

Буров А. Е., Москвичев Е. В.
A. E. Burov, E. V. Moskvichev

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОТВЕРСТИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ТКАНОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF HOLE ON STRENGTH OF PLAIN WEAVE COMPOSITE UNDER TENSION

Буров Андрей Ефимович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (Россия, Красноярск); тел. 8(391)227-29-12. E-mail: aeburov@ict.nsc.ru.

Andrey E. Burov – PhD in Engineering, Leading Researcher, Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Russia, Krasnoyarsk); tel. 8(391)227-29-12. E-mail: aeburov@ict.nsc.ru.

Москвичев Егор Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий (Россия, Красноярск); тел. 8(391)227-45-70. E-mail: jugr@ict.nsc.ru.

Egor V. Moskvichev – PhD in Engineering, Senior Researcher, Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Russia, Krasnoyarsk); tel. 8(391)227-45-70. E-mail: jugr@ict.nsc.ru.

Аннотация. Работа посвящена экспериментальным исследованиям влияния концентратора напряжений, размер которого сопоставим с элементарной ячейкой структуры, на прочность композиционных материалов при растяжении. Испытания проводились на пластинах из тканого материала полотняного плетения на основе углеродных волокон и эпоксидного связующего с центральным отверстием. Распределение напряжений в ослабленном отверстием сечении пластины, вычисленное по измеренным деформациям, сравнивается с аналитическим решением. Наблюдаемое снижение прочности образцов с отверстием значительно меньше теоретического значения, что свидетельствует о низкой чувствительности материала к данному типу концентратора. На основе критерия напряжения в точке определена зависимость эффективного коэффициента концентрации напряжений от масштабного параметра.

Summary. The work is devoted to experimental study on the effect of a stress concentrator, which size is comparable with a unit cell, on the strength of composite materials under tension. Tests were carried out on plates made of plain weave composite based on carbon fibers and epoxy binder with a central hole. The stress distribution in the plate section weakened by the hole, calculated from the measured strains, is compared with the analytical solution. The observed strength reduction of the notched samples is significantly less than the theoretical value, indicating a low sensitivity of the material to this type of concentrator. Based on the point stress criterion, the dependence of the effective stress concentration coefficient on the scale parameter is determined.

Ключевые слова: эксперимент, тканые композиты, отверстие, концентрация напряжений, прочность.

Key words: experiment, plain weave composite, hole, stress concentration, strength.

УДК 539.4

Введение. Резкие изменения геометрии поперечного сечения элементов конструкций, такие как отверстия, вырезы и галтели, вызывают формирование примыкающей к ним области повышенных напряжений, известное как концентрация напряжений [5]. Концентраторы напряжений являются местом возникновения повреждений и инициации трещин [2; 13], однако их наличие неизбежно при практическом применении деталей из композиционных материалов (КМ), прежде всего для их крепления или соединения.

Определение влияния концентрации напряжений на несущую способность является актуальной задачей при проектировании композитных элементов конструкций [8; 12; 14]. Как правило, её решение индивидуально для конкретного типа КМ и конфигурации образцов вследствие выра-

женной структурной неоднородности и многообразия возможных механизмов разрушения [4; 7–10]. Численные и экспериментальные исследования показали, что эффективный коэффициент концентрации напряжений в пластинах из тканых углепластиков зависит от размеров отверстия и геометрии образцов [11; 14], материала связующего [9], структуры материала [4; 7; 10; 15], а также технологии создания отверстия [1]. Это обуславливает разработку расчётно-экспериментальных методов, позволяющих прогнозировать прочность элементов конструкций из КМ, содержащих концентраторы напряжений, при ограниченном наборе экспериментальных данных.

Целью настоящих расчётно-экспериментальных исследований является установление влияния отверстия, размер которого сопоставим с элементарной ячейкой структуры материала, на прочность пластин из тканых углепластиков при растяжении.

Материалы и методика исследований. В работе использовались ткани полотняного плетения на основе углеродных волокон и эпоксидного связующего, произведённые в Китае. Размер элементарной ячейки материала составляет порядка 4x4 мм. Прямоугольные образцы из исходных композитных пластин толщиной 2...3 мм получали по технологии гидроабразивной струи, отверстия – фрезерованием. Диаметр D отверстий, расположенных в центре образца, варьировался в пределах 3...8 мм с шагом 1 мм. Ширина образцов W выбиралась исходя из постоянного соотношения $D/W = 0,17$.

Испытания на растяжения до разрушения проводились в Инженерно-испытательном центре ФИЦ ИВТ на универсальной испытательной машине Tinius Olsen 100ST со скоростью нагружения 1 мм/мин при комнатной температуре (см. рис. 1). Продольные деформации в ослабленном сечении регистрировались при помощи бесконтактного видеоэкстензометра в восьми точках, расположенных на различном расстоянии от кромки отверстия (см. рис. 1), поперечные деформации – с помощью тензорезисторов. В качестве методической основы проведения экспериментов применялся стандарт ASTM D 5766.

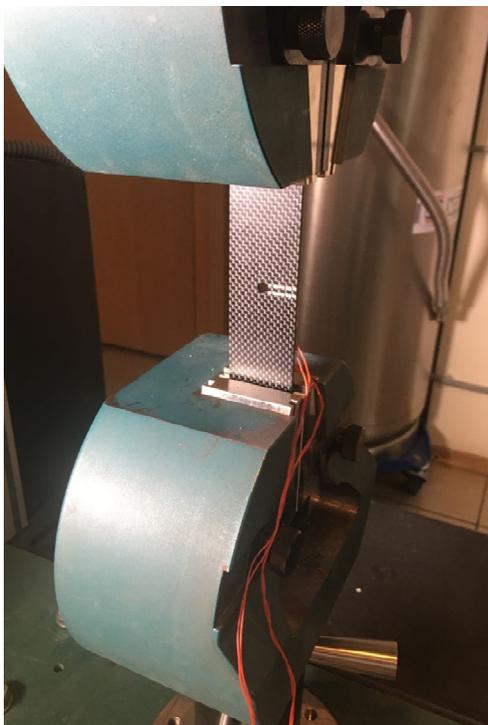


Рис. 1. Внешний вид образца, установленного в испытательной машине

Определение характеристик механических свойств материала проводили на стандартных образцах с двухсторонними лопатками (ГОСТ 32656-2017). По экспериментальным данным получены следующие средние значения: модуль упругости $E_{yy} = 58,88$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_{xy} = 0,044$, напряжения разрушения (предел прочности) $\sigma_B = 578$ МПа.

Для оценки снижения прочности композитных пластин с отверстием в центре при одноосном растяжении широко используются две относительно простые модели разрушения: критерий напряжения в точке (КНТ) и критерий среднего напряжения (КСН) [6; 15]. Оба критерия предполагают, что разрушение возникает, когда КНТ или КСН на некотором расстоянии d или a от края отверстия достигает значения предельного напряжения для образцов без концентратора. Параметры d и a являются константами, характеризующими структуру материала, и рассчитываются по экспериментальным данным. Предполагается, что их относительно малый размер не вносит существенного изменения в распределение напряжений возле отверстия, полученное на основе решения упругой задачи.

Предварительный анализ показал, что полученные в эксперименте значения предельной нагрузки более точно описываются на основе модели КНТ. Поэтому именно модель КНТ использовалась для определения влияния отверстия на прочность. Эффективный коэффициент концентрации напряжений K_{ef} (иногда называемый коэффициентом снижения прочности) для образца шириной W с центральным отверстием диаметром D определялся как отношение предела прочности σ_B , значение которого получено на гладких образцах, и номинальных разрушающих напряжений σ_{nc} с учётом относительного размера отверстия и ширины образца [3; 15; 18]:

$$\eta = D/W; \quad \xi = \eta + 2d/W;$$

$$M = \left(\sqrt{1 - 8 \left[\frac{3(1-\eta)}{2 + (1-\eta)^3} - 1 \right] - 1/2\eta^2} \right)^{0,5};$$

$$f_w = \left(\frac{3(1-\eta)}{2 + (1-\eta)^3} + \frac{(\eta M)^6}{2} (K_\infty - 3)(1 - (\eta M)^2) \right)^{-1};$$

$$K_{ef} = \frac{\sigma_B}{\sigma_{nc}} = f_w \left[1 + \frac{(\eta/\xi)^2}{2} + \frac{3(\eta/\xi)^2}{2} (\eta/\xi)^4 - \frac{K_\infty - 3}{2} (5(\eta/\xi)^6 - 7(\eta/\xi)^8) \right], \quad (1)$$

где f_w – поправочная функция, учитывающая конечную ширину пластины; K_∞ – коэффициент концентрации на кромке отверстия для бесконечной ортотропной пластины, рассчитываемый по известному решению [15]:

$$K_\infty = 1 + \sqrt{\frac{2}{A_{22}} \left(\sqrt{A_{11}A_{22}} - A_{12} + \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{2A_{66}} \right)},$$

здесь A_{ij} – компоненты эффективной матрицы жёсткости композита.

Значения напряжений в ослабленном сечении в направлении приложения нагрузки рассчитывались по данным регистрируемых в испытаниях деформаций согласно [3; 17]:

$$\sigma_y = \frac{E_{xx}\varepsilon_{xx}}{[1 - \nu_{xy}^2(E_{yy}/E_{xx})]} + \frac{\nu_{xx}E_{yy}\varepsilon_{yy}}{[1 - \nu_{xy}^2(E_{yy}/E_{xx})]}, \quad \nu_{yx} = \nu_{xx}E_{yy}/E_{xx}. \quad (2)$$

Результаты и их обсуждения. Все образцы показали хрупкое разрушение по минимальному сечению с практически линейным характером диаграммы деформирования. Результаты испытаний, эффективный коэффициент концентрации напряжений и значения d , полученные из решения уравнения (1) представлены в табл. 1.

Как следует из данных табл. 1, среднее значение эффективного коэффициента концентрации напряжений составляет 1,34, что значительно меньше теоретического значения, которое для квазиизотропного материала равно 3 [3]. Низкая чувствительность несущей способности тканых композитов к наличию круглого отверстия также отмечалась в работах других авторов [4; 16].

Разрушающие напряжения и эффективные коэффициенты концентрации

№ образца	D , мм	$\sigma_{нс}$, МПа	K_{ef}	d , мм
1	3,0	436,2	1,33	1,2
2	3,0	443,3	1,30	1,3
3	4,1	414,6	1,39	1,4
4	5,0	385,5	1,50	1,4
5	5,1	411,0	1,41	1,7
6	6,0	443,2	1,30	2,6
7	7,0	456,9	1,26	3,4
8	7,1	447,1	1,29	3,2
9	7,9	447,5	1,29	3,6

Зависимость расчётных значений характеристического расстояния d от диаметра отверстия можно аппроксимировать (коэффициент корреляции $R^2 = 0,93$) следующей экспоненциальной функцией:

$$d = 0,57e^{0,24D}. \quad (3)$$

Если учесть, что испытания проводились на образцах, имеющих одинаковое значение отношения D/W , только диаметр отверстия и расстояние d модели КНТ являются масштабными параметрами, которые могут влиять на распределение напряжений в ослабленном сечении и оценку предельной нагрузки. Об этом свидетельствует зависимость K_{ef} от относительного характеристического расстояния (d/D), которая хорошо аппроксимируется степенной функцией (см. рис. 2):

$$K_{ef} = (d/D)^{-0,32}. \quad (4)$$

Таким образом, совместное использование (3) и (4) позволяет оценить влияние круглого отверстия на несущую способность пластин из тканого композита при одноосном растяжении. Следует отметить, что эмпирические зависимости (3) и (4) получены по результатам испытаний образцов с отверстием, размер которого сопоставим с элементарной ячейкой структуры материала. Их использование для данного концентратора напряжений большего размера является предметом дальнейших исследований.

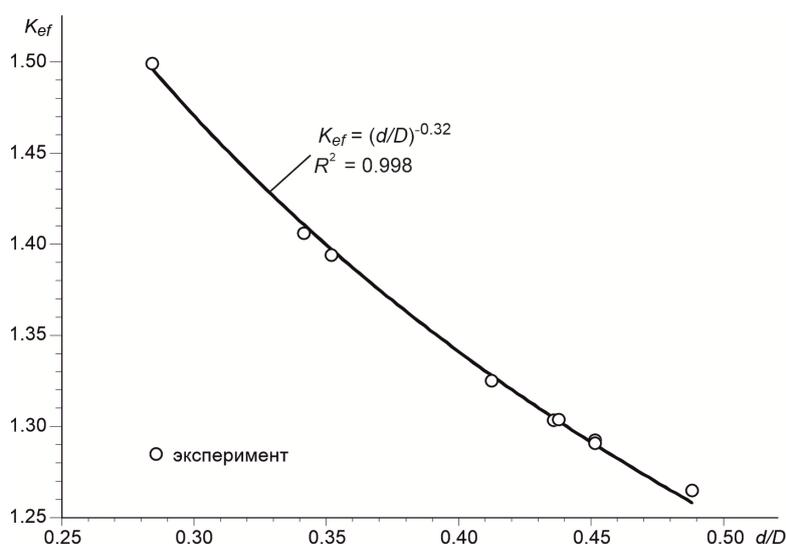


Рис. 2. Масштабная зависимость эффективного коэффициента концентрации напряжений для пластин с отверстием

На рис. 3 представлено сравнение распределения напряжений в ослабленном сечении, определённое по экспериментальным значениям деформаций, с аналитическим решением (2). Расхождение распределений напряжений, особенно в области, примыкающей к концентратору, можно объяснить неоднородностью структуры материала в пределах элементарной ячейки и соответствующей ей вариации упругих свойств, тогда как при расчёте напряжений по (2) использовались их осреднённые характеристики.

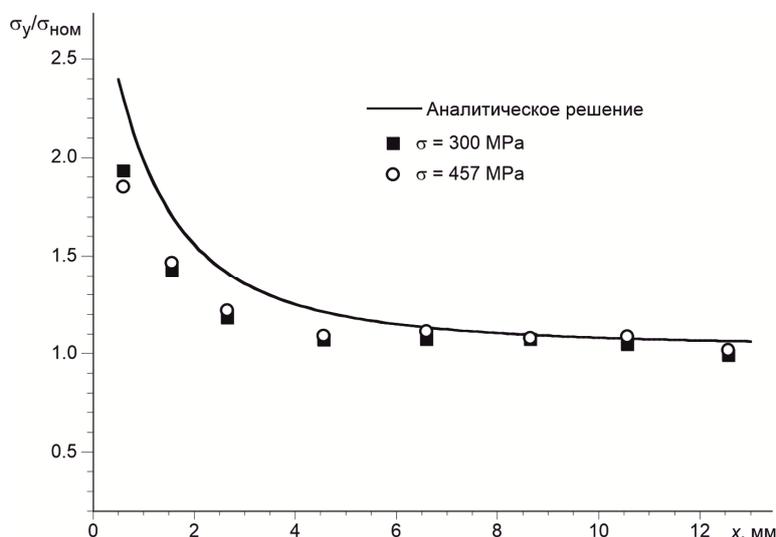


Рис. 3. Распределение напряжений в ослабленном сечении образца с отверстием диаметром 7 мм

Заключение. Проведены испытания до разрушения пластин из тканого углепластика с центральным круглым отверстием диаметром 3...8 мм при одноосном растяжении. Распределение напряжений в ослабленном сечении пластины, вычисленное по экспериментальным значениям деформаций, показало приемлемое соответствие аналитическому решению. Для оценки несущей способности пластин использовался критерий напряжений в точке. По результатам исследований получена зависимость эффективного коэффициента концентрации от отношения характеристического расстояния к диаметру отверстия. Меньшее по сравнению с теоретическим значением снижение прочности образцов с отверстием свидетельствует о низкой чувствительности материала к данному типу концентратора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сравнительное изучение влияния технологий фрезерования и резки гидроабразивной струёй на поведение эпоксидных слоистых углепластиков при растяжении / А. Абиди, С. Бен Салем, А. Безази, Х. Бумедири // *Механика композитных материалов*. – 2021. – Т. 57. – № 4. – С. 767-782.
2. Андрианов, И. К. Моделирование хрупкого разрушения турбинной лопатки с дефектом / И. К. Андрианов, К. А. Палков, Е. К. Чепурнова // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2024. – № III (75). – С. 32-37.
3. Лехницкий, С. Г. Теория упругости анизотропного тела / С. Г. Лехницкий. – М.: Гостехтеоретиздат, 1950. – 299 с.
4. Лешков, Е. В. Экспериментальное исследование прочности гибридных полимерных композитов с концентратором напряжений / Е. В. Лешков, С. Б. Сапожников // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. – 2020. – Т. 1. – С. 108-111.
5. Серенсен, С. В. Несущая способность деталей машин / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 354 с.
6. Сукнев, С. В. Применение методов теории критических расстояний для оценки разрушения квазихрупких материалов с вырезами / С. В. Сукнев // *Известия российской академии наук. Механика твёрдого тела*. – 2023. – № 1. – С. 129-141.

7. Татусь, Н. А. Влияние отверстий на снижение прочности композитных образцов с различной укладкой волокон / Н. А. Татусь, А. Н. Полилов, Д. Д. Власов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2022. – Т. 88. – № 4. – С. 58-65.
8. Ali Kouka, M.; Abbassi, F., Demiral, M., et al. Behaviour of woven-ply PPS thermoplastic laminates with interacting circular holes under tensile loading: An experimental and numerical study // Engineering Fracture Mechanics. – 2021. – V. 251. – P. 107802.
9. Elbadry, E. A.; Abdalla, G.; Aboraia M.; Oraby E. Notch sensitivity of short and 2D plain woven glass fibres reinforced with different polymer matrix composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2017. – V. 36 (15). – P. 1092-1098.
10. Joshi, P.; Kondo A.; Watanabe N. Numerical analysis to study the effect of through thickness reinforcement with different stitch orientations on open-hole laminates // Plastics Rubber and Composites. – V. 45 (10). – P. 445-454.
11. Kim, S.-Y.; Koo, J.-M.; Kim, D.; Seok, C.-S. Prediction of the static fracture strength of hole notched plain weave CFRP composites // Composites Science and Technology. – 2011. – V. 71. – P. 1671-1676.
12. Kumar, S. A.; Rajesh, R.; Pugazhendhi, S. A. Review of Stress Concentration Studies on Fibre Composite Panels with Holes and Cutouts // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials. – 2020. – V. 234. – P. 1461-1472.
13. Liu, Y.; Zhang, L.; Li, Z., et al. Investigation on damage evolution of open-hole plain woven composites under tensile load by acoustic emission signal analysis // Composite Structures. – 2023. – V. 305. – P. 116481.
14. Mohamed Makki, M., Chokri, B. Experimental, analytical, and finite element study of stress concentration factors for composite materials // Journal of Composite Materials. – 2017. – V. 51 (11). – P. 1583-1594.
15. Moure, M. M.; Herrero-Cuenca, J.; García-Castillo, J. S. K; Barbero, E. Design tool to predict the open-hole failure strength of composite laminates subjected to in-plane loads // Composite Structures. – 2020. – V. 238. – P. 111970.
16. Ozaslan, E.; Yetgin, A.; Acar, B. Stress concentration and strength prediction of 2×2 twill weave fabric composite with a circular hole // Journal of Composite Materials. – 2019. – V. 53 (4). – P. 463-474.
17. Pandita, S. D.; Nishiyabu, K.; Verpoest, I. Strain concentrations in woven fabric composites with holes // Composite Structures. – 2003. – V. 59. – P. 361-368.
18. Tan, S. C. Finite-width correction factors for anisotropic plate containing a central opening // Journal of Composite Materials. – 1988. – V. 22. – P. 1080-1018.