Стрингарь, Е.М. Экспериментальное изучение предельных деформаций и разрушение стеклопластиков с концентраторами напряжений / Е.М. Стрингарь, Д.С. Лобанов, Е.А. Чеботарева. – DOI: 10.15593/perm.mech/2024.4.09 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 4. – С. 98–112.

Perm Polytech Style: Strungar E.M., Lobanov D.S., Chebotareva E.A. Experimental Study of Ultimate Deformation and Fracture of FRP with Stress Concentrators. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 4, pp. 98-112. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.4.09

пермский политех

**ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА**
**№ 4, 2024**
**PNRPU MECHANICS BULLETIN**
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2024.4.09
УДК 539.3

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И РАЗРУШЕНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

**Е.М. Стрингарь, Д.С. Лобанов, Е.А. Чеботарева**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 30 сентября 2024 г.
Одобрена: 04 октября 2024 г.
Принята к публикации:
08 октября 2024 г.

*Ключевые слова:*

эксперимент, концентрация напряжений, стеклопластик, структурный элемент, дефект, расположение отверстий, масштабный фактор, метод корреляции цифровых изображений, акустическая эмиссия, микроскоп.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена экспериментальному исследованию влияния масштабного эффекта на процессы инициирования и развития дефектов в области концентраторов напряжений в структурно-неоднородном материале при квазистатическом нагружении. Образцы композита были изготовлены из стеклотекстолита СТЭФ. В качестве концентратора рассматривалось сквозное отверстие разного диаметра, расположенное по геометрическому центру образца. Получены новые данные о механическом поведении композита с помощью метода корреляции цифровых изображений (DIC), метода акустической эмиссии (AE) и оптической микроскопии. Проведены экспериментальные исследования механического поведения композитов в зонах концентраторов с учетом структурных параметров. По мере увеличения диаметра отверстия несущая способность снижается. Метод DIC позволил изучить эволюцию неоднородных полей деформаций на поверхности образцов. Был отмечен характерный рост кумулятивной энергии у всех видов образцов вне зависимости от размера и наличия концентраторов напряжений, а именно плавный незначительный рост значений с резким всплеском высокой энергии в конце испытания. Были проанализированы значения частот спектрального максимума, отмечены дополнительные интервалы частот, а также показан вклад каждого в общее количество сигналов, установлены закономерности между интервалами частот и наличием концентратора на образцах. На основе микроструктурных исследований выявлены основные виды дефектов, полученные данные подтверждают результаты, зарегистрированные с помощью акустической эмиссии. Таким образом, в работе получены экспериментальные данные, демонстрирующие наличие масштабного эффекта прочности стеклопластиков с концентраторами в зависимости от структурных параметров.

© **Стрингарь Елена Михайловна** – к. ф.-м. н., с. н. с. Центра экспериментальной механики, e-mail: cem.spaskova@mail.ru, ID: 0000-0002-2246-8638.
**Лобанов Дмитрий Сергеевич** – к. т. н., с. н. с. Центра экспериментальной механики, e-mail: cem.lobanov@gmail.com, ID: 0000-0003-1948-436X.
**Чеботарева Екатерина Алексеевна** – асп. кафедры Экспериментальной механики и конструкционного материаловедения, e-mail: cem.chebotareva@mail.ru, ID: 0000-0002-6374-6964.

**Elena M Strungar** – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of the Center of Experimental Mechanics, e-mail: cem.spaskova@mail.ru, ID: 0000-0002-2246-8638.
**Dmitry S. Lobanov** – PhD in Technical Sciences, Senior Researcher of the Center of Experimental Mechanics, e-mail: cem.lobanov@gmail.com, ID: 0000-0003-1948-436X.
**Ekaterina A. Chebotareva** – postgraduate student of the Department of Experimental Mechanics and Structural Materials Science, e-mail: cem.chebotareva@mail.ru, ID: 0000-0002-6374-6964.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

# EXPERIMENTAL STUDY OF ULTIMATE DEFORMATION AND FRACTURE OF FRP WITH STRESS CONCENTRATORS

**E.M. Strungar, D.S. Lobanov, E.A. Chebotareva**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 30 September 2024
Approved: 04 October 2024
Accepted for publication:
08 October 2024

*Keywords:*

experiment, stress concentration, fiberglass, structural element, defect, hole location, scale factor, digital image correlation method, acoustic emission, microscope.

ABSTRACT

This work experimentally studies the influence of the scale effect on the processes of initiation and development of defects in the region of stress concentrators in a structurally inhomogeneous material under quasi-static loading. Composite specimens were made of glass-textolite STEF. A through hole of different diameters located in the geometric center of the specimen was considered as a concentrator. New data on the mechanical behavior of the composite were obtained using digital image correlation (DIC), acoustic emission (AE) method and optical microscopy. In this work, experimental investigations of the mechanical behavior of composites in the hub zones have been carried out considering the structural parameters. As the hole diameter increases, the load carrying capacity decreases. The DIC method allowed us to study the evolution of inhomogeneous strain fields on the surface of the samples. A characteristic growth of cumulative energy was observed in all types of specimens regardless of the size and presence of stress concentrators, namely a smooth insignificant growth of values with a sharp spike of high energy at the end of the test. The values of spectral maximum frequencies were analyzed, additional frequency intervals were marked, and the contribution of each to the total number of signals was shown, the regularities between the frequency intervals and the presence of the concentrator on the samples were established. On the basis of the microstructural studies, the main types of defects have been identified, the data obtained confirm the results recorded by the acoustic emission. Thus, the experimental data demonstrating the presence of a scale effect of the strength of glass-reinforced plastics with concentrators depending on the structural parameters have been obtained in this work.

## Введение

Влияние концентраторов на глобальное поведение структур композиционных материалов вызывает значительное снижение прочности и срока службы составных структур. Наличие отверстия в образце можно использовать для моделирования других сложных форм повреждений, таких как удары или сквозные трещины [1–4]. В научной литературе отечественными и зарубежными авторами [5; 6] отмечается, что сложность структуры композиционных материалов приводит к необходимости рассматривать дефекты на различных масштабных уровнях и на разных стадиях изготовления структурных компонентов, материалов и изделий. В работах приведенных авторов было отмечено, что разрушение обычно наблюдается в области, не совпадающей с точкой максимального коэффициента концентрации осредненных напряжений.

Особый интерес представляет установление связи между масштабным эффектом и параметром структурной неоднородности материала. Чем больше размеры образца, тем больше в нем может быть всякого рода дефектов – пустот, включений, участков с различными внутренними и внешними повреждениями. Поскольку отверстия разного размера вовлекают в работу различные объемы материала, которые, в свою очередь, включают в себя разное количество элементов структуры, процессы деформирования могут вести себя поразному, особенно, когда размер отверстия сопоставим с величиной структурного элемента. Для структурно-неоднородных материалов в зону концентрации напряжений попадает разное количество структурных элементов, реализуются различные механизмы разрушения этих элементов. С размером структурного элемента связан масштабный эффект (эффект абсолютного размера, англ. scale effect), учет которого необходим при постановке модельных экспериментов [7–11].

В целом термин «эффект абсолютного размера» относится к влиянию размера образца на механические характеристики, такие как прочность. Размерные эффекты в горной инженерии представляли особый интерес в течение последних четырех десятилетий, и было проведено много исследований для понимания этого явления. Для прогнозирования разрушения бетона фундаментальное значение имеет эффект размера материала [12; 13]. Номинальная прочность всегда уменьшается с увеличением размера образца. Механическое поведение бетона характеризуется квазихрупкостью в лабораторных условиях, но в достаточно больших масштабах имеет тенденцию становиться совершенно хрупким [14]. Вопрос о размерном эффекте материала стал решающим при проектировании бетонных конструкций, для которых установлено различие между масштабами в лабораторных испытаниях. Среди различных теорий размерного эффекта материала Базант [14] установил, что детерминированный размерный эффект на номинальную прочность вызван наличием большой зоны разрушения (FPZ) характерного размера, которая всегда предшествует дискретным макротрещинам. Размерные эффекты не ограничиваются горными породами. Ре-

зультаты, полученные в работе [15], дают прямое доказательство того, что ширина образца C/SiC оказывает большое влияние на механические свойства. В работе [11] отмечено влияние масштабного эффекта на прочностные характеристики и даны рекомендации выбору оптимального соотношения ширины образца и размера отверстия для композиционного материала PET (rPET) при статических испытаниях. В работе [16] приведены исследования, позволяющие оценить то, как концентрация напряжений и деформаций в ортотропных композитных пластинах влияют на размер и форму отверстия, количество слоев, ориентацию волокон и кривизну пластины с помощью расчетных данных.

Оценка прочности образцов с отверстиями является сложной задачей даже при простом нагружении из-за взаимодействия различных видов повреждений. Распределение напряжений вокруг отверстий оценивается с помощью вычислительных методов и экспериментального анализа напряжений. Важным научным направлением являются эксперименты с применением комбинированных способов исследования разрушения композитных объектов с концентраторами в виде отверстий, вырезов и выточек для анализа напряженно-деформированного состояния материала [17–20]. В работах многих авторов отмечается перспективность совместного использования видеосистемы бесконтактного измерения и анализа полей перемещений и деформаций для анализа механического поведения композитов при различных видах квазистатического и циклического нагружения [21–29]. Также одним из эффективных методов диагностики структурной целостности и обнаружения развивающихся дефектов под воздействием нагрузки в конструкционных материалах является метод акустической эмиссии (АЭ). Изучение процессов накопления повреждений в композитах дает понимание о стадийности разрушения структурно-неоднородных материалов, что, в свою очередь, необходимо при создании ответственных конструкций и сооружений из композиционных материалов [30–36].

Таким образом, полученные в работе результаты в области экспериментальной механики композитов имеют существенное значение для развития моделей и методов прочностного анализа элементов ответственных композитных конструкций. Основная цель исследования в накоплении экспериментальных данных об особенностях механического поведения современных композиционных материалов с концентраторами напряжений, в частности, оценка влияния размера отверстия на степень снижения несущей способности композитов, а также исследование механического поведения и масштабного фактора на геометрически подобных образцах.

## 1. Материал и методика

С целью оценки влияния размера отверстия на степень снижения несущей способности композитного объекта был рассмотрен стеклотекстолит СТЭФ. Это слоистый армированный стеклопластик, полученный методом горячего прессования стеклотканей, пропитанных термореактивным связующим на основе совмещенных эпоксидной и фенолформальдегидной смол. Испытания проводились на электромеханической системе Instron 5882 с использованием камер Prosilica 50 мм. Сплошные образцы (4×25×150 мм) были испытаны для определения основных механических свойств со скоростью удлинения $u'_0$=2 мм/мин. Продольная и поперечная деформация регистрировалась с использованием дополнительного модуля программного обеспечения видеосистемы «виртуальный экстензометр». Всего на образец устанавливалось по два «виртуальных экстензометра» справа и слева от отверстия в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, *b*. Для отработки методики и оценки влияния структурного элемента проводились испытания образцов (4×25×150 мм) на одноосное растяжение с разной величиной диаметра сквозного отверстия $d$=2, 4, 6, 8, 10, 12 мм со скоростью удлинения $u'_0$=2 мм/мин.

Программа исследований по оценке влияния структурных и размерных параметров композитных образцов с концентратором напряжений в форме сквозного кругового отверстия включала в себя проведение механических испытаний на одноосное растяжение трех групп образцов-полосок с различным диаметром отверстия ($d$) 2, 4 и 6 мм. Следует отметить, что при подборе ширины ($h$) и длины ($l$) рабочей части образца соблюдалось подобие геометрических размеров. В частности, ширина рабочей части равна шести диаметрам отверстия ($h$=6$d$), длина рабочей части – четырнадцати диаметрам отверстия ($h$=14$d$), при этом толщина образца была неизменна (табл. 1). Стоит отметить, что верхний предел размера по ширине образца, как правило, максимум около 50 мм. Это ограничение связано с предельным размером захвата испытательной системы. Кинематическое нагружение реализовано при постоянной скорости перемещения траверсы испытательной системы $u'_0$=0,28 мм/мин (для образцов с $d$=2 мм), $u'_0$=0,56 мм/мин ($d$=4 мм) и $u'_0$=0,84 мм/мин ($d$=6 мм) (0,04 мин$^{-1}$).

Таблица 1

Геометрические размеры композитного образца

Table 1

Geometric dimensions of the composite specimen

| № п/п | Диаметр отверстия, мм | Ширина рабочей части, мм | Длина рабочей части, мм | Общая длина, мм | Скорость нагружения, мм/мин |
|---|---|---|---|---|---|
| | $d$ | $h$=6$d$ | $l$=14$d$ | $L$ | 0,01·$l$ |
| 1 | 2 | 12 | 28 | 88 | 0,28 |
| 2 | 4 | 24 | 56 | 153 | 0,56 |
| 3 | 6 | 36 | 84 | 184 | 0,84 |

Цифровая оптическая система использовалась для регистрации деформации на структурно-неоднородной поверхности композитного образца. Значение среднего напряжения σ определялось как отношение приложен-

ной силы к толщине образца ($H$) и 5 диаметрам ($d$) в соответствии с формулой (1). Стоит отметить, что расчет среднего напряжения σ образца с концентратором осуществляется за вычетом отверстия из общей ширины (в сечении образца с наименьшей площадью).

$$\sigma = \frac{P}{H \cdot 5d}. \quad (1)$$

Для регистрации сигналов акустической эмиссии использовалась многоканальная система AMSY-6. В испытаниях был применен широкополосный датчик AE144A с рабочим диапазоном частот до 500 кГц и предусилитель с коэффициентом усиления 34 дБ. Частота дискретизации данных составила 10 МГц, пороговое значение регистрации сигналов АЭ – 40 дБ. В качестве информативных параметров использовались энергетический параметр, амплитуда сигналов и частота спектрального максимума (характеристика быстрого преобразования Фурье). Энергетический параметр сигналов АЭ рассчитывался с помощью специальной программной опции в единицах энергии (eu).

После проведения механических испытаний образцы были исследованы с применением оптического стереомикроскопа Carl Zeiss Stereo Discovery V12 с 63х увеличением.

## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. Оценка влияния размера концентратора напряжений при изучении процессов неупругого деформирования и разрушения

Прочность композитного образца уменьшается с увеличением диаметра отверстия. Отличительный характер поведения наблюдается на восходящих и ниспадающих участках, что свидетельствует о разных механизмах разрушения структурных элементов. В табл. 2 записаны значения максимальной нагрузки ($P$) и соответствующее перемещение ($U$).

Анализ поврежденности композиционного материала вследствие развития макротрещин проводился с использованием микроскопа. В области больших деформаций вокруг отверстия с обеих сторон наблюдается разрыв волокон, свидетельство этого приведено на фотографиях поверхности образца (рис. 1). Также наблюдается растрескивание матрицы и расслоение. После разрушения матрицы в материале происходит отслоение волокон и впоследствии их разрушение.

Таблица 2

Значения максимальной нагрузки ($P$)
и соответствующее перемещение ($U$)
для образцов различного диаметра $d_1$-$d_6$

Table 2

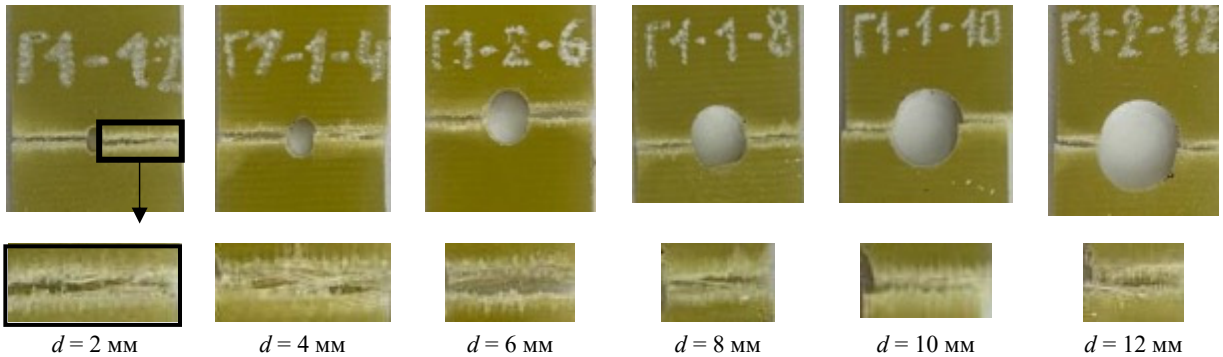
Maximum load ($P$) and corresponding displacement ($U$)
values for specimens with different diameters $d_1$-$d_6$

| Обозначение | $d$, мм | $P$, кН | $U$, мм |
|---|---|---|---|
| $d_0$ | 0 | 28,3 | 4,4 |
| $d_1$ | 2 | 24,5 | 4,3 |
| $d_2$ | 4 | 19,9 | 3,3 |
| $d_3$ | 6 | 17,4 | 3,0 |
| $d_4$ | 8 | 15,1 | 2,8 |
| $d_5$ | 10 | 14,1 | 2,3 |
| $d_6$ | 12 | 12,2 | 2,1 |

Начальные участки кривых $P$~$U$ совпадают, модуль упругости не зависит от размера диаметра. Как видно из полученных результатов, приведенных на рис. 2, несущая способность композитного образца уменьшается с увеличением диаметра отверстия. Отличительный характер поведения наблюдается на восходящих и ниспадающих участках, что свидетельствует о разных механизмах разрушения структурных элементов.

Для дополнительной оценки влияния размера концентратора напряжений относительно параметров структуры слоисто-волокнистого композиционного материала при изучении процессов неупругого деформирования и разрушения ниже приведены неоднородные поля продольных деформаций на поверхности образца (рис. 3). Поля получены при уровнях нагрузки 100, 75, 50 % от $P_{max}$, причем $P_{max}$ совпадает с $\sigma_{max}$.

В области малого отверстия при $d$=2 мм наблюдается характерная неоднородность в области отверстия при уровне деформаций 75 % от $P_{max}$. В остальных случаях ($d$=4, 6, 8, 10 и 12 мм) неоднородность проявляется при 50 % от $P_{max}$. Слева и справа от отверстия зафиксированы зоны с максимальным значением деформаций, снизу и сверху присутствуют зоны разгрузки.



$d$ = 2 мм $d$ = 4 мм $d$ = 6 мм $d$ = 8 мм $d$ = 10 мм $d$ = 12 мм

Рис. 1. Фотографии структуры стеклопластика после разрушения образца

Fig. 1. Photographs of the fiberglass structure after sample fracture

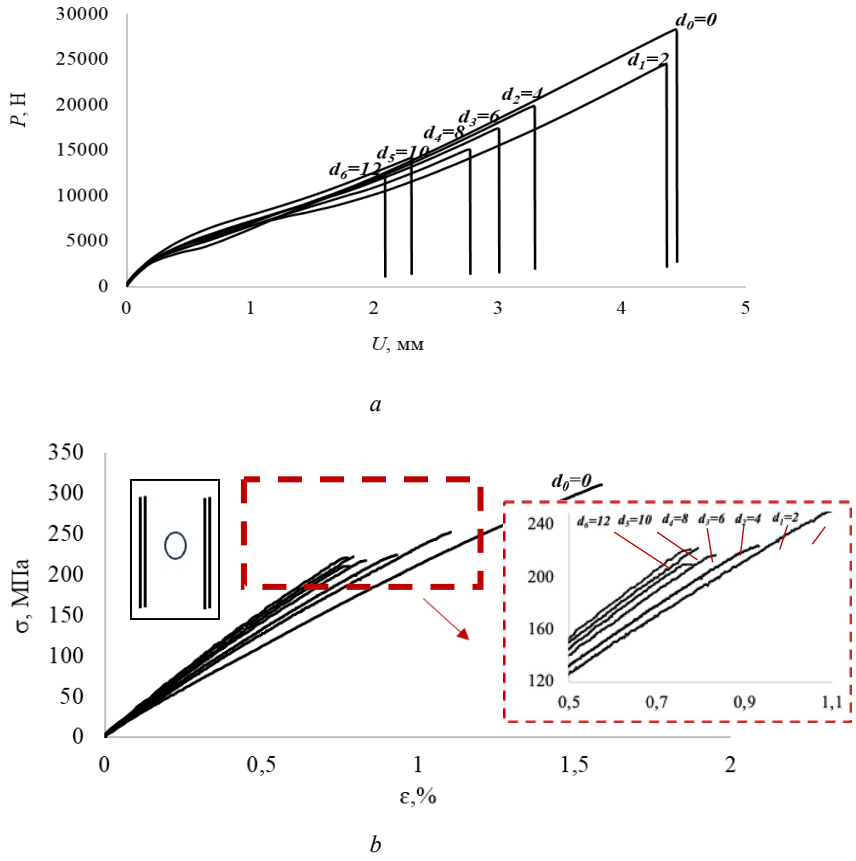



Рис. 2. Диаграмма нагружения (*a*) и деформирования (*b*) для образцов с различными диаметрами отверстия при испытаниях на одноосное растяжение

Fig. 2. Loading (*a*) and deformation diagram (*b*) for specimens with different hole diameters in uniaxial tensile tests

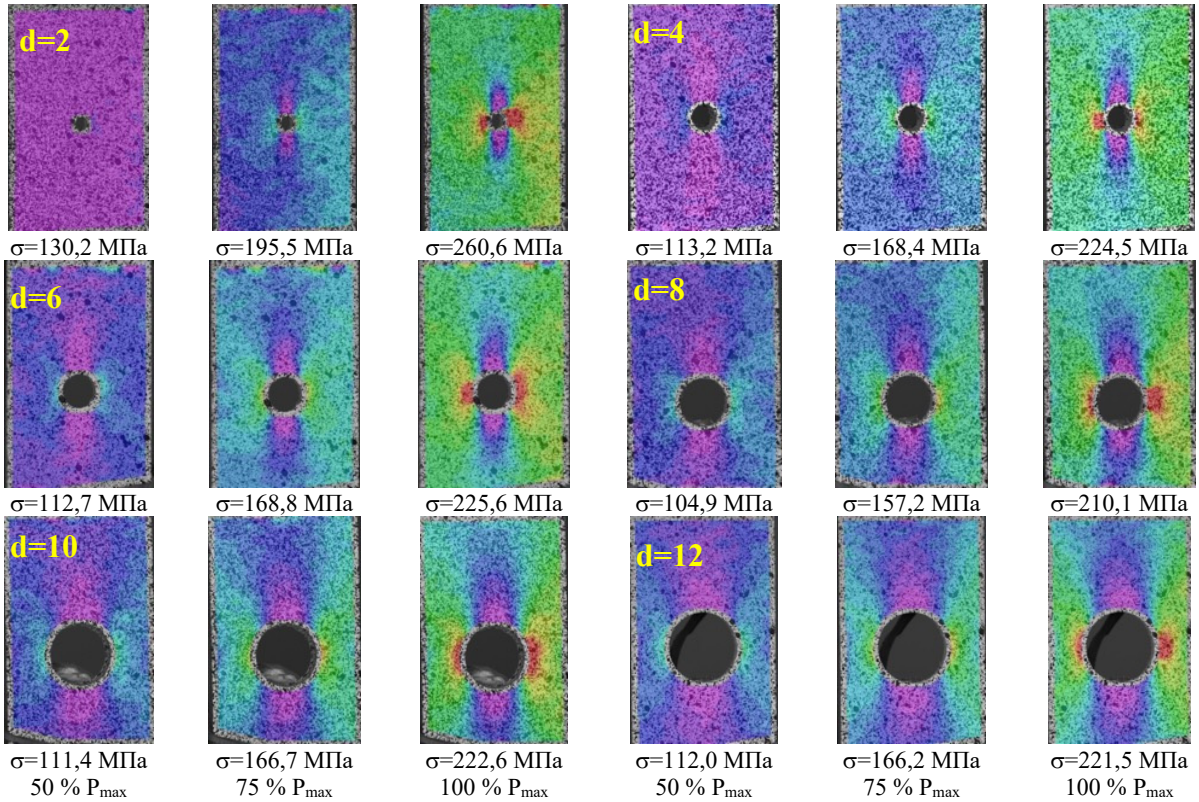



Рис. 3. Неоднородные поля продольных деформаций на поверхности стеклопластиковых образцов с концентраторами разного диаметра

Fig. 3. Inhomogeneous longitudinal strain fields on the surface of fiberglass specimens with concentrators of different diameters

С помощью системы AMSY-6 регистрировались сигналы акустической эмиссии. Перед началом испытания была произведена калибровка и подобрано оборудование. Использовались широкочастотный пьезоэлектрический датчик AE144A (частотный диапазон 50–450 кГц) и предусилитель (коэффициент усиления 34 дБ). Частота дискретизации данных составляла 10 МГц, пороговое значение при регистрации сигналов АЭ – 40 дБ.

Каждый сигнал представляет собой одно событие акустической эмиссии и содержит в себе определенные характеристики, которые позволяют провести комплексный параметрический анализ. В работе были использованы энергетический параметр, количество сигналов, пиковые амплитуда и частота.

Кумулятивная энергия – суммарная энергия за все предыдущие временные промежутки. Исходя из значений кумулятивной энергии, можно судить о процессе накопления повреждений в материале. На рис. 4 представлена диаграмма зависимости кумулятивной энергии от времени образцов с разным диаметров отверстий. Максимальное значение кумулятивной энергии было зафиксировано у образцов с отверстием 4 мм, далее при увеличении диаметра, значения снижаются. У образцов с диаметром отверстия 0, 2 и 6 мм значения находятся на одном уровне, так же, как и у образцов с диаметром отверстия 8, 10 и 12 мм.

Также были построены зависимости пиковых амплитуд и пиковых частот сигналов АЭ (рис. 5–7). По значениям пиковых амплитуд сигналов можно также отметить снижение количества сигналов при увеличении отверстия на образцах, при этом сигналы с высоким значением амплитуды (более 75 дБ) фиксируются раньше при увеличении отверстия.

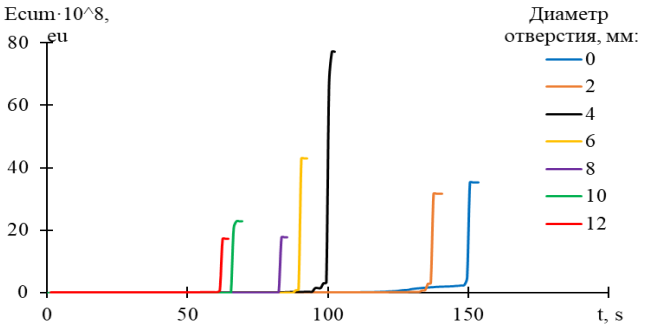
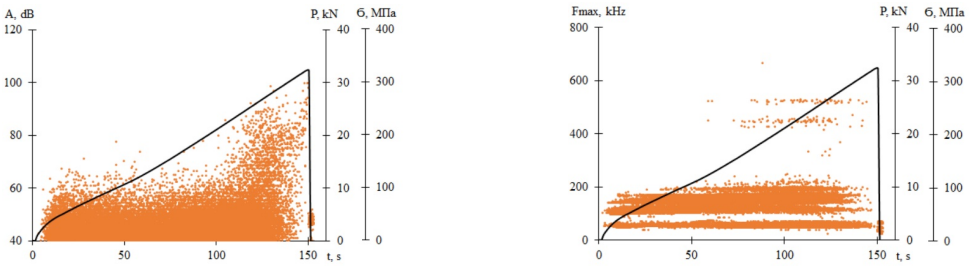



Рис. 4. Диаграмма зависимости кумулятивной энергии от времени образцов с разными отверстиями

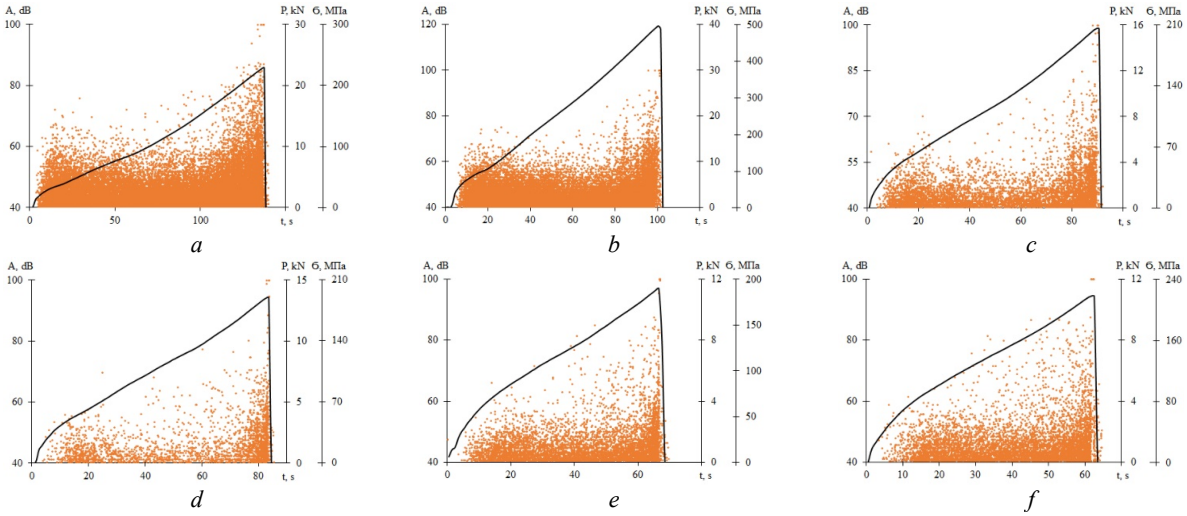
Fig. 4. Diagram of cumulative energy dependence on time of samples with different holes




*a* *b*

Рис. 5. Диаграмма зависимости пиковых амплитуд (*a*) и пиковых частот (*b*) сигналов АЭ от времени, совмещенная с диаграммой нагружения образца без отверстия

Fig. 5. Time dependence diagram of peak amplitudes (*a*) and peak frequencies (*b*) of AE signals, combined with the loading diagram of the specimen without a hole




*a* *b* *c*

*d* *e* *f*

Рис. 6. Диаграмма зависимости пиковых амплитуд от времени, совмещенная с диаграммой нагружения образцов с отверстием 2 мм (*a*), 4 мм (*b*), 6 мм (*c*), 8 мм (*d*), 10 мм (*e*), 12 мм (*f*)

Fig. 6. Time dependence diagram of peak amplitudes combined with the loading diagram of specimens with a 2 mm (*a*), 4 mm (*b*), 6 mm (*c*), 8 mm (*d*), 10 mm (*e*), 12 mm (*f*) hole

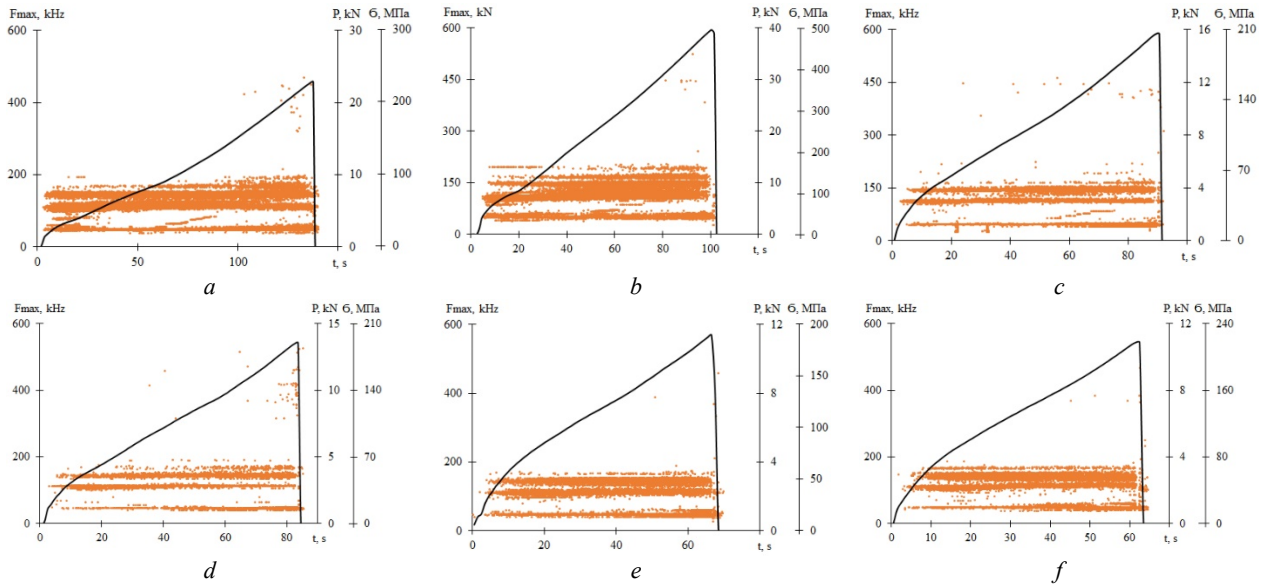



Рис. 7. Диаграмма зависимости пиковых частот от времени, совмещенная с диаграммой нагружения образцов с отверстием 2 мм (*a*), 4 мм (*b*), 6 мм (*c*), 8 мм (*d*), 10 мм (*e*), 12 мм (*f*)

Fig. 7. The diagram of peak frequencies dependence on time combined with the loading diagram of specimens with a hole of 2 mm (*a*), 4 mm (*b*), 6 mm (*c*), 8 mm (*d*), 10 mm (*e*), 12 mm (*f*)

Значения пиковых частот преимущественно присутствуют в низком диапазоне частот, который соответствует такому механизму разрушения, как растрескивание матрицы. В среднем и высоком диапазоне частот зафиксированы единичные сигналы, при этом при увеличении отверстия сигналов в этих диапазонах частот все меньше и меньше.

Исследование влияния расположения отверстия относительно структурного элемента плетения на снижение несущей способности композитных образцов с концентратором напряжений проводилось на основании образцов из первой части работы (образцы одного размера с разными диаметрами отверстий, пункт 2.1). Площадь ячейки для стеклопластика составила– 4 мм$^2$ – $S_1$. Отношение площади ячейки в образце СТЭФ к площади отверстия – коэффициент ($k$), отражающий влияние концентратора на несущую способность материала. Увеличение коэффициента – если площадь ячейки превышает площадь отверстия (коэффициент больше 1), это может привести к увеличению несущей способности образца (табл. 3).

Таблица 3

Расположение отверстия относительно структурного элемента плетения

Table 3

Location of the hole in relation to the weave structural element

| Параметр | Значение | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Диаметр отверстия, мм | $d = 2$ | $d = 4$ | $d = 6$ | $d = 8$ | $d = 10$ | $d = 12$ |
| Площадь отверстия – $S_2$ мм$^2$ | 3,14 | 12,57 | 28,27 | 50,27 | 78,54 | 113,10 |
| $k = \frac{s_1}{s_2}$ | 1,27 | 0,32 | 0,14 | 0,08 | 0,05 | 0,04 |

Большая площадь материала вокруг отверстия обеспечивает большую жесткость и устойчивость к нагрузкам, что способствует повышению несущей способности. Уменьшение коэффициента – если площадь ячейки меньше площади отверстия (коэффициент меньше 1), это может снизить несущую способность образца. Уменьшенная площадь материала вокруг отверстия может уменьшить его жесткость и устойчивость к нагрузкам, что может привести к уменьшению несущей способности.

## 2.2. Изучение эффектов проявления масштабного фактора прочности на процессы инициирования и развития дефектов в области концентраторов напряжений в структурно-неоднородном материале

На рис. 8 приведены характерные диаграммы деформирования для образцов с диаметром отверстия 2, 4 и 6 мм. Пунктирной линией отмечен сплошной образец. Начальные участки кривых σ~ε совпадают, можно предположить, что модуль упругости не зависит от масштабирования образца. Было показано, что упругий участок композитных образцов следует закону подобия, в то время как предельное значение среднего напряжения σ при разрушении увеличивается по мере уменьшения диаметра образца. В ходе исследований обнаружен масштабный эффект, по мере увеличения диаметра отверстия несущая способность снижается. Также по полученным данным видно, что с увеличением скорости деформации наклон кривой «напряжение – деформация» на стадии пластической деформации постепенно уменьшается, а напряжение значительно изменяется (17 %). Прочность при растяжении увеличивается с ростом скорости деформации.

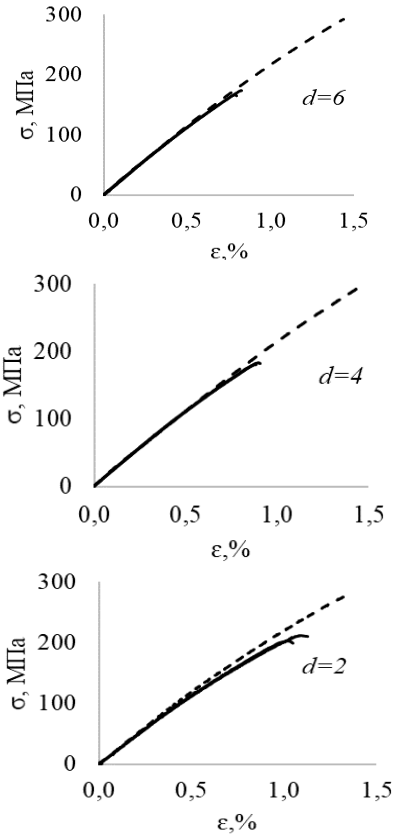



Рис. 8. Диаграммы деформирования образцов при испытании на одноосное растяжение

Fig. 8. Deformation diagrams of specimens in uniaxial tensile test

Для количественного анализа выделим в композите некоторый характерный размер неоднородности для данного материала (δ). Размер структурного элемента (δ) для стеклопластика составил δ=4 мм (ширина переплетения). Можно отметить, что на образцах с шириной 12 мм наблюдается преимущественно расслоение и растрескивание матрицы, тогда как на образцах шириной 36 мм причиной разрушения послужил разрыв волокон.

С целью оценки влияния масштабного эффекта была получена диаграмма зависимости предельного значения среднего напряжения ($\sigma_{max}$) от параметра неоднородности (ξ) для образцов с разным диаметром отверстия ($d$) (рис. 9). Параметр неоднородности (ξ) зависит от диаметра отверстия ($d$) и от размера структурного элемента δ, вычисляется по формуле:

$$\xi = \frac{d}{\delta}. \qquad (2)$$

Для стеклопластика (рис. 9) получены данные в диапазоне параметра неоднородности ξ от 0,5 до 1,5. При указанных значениях структурного параметра неоднородности (ξ) масштабный эффект присутствует. Полученные результаты свидетельствуют, что предельное значение среднего напряжения не является константой материала, а зависит от размера структурного элемента.

Использование полученных экспериментальных данных необходимо для усовершенствования моделей механического поведения конструкций из композиционных материалов в зонах конструктивных особенностей. Исходя из полученных результатов, сделан вывод о необходимости дальнейших исследований. Требуется дополнительно рассмотреть различные соотношения диаметра отверстия и размера структурного элемента. Осуществить оценку механизмов повреждения композитов различной структуры в зонах концентрации напряжений.

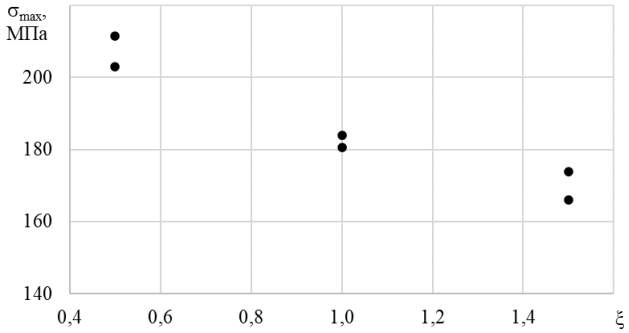
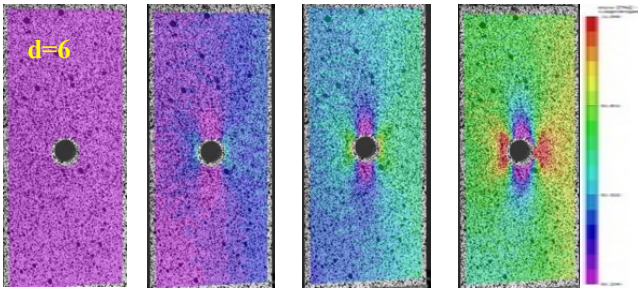



Рис. 9. График зависимости параметра ξ от предельного значения среднего напряжения $\sigma_{max}$ для СТЭФ

Fig. 9. Graph of dependence of the parameter ξ on the limiting value of the average voltage $\sigma_{max}$ for STEF

Для оценки эффекта проявления масштабного фактора прочности на процессы инициирования и развития дефектов в области концентраторов напряжений в структурно-неоднородном материале получены поля неоднородных деформаций (рис. 10) при уровнях нагрузки 100, 75, 50, 25 % от $P_{max}$. Стоит отметить, что на характер распределения полей влияния масштабного эффекта не отмечено.




σ=50,4 МПа 25 % $P_{max}$ | σ=100,5 МПа 50 % $P_{max}$ | σ=150,7 МПа 75 % $P_{max}$ | σ=201,0 МПа 100 % $P_{max}$

Рис. 10. Неоднородные поля продольных деформаций на поверхности стеклопластиковых геометрически подобных образцов

Fig. 10. Inhomogeneous longitudinal strain fields on the surface of fiberglass geometrically similar specimens

По данным акустической эмиссии был проведен параметрический анализ на основе энергетического параметра, количества сигналов, пиковой амплитуды и пиковой частоты.

Энергетический параметр представлен в виде кумулятивной энергии сигналов (рис. 11). У всех типов образцов характер кумулятивной энергии схожий – при разрушении образца наблюдается всплеск энергетического параметра, превосходящий значение энергии предыдущих сигналов на несколько порядков. Можно отметить, что у образцов шириной 36 мм, как с отверстием, так и нет, значения кумулятивной энергии на два порядка ниже, чем у образцов шириной 12 и 24 мм.

На рис. 12 представлены типичные зависимости количества сигналов АЭ от времени, совмещенные с диаграммой нагружения. У образцов шириной 12 мм наблюдается значительный рост количества сигналов при достижении максимальной нагрузки. У образцов шириной 24 мм, как с отверстием, так и нет, зарегистрирован постепенный рост количества сигналов с увеличением при приближении к максимальной нагрузке. У образцов шириной 36 мм в начале испытания значение количества сигналов возрастает, затем уменьшается в течение всего испытания, при приближении к максимальной нагрузке вновь возрастает, достигая значений, близких к первоначальному пику.

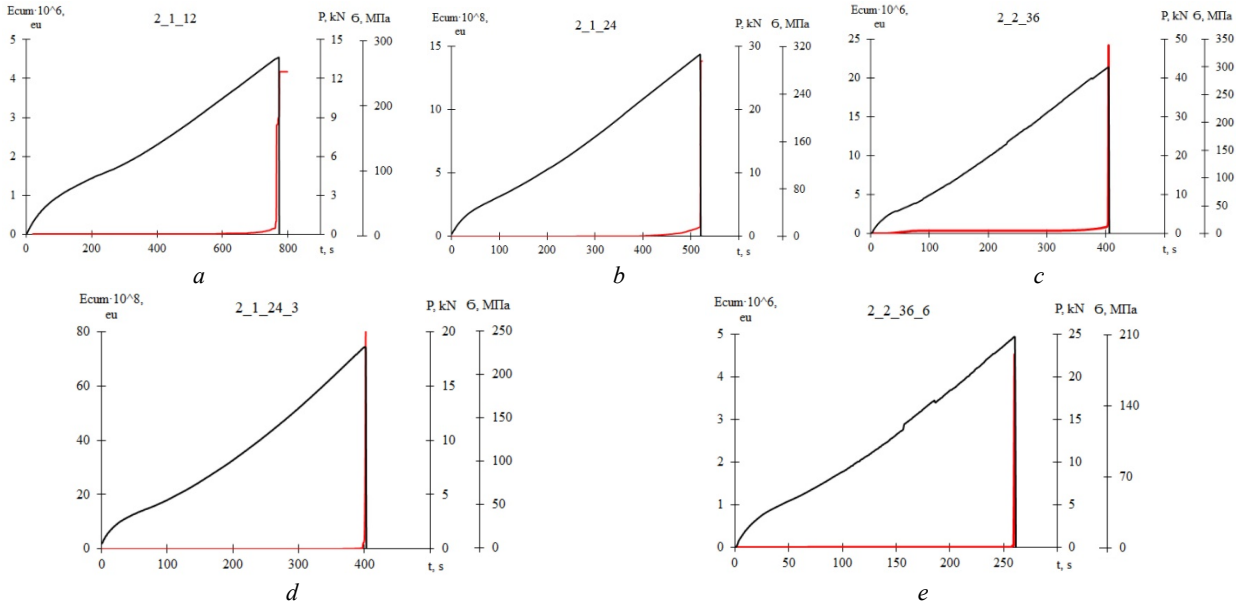



Рис. 11. Диаграммы зависимости кумулятивной энергии от времени, совмещенные с диаграммой нагружения образцов без отверстия шириной 12 мм (*a*), 24 мм (*b*), 36 мм (*d*), с отверстием 3 мм и шириной 24 мм (*d*), отверстием 6 мм и шириной 36 мм (*e*)

Fig. 11. Diagrams of cumulative energy dependence on time, combined with the diagram of loading of specimens without a hole 12 mm wide (*a*), 24 mm wide (*b*), 36 mm wide (*d*), with a hole 3 mm and 24 mm wide (*d*), with a hole 6 mm and 36 mm wide (*e*)

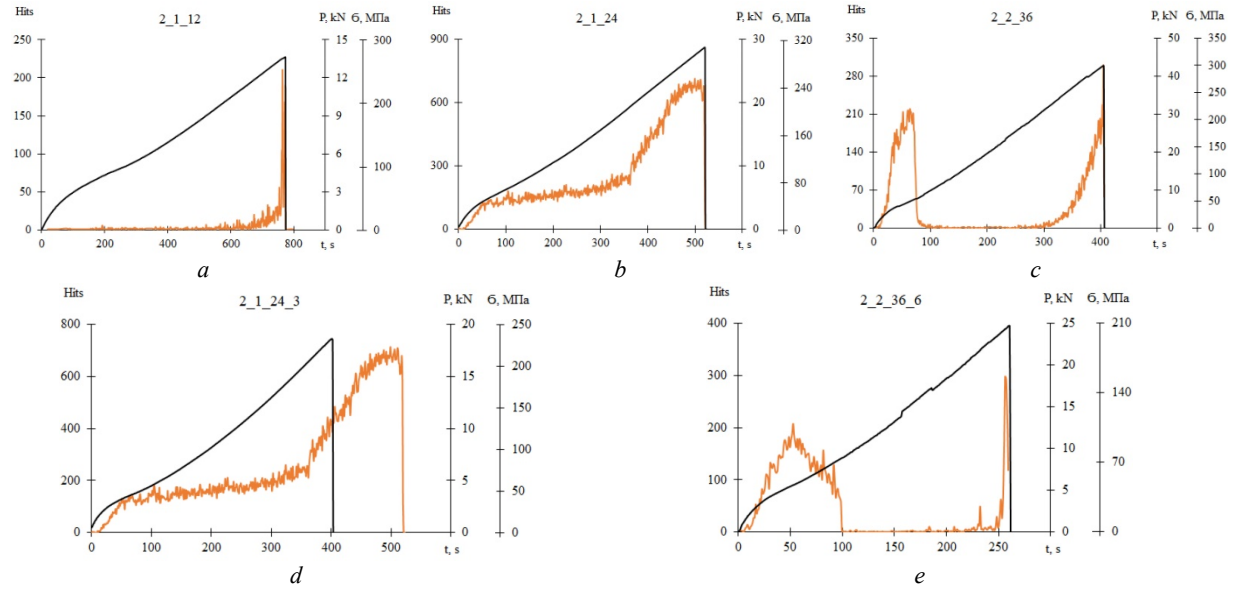



Рис. 12. Диаграммы зависимости количества сигналов АЭ от времени, совмещенные с диаграммой нагружения образцов без отверстия шириной 12 мм (*a*), 24 мм (*b*), 36 мм (*d*), с отверстием 3 мм и шириной 24 мм (*d*), отверстием 6 мм и шириной 36 мм (*e*)

Fig. 12. Time dependence diagrams of the number of AE signals, combined with the loading diagram of specimens without a 12 mm wide hole (*a*), 24 mm wide (*b*), 36 mm wide (*d*), with a 3 mm hole and 24 mm wide (*d*), with a 6 mm hole and 36 mm wide (*e*)

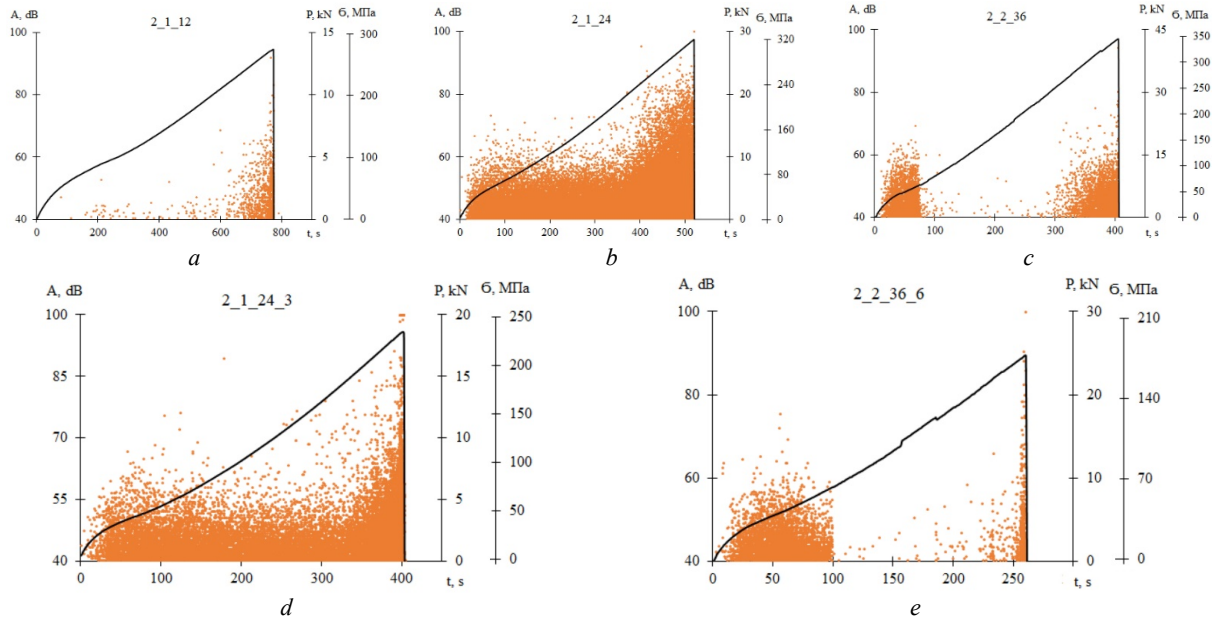



Рис. 13. Диаграммы зависимости пиковых амплитуд от времени, совмещенные с диаграммой нагружения образцов без отверстия шириной 12 мм (*a*), 24 мм (*b*), 36 мм (*d*), с отверстием 3 мм и шириной 24 мм (*d*), отверстием 6 мм и шириной 36 мм (*e*)

Fig. 13. Diagrams of peak amplitudes dependence on time, combined with the diagram of loading of specimens without a hole 12 mm wide (*a*), 24 mm wide (*b*), 36 mm wide (*d*), with a hole of 3 mm and 24 mm wide (*d*), with a hole of 6 mm and 36 mm wide (*e*)

На рис. 13 представлены диаграммы зависимости пиковых амплитуд сигналов от времени. У образцов шириной 24 мм зафиксированы высокие значения амплитуды (выше 75 дБ) уже в начале испытания. У образцов шириной 36 мм в начале испытания присутствуют сигналы амплитудой выше 75 дБ, затем уровень значений падает и увеличивается только при достижении нагрузки ~ 20 кН.

Кроме стандартного параметрического анализа сигналов акустической эмиссии была произведена оценка количества выбрасываемых сигналов акустической эмиссии (рис. 14).

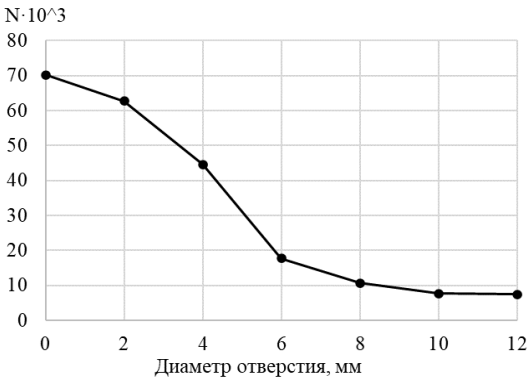



Рис. 14. Зависимость количества сигналов акустической эмиссии от диаметра отверстия в образцах

Fig. 14. Dependence of the number of acoustic emission signals on the hole diameter in the samples

Было отмечено, что при увеличении диаметра отверстия количество сигналов уменьшается. При этом снижение значений сначала идет интенсивно (разница между образцами с диаметром отверстия 2 и 6 мм более чем в 3 раза), а затем интенсивность снижается, что видно на диаграмме. Так как образцы разрушались в зоне отверстия, данную зависимость можно связать с уменьшением площади рабочей зоны за счет увеличения отверстия.

Сигналы в низкочастотном диапазоне также можно разделить на несколько интервалов (рис. 15), что было показано на гистограммах распределения частот спектрального максимума. Процентное соотношение сигналов на этих интервалах у образцов всех видов примерно одинаковое.

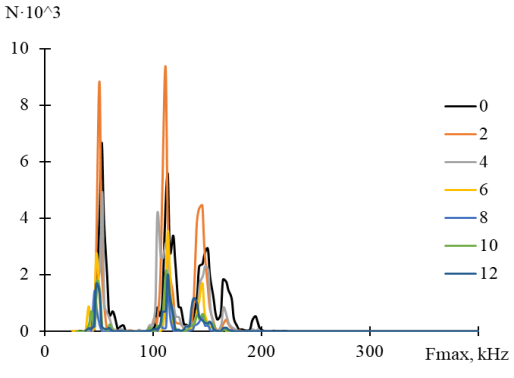



Рис. 15. Распределение частот спектрального максимума для образцов с разным диаметром отверстий

Fig. 15. Frequency distribution of the spectral maximum for samples with different hole diameters

Разрушение образцов с отверстиями произошло в зоне концентратора напряжений, поперек оси нагружения. Характер распространения трещины не изменя-

ется при увеличении отверстия. На верхних слоях отмечаются локальные отслоения вследствие растрескивания матрицы (рис. 16).

Для геометрически подобных образцов была построена гистограмма распределения частот спектрального максимума (рис. 17). Так как в диапазоне средний и высоких частот зафиксировано менее 0,005 % сигналов, рассматривались сигналы в низкочастотном диапазоне, который можно соотнести с таким механизмом разрушения, как растрескивание матрицы. Для более наглядной визуализации результатов были построены круговые диаграммы (рис. 18), показывающие соотношения каждого интервала частот у разных видов образцов. У образцов с отверстиями больше половины сигналов зафиксировано в интервале 100–130 кГц. У образцов без отверстий преобладающим является интервал с самыми низкими частотами – 20–80 кГц.

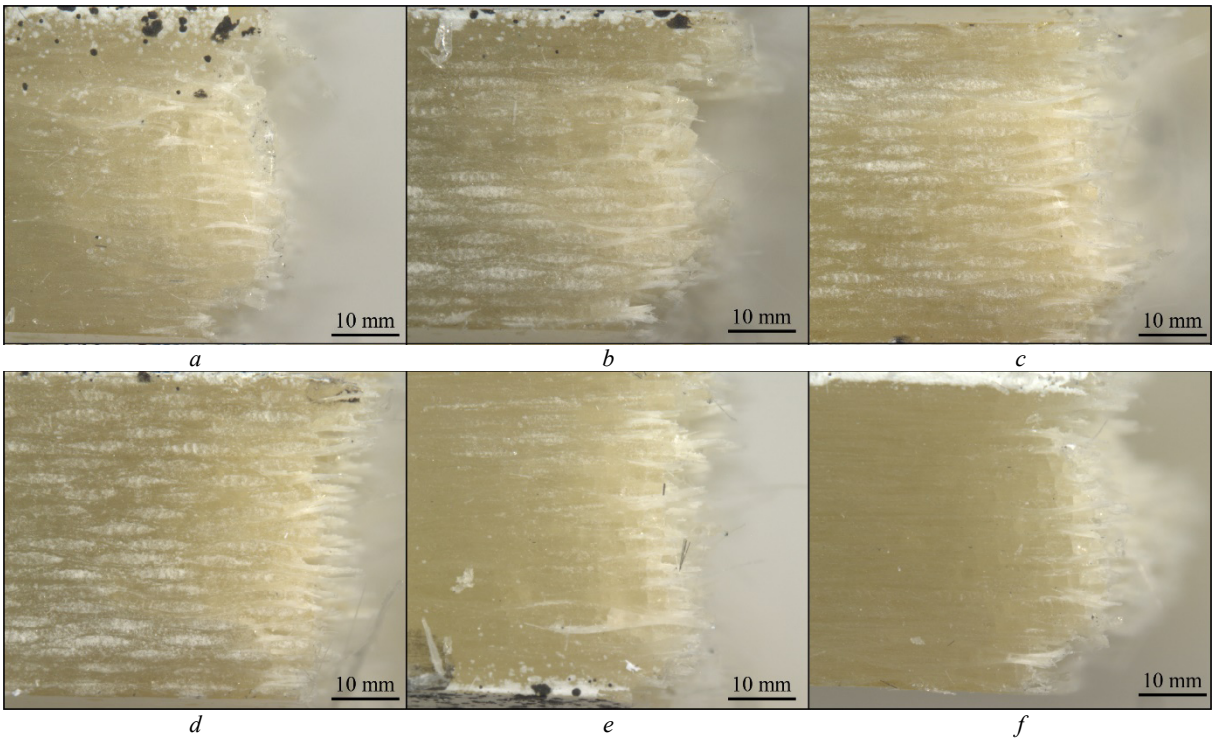



Рис. 16. Снимки стереомикроскопа образцов после разрушения с отверстием 2 мм (*a*), 4 мм (*b*), 6 мм (*c*), 8 мм (*d*), 10 мм (*e*), 12 мм (*f*)

Fig. 16. Stereomicroscope images of specimens after fracture with a 2 mm (*a*), 4 mm (*b*), 6 mm (*c*), 8 mm (*d*), 10 mm (*e*), 12 mm (*f*) hole

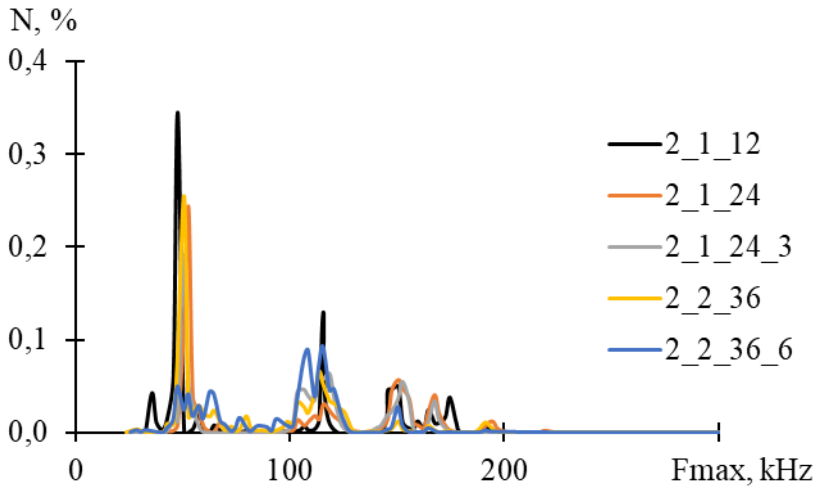



Рис. 17. Гистограмма распределения частот спектрального максимума сигналов АЭ

Fig. 17. Histogram of frequency distribution of spectral maximum of AE signals

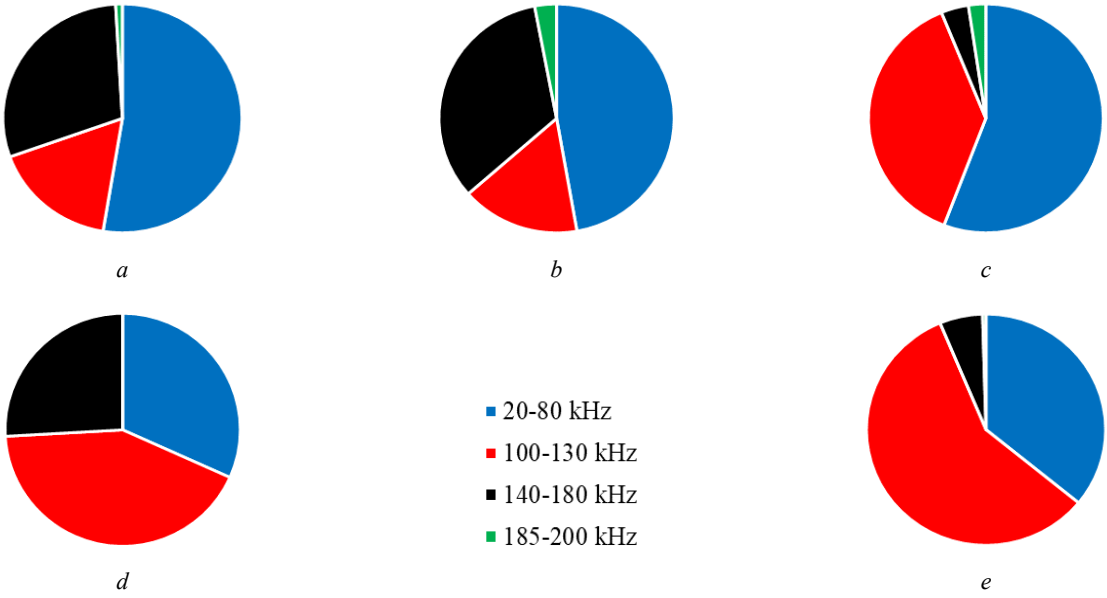



Рис. 18. Диаграммы соотношения количества сигналов в интервалах низкочастотного диапазона образцов без отверстия шириной 12 мм (*a*), 24 мм (*b*), 36 мм (*d*), с отверстием 3 мм и шириной 24 мм (*d*), отверстием 6 мм и шириной 36 мм (*e*)

Fig. 18. Diagrams of the ratio of the number of signals in the intervals of the low-frequency range of samples without a hole width of 12 mm (*a*), 24 mm (*b*), 36 mm (*d*), with a hole of 3 mm and width of 24 mm (*d*), with a hole of 6 mm and width of 36 mm (*e*)

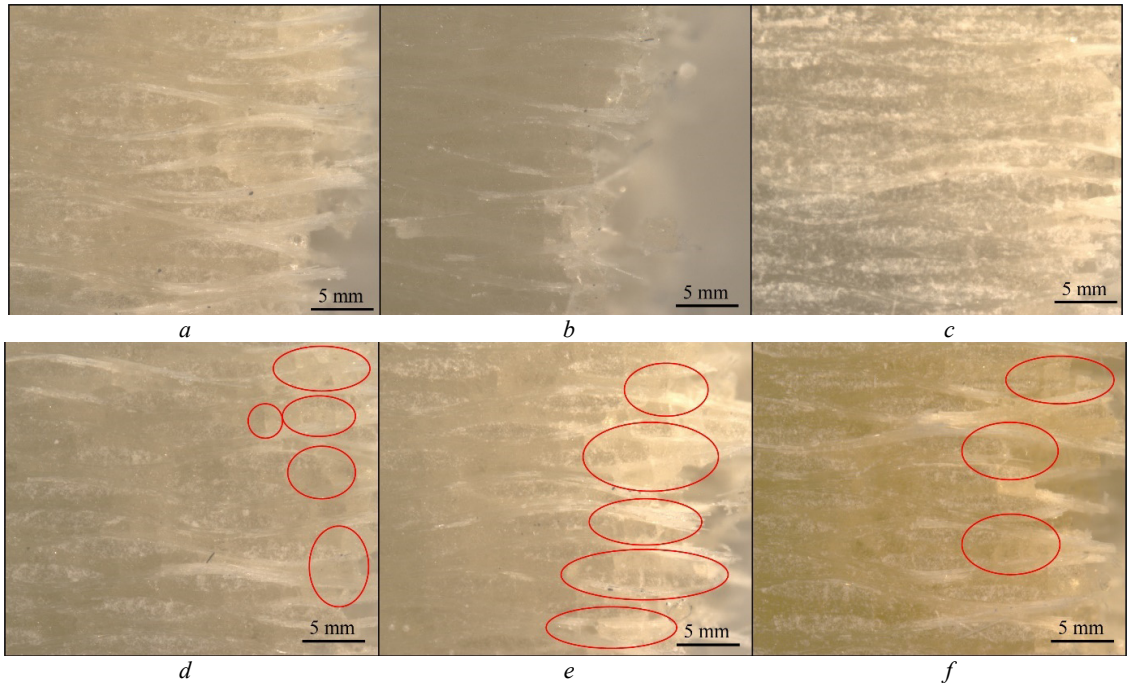



Рис. 19. Снимки стереомикроскопа образцов после разрушения без отверстия шириной 12 мм (*a*), 24 мм (*b*), 36 мм (*c*), с отверстием 1,5 мм и шириной 12 мм (*d*) с отверстием 3 мм и шириной 24 мм (*e*), отверстием 6 мм и шириной 36 мм (*f*)

Fig. 19. Stereomicroscope images of specimens after fracture with no hole 12 mm wide (*a*), 24 mm wide (*b*), 36 mm wide (*c*), with 1.5 mm hole and 12 mm wide (*d*) with 3 mm hole and 24 mm wide (*e*), 6 mm hole and 36 mm wide (*f*)

По данным микроструктурных исследований были отмечены различия в разрушении образцов с отверстиями и сплошных образцов. Образцы без отверстий разрушились в захватной зоне, при этом растрескивания матрицы зафиксированы вдоль укладки волокон (рис. 19, *a–c*). У образцов с отверстиями разрушение произошло в зоне концентратора напряжений, также вблизи области разрушения можно отметить растрескивания матрицы перпендикулярно укладке волокон (рис. 19, *d–f*). На снимках с микроскопа была увеличена насыщенность для более наглядной демонстрации результатов.

Анализируя данные микроструктурного анализа и данные, полученные при регистрации сигналов акустической эмиссии, можно сделать предположение о том, что при растрескивании матрицы вдоль укладки волокон сигналы АЭ имеют более низкую частоту в отличии

от сигналов, полученных при растрескивании матрицы перпендикулярно укладке волокон.

## Заключение

Проведены серии экспериментов на образцах стеклопластика одной геометрии и с разной величиной диаметра сквозного отверстия ($d$=2, 4, 6, 8, 10, 12 мм) и на образцах стеклопластика с диаметром отверстия $d$= 2, 4 и 6 мм, при этом соблюдалось подобие геометрических размеров (ширины и длины). Испытания проводились при совместном использовании испытательной системы, метода корреляции цифровых изображений (DIC), метода акустической эмиссии (АЭ) и оптической микроскопии.

По результатам испытаний установлено, что с увеличением диаметра отверстия происходит снижение несущей способности образцов с концентратором. В случаях геометрического подобия обнаружен масштабный эффект – такой, что по мере увеличения диаметра отверстия несущая способность снижается. Также по результатам испытаний видно, что с увеличением скорости деформации наклон кривой «напряжение – деформация» на стадии пластической деформации постепенно уменьшается, а значения максимальных напряжений возрастают на 17 % при уменьшении абсолютных размеров образцов в исследуемом диапазоне. На основе сигналов акустической эмиссии были установлены частоты, при которых происходит разрушение материала. Также отмечено, что количество сигналов АЭ снижается с увеличением диаметра отверстия образца. При испытаниях геометрически подобных образцов были зафиксированы отдельные интервалы в низкочастотном диапазоне, которые соответствуют различному характеру разрушения матрицы в зависимости от наличия или отсутствия концентратора напряжения.

## Библиографический список


1. Determination of damage model parameters using nano- and bulk-scale digital image correlation and the finite element method / Gang Hee Gu, Jihye Kwon, Jongun Moon, Hyeonseok Kwon, Jongwon Lee, Yongju Kim, Eun Seong Kim, Min Hong Seo, Hyunsang Hwang, Hyoung Seop Kim // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – Vol. 17. – P. 392–403.

2. Pipes Mechanisms of notch insensitivity in long-fiber discontinuous, prepreg platelet compression molded composites / Drew E. Sommera, Sergii G. Kravchenkob, William B. Averyc, R. Byron // Composites: Part A. – 2022. – Vol. 162. – 107133.

3. Tianqi, Zhang Influence of thermoplastic interleaves and its healing effect on the failure mechanisms of open-hole notched composite laminates / Zhang Tianqi, Mehdi Yasaee // Composites Science and Technology. – 2022. – Vol. 227. – 109597.

4. Off-axis tensile performance of notched resin-infused thermoplastic 3D fibre-reinforced composites / S.Z.H. Shah, P.S.M. Megat-Yusoff, Tahir Sharif, Syed Zahid Hussain, R.S. Choudhry // Mechanics of Materials. – 2022. – Vol. 175. – 104478.

5. Ricotta, M. Notch Effect in the Tensile Quasi-Static Behaviour of 40% Short Glass Fibre – PPS Reinforced Composites / M. Ricotta, M. Sorgato, M. Zappalorto // Procedia Structural Integrity. – 2021. – Vol. 33. – P. 695–703.

6. Damage evolution analysis of open-hole tensile laminated composites using a progress damage model verified by AE and DIC / WenQin Han, KeJun Hu, QingHe Shi, FuXian Zhu // Composite Structures. – 2020. – Vol. 247. – 112452.

7. In-situ imaging of inter- and intra-laminar damage in open-hole tension tests T of carbon fibre-reinforced composites / Fatih E. Oza, Mahoor Mehdikhani, Nuri Ersoy, Stepan V. Lomov // Composite Structures. – 2020. – Vol. 244. – 112302.

8. Optimal design of functionally graded material for stress concentration reduction / Yicong Zhou, Qiyin Lin, Jun Hong, Nan Yang // Structures. – 2021. – Vol. 29. – P. 561–569.

9. Szebényi, G. Detection of delamination in polymer composites by digital image correlation-experimental test / G. Szebényi, V. Hliva // Polymers. – 2019. – Vol. 11. – P. 523. DOI: 10.3390/polym11030523

10. Strain and stress concentration of ductile composites in full-range deformation by digital image correlation / C-M. Wu, S. Kumar, P-C. Lin, J-C. Chen // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2022.

11. Strain concentration of double-edge hole ductile composites in the full range of deformation by digital image correlation / Sanjay Kumar, Chang-Mou Wu, Po-Chun Lin, Jieng-Chiang Chen, Yoshinobu Shimamura // Express Polymer Letters. – 2022. – Vol. 16, no. 10. – P. 1038–1051.

12. Use of the digital image correlation and acoustic emission technique to study the effect of structural size on cracking of reinforced concrete / S.Y. Alam, A. Loukili, F. Grondin, E. Rozière // Engineering Fracture Mechanics. – 2015. – Vol. 143. – P. 17–31.

13. Experimental characterization on fracture behavior of UHPMC under small-scale sample tensile testing: Acoustic emission monitoring and digital image correlation / Yubo Jiao, Yaojia Chen, Hua Yang, Caiqin Wang // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2024. – Vol. 130. – 104342.

14. Bazant, Z.P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal / Z.P. Bazant // J Engng Mech (ASCE). – 1984. – Vol. 110(4). – P. 518–35.

15. Effect of off-axis angle on mesoscale deformation and failure behavior of plain-woven C/SiC composites with digital image correlation / Xuefeng Teng, Shuangqi Lyu, Xiaoan Hu, Yun Jiang, Xiangfan Nie, Xin Liu, Longbiao Li // Journal of the European Ceramic Society. – 2022. – Vol. 42, iss. 12. – P. 4712–4722.

16. Chawla, K. Stress and strain concentration factors in orthotropic composites with hole under uniaxial tension / K. Chawla, S. Ray-Chaudhuri // Curved and Layered Structures. – 2018. – Vol. 5. – P. 213–231. DOI: 10.1515/cls-2018-0016

17. Полилов, А.Н. Механизмы уменьшения концентрации напряжений в волокнистых композитах / А.Н. Полилов // Прикладная механика и техническая физика. – 2014. – Т. 55, № 1. – С. 187–197.

18. Ермаков, И.С. Расчётный прогноз прочности растягиваемых композитных образцов с набором круговых отверстий в сопоставлении с результатами эксперимента / И.С. Ермаков, Л.Г. Сухомлинов // Космонавтика и ракетостроение. – 2023. – Вып. 1(130). – С. 88–97.

19. Использование модели развивающегося повреждения при оценке прочности слоистых углепластиков с различными концентраторами напряжений / В.А. Беспалов, Т.Б. Гоцелюк, Н.А. Коваленко, И.П. Олегин // Омский научный вестник. – 2015. – № 3(143). – С. 329–333.

20. Research on the deformation law of ultra-thin fiber metal laminates under the synergistic effect of nano-reinforcement and scale effect / Yao Wang, Kang Liu, Shaojun Zhang, Yong Li, Sifa Zheng, Libin Zhao, Ning Hua // Materials & Design. – 2024. – Vol. 243. – 113059.

21. Mechanical behavior of fiber-glass plastic with hole pattern using digital image correlation and acoustic emission methods / E. Strungar, D. Lobanov, E. Chebotareva, Y. Kochneva // Frattura Ed Integrità Strutturale. – 2024. – Vol. 18(68). – P. 63–76. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.68.04

22. Studying the development of a technological defect in complex stressed construction cfrp using digital image correlation and acoustic emission methods / D.S. Lobanov, E.M. Strungar, E.M. Zubova, V.E. Wildemann // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – Vol. 55, no. 9. – P. 631–638.

23. Experimental Study of Postcritical Deformation Stage Realization in Layered Composites during Tension using Digital Image Correlation and Acoustic Emission / V. Wildemann, E. Strungar, D. Lobanov, A. Mugatarov, E. Chebotareva // Acta Mech. Sin. – 2024. – Vol. 40. – 423468. DOI: 10.1007/s10409-023-23468-x

24. Strungar, E. Evaluation of the Sensitivity of Various Reinforcement Patterns for Structural Carbon Fibers to Open Holes during Tensile Tests / E. Strungar, D. Lobanov, V. Wildemann // Polymers. – 2021. – Vol. 13. – 4287. DOI: 10.3390/polym13244287

25. Strungar, E.M. Inelastic deformation and destruction of fiber-laminated polymer composites in stress concentration zones / E.M. Strungar, V.E. Wildemann // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2020. – Vol. 53. – P. 406–416. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.53.31

26. Studying the Development of a Technological Defect in Complex Stressed Construction CFRP Using Digital Image Correlation and Acoustic Emission Methods / D.S. Lobanov, E.M. Strungar, E.M. Zubova, V.E. Wildemanna // Russian Journal of Nondestructive Testing – 2019. – Vol. 55, no. 9. – P. 631–638.

27. Lobanov, D.S. Evaluation of the Effect of Elevated Temperature and Preliminary Thermal Aging on the Residual Mechanical Properties of a Structural Fiberglass Using the Signals of Acoustic Emission / D.S. Lobanov, E.M. Lunegova // Mechanics of Composite Materials. – 2023. – Vol. 59(1). – P. 101–114.

28. Strength improvement and stress analysis of E-glass laminated plates with circular notches using digital image correlation / A. Khechai, P.M. Mohite, A. Tati, M.-O. Belarbi // IntechOpen. – 2019. – October. – P. 1–10. DOI: 10.5772/intechopen.87089

29. Khemchandani, A.A. Determination of tensile strength of composite laminates with multiple holes / A.A. Khemchandani, Kameshwaran, J. Vasanth // International Journal of Applied Engineering Research. – 2019. – Vol. 14, no. 19. – P. 3749–3755.

30. Самуйлов, А.О. Модель оценки наличия и степени опасности дефектов на основе инвариантов акустической эмиссии / А.О. Самуйлов // Вестник Московского авиационного института. – 2022. – Т. 29, № 4. – С. 94–103.

31. Лепихова, В.А. Исследование аналитических связей шумовых параметров акустической эмиссии и деструктивных процессов элементов тяговых двигателей / В.А. Лепихова, Н.В. Ляшенко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2024. – № 2(222). – С. 60–66.

32. 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 / D. Lobanov, A. Yankin, M. Mullahmetov, E. Chebotareva, V. Melnikova // Polymers. – 2023. – Vol. 15(9). – 2087.

33. Identification of failure modes of composite thin-ply laminates containing circular hole under tension by acoustic emission signals / Chunfang Huang, Su Ju, Mingchang He, Qing Zheng, Yonglyu He, Jiayu Xiao, Jiangwei Zhang, Dazhi Jiang // Composite Structures. – 2018. – Vol. 206. – P. 70–79.

34. Correlation of acoustic emission with finite element predicted damages in open-hole tensile laminated composites / Reza Mohammadi, Mehdi Ahmadi Najafabadi, Milad Saeedifar, Jalal Yousefi, Giangiacomo Minak // Composites Part B: Engineering. – 2017. – Vol. 108. – P. 427–435.

35. Damage mode identification of open hole composite laminates based on acoustic emission and digital image correlation methods / E. Özaslan, A. Yetgin, B. Acar, M.A. Güler // Composite Structures. – 2021. – Vol. 274. – 114299.

36. Acoustic emission onset time detection for structural monitoring with U-Net neural network architecture / Jonathan Melchiorre, Leo D'Amato, Federico Agostini, Antonino Maria Rizzo // Developments in the Built Environment. – 2024. – Vol. 18. – 100449.

## References

1. Gang Hee Gu, Jihye Kwon, Jongun Moon, Hyeonseok Kwon, Jongwon Lee, Yongju Kim, Eun Seong Kim, Min Hong Seo, Hyunsang Hwang, Hyoung Seop Kim Determination of damage model parameters using nano- and bulk-scale digital image correlation and the finite element method // Journal of Materials Research and Technology. Vol. 17, 2022, Pages 392-403

2. Drew E. Sommera, Sergii G. Kravchenkob, William B. Averyc, R. Byron Pipes Mechanisms of notch insensitivity in long-fiber discontinuous, prepreg platelet compression molded composites // Composites: Part A 162 (2022) 107133

3. Tianqi Zhang, Mehdi Yasaee Influence of thermoplastic interleaves and its healing effect on the failure mechanisms of open-hole notched composite laminates // Composites Science and Technology Vol. 227, 2022, 109597

4. S.Z.H. Shah, P.S.M. Megat-Yusoff, Tahir Sharif, Syed Zahid Hussain, R.S. Choudhry Off-axis tensile performance of notched resin-infused thermoplastic 3D fibre-reinforced composites // Mechanics of Materials Vol. 175, 2022, 104478

5. Mauro Ricotta, Marco Sorgato, Michele Zappalorto Notch Effect in the Tensile Quasi-Static Behaviour of 40% Short Glass Fibre - PPS Reinforced Composites // Procedia Structural Integrity 33 (2021) 695–703

6. WenQin Han, KeJun Hu, QingHe Shi, FuXian Zhu Damage evolution analysis of open-hole tensile laminated composites using a progress damage model verified by AE and DIC// Composite Structures 247 (2020) 112452

7. Fatih E. Oza, Mahoor Mehdikhani, Nuri Ersoy, Stepan V. Lomov In-situ imaging of inter- and intra-laminar damage in open-hole tension tests T of carbon fibre-reinforced composites // Composite Structures 244 (2020) 112302

8. Yicong Zhou, Qiyin Lin, Jun Hong, Nan Yang Optimal design of functionally graded material for stress concentration reduction // Structures. Vol. 29, 2021, Pages 561-569

9. Szebényi G., Hliva V.: Detection of delamination in polymer composites by digital image correlation-experimental test. Polymers, 11, 523 (2019). https://doi.org/10.3390/polym11030523

10. Wu C-M., Kumar S., Lin P-C., Chen J-C.: Strain and stress concentration of ductile composites in full-range deformation by digital image correlation. Mechanics of Advanced Materials and Structures, in press (2022).

11. Sanjay Kumar, Chang-Mou Wu, Po-Chun Lin, Jieng-Chiang Chen, Yoshinobu Shimamura Strain concentration of double-edge hole ductile composites in the full range of deformation by digital image correlation // Express Polymer Letters Vol.16, No.10 (2022) 1038–1051

12. S.Y. Alam, A. Loukili, F. Grondin, E. Rozière Use of the digital image correlation and acoustic emission technique to study the effect of structural size on cracking of reinforced concrete // Engineering Fracture Mechanics 143 (2015) 17–31

13. Yubo Jiao, Yaojia Chen, Hua Yang, Caiqin Wang Experimental characterization on fracture behavior of UHPMC under small-scale sample tensile testing: Acoustic emission monitoring and digital image correlation // Theoretical and Applied Fracture Mechanics Vol. 130, 2024, 104342

14. Bazant ZP. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal. J Engng Mech (ASCE) 1984;110(4):518–35.

15. Xuefeng Teng, Shuangqi Lyu, Xiaoan Hu, Yun Jiang, Xiangfan Nie, Xin Liu, Longbiao Li Effect of off-axis angle on mesoscale deformation and failure behavior of plain-woven C/SiC composites with digital image correlation // Journal of the European Ceramic Society. Vol. 42, Iss. 12, 2022, Pages 4712-4722

16. Chawla K. Stress and strain concentration factors in orthotropic composites with hole under uniaxial tension / K. Chawla, S. Ray-Chaudhuri // Curved and Layered Structures. – 2018. – 5. – P. 213-231. – DOI: 10.1515/cls-2018-0016

17. Polilov A.N. Mehanizmy umen'shenija koncentracii naprjazhenij v voloknistyh kompozitah / A.N. Polilov // Prikladnaja mehanika i tehnicheskaja fizika. – 2014. – T. 55, No1. – S. 187-197.

18. Ermakov I.S. Raschjotnyj prognoz prochnosti rastjagivaemyh kompozitnyh obrazcov s naborom krugovyh otverstij v sopostavlenii s rezul'tatami jeksperimenta / I.S. Ermakov, L.G. Suhomlinov // Kosmonavtika i raketostroenie. – 2023. – vyp. 1(130), – S. 88-97.

19. Bespalov V.A. Ispol'zovanie modeli razvivajushhegosja povrezhdenija pri ocenke prochnosti sloistyh ugleplastikov s razlichnymi koncentratorami naprjazhenij / V.A. Bespalov, T.B. Goceljuk, N.A. Kovalenko, I.P. Olegin // Omskij nauchnyj vestnik. – 2015. – 3(143). – S. 329-333.

20. Yao Wang, Kang Liu, Shaojun Zhang, Yong Li, Sifa Zheng, Libin Zhao, Ning Hua Research on the deformation law of ultra-thin fiber metal laminates under the synergistic effect of nano-reinforcement and scale effect // Materials & Design 243 (2024) 113059

21. Strungar, E., Lobanov, D., Chebotareva, E., Kochneva, Y. (2024). Mechanical behavior of fiber-glass plastic with hole pattern using digital image correlation and acoustic emission methods. Frattura Ed Integrità Strutturale, 18(68), 63–76. https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.68.04

22. Studying the development of a technological defect in complex stressed construction cfrp using digital image correlation and acoustic emission methods/ Lobanov D.S., Strungar E.M., Zubova E.M., Wildemann V.E., Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. T. 55. № 9. C. 631-638.

23. Wildemann V., Strungar E., Lobanov D., Mugatarov A., Chebotareva E. Experimental Study of Postcritical Deformation Stage Realization in Layered Composites during Tension using Digital Image Correlation and Acoustic Emission // Acta Mech. Sin.40, 423468(2024), DOI: 10.1007/s10409-023-23468-x

24. Strungar E., Lobanov D., Wildemann V. Evaluation of the Sensitivity of Various Reinforcement Patterns for Structural Carbon Fibers to Open Holes during Tensile Tests. Polymers 2021,13,4287. https:// doi.org/10.3390/polym13244287

25. Strungar E. M., Wildemann V. E. Inelastic deformation and destruction of fiber-laminated polymer composites in stress concentration zones, Frattura ed Integrità Strutturale, 53 (2020), 406-416. doi: 10.3221/IGF-ESIS.53.31.

26. Lobanov D. S., Strungar E. M., Zubova E. M., Wildemanna V. E. Studying the Development of a Technological Defect in Complex Stressed Construction CFRP Using Digital Image Correlation and Acoustic Emission Methods // Russian Journal of Nondestructive Testing – 2019. – Vol. 55, No. 9. – pp. 631–638.

27. Lobanov, D.S., Lunegova, E.M. Evaluation of the Effect of Elevated Temperature and Preliminary Thermal Aging on the Residual Mechanical Properties of a Structural Fiberglass Using the Signals of Acoustic Emission // Mechanics of Composite Materials, 2023, 59(1), pp 101–114.

28. Khechai A. Strength improvement and stress analysis of E-glass laminated plates with circular notches using digital image correlation / A. Khechai, P.M. Mohite, A. Tati, M.-O. Belarbi // IntechOpen. – October 2019. – P. 1-10. – DOI: 10.5772/intechopen.87089.

29. Khemchandani A.A. Determination of tensile strength of composite laminates with multiple holes / A.A. Khemchandani, Kameshwaran, J. Vasanth // International Journal of Applied Engineering Research. – 2019. – Vol.14. – No. 19. – P. 3749-3755.

30. Samujlov, A. O. Model' ocenki nalichija i stepeni opasnosti defektov na osnove invariantov akusticheskoj jemissii / A.O. Samujlov // Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta. – 2022. – T. 29, № 4. – S. 94-103.

31. Lepihova, V. A. Issledovanie analiticheskih svjazej shumovyh parametrov akusticheskoj jemissii i destruktivnyh processov jelementov tjagovyh dvigatelej / V. A. Lepihova, N. V. Ljashenko // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki. – 2024. – № 2(222). – S. 60-66.

32. 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; 15(9):2087.

33. Chunfang Huang, Su Ju, Mingchang He, Qing Zheng, Yonglyu He, Jiayu Xiao, Jiangwei Zhang, Dazhi Jiang, Identification of failure modes of composite thin-ply laminates containing circular hole under tension by acoustic emission signals, Composite Structures, Volume 206, 2018, Pages 70-79

34. Reza Mohammadi, Mehdi Ahmadi Najafabadi, Milad Saeedifar, Jalal Yousefi, Giangiacomo Minak, Correlation of acoustic emission with finite element predicted damages in open-hole tensile laminated composites, Composites Part B: Engineering, Volume 108, 2017, Pages 427-435

35. E. Özaslan, A. Yetgin, B. Acar, M.A. Güler, Damage mode identification of open hole composite laminates based on acoustic emission and digital image correlation methods, Composite Structures, Volume 274, 2021, 114299

36. Jonathan Melchiorre, Leo D'Amato, Federico Agostini, Antonino Maria Rizzo, Acoustic emission onset time detection for structural monitoring with U-Net neural network architecture, Developments in the Built Environment, Volume 18, 2024, 100449

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2024-0013).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов равноценен.**

**Financing.** The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSNM-2024-0013).

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**The contribution of the authors is equivalent.**