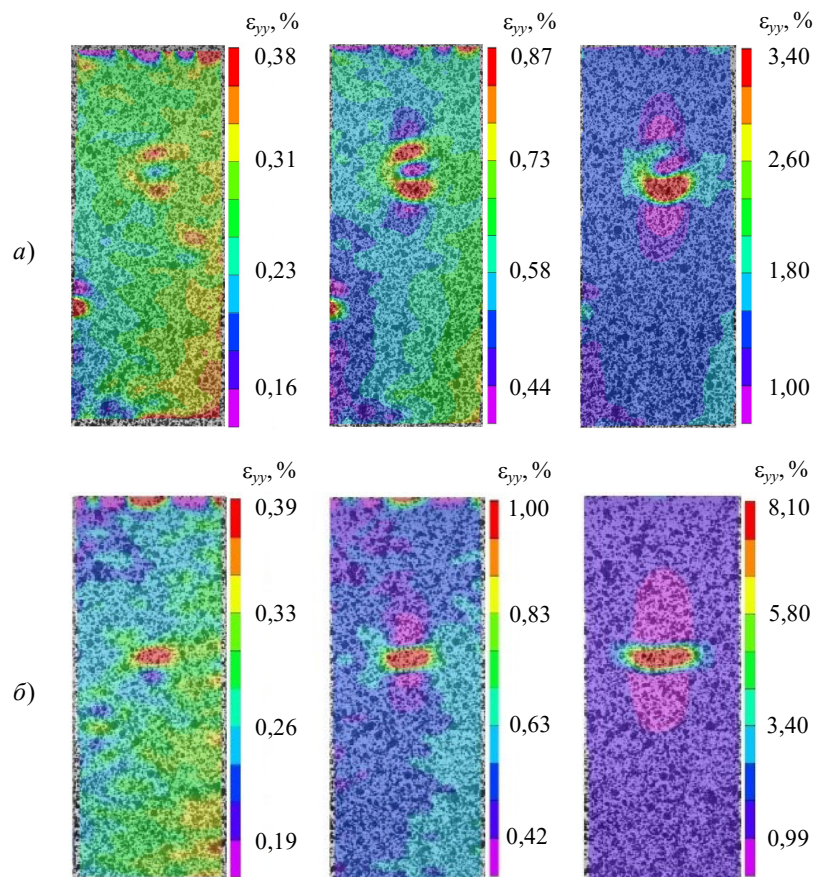


Рис. 8. Поля продольных деформаций для образцов с нанесенными дефектами диаметром 6 мм (а) и 12 мм (б)

По ходу увеличения уровня нагрузки происходит образование зон с минимальными и максимальными степенями продольных деформаций. Как видно из картин полей, локализация деформаций происходит в зоне нанесенного дефекта. Сильный скачок по росту деформаций наблюдается в момент перед разрушением образцов (см. рис. 8). Значения продольных деформаций различаются в 4 раза, что подтверждает, в какой зоне рабочей части образца произошло разрушение.

Из анализа полей продольных деформаций для каждой серии образцов с дефектами разных размеров на рис. 9 представлены картины полей осевых деформаций, сделанные до разрушения образцов. Исходя из картин полей, можно сделать вывод, что для образцов с большими диаметрами дефектов (10 и 12 мм) разрушение происходит в зоне нанесенного дефекта, о чем свидетельствует сильный рост деформаций.

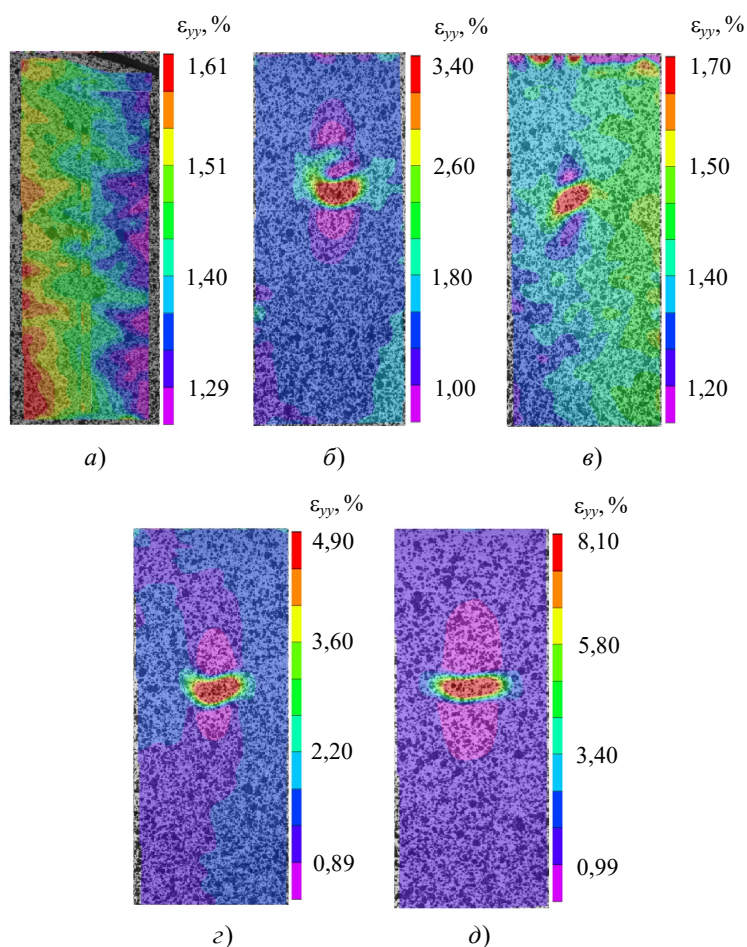


Рис. 9. Картины полей продольных деформаций в момент перед разрушением образцов без дефекта (а), с дефектом 6 мм (б), 8 мм (в), 10 мм (г), 12 мм (д)

### Заключение

Проведены экспериментальные исследования полимерного композиционного материала по нанесению дефектов различного диаметра при постоянной нагрузке. Оценено механическое поведение композитов при различной степени поврежденности.

Исходя из полученных данных системы регистрации акустической эмиссии, были установлены соответствия разных подходов при анализе параметров сигналов. Выявлены механизмы разрушения в материале, энергетический вклад сигналов при различных диапазонах пиковых частот. Выявлены закономерности влияния формы сигнала на основе зависимостей между параметрами  $AF$  и  $RA$  на механизмы разрушения материала.

В ходе анализа извлеченных данных с видеосистемы были построены поля продольных деформаций для каждой серии образцов. Из картин полей продольных деформаций следует, что у дефектов с большим диаметром разрушение происходило в зоне самого дефекта.

#### Список литературы

1. Gunarti M., Prawoto A., Fauzi W., Wirawan W. Mechanical behavior of glass fiber-epoxy composite laminates for ship hull structures. *Mechanical Engineering for Society and Industry*. 2024. Vol. 4. No 2. P. 156–166. DOI: 10.31603/mesi.11589.
2. Lobanov D.S., Lykova A.V., Pankov A.M., Ugolnikov M.V. Effect of internal technological defects and loading waveform on structural composite fatigue life. *Fracture and Structural Integrity*. 2025. Vol. 71. P. 1–10. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.71.01.
3. Javadian M., Dadashi A., Bagheri A., Azadi M. Fatigue behavior and failure mechanism of 3d-printed continuous glass fiber-reinforced pla composites under rotating bending fatigue. *Composites Part C: Open Access*. 2025. Vol. 17. Article No 100623. DOI: 10.1016/j.jcomc.2025.100623.
4. Kolor S.R., Karimzadeh A., Abdullah M., Petru M., Yidris N., Sapuan S., Tamin N. Linear-nonlinear stiffness responses of carbon fiber-reinforced polymer composite materials and structures: A numerical study. *Polymers*. 2021. Vol. 13. Iss. 3. Article No 344. DOI: 10.3390/polym13030344.
5. Ariff I., Ahmad Z., Gan K., Petru M., Kolor S.R., Tamin N. Damage initiation strengths for the mesoscale lamina damage model of fiber-reinforced polymer composite laminates. *Journal of Composite Materials*. 2025. Vol. 59. Iss. 11. P. 1399–1415. DOI: 10.1177/00219983241311359.
6. Khan S., Kolor S.R., Wong K.J., Siebert G., Tamin N. A fatigue model to predict interlaminar damage of FRP composite laminates subjected to mode I load. *Polymers*. 2023. Vol. 15. Iss. 3. Article No 527. DOI: 10.3390/polym15030527.
7. Slovikov S.V., Lobanov D.S., Chebotareva E.A., Melnikova V.A. The influence of technological defects on the mechanical behavior of CFRP during buckling under compression based on DIC data and acoustic emission. *Fracture and Structural Integrity*. 2024. Vol. 69. P. 60–70. DOI:10.3221/IGF-ESIS.69.05.
8. Ботвина Л.Р., Белецкий Е.Н., Тютин М.Р. и др. Разрушение стали 30ХГСА в условиях смешанных мод нагружения. *Физическая мезомеханика*. 2023. Т. 26. №2. С. 30–42. DOI: 10.55652/1683-805X\_2023\_26\_2\_30.
9. Тютин М.Р., Ботвина Л.Р., Шувалов А.Н. и др. Размерный эффект, наблюдаемый при испытании на изгиб образцов из фибробетона. *Деформация и разрушение материалов*. 2023. №1. С. 28–40. DOI: 10.31044/1814-4632-2023-1-28-40.
10. Бабушкин А.В., Бабушкина А.В., Ожгихин И.П. Уточнение механических характеристик 3D-армированных углепластиков авиационного назначения при перекрестном наблюдении за процессом деформирования. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. 2023. №75. С. 103–119. DOI 10.15593/2224-9982/2023.75.09.
11. Барат В.А., Марченков А.Ю., Поройков А.Ю. и др. Применение метода акустической эмиссии и цифровой корреляции изображений при выявлении диффузионных прослоек разнородных сварных соединений. *Дефектоскопия*. 2023. №10. С. 73–75. DOI: 10.31857/S0130308223100081.
12. Chen J., Yu Z., Jin H. Nondestructive testing and evaluation techniques of defects in

fiber-reinforced polymer composites: A review. *Frontiers in Materials*. 2022. Vol. 9. P. 1–29. DOI: 10.3389/fmats.2022.986645.

13. Willems F., Benz J., Bonten C. Detecting the critical strain of fiber reinforced plastics by means of acoustic emission analysis. *Journal of Acoustic Emission*. 2016. Vol. 33. P. 525–534.

14. Lange Yu.V. The mechanical impedance analysis method of nondestructive testing (a review). *Nondestructive Testing and Evaluation*. 1994. Vol. 11. No 4. P. 177–193. DOI: 10.1080/10589759408952830.

15. Chen Y., Dong L., Adinolfi G.M., Guo J., Zhang Y., Vinciguerra S. Acoustic emission and wave velocity monitoring of rock-backfill composites: damage identification and failure characterization. *Measurement*. 2025. Vol. 256. Pt. B. Article No 118247. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118247>.

16. Weimin Song, Wenlong Yan, Hao Wu, Yuxuan Sun, Xiaobao Chen, Zhiqiang Cheng, De Zhang. Acoustic emission characterization of mode I fracture in asphalt mixtures at intermediate temperatures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2026. Vol. 141. Pt. A. Article No 105271. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2025.105271>.

17. Jingye Hao, Su Ju, Ke Duan, Pengcheng Zou, Congcong Jia, Jinshui Yang, Changping Yin, Dingding Chen. A damage assessment method based on recent-time acoustic emission events for composite interlaminar damage. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 27. Article No 106016. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106016>.

18. Lobanov D., Yankin A., Mullahmetov M., Chebotareva E., Melnikova V. The analysis of stress raisers affecting the gfrp strength at quasi-static and cyclic loads by the theory of critical distances, digital image correlation, and acoustic emission. *Polymers*. 2023. Vol. 15. Iss. 9. Article No 2087. DOI: 10.3390/polym15092087.

19. Lobanov D.S., Lykova A.V., Pankov A.M. Effect of external operational damage on the mechanical behavior of GFRP under quasi-static and fatigue loading. *Fracture and Structural Integrity*. 2026. Vol. 76. P. 212–222. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.76.13.

20. Yoras D., Czlonka-Makowska S., Kairyte A., Šeputytė-Jucikė J., Drehmmer L., Tonatto M. Elastic property evaluation of fiberglass and epoxy resin composite material using digital image correlation. *Materials*. 2024. Vol. 17(15). Article No 3726. DOI: 10.3390/ma17153726.

21. Pan T., Zheng Y., Zhou Y., Luo W., Xu X., Hou C., Zhou Y. Damage pattern recognition for corroded beams strengthened by CFRP anchorage system based on acoustic emission techniques. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 406. Article No 33474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133474.

22. Rishikesan V., Bhagyesh C., Arunachalam N. Characterisation of drilling-induced damage in GFRP honeycomb sandwich composites using acoustic emission. *Procedia Manufacturing*. 2021. Vol. 53. P. 664–672. DOI: 10.1016/j.promfg.2021.06.066.

23. Чеботарева Е.А., Лобанов Д.С. Оценка влияния эксплуатационных дефектов и наружных повреждений на механическое поведение полимерного слоистого композиционного материала. *Проблемы прочности и пластичности*. 2025. Т. 87. №4. С. 539–551. DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-4-539-551.

#### References

1. Gunarti M., Prawoto A., Fauzi W., Wirawan W. Mechanical behavior of glass fiber-epoxy composite laminates for ship hull structures. *Mech. Eng. Soc. Ind*. 2024. Vol. 4. No 2. P. 156–166. DOI: 10.31603/mesi.11589.

2. Lobanov D.S., Lykova A.V., Pankov A.M., Ugolnikov M.V. Effect of internal technological defects and loading waveform on structural composite fatigue life. *Fractur. Struct. Integr*. 2025. Vol. 71. P. 1–10. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.71.01.

3. Javadian M., Dadashi A., Bagheri A., Azadi M. Fatigue behavior and failure mechanism of 3d-printed continuous glass fiber-reinforced pla composites under rotating bending fatigue. *Compos. Part C-Open*. 2025. Vol. 17. Article No 100623. DOI: 10.1016/j.jcomc.2025.100623.

4. Kolor S.R., Karimzadeh A., Abdullah M., Petru M., Yidris N., Sapuan S., Tamin N. Linear-nonlinear stiffness responses of carbon fiber-reinforced polymer composite materials and structures: A numerical study. *Polymers*. 2021. Vol. 13. Iss. 3. Article No 344. DOI: 10.3390/polym13030344.

5. Ariff I., Ahmad Z., Gan K., Petru M., Kolor S.R., Tamin N. Damage initiation strengths for the mesoscale lamina damage model of fiber-reinforced polymer composite laminates. *J. Compos. Mater.* 2025. Vol. 59. Iss. 11. P. 1399–1415. DOI: 10.1177/00219983241311359.
6. Khan S., Kolor S.R., Wong K.J., Siebert G., Tamin N. A fatigue model to predict interlaminar damage of FRP composite laminates subjected to mode I load. *Polymers.* 2023. Vol. 15. Iss. 3. Article No 527. DOI: 10.3390/polym15030527.
7. Slovikov S.V., Lobanov D.S., Chebotareva E.A., Melnikova V.A. The influence of technological defects on the mechanical behavior of CFRP during buckling under compression based on DIC data and acoustic emission. *Fractur. Struct. Integr.* 2024. Vol. 69. P. 60–70. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.69.05.
8. Botvina L.R. Beletsky E.N., Tyutin M.R. et al. Razrushenie stali 30KhGSA v usloviyakh smeshannykh mod nagruzheniya [Fracture of 30CRMNSIA Steel under mixed loading modes]. *Fizicheskaya mezhmekhanika [Phys. Mesomech.]*. 2023. Vol. 26. No 2. P. 30–42 (In Russian).
9. Tyutin M.R., Botvina L.R., Shuvalov A.N., Petersen T.B., Levin V.P., Sineev A.A., Solov'ev V.G. Size effect during bending tests of fiber-reinforced concrete specimens. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2023. Vol. 2023. No 4. P. 541–552.
10. Babushkina A.V., Babushkina A.V., Ozhgikhin I.P. Utochnenie mekhanicheskikh kharakteristik 3D-armirovannykh ugleplastikov aviatsionnogo naznacheniya pri perekrestnom nablyudenii za protsessom deformirovaniya [Clarification of mechanical characteristics 3d-reinforced carbon fiber plastics for aviation purposes under cross-observation behind the deformation process]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika [Perm National Research Politechnic University. Aerospace Engineering]*. 2023. No 75. P. 103–119 (In Russian).
11. Barat V.A., Marchenkov A.Yu., Poroykov A.Yu. et al. Primenenie metoda akusticheskoy emissii i tsifrovoy korrelyatsii izobrazheniy pri vyyavlenii diffuzionnykh prosloek raznorodnykh svarnykh soedineniy [Application of acoustic emission and digital image correlation for detecting diffusion interlayers in dissimilar welded joints]. *Defektoskopiya*. 2023. No 10. P. 73–75 (In Russian).
12. Chen J., Yu Z., Jin H. Nondestructive testing and evaluation techniques of defects in fiber-reinforced polymer composites: A review. *Front Mater.* 2022. Vol. 9. P. 1–29. DOI: 10.3389/fmats.2022.986645.
13. Willems F., Benz J., Bonten C. Detecting the critical strain of fiber reinforced plastics by means of acoustic emission analysis. *Journal of Acoustic Emission*. 2016. Vol. 33. P. 525–534.
14. Lange Yu.V. The mechanical impedance analysis method of nondestructive testing (a review). *Nondestructive Testing and Evaluation*. 1994. Vol. 11. No 4. P. 177–193. DOI: 10.1080/10589759408952830.
15. Chen Y., Dong L., Adinolfi G.M., Guo J., Zhang Y., Vinciguerra S. Acoustic emission and wave velocity monitoring of rock-backfill composites: damage identification and failure characterization. *Measurement*. 2025. Vol. 256. Pt. B. Article No 118247. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118247>.
16. Weimin Song, Wenlong Yan, Hao Wu, Yuxuan Sun, Xiaobao Chen, Zhiqiang Cheng, De Zhang. Acoustic emission characterization of mode I fracture in asphalt mixtures at intermediate temperatures. *Theor. Appl. Fract. Mec.* Vol. 141. Pt. A. 2026. Article No 105271. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2025.105271>.
17. Jingye Hao, Su Ju, Ke Duan, Pengcheng Zou, Congcong Jia, Jinshui Yang, Changping Yin, Dingding Chen. A damage assessment method based on recent-time acoustic emission events for composite interlaminar damage. *Result. Eng.* 2025. Vol. 27. Article No 106016. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106016>.
18. Lobanov D., Yankin A., Mullahmetov M., Chebotareva E., Melnikova V. The analysis of stress raisers affecting the gfrp strength at quasi-static and cyclic loads by the theory of critical distances, digital image correlation, and acoustic emission. *Polymers.* 2023. Vol. 15. Iss. 9. Article No 2087. DOI: 10.3390/polym15092087.
19. Lobanov D.S., Lykova A.V., Pankov A.M. Effect of external operational damage on the mechanical behavior of GFRP under quasi-static and fatigue loading. *Fracture and Structural Integrity*. 2026. Vol. 76. P. 212–222. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.76.13.

20. Yoras D., Czlonka-Makowska S., Kairyte A., Šeputytė-Jucikė J., Drehmmer L., Tonatto M. Elastic property evaluation of fiberglass and epoxy resin composite material using digital image correlation. *Materials*. 2024. Vol. 17(15). Article No 3726. DOI: 10.3390/ma17153726.

21. Pan T., Zheng Y., Zhou Y., Luo W., Xu X., Hou C., Zhou Y. Damage pattern recognition for corroded beams strengthened by CFRP anchorage system based on acoustic emission techniques. *Constr. Build. Mater.* 2023. Vol. 406. Article No 33474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133474.

22. Rishikesan V., Bhagyesh C., Arunachalam N. Characterisation of drilling-induced damage in GFRP honeycomb sandwich composites using acoustic emission. *Procedia Manuf.* 2021. Vol. 53. P. 664–672. DOI: 10.1016/j.promfg.2021.06.066.

23. Chebotareva E.A., Lobanov D.S. Otsenka vliyaniya ekspluatatsionnykh defektov i naruzhnykh povrezhdeniy na mekhanicheskoe povedenie polimernogo sloistogo kompozitsionnogo materiala [Assessment of the influence of operational defects and external damage on the mechanical behaviour of polymer laminated composite material]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2025. Vol. 87. No 4. P. 539–551 (In Russian).

### STUDY OF RESIDUAL MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER LAMINATED COMPOSITE AFTER APPLYING INDENTATIONS OF DIFFERENT SIZES\*

**Chebotareva E.A., Lobanov D.S., Melnikova V.A.**

*Center of Experimental Mechanics of Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation*

*cem.chebotareva@mail.ru*

*Received by the Editor 2025/11/30*

The paper presents the results of a comprehensive study of the influence of external defects of various sizes on the mechanical characteristics and fracture processes of a polymer composite material. Experimental research was conducted on samples with artificially introduced indentation defects under fixed load using indenters of different diameters. After defect introduction, the samples were tested for quasi-static uniaxial tension. An analysis of sample fracture types was performed, and according to regulatory documentation, the impact of defect size on the material's strength characteristics was established. During the research, a three-dimensional video system and an acoustic emission (AE) recording system were utilized. An analysis of material fracture mechanisms was conducted based on acoustic emission signals. The analysis included both characteristics of the energy parameter and peak frequencies, as well as signal shape parameters based on signal rise time, duration, and amplitude. Regularities were identified in the data obtained during AE signal registration. Three characteristic frequency ranges of AE signals were revealed, associated with different types of material damage and their changes depending on the size of the pre-introduced defect. The material stiffness under load was evaluated, as well as stress localization in samples with surface defects. The digital image correlation method allowed studying the evolution of non-uniform deformation fields on the sample surface. The research established regularities in the influence of external defects on the strength characteristics and fracture mechanisms of the polymer composite material, which is significant for assessing the performance of composite structures in the presence of surface damage.

*Keywords:* experimental mechanics, acoustic emission, parametric analysis, composite materials, digital image correlation.

---

\* The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No 25-29-00188 (<https://rscf.ru/project/25-29-00188/>).