

УДК 620.178.4/6

DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.07

А.А. Зebзеев, А.В. Торопицина, Д.В. Маклаков

ОДК-Авиадвигатель, Пермь, Россия

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ОБРАЗЦА
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЗНАЧЕНИЕ
ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА МЕЖСЛОЕВОЙ СДВИГ
МЕТОДОМ КОРОТКОЙ БАЛКИ**

Описываются результаты испытаний стандартных образцов из тканых и однонаправленных полимерных композиционных материалов, испытанных на межслоевой сдвиг методом короткой балки. Каждая группа испытанных образцов имеет различную толщину, которая меняется с определенным шагом. Описаны ключевые особенности этих испытаний, выполнен сравнительный анализ полученных результатов. Для учета влияния внешних факторов испытания проводились при разных условиях (стандартные лабораторные условия, при пониженной температуре и влагонасыщенные образцы при повышенной температуре). На основе полученных данных и выполненного анализа построены графики зависимости предела прочности при межслоевом сдвиге от толщины образца, построены диаграммы размаха полученных значений, выполнена оценка статистической значимости при помощи критерия Стьюдента и установлено влияние размеров поперечного сечения (в данном случае толщины) стандартного образца на значение предела межслоевой прочности. Для получения более обширных и достоверных данных по этой проблеме необходимо увеличить количество образцов в каждой из групп. Полученные результаты рекомендуется использовать при проведении испытаний по определению предела прочности при межслоевом сдвиге методом короткой балки.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, межслоевой сдвиг методом короткой балки, предел прочности при межслоевом сдвиге, геометрические размеры стандартного образца, критерий Стьюдента для оценки статистической значимости.

A.A. Zebzeev, A.V. Toropitcina, D.V. Maklakov

UEC-Aviadvigatel, Perm, Russian Federation

**INFLUENCE OF THE CROSS-SECTIONAL DIMENSIONS OF A POLYMER
COMPOSITE SPECIMEN ON THE ULTIMATE STRENGTH VALUE
IN THE INTERLAYER SHEAR TEST BY THE SHORT BEAM METHOD**

The article describes the results of tests of standard woven and unidirectional polymer composite specimens tested for interlayer shear by the short beam method. Each group of tested specimens has a different thickness, which varies with a certain step. The key features of these tests are described and a comparative analysis of the results obtained is performed. To account for the influence of external factors, tests were conducted under different conditions (standard laboratory conditions, at reduced temperature and moisture-saturated specimens at elevated temperature). On the basis of the obtained data and the performed analysis the diagrams of dependence of the ultimate strength at interlayer shear from the thickness of the specimen were plotted, the diagrams of the range of the obtained values were plotted, the statistical significance was estimated by Student's test and the effect of the cross-sectional dimensions (in this case the thickness) of the standard specimen on the ultimate strength at interlayer shear was determined. To obtain more extensive and reliable data on this problem it is necessary to increase the number of specimens in each of the groups, and conduct repeated tests. The results are recommended for use in tests to determine the interlayer shear strength by the short beam method.

Keywords: polymer composite material, interlayer shear by short beam method, interlayer shear strength, geometric dimensions of a standard specimen, Student's test for estimation of statistical significance.

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) активно используются в современных авиационных конструкциях, применение этих материалов позволяет добиться снижения веса, а также повышения эксплуатационных характеристик конструкций и отдельных деталей [1–3]. Однако из-за того, что современные полимерные композиционные материалы имеют ряд следующих факторов – анизотропия свойств, неоднородность, производственные и тех-

нологические дефекты, применение в полноразмерных конструкциях этих материалов приводит к дополнительным прочностным исследованиям и анализу надежности конструкции [4–6].

Одним из основных видов разрушения полимерных композиционных материалов является расслоение, поэтому важно и необходимо проводить испытания материалов из ПКМ на межслоевую прочность, в частности на сдвиг методом короткой балки (ГОСТ 32659-2014). Помимо этого, расслоение дает качественное понимание о свойствах готового углепластика и используется как приемосдаточная характеристика.

В процессе проведения работ были изучены труды, которые касаются основных особенностей испытаний образцов из ПКМ на межслоевой сдвиг методом короткой балки. В работе [7] приводится сравнение геометрических размеров образцов из ПКМ, которые используются в международных стандартах и отечественных методиках (ГОСТ). В работе [8] приводится оценка влияния геометрических и технологических факторов на напряженно-деформированное состояние образцов из полимерных композиционных материалов при испытаниях на изгиб и межслоевой сдвиг методом короткой балки. В работе [9] выполнено моделирование процессов деформирования полимерных композиционных материалов на основе тканевого препрега при испытаниях на изгиб и межслоевой сдвиг методом короткой балки. Различные существующие экспериментальные методы исследований физико-механических свойств полимерных композиционных материалов рассмотрены в работах [10–12], определены их преимущества и недостатки. В анализе зарубежной литературы изучены работы по экспериментальному и численному определению прочности при межслоевом сдвиге эпоксидных композитов, армированных стекловолокном [13], исследования возникающего расслоения и разрушения в тканых композитных материалах при испытаниях на сдвиг методом короткой балки [14], определение характеристик прочности при испытании на межслоевой сдвиг IM7/8552 с помощью стандартных образцов [15]. Помимо этого, были изучены основные нормативные документы и стандарты по определению прочности при испытаниях на межслоевой сдвиг [16–17].

Краткий анализ проблемы указывает на необходимость проведения работ по оценке влияния геометрических размеров поперечного сечения образца из ПКМ на предел прочности при испытании на межслоевой сдвиг методом короткой балки и возможного установления единых или минимальных значений поперечного сечения образцов из ПКМ.

Общие данные по испытаниям

Для оценки влияния размеров поперечного сечения на значение предела прочности при испытании на межслоевой сдвиг методом короткой балки испытаны стандартные образцы из полимерных композиционных материалов (тканого и однонаправленного). Образцы изготовлены в соответствии с требованиями стандартов (ASTM D2344 [16] и ASTM D 5229 [17]). Для определения влияния размеров поперечного сечения на значение предела прочности каждая группа образцов имеет свою толщину (с определенным равномерным шагом изменения толщины), для учета влияния внешних факторов, испытания проводятся при различных условиях (STD – сухие образцы при отрицательной температуре, RTD – образцы в состоянии поставки при комнатной температуре, ETW – влагонасыщенные образцы при повышенной температуре). Обобщенные сведения по поставленным на испытания образцам представлены в табл. 1 (по толщинам образцов приведен нормированный коэффициент толщины образцов). Типовая схема стандартного образца из ПКМ, изготовленного для испытаний на межслоевой сдвиг методом короткой балки, приведена на рис. 1.

Испытания проводятся на гидравлической универсальной испытательной машине, предназначенной для определения механических свойств материалов при прочностных испытаниях. Машина оснащена вспомогательными элементами: видеоэкстензометром для измерения продольной и поперечной деформации и штатной климатической камерой для проведения испытаний при различных уровнях температур.

Таблица 1

Общие данные по поставленным на испытания образцам

Группа образцов	Нормированный коэффициент на толщину образца	Материал	Количество, шт.			
			СТД	RTD	ETD	ETW
1	0,40	Тканый материал (ПКМ)	6	12	–	6
2	0,60		6	12	–	6
3	0,80		6	12	–	6
4	1,00		6	12	–	6
5	0,40	Однонаправленный материал (ПКМ)	6	12	–	6
6	0,60		6	12	–	6
7	0,80		6	12	–	6
8	1,00		6	12	–	6
Итого:			48	96	0	48

Примечание:

СТД – сухие образцы при отрицательной температуре (– 60 °С);

RTD – сухие образцы при комнатной температуре;

ETD – сухие образцы при повышенной температуре (120 °С);

ETW – влагонасыщенные образцы при повышенной температуре.

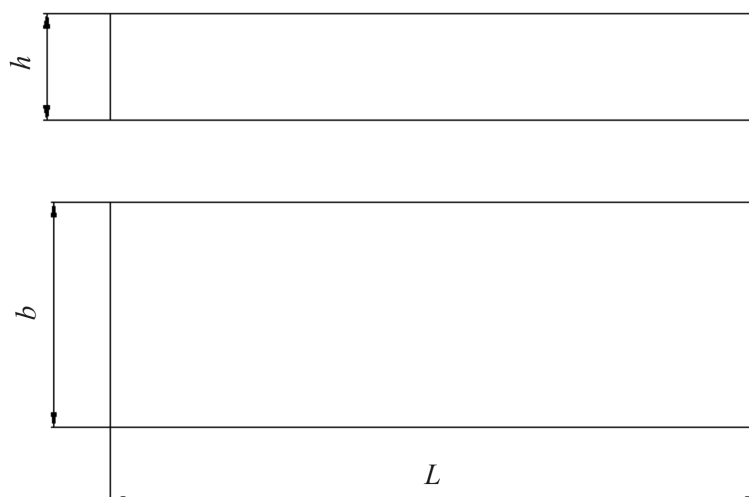


Рис. 1. Типовая схема стандартного образца, изготовленного для испытаний на межслоевой сдвиг методом короткой балки

Перед началом проведения испытаний для всех образцов выполнены обмеры геометрических характеристик, а также часть образцов была подвергнута процедуре влагонасыщения (см. табл. 1) в климатической камере в соответствии с ASTM D5229 [17]. Помимо этого, до начала проведения испытаний для каждой из группы образцов по формуле (1) определяется индивидуальное расстояние между опорами:

$$L = 4 \cdot h, \quad (1)$$

где L – расстояние между опорами, мм; h – толщина образца, мм.

После выполнения всех подготовительных процедур образцы устанавливаются в оснастку испытательной машины и испытываются на межслоевой сдвиг методом короткой балки до разрушения, схема нагружения образцов представлена на рис. 2. Определяемая характеристика при испытаниях – предел прочности на межслоевой сдвиг.

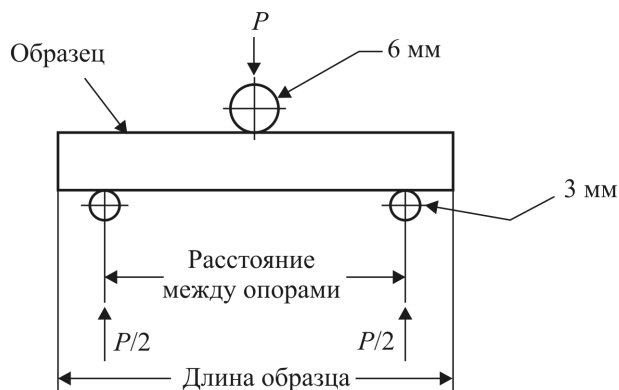


Рис. 2. Схема нагружения при испытаниях на межслоевой сдвиг методом короткой балки

После завершения испытаний для каждой характеристики определяется среднее значение по формуле (2), стандартное отклонение по формуле (3), коэффициент вариации (в процентах) по формуле (4) для каждой группы образцов.

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n, \quad (2)$$

$$S_{n-1} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right) / (n-1)}, \quad (3)$$

$$CV = 100 \cdot S_{n-1} / \bar{x}, \quad (4)$$

где \bar{x} – среднее значение величины;
 S_{n-1} – стандартное отклонение величины;
 CV – коэффициент вариации в процентах;
 x_i – значение величины.

Предел прочности при испытании на межслоевой сдвиг методом короткой балки определяется по соотношению (5) и (6):

$$\tau_{xy} = \frac{3P_{\text{разр}}}{4S}, \quad (5)$$

$$S = b \cdot h, \quad (6)$$

где τ_{xy} – предел прочности при испытании на межслоевой сдвиг методом короткой балки, МПа;
 S – площадь поперечного сечения, мм²;
 $P_{\text{разр}}$ – нагрузка разрушения образца, кН;
 b – ширина образца, мм;
 h – толщина образца, мм.

При испытании на межслоевой сдвиг методом короткой балки и оценке влияния геометрических размеров на предел прочности были испытаны образцы разной толщины, при разных условиях проведения испытаний (RTD, STD, ETW) и из разного материала (тканый и однонаправленный).

Результаты испытаний

Проведены испытания всех групп стандартных образцов из ПКМ при трех условиях испытаний. По полученным результатам испытаний построены графики зависимости межслоевой прочности на сдвиг методом короткой балки от площади поперечного сечения (полученная за-

зависимость и диаграмма размаха для одной группы образцов представлены на рис. 3 (а, б), стоит отметить, что у всех групп испытанных образцов зависимости и диаграммы размаха имеют схожий характер), выполнен статистический анализ полученных данных по формулам (2)–(4). Полученные разрушения образцов имеют идентичный характер, который соответствует основному типу разрушения при испытаниях на межслоевой сдвиг методом короткой балки. Результаты испытаний образцов из тканого полимерного композиционного материала представлены на рис. 4, из однонаправленного – на рис. 5.

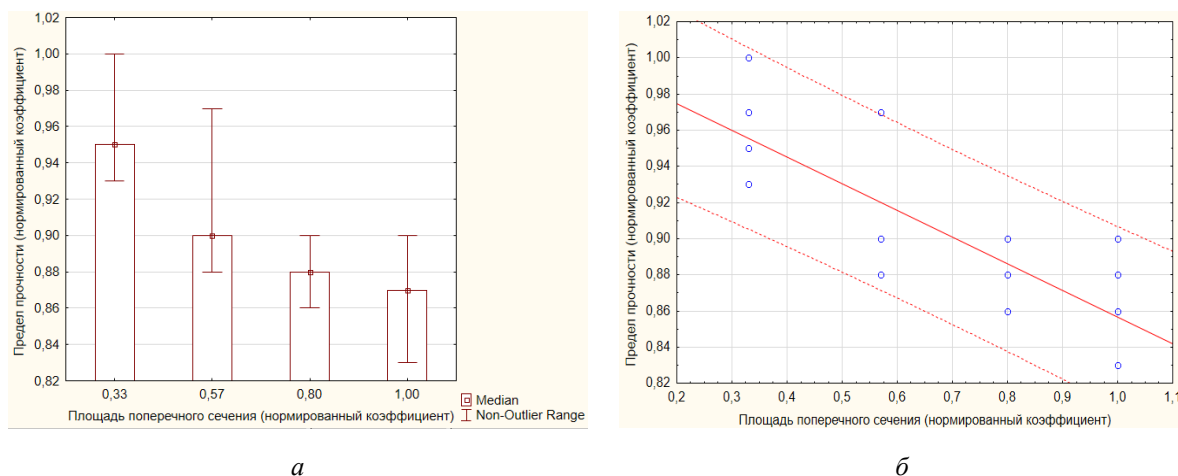


Рис. 3. Построенные зависимости по полученным данным: а – диаграмма размаха для одной группы образцов; б – зависимость предела прочности от площади поперечного сечения для одной группы образцов

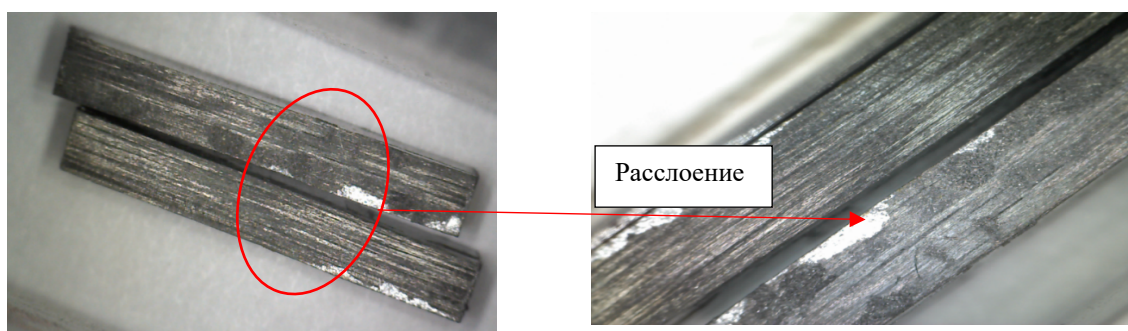


Рис. 4. Результаты испытаний образцов из тканого материала на межслоевой сдвиг методом короткой балки

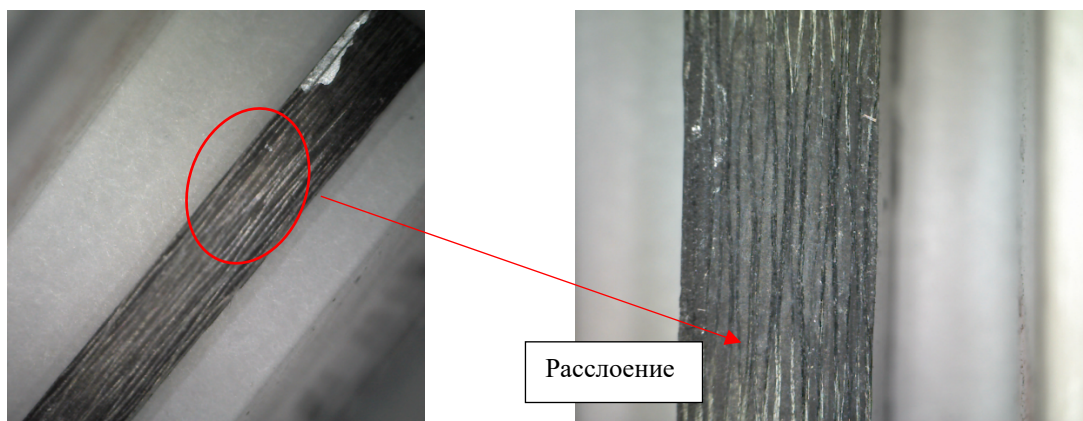


Рис. 5. Результаты испытаний образцов из однонаправленного материала на межслоевой сдвиг методом короткой балки

Для определения статистической значимости отличий пределов прочности при межслоевом сдвиге для образцов различных толщин выполнена оценка статистической значимости при помощи критерия Стьюдента. Все четыре группы образцов каждого материала при отдельном условии испытаний сравниваются друг с другом. Для сравнительного анализа вычисляются: дисперсия между двумя группами данных (по формуле (7)), t -оценка данных (по формуле (8)) и число степеней свободы двух групп данных (по формуле (9)). Для выполнения оценки статистической значимости принят уровень значимости $\alpha = 0,05$ – в этом случае вероятность обнаружения случайной разницы между разными наборами данных составляет 5 %.

$$S_d = \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}, \quad (7)$$

$$t = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2}{S_d}, \quad (8)$$

$$i = 2 \cdot (n - 1), \quad (9)$$

где S_d – дисперсия между двумя группами данных;

S_1 – стандартное отклонение величины первой группы данных;

S_2 – стандартное отклонение величины второй группы данных;

n_1 – количество образцов в первой группе данных;

n_2 – количество образцов во второй группе данных;

t – t -оценка данных;

\bar{x}_1 – среднее значение предела прочности в первой группе данных, МПа;

\bar{x}_2 – среднее значение предела прочности во второй группе данных, МПа;

i – число степеней свободы двух групп данных.

По критерию Стьюдента определена статистическая значимость для каждой группы образцов из ПКМ. Пример полученных данных представлен в табл. 2.

Для всех групп образцов составлены аналогичные таблицы и обработаны полученные результаты.

Таблица 2

Результаты оценки статистической значимости однонаправленных образцов (RTD)

Нормированный коэффициент на толщину образца	0,40	0,60	0,80	1,00
0,40	–	Различия статистически значимы	Различия статистически значимы	Различия статистически значимы
0,60	Различия статистически значимы	–	Статистически значимых различий нет	Различия статистически значимы
0,80	Различия статистически значимы	Статистически значимых различий нет	–	Различия статистически значимы
1,00	Различия статистически значимы	Различия статистически значимы	Различия статистически значимы	–

Заключение

Для оценки влияния размеров поперечного сечения на значение предела прочности при испытании на межслоевой сдвиг методом короткой балки испытаны стандартные образцы из полимерных композиционных материалов (тканого и однонаправленного) в различных условиях (STD, RTD, ETW) и с разной толщиной. По результатам работы установлено:

1) на основании полученных результатов, построенных графиков зависимостей и диаграмм размаха определено, что толщина образца оказывает влияние на предел межслоевой прочности, полученный методом короткой балки. Для большинства групп образцов выявлено, что с увеличением толщины (как следствие, и площади поперечного сечения) образца предел межслоевой прочности снижается на некоторую величину. Этот вывод справедлив для всех условий испытаний (STD, RTD и ETW). По критерию Стьюдента для большинства групп образцов установлено, что различия в пределах межслоевой прочности для разных толщин статистически значимы;

2) для проведения последующих испытаний получены рекомендации по минимальной толщине исследуемого образца при испытаниях на межслоевой сдвиг методом короткой балки. Также для слишком тонких образцов выявлены ряд трудностей, а именно проскальзывание образцов в плоскости между нагружающим приспособлением и опорами, а также натонких образцах увидеть расслоение и определить характер расслоения в процессе проведения испытаний достаточно сложно;

3) для получения более обширных и достоверных данных по этой проблеме необходимо увеличить количество образцов в каждой из групп и провести повторные испытания на межслоевой сдвиг методом короткой балки.

Библиографический список

1. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. Композиционные материалы: справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 510 с.
2. Берлин А.А. Современные полимерные композиционные материалы // Соросовский образовательный журнал. – 1995. – № 1. – С. 57–65.
3. Виноградов В.М., Кербер М.Л., Головкин Г.С. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. – М.: Профессия, 2008. – 560 с.
4. Шершак П.В. Особенности национальной стандартизации методов испытаний полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2019. – № 2 (74). – С. 8–13.
5. Афанасьев А.В., Рабинский Л.Н., Шершак П.В. Экспериментальное определение деформационных и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 214–222.
6. Karger-Kocsis J., Mahmood H., Pegoretti A. Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites // Progress in Materials Science. – 2015. – Vol. 73. – P. 1–43.
7. Ильичев А.В., Раскутин А.Е., Гуляев Л.Н. Сравнение геометрических размеров образцов из ПКМ, используемых в международных стандартах ASTM и отечественных ГОСТ // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журнал. – 2015. – № 4. – Ст. 05.
8. Лаптев М.Ю., Адамов А.А. Оценка влияния геометрических и технологических факторов на напряженно-деформированное состояние образцов из полимерных композиционных материалов при испытаниях на изгиб и межслоевой сдвиг короткой балки // Конструкции из композиционных материалов. – 2015. – № 2. – С. 10–14.
9. Лаптев М.Ю., Адамов А.А. Моделирование процессов деформирования полимерных композиционных материалов на основе тканевого препрега при испытаниях на изгиб и межслоевой сдвиг методом короткой балки // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 264–272.
10. Губский Д.В. Методы экспериментальных исследований физико-механических свойств полимерных композиционных материалов // Проблемы современной науки и образования. – 2016. – № 30. – С. 25–30.
11. Лаптев М.Ю., Адамов А.А. Сравнение методик определения упругих и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов при разных видах нагружения // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – № 2. – С. 244–252.

12. Стрижало В.А., Земцов В.П. Жесткость и прочность слоистых углепластиков при одноосном нагружении // Проблемы прочности. – 2011. – № 6. – С. 61–71.
13. Experimental and numerical determination of interlayer shear strength of glass fiber-reinforced epoxy composites / Mustafa Albayrak, Ahmet Murat Asan, Mete Onur Kaman, İlyas Bozkurt // Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics. – 2022. – Vol. 5. – P. 289–299.
14. Espadas-Escalante J.J., Isaksson P. A study of induced delamination and failure in woven composite laminates subject to short-beam shear testing // Eng Fract Mech. – 2019. – P. 359–369.
15. Allott N.R., Czabaj M.W. Characterization of the interlaminar shear strength of IM7/8552 using small-scale short beam shear tests // Compos Part A Appl Sci Manuf. – 2021. – Vol. 142. – 10 p.
16. ASTM D2344 / Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates Compression (CLC) Test Fixture. – 2015.
17. ASTM D 5229 / Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials. – 2013.

References

1. Vasiliev V.V., Protasov V.D., Bolotin V.V. Kompozitsionnyye materialy: spravochnik [Composite materials: handbook]. Moscow, *Mashinostroyeniye*, 1990, 510 p.
2. A.A. Berlin. Sovremennyye polimernyye kompozitsionnyye materialy [Modern Polymer Composite Materials]. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, 1995, no. 1, pp. 57–65.
3. Vinogradov V.M., Kerber M.L., Golovkin G.S. Polimernyye kompozitsionnyye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya [Polymer composite materials: structure, properties, technology]. Moscow, *Professiya*, 2008, 560 p.
4. Shershak P.V. Osobennosti natsionalnoy standartizatsii metodov ispytaniy polimernykh kompozitsionnykh materialov [Features of national standardization of testing methods of polymer composites]. Scientific and Technical On-line Journal «Trudy VIAM» («Proceedings of VIAM»), 2019, no. 2 (74), pp. 8–13.
5. Afanasyev A.V., Rabinskiy L.N., Shershak P.V. Eksperimentalnoye opredeleniye deformatsionnykh I prochnostnykh kharakteristik polimernykh kompozitsionnykh materialov [Experimental determination of deformation and strength characteristics of polymeric composite materials]. *Mechanics of composite materials and structures*, 2010, vol.16, no. 2, pp. 214–222.
6. Karger-Kocsis J., Mahmood H., Pegoretti A. Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites. *Progress in Materials Science*, 2015, vol.73, pp. 1–43.
7. Ilichev A.V., Raskutin A.E., Gulyayev L.N. Sravneniye geometricheskikh razmerov obraztsov PKM, ispolzuyemykh v mezhdunarodnykh standartakh ASTM I otechestvennykh GOST [Comparison of geometric dimensions of samples of PCM used in international standards ASTM and domestic GOST]. *Material science and technology news*, 2015, no. 4, Art.05.
8. Laptev M.Yu., Adamov A.A. Otsenka vliyaniya geometricheskikh I tekhnologicheskikh faktorov na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye obraztsov iz polimernykh kompozitsionnykh materialov pri ispytaniyakh na izgib I mezhsloyevoy sdvig korotkoy balki [Assessment of the influence of geometric and technological factors on the stress-strain state of samples from polymer composites in bending tests and interlayer shear of a short beam]. *Composite materials constructions*, 2015, no. 2, pp.10–14.
9. Laptev M.Yu., Adamov A.A. Modelirovaniye protsessov deformirovaniya polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove tkanevogo preprega pri ispytaniyakh na izgib i mezhsloyevoy sdvig metodom korotkoy balki [Modeling of deformation processes of polymer composite materials based on tissue prepreg during bending and interlayer shear tests by the short beam method]. *Computational Continuum Mechanics*, 2015, vol.8, no.3, pp. 264–272.
10. Gubskiy D.V. Metody eksperimentalnykh issledovaniy fiziko-mekhanicheskikh svoystv polimernykh kompozitsionnykh materialov [Methods of experimental studies of physical and mechanical properties of polymer composites]. *Problems of modern science and education*, 2016, no. 30, pp. 25–30.
11. Laptev M.Yu., Adamov A.A. Sravneniye metodik opredeleniya uprugikh i prochnostnykh kharakteristik polimernykh kompozitsionnykh materialov pri raznykh vidakh nagruzheniya [Comparison of methods for determining the elastic and strength characteristics of polymer composites under different types of loading]. *Computational continuum mechanics*, 2015, no. 2, pp.244–252.
12. Strizhalo V.A., Zemtsov V.P. Zhestkost I prochnost sloistykh ugleplastikov pri odnoosnom nagruzhenii [Stiffness and strength of laminated carbon plastics under uniaxial loading]. *Strength of Materials*, 2011, no. 6, pp. 61–71.

13. Mustafa Albayrak, Ahmet Murat Asan, Mete Onur Kaman, İlyas Bozkurt. Experimental and numerical determination of interlayer shear strength of glass fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 2022, Vol. 5, pp. 289-299.
14. Espadas-Escalante JJ, Isaksson P.A study of induced delamination and failure in woven composite laminates subject to short-beam shear testing. *Eng Fract Mech.*, 2019, pp. 359-369.
15. Allott NR, Czabaj MW. Characterization of the interlaminar shear strength of IM7/8552 using small-scale short beam shear tests. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, vol. 142, 10 p.
16. ASTM D2344 /Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates Compression (CLC) Test Fixture, 2015.
17. ASTM D 5229 / Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials, 2013.

Об авторах

Зебзеев Александр Алексеевич (Пермь, Россия) – аспирант, кафедра «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29); инженер отдела экспериментальных исследований силовых схем и полимерных композиционных материалов, ОДК-Авиадвигатель (Пермь, 614000, Комсомольский пр., 93, e-mail: zebzeev-aa@avid.ru).

Торопицина Анна Владимировна (Пермь, Россия) – заместитель начальника отдела по экспериментальным исследованиям и работам с полимерными композиционными материалами, ОДК-Авиадвигатель (Пермь, 614000, Комсомольский пр., 93, e-mail: toropitsina@avid.ru).

Маклаков Данила Валентинович (Пермь, Россия) – начальник бригады экспериментальных исследований силовых схем и полимерных композиционных материалов, ОДК-Авиадвигатель (Пермь, 614000, Комсомольский пр., 93, e-mail: maklakov-dv@avid.ru).

About the authors

Alexander A. Zebzeev (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm); Engineer, Department of Experimental Research of Power Circuits and Polymer Composite Materials, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky av., 614000, Perm, e-mail: zebzeev-aa@avid.ru).

Anna V. Toropitsina (Perm, Russian Federation) – Deputy Head of Experimental Research and Works with Polymer Composite Materials, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky av., 614000, Perm, e-mail: toropitsina@avid.ru).

Danila V. Maklakov (Perm, Russian Federation) – Head of Experimental Research Team of Power Circuits and Polymer Composite Materials, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky av., 614000, Perm, e-mail: maklakov-dv@avid.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 31.01.2023

Одобрена: 03.02.2023

Принята к публикации: 28.02.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Зебзеев, А.А. Влияние размеров поперечного сечения образца из полимерных композиционных материалов на значение предела прочности при испытании на межслоевой сдвиг методом короткой балки / А.А. Зебзеев, А.В. Торопицина, Д.В. Маклаков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 72. – С. 91–99. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.07

Please cite this article in English as: Zebzeev A.A., Toropitsina A.V., Maklakov D.V. Influence of the cross-sectional dimensions of a polymer composite specimen on the ultimate strength value in the interlayer shear test by the short beam method. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2023, no. 72, pp. 91-99. DOI: DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.07