

Научная статья

УДК 620.17

doi: 10.17223/19988621/91/12

Деформирование и разрушение слоистого тканевого стеклопластика при изгибе на кольцевой опоре: влияние трехмерного армирования и скорости нагружения

Галина Анатольевна Форенталь¹, Сергей Борисович Сапожников²,
Анастасия Валерьевна Игнатова³, Ольга Станиславовна Буслаева⁴,
Александр Вячеславович Херувимов⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

¹ gforental@mail.ru

² sapozhnikovsb@susu.ru

³ ignatovaav@susu.ru

⁴ buslaevaos@susu.ru

⁵ kheruvimovav@mail.ru

Аннотация. Представлены экспериментальные исследования влияния локального трехмерного армирования (фелтинга) на сопротивление изгибу на кольцевой опоре слоистых пластин из стеклопластика. Рассмотрено квазистатическое и низкоскоростное ударное локальное нагружение сферическим индентором. Показано, что при плотности фелтинга 10 ударов на 1 см² тканевая структура композита несколько повреждается, жесткость на изгиб снижается. Однако максимальные нагрузки и площади локальных дефектов (расслоения и разрывы волокон) при наличии фелтинга существенно снижаются.

Ключевые слова: тканевый стеклопластик, трехмерное армирование, изгиб на кольцевой опоре, статическое нагружение, низкоскоростной удар

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13007. Авторы выражают благодарность А.В. Никонову, М.В. Жихареву и А.В. Безмельницыну за помощь при изготовлении образцов.

Для цитирования: Форенталь Г.А., Сапожников С.Б., Игнатова А.В., Буслаева О.С., Херувимов А.В. Деформирование и разрушение слоистого тканевого стеклопластика при изгибе на кольцевой опоре: влияние трехмерного армирования и скорости нагружения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 91. С. 141–152. doi: 10.17223/19988621/91/12

Deformation and failure of laminated fabric fiber-glass reinforced plastic during bending on an annular support: effect of 3D reinforcement and loading rate

Galina A. Forental¹, Sergey B. Sapozhnikov², Anastasiya V. Ignatova³,
Ol'ga S. Buslaeva⁴, Aleksandr V. Kheruvimov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

¹ gforental@mail.ru

² sapozhnikovsb@susu.ru

³ ignatovaav@susu.ru

⁴ buslaevaos@susu.ru

⁵ kheruvimovav@mail.ru

Abstract. Felting is a needle-punching technology in which the impacts of barbed needles partially damage the dry fibers of the fabric stack and pull them normally to the surface. The result is transversal reinforcement at a given impact density per 1 cm² in the local area. In this work, the effect of felting on the resistance to bending on the annular support of laminated fabric fiber-glass reinforced plastic at various loading rates is experimentally studied. During quasi-static tests, the area of defects observed by the backlit of the specimens with felting decreases by approximately 20% compared to the specimens without felting at indenter diameters of 10 and 20 mm.

During the low-velocity impact tests, the damaged area decreases on average by 9% (velocity is 1.93 m/s) and 15% (velocity is 2.4 m/s) with felting at an indenter diameter of 10 mm. For a diameter of 20 mm, the damaged area with felting also decreases compared with the specimens without felting (by 11% at 1.42 m/s, by 22% at 1.98 m/s, and by 34% at 2.42 m/s). The experimental results show that even the minimum density felting (10 cm⁻²) significantly reduces the delamination area (up to 34%) during a local impact.

Keywords: fabric fiber-glass reinforced plastic, three-dimensional reinforcement, bending on the annular support, static loading, low-velocity impact

Acknowledgments: This study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-29-13007). The authors are grateful to A.V. Nikonov, M.V. Zhikharev and A.V. Bezmelnitsyn for assistance in preparing the specimens.

For citation: Forental', G.A., Sapozhnikov, S.B., Ignatova, A.V., Buslaeva, O.S., Kheruvimov A.V. (2024) Deformation and failure of laminated fabric fiber-glass reinforced plastic during bending on an annular support: effect of 3D reinforcement and loading rate. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 91. pp. 141–152. doi: 10.17223/19988621/91/12

Введение

Композитные материалы применяются в аэрокосмической, автомобильной технике, в области ветроэнергетики, где предъявляются высокие требования к прочности материалов в присутствии локальных дефектов эксплуатации. Одним из самых опасных видов воздействий на слоистые композитные материалы является

удар в направлении нормали к плоскости укладки армирующих слоев композита. Ударные воздействия приводят к возникновению расслоений в структуре материала и разрывам волокон, которые можно уменьшить, используя трехмерное армирование [1–4]. К способам трехмерного армирования в настоящее время относят тафтинг, прошивку, введение Z-стержней, фелтинг и др. [5, 6]. Фелтинг представляет собой пробивку пакета стандартных сухих тканей с плоским плетением специальной иглой с зазубринами [7, 8], часть нитей в плоскости XY разрывается и протягивается зазубринами в направлении нормали (Z). В результате может быть получен композитный материал с трехмерным армированием. Количество вытянутых в направлении Z нитей зависит от плотности фелтинга, т.е. количества ударов иглой на 1 см² площади тканевого пакета. Полученный после фелтинга материал обладает повышенными трансверсально-сдвиговыми характеристиками в плоскостях XZ и YZ, что может привести к повышению сопротивления локальным ударным нагрузкам. Однако за счет ослабления материала в плоскости укладки слоев XY наблюдается ухудшение механических характеристик при нагружении материала в этой плоскости [9].

Исследование механического поведения полимерных композитов проводят при различных скоростях нагружения, так как полимеры имеют заметную чувствительность прочности к этому параметру [10–13]. Испытания на трансверсальный сдвиг, как правило, наиболее чувствительны к скорости нагружения по сравнению с нагружением в плоскости армирования [14]. Поэтому в данной работе были проведены сравнительные экспериментальные исследования влияния фелтинга на механическое поведение слоистого стеклопластика при изгибе на кольцевой опоре при различных скоростях нагружения.

Изготовление материалов и образцов

С помощью иглопробивной машины с числовым программным управлением [15] осуществляли процесс фелтинга 15 слоев сухой стеклоткани полотняного переплетения (толщина слоя 0.2 мм, стекловолокна типа E, средний диаметр 9 мкм). Плотность фелтинга – 10 см⁻². Тканевые преформы после фелтинга пропитывали эпоксидной смолой холодного отверждения ЭТАЛ ИНЖЕКТ SL (производитель фирма «Эпитал» [16]) методом вакуумной инфузии. Режим отверждения включал выдержку при комнатной температуре в течение 24 ч и постотверждение при температуре 90°C в течение 4 ч. Так же был пропитан контрольный пакет из 15 слоев сухой стеклоткани без фелтинга. После отверждения изготовленные пластины разрезали на станке с ЧПУ пальцевой фрезой шагами 0.2 мм по толщине на образцы с размерами 25 × 25 мм для последующих испытаний. Толщина полученных образцов без фелтинга составляла 2.88 ± 0.05 мм, для образцов с плотностью фелтинга 10 см⁻² – 2.86 ± 0.09 мм.

Методы испытаний

В данной работе использовано два метода исследования влияния фелтинга на механические характеристики композитного материала в зависимости от скорости нагружения: статические испытания и испытания при низкоскоростном ударе.

Статические испытания проводили на универсальной испытательной машине INSTRON 5900R. Схема статических испытаний показана на рис. 1, *a*. Образец помещали на цилиндр диаметром 20 мм с конусным углублением диаметром 19 мм и углом конусности 12°. Нагружение проводили стальными полусферами диаметрами 10 и 20 мм. В одинаковых условиях испытывали серии из 4 образцов каждая.



Рис. 1. Испытания на изгиб на кольцевой опоре:
a – статические испытания; *b* – низкоскоростной удар
Fig. 1. Bending tests on an annular support:
 (a) static tests and (b) low-velocity impact tests

Испытания на изгиб на кольцевой опоре при низкоскоростном ударе проводили на вертикальном башенном копре INSTRON CEAST 9350 по аналогии со статическим нагружением (см. рис. 1, *b*). В испытаниях использовали ударник INSTRON 7529.841 со сферическим наконечником диаметрами 10 и 20 мм, масса ударника – 2.045 кг. Испытания проводили при трех различных скоростях ударника – 2.4 м/с (энергия 6 Дж), 1.93 м/с (энергия 4 Дж), 1.4 м/с (энергия 2 Дж) для каждого диаметра наконечника.

Результаты и обсуждение.

Статические испытания на изгиб на кольцевой опоре

На рис. 2 представлены диаграммы «нагрузка–перемещение» образцов без фелтинга и с плотностью фелтинга 10 см⁻². В таблице 1 приведены результаты статических испытаний.

При испытаниях с полусферой диаметром 10 мм (см. рис. 2, *a*) средняя нагрузка при перемещении 1.56 мм для образцов без фелтинга равна 2.87 кН. Для образцов с фелтингом – 2.44 кН, коэффициенты вариации меньше 2%. При использовании фелтинга средняя нагрузка падает на 15%.

Для полусферы диаметром 20 мм (см. рис. 2, *b*) средняя нагрузка при перемещении 1.88 мм для образцов без фелтинга равна 4.23 кН, для образцов с фелтингом – 3.86 кН, коэффициенты вариации 1 и 5%. В этом случае при применении фелтинга нагрузка падает на 9%.

На рис. 3 приведены примеры картин повреждений образцов после испытаний. Данные картины были получены после обработки фотографий в проходящем свете (так как стеклопластик частично прозрачен). Светлые зоны на рис. 3 связаны с образованием трещин расслоения и разрыва волокон.

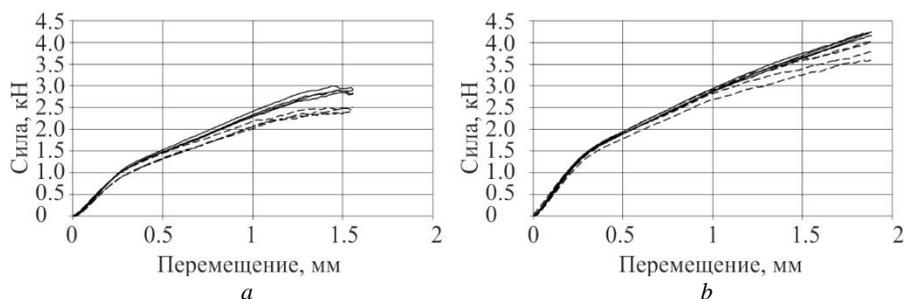


Рис. 2. Результаты статических испытаний с полусферой диаметром 10 мм (а) и 20 мм (b): диаграммы «нагрузка–перемещение» для образцов без фелтинга (сплошные линии) и с плотностью фелтинга 10 см²

Fig. 2. Results of static tests with a hemisphere diameter of (a) 10 and (b) 20 mm: load–displacement diagrams for the specimens without felting (solid lines) and with a felting density of 10 cm² (dotted lines)

Таблица 1

Результаты статических испытаний

Полусфера 10 мм			
Плотность фелтинга, см ²	Перемещение, мм	Сила, кН	Средняя сила, кН
0	1.56	2.90	2.87 ± 0.05 (CV = 1.7%)
0	1.56	2.82	
0	1.56	2.84	
0	1.56	2.92	
10	1.56	2.43	2.44 ± 0.04 (CV = 1.6%)
10	1.56	2.50	
10	1.56	2.43	
10	1.56	2.41	
Полусфера 20 мм			
Плотность фелтинга, см ²	Перемещение, мм	Сила, кН	Средняя сила, кН
0	1.88	4.25	4.23 ± 0.04 (CV = 0.9%)
0	1.84	4.22	
0	1.89	4.26	
0	1.90	4.17	
10	1.88	3.60	3.86 ± 0.20 (CV = 5.2%)
10	1.88	3.79	
10	1.88	4.00	
10	1.88	4.04	

Как видно из рис. 3, видимая площадь дефектов образцов с фелтингом уменьшается по сравнению с образцом без фелтинга. В испытаниях с полусферой диаметром 10 мм площадь дефекта образца без фелтинга составила 119.0 мм², а для образца с фелтингом – 95.3 мм². Уменьшение видимой площади дефектов составило 19,9%. При испытаниях с полусферой диаметром 20 мм площадь дефекта образца без фелтинга составила 241.7 мм², для образца с фелтингом – 194.8 мм². Уменьшение видимой площади дефектов составило 19.4%.

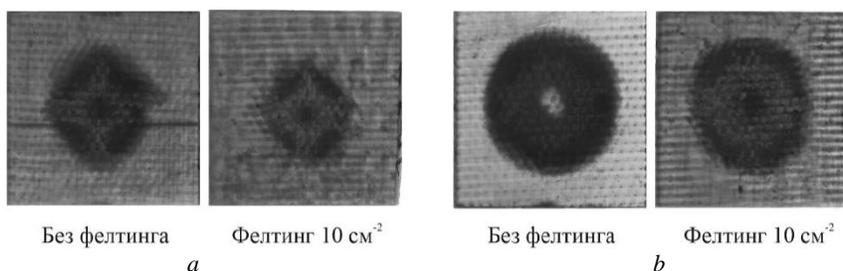


Рис. 3. Результаты статических испытаний: оптическая плотность образцов без фелтинга и с плотностью фелтинга 10 см^{-2} : диаметр полусферы 10 мм (a) и 20 мм (b). Образцы были разгружены после достижения перемещения 1.56 мм (a) и 1.88 мм (b)

Fig. 3. Results of static tests for optical density of the specimens without felting (on the left) and with a felting density of 10 cm^{-2} (on the right) at a hemisphere diameter of: (a) 10 and (b) 20 mm. The specimens were unloaded after a displacement of (a) 1.56 and (b) 1.88 mm is reached

Испытания на вертикальном башенном копре

В табл. 2–3 приведены результаты испытаний на изгиб на кольцевой опоре при низкоскоростном ударе. На рис. 4 показаны типичные зависимости нагрузки на инденторе от времени для образцов с фелтингом 10 см^{-2} и без фелтинга для трех скоростей ударника.

При диаметре ударника 10 мм (см. рис. 4, a) изменение максимальной силы на инденторе в процессе контакта меньше 1% у образцов с фелтингом и без фелтинга. При диаметре ударника 20 мм (см. рис. 4, b) для образцов с фелтингом максимальная сила на инденторе в процессе контакта увеличивается не более чем на 5% по сравнению с образцами без фелтинга.

Таблица 2

Результаты испытаний при низкоскоростном ударе – диаметр полусферы 10 мм

Плотность фелтинга, см^{-2}	Скорость, м/с	Площадь дефектов, мм^2	Средняя площадь дефектов, мм^2	Максимальная сила, кН	Средняя сила, кН
0	1.4	56.4	52.2 ± 3.7	2.83	2.92 ± 0.09
0	1.4	50.9		3.00	
0	1.4	49.3		2.94	
0	1.93	95.9	98.6 ± 10.3	3.63	3.72 ± 0.08
0	1.93	109.9		3.79	
0	1.93	89.9		3.73	
0	2.4	163.0	166.0 ± 4.2	4.66	4.49 ± 0.17
0	2.4	170.8		4.33	
0	2.4	164.3		4.47	
10	1.4	54.7	52.1 ± 4.8	2.92	2.90 ± 0.02
10	1.4	55.0		2.91	
10	1.4	46.5		2.88	
10	1.93	94.2	89.4 ± 4.4	3.67	3.71 ± 0.06
10	1.93	85.6		3.68	
10	1.93	88.3		3.79	
10	2.4	137.3	140.5 ± 13.0	4.51	4.46 ± 0.12
10	2.4	129.0		4.55	
10	2.4	154.7		4.33	

Таблица 3

Результаты испытаний при низкоскоростном ударе – диаметр полусферы 20 мм

Плотность фелтинга, см ²	Скорость, м/с	Площадь дефектов, мм ²	Средняя площадь дефектов, мм ²	Максимальная сила, кН	Средняя сила, кН
0	1.4	47.2	46.7 ± 2.1	3.34	3.31 ± 0.03
0	1.4	48.4		3.30	
0	1.4	44.4		3.29	
0	1.98	108.5	115.1 ± 6.5	4.02	4.08 ± 0.09
0	1.98	115.4		4.05	
0	1.98	121.4		4.18	
0	2.42	189.3	194.4 ± 4.7	4.66	4.69 ± 0.07
0	2.42	195.5		4.65	
0	2.42	198.5		4.77	
10	1.4	32.9	41.3 ± 6.7	3.51	3.41 ± 0.16
10	1.4	46.3		3.22	
10	1.4	39.4		3.49	
10	1.98	74.6	89.4 ± 5.8	4.26	4.39 ± 0.39
10	1.98	86.1		4.09	
10	1.98	81.9		4.82	
10	2.42	135.1	128.9 ± 8.7	4.76	5.23 ± 0.64
10	2.42	122.8		4.97	

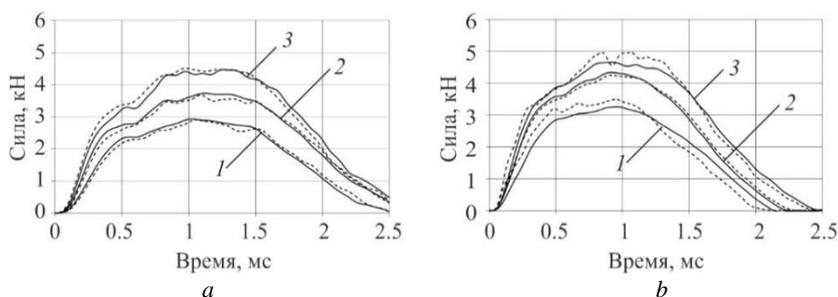


Рис. 4. Результаты испытаний при низкоскоростном ударе: зависимость силы от времени для образцов без фелтинга (сплошные линии) и с плотностью фелтинга 10 см² (пунктирные линии): диаметр полусферы 10 мм (а) и 20 мм (б); 1 – скорость 1.4 м/с; 2 – 1.93 м/с; 3 – 2.4 м/с

Fig. 4. Results of low-velocity impact tests: time dependence of the force for the specimens without felting (solid lines) and with a felting density of 10 cm⁻² (dotted lines) at a hemisphere diameter of (a) 10 and (b) 20 mm for a velocity of (1) 1.4, (2) 1.93, and (3) 2.4 m/s

На рис. 5 приведены зависимости нагрузки на инденторе от перемещения для образцов без фелтинга и с плотностью фелтинга 10 см² для трех скоростей ударника.

На рис. 6 представлены оптические плотности (видимые площади дефектов) для трех энергий удара и двух диаметров ударника. Можно заметить, что площадь дефектов увеличивается с возрастанием энергии удара. Для диаметра ударника 10 мм (рис. 7) при скорости 1.4 м/с площадь дефекта в образцах с фелтингом практически не изменяется по сравнению с образцом без фелтинга (изменение менее 1%). При скорости 1.93 м/с площадь дефекта уменьшается в среднем на 9%, при скорости 2.4 м/с – на 15%. Площадь дефектов изменяется от скорости удара по линейной зависимости, при этом для образцов без фелтинга при скорости меньше 1 м/с дефекты не появляются. Для образцов с фелтингом пороговая скорость равна 0.9 м/с.

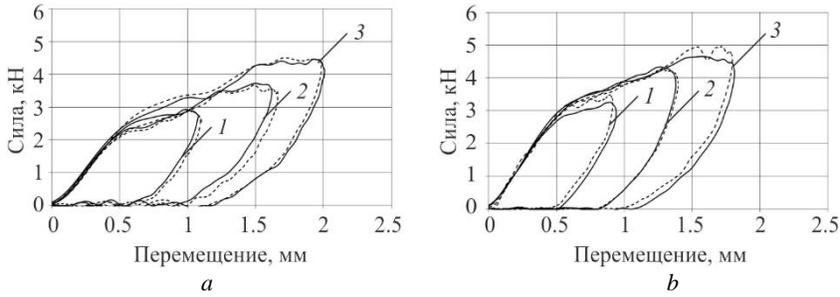


Рис. 5. Результаты испытаний при низкоскоростном ударе: зависимость силы от перемещения для образцов без фелтинга (сплошные линии) и с плотностью фелтинга 10 см^{-2} (пунктирные линии): диаметр полусферы 10 мм (а) и 20 мм (b); 1 – скорость 1.4 м/с; 2 – 1.93 м/с; 3 – 2.4 м/с
Fig. 5. Results of low-velocity impact tests: force as a function of displacement for the specimens without felting (solid lines) and with a felting density of 10 cm^{-2} (dotted lines) at a hemisphere diameter of (a) 10 and (b) 20 mm for a velocity of (1) 1.4, (2) 1.93, and (3) 2.4 m/s

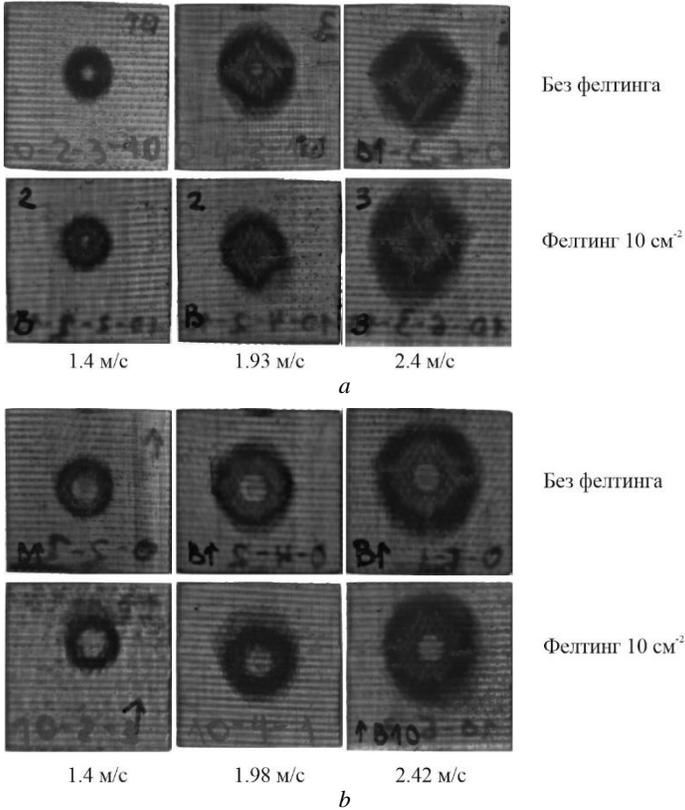


Рис. 6. Результаты испытаний при низкоскоростном ударе: оптическая плотность образцов без фелтинга и с плотностью фелтинга 10 см^{-2} ; а – диаметр полусферы 10 мм, б – диаметр полусферы 20 мм
Fig. 6. Results of low-velocity impact tests for optical density of the specimens without felting (on the top) and with a felting density of 10 cm^{-2} (on the bottom) at a hemisphere diameter of (a) 10 and (b) 20 mm

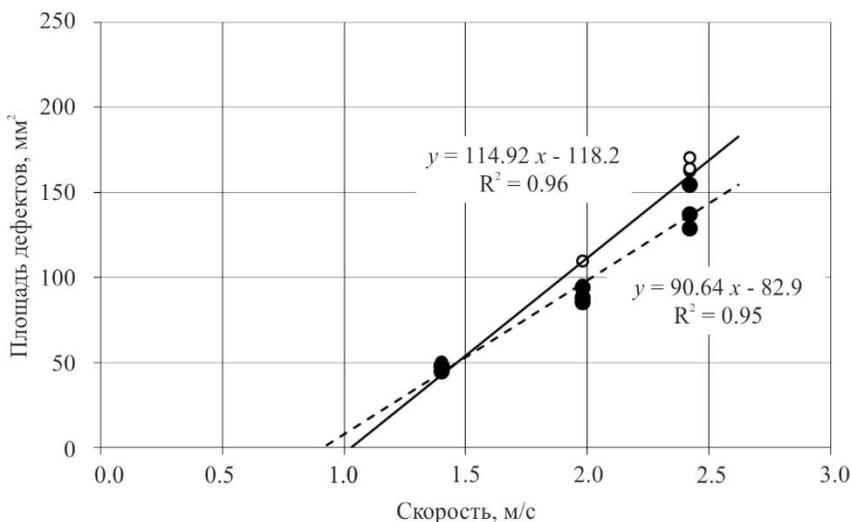


Рис. 7. Зависимость общей площади повреждения от скорости удара с полусферой диаметром 10 мм: ○ – без фелтинга, ● – плотность фелтинга 10 см⁻²

Fig. 7. Dependence of the total damage area on the impact velocity at a hemisphere diameter of 10 mm: ○ – without felting, ● – with a felting density of 10 cm⁻²

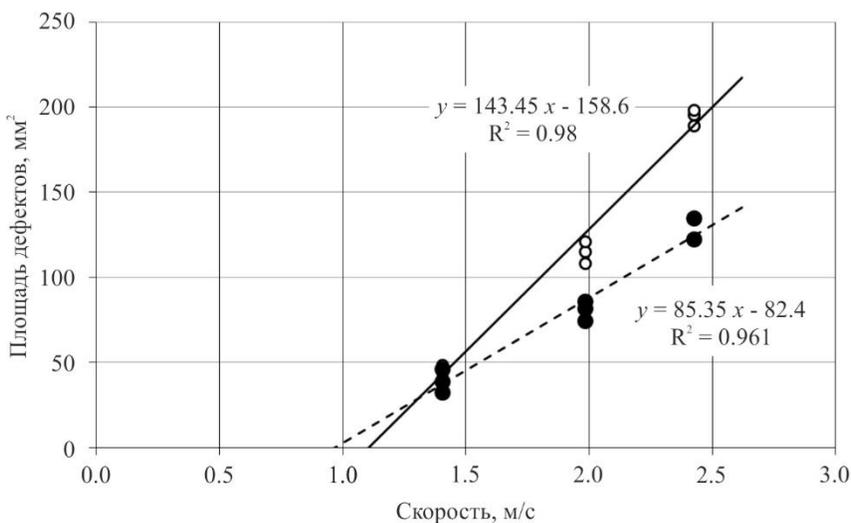


Рис. 8. Зависимость общей площади повреждения от скорости удара с полусферой диаметром 20 мм: ○ – без фелтинга, ● – плотность фелтинга 10 см⁻²

Fig. 8. Dependence of the total damage area on the impact velocity at a hemisphere diameter of 20 mm: ○ – without felting, ● – with a felting density of 10 cm⁻²

Для диаметра ударника 20 мм (рис. 8) при скорости 1.42 м/с площадь дефекта в образцах с фелтингом уменьшается на 11% по сравнению с образцом без фелтинга, при скорости 1.98 м/с – на 22%, при скорости 2.42 м/с – на 34%. Дефекты у образцов без фелтинга не появляются при скорости меньше, чем 1.1 м/с, для образцов с фелтингом – 0.97 м/с.

Заключение

Фелтинг – иглопробивная технология, при которой удары игл с зазубринами частично повреждают сухие нити тканевой преформы и вытягивают их в направлении нормали к поверхности. Это позволяет получить трансверсальное армирование с необходимой плотностью ударов на 1 см^2 в локальной области.

В работе проведены экспериментальные исследования влияния фелтинга на сопротивление изгибу на кольцевой опоре слоистых пластин из стеклопластика при различных скоростях нагружения.

При квазистатических испытаниях максимальное усилие на инденторе ниже для образцов с фелтингом по сравнению с образцами без фелтинга. При диаметре индентора 10 мм уменьшение составляет 15%, а при диаметре 20 мм – 9%. Видимая напросвет площадь дефектов у образцов с фелтингом уменьшается на ~ 20% по сравнению с образцами без фелтинга независимо от диаметра индентора.

При низкоскоростном ударном локальном нагружении сферическим индентором на копре с вертикально падающим грузом максимальное усилие на инденторе зависит от скорости нагружения и диаметра индентора. При диаметре 10 мм максимальное усилие в процессе контакта при всех трех скоростях и площадь видимых дефектов при скорости 1.4 м/с практически не изменяются (различие меньше 1%). Площадь видимых дефектов при скорости 1.93 м/с уменьшается в среднем на 9% для образцов с фелтингом, при скорости 2.4 м/с – на 15%. При диаметре 20 мм максимальная сила в образцах с фелтингом увеличивается не более чем на 5% по сравнению с образцами без фелтинга. При скорости 1.42 м/с площадь дефекта в образцах с фелтингом уменьшается на 11% по сравнению с образцом без фелтинга, при скорости 1.98 м/с – на 22%, при скорости 2.42 м/с – на 34%.

На основании проведенных экспериментов можно заключить, что фелтинг даже минимальной плотности (10 см^{-2}) существенно (до 34%) снижает площадь расслоения при локальном ударе. Чем выше скорость удара, тем больше положительный эффект фелтинга.

Список источников

1. *Saboktakin A.* 3D textile preforms and composites for aircraft structures: a review // International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace. 2019. V. 6 (1). doi: 10.15394/ijaaa.2019.1299
2. *Callister W.D. Jr., Rethwisch D.G.* Materials Science and Engineering: An Introduction. 10th ed. New-Jersey : Wiley, 2018.
3. *Tong L., Mouritz A.P., Bannister M.K.* 3D Fibre Reinforced Polymer Composites. Amsterdam : Elsevier Science, 2002.
4. *Wu X., Shan Z., Liu F., Li Z.* Research on the Z-Direction Compression Failure Mode of 3D Woven Composites // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2018. V. 301 (1). Art. 012057. doi: 10.1088/1757-899X/301/1/012057
5. *Mouritz A.P., Cox B.N.* A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2010. V. 41 (6). P. 709–728. doi: 10.1016/j.compositesa.2010.02.001
6. *Bilisik K.* Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review // Textile Research Journal. 2012. V. 82 (7). P. 725–743. doi: 10.1177/0040517511435013
7. *Xie J., Liang J., Fang G., Chen Z.* Effect of needling parameters on the effective properties of 3D needled C/C-SiC composites // Composites Science and Technology. 2015. V. 117. P. 69–77. doi: 10.1016/j.compscitech.2015.06.003

8. Chen X., Zhao Y., Zhang C., Wang X., Chen L. Robot needle-punching for manufacturing composite performs // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018. V. 50. P. 132–139. doi: 10.1016/j.rcim.2017.09.008
9. Forental G.A., Ignatova A.V., Bezmelnitsyn A.V., Nikonov A.V., Sapozhnikov S.B. The influence of felting on low-velocity impact damage and residual flexural strength of polymer composite material: Experimental study // *AIP Conference Proceedings*. 2023. V. 2697 (1). Art. 030002. doi: 10.1063/5.0118220
10. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. М. : Химия, 1981.
11. Konev S., Eremyeyev V.A., Sedighi H.M., Igumnov L., Bragov A., Konstantinov A., Kuanyshova A., Sergeichev I. Strain-Rate Dependency of a Unidirectional Filament Wound Composite under Compression // *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 2023. V. 137 (3). P. 2149–2161. doi: 10.32604/cmescs.2023.028179
12. Vattathuralappil S.H., Hassan S.F., Haq M. Mechanics of ABS Polymer under Low & Intermediate Strain Rates // *Recent Progress in Materials*. 2023. V. 5 (1). doi: 10.21926/rpm.2301012
13. Fasce L.A., Sanchez L., Frontini P. Effect of loading strain rate on nano-indentation response of an aerospace grade epoxy polymer // *Express Polymer Letters*. 2023. V. 17 (6). P. 647–659. doi: 10.3144/expresspolymlett.2023.47
14. Daniel I.M., Ishai O. Engineering mechanics of composite materials. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005.
15. Forental G.A., Kheruvimov A.V., Nikonov A.V., Sapozhnikov S.B. Stack fabric felting to get PCM GIIC improvement and LVI tolerance // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1024 (1). Art. 012001. doi: 10.1088/1757-899X/1024/1/012001
16. Эпоксидный компаунд Этал-Инжект-SL для вакуумной инфузии // Эпитал. URL: <https://www.epital.ru/infu/sl.html> (дата обращения: 03.06.2023).

References

1. Saboktakin A. (2019) 3D textile preforms and composites for aircraft structures: A review. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*. 6(1). doi: 10.15394/ijaaa.2019.1299
2. Callister W.D.Jr., Rethwisch D.G. (2018) *Materials Science and Engineering: An Introduction. 10th Edition*. New-Jersey: Wiley.
3. Tong L., Mouritz A.P., Bannister M.K. (2002) *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*. Amsterdam: Elsevier Science.
4. Wu X., Shan Z., Liu F., Li Z. (2018) Research on the z-direction compression failure mode of 3D woven composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 301(1). Article 012057. doi: 10.1088/1757-899X/301/1/012057
5. Mouritz A.P., Cox B.N. (2010) A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 41(6). pp. 709–728. doi: 10.1016/j.compositesa.2010.02.001
6. Bilisik K. (2012) Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review. *Textile Research Journal*. 82(7). pp. 725–743. doi: 10.1177/0040517511435013
7. Xie J., Liang J., Fang G., Chen Z. (2015) Effect of needling parameters on the effective properties of 3D needled C/C-SiC composites. *Composites Science and Technology*. 117. pp. 69–77. doi: 10.1016/j.compscitech.2015.06.003
8. Chen X., Zhao Y., Zhang C., Wang X., Chen L. (2018) Robot needle-punching for manufacturing composite performs. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 50. pp. 132–139. doi: 10.1016/j.rcim.2017.09.008
9. Forental G.A., Ignatova A.V., Bezmelnitsyn A.V., Nikonov A.V., Sapozhnikov S.B. (2023) The influence of felting on low-velocity impact damage and residual flexural strength of polymer composite material: Experimental study. *AIP Conference Proceedings*. 2697(1). Article 030002. doi: 10.1063/5.0118220

10. Tarnopol'sky Yu.M., Kintsis T.Ya. (1981) *Metody staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov* [Methods for static testing of reinforced plastics]. Moscow: Khimiya.
11. Konev S., Ereimeyev V.A., Sedighi H.M., Igumnov L., Bragov A., Konstantinov A., Kuanyshova A., Sergeichev I. (2023) Strain-rate dependency of a unidirectional filament wound composite under compression. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*. 137(3). pp. 2149–2161. doi: 10.32604/cmescs.2023.028179
12. Vattathurvalappil S.H., Hassan S.F., Haq M. (2023) Mechanics of ABS polymer under low & intermediate strain Rates. *Recent Progress in Materials*. 5(1). doi: 10.21926/rpm.2301012
13. Fasce L.A., Sanchez L., Frontini P. (2023) Effect of loading strain rate on nano-indentation response of an aerospace grade epoxy polymer. *Express Polymer Letters*. 17(6). pp. 647–659. doi: 10.3144/expresspolymlett.2023.47
14. Daniel I.M., Ishai O. (2005) *Engineering Mechanics of Composite Materials*. 2nd edition. New York: Oxford University Press.
15. Forental G.A., Kheruvimov A.V., Nikonov A.V., Sapozhnikov S.B. (2021) Stack fabric felting to get PCM GIC improvement and LVI tolerance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1024(1). Article 012001. doi: 10.1088/1757-899X/1024/1/012001
16. URL: <https://www.epital.ru/infu/sl.html>.

Сведения об авторах:

Форенталь Галина Анатольевна – инженер-исследователь НПИ «Учебная техника и технологии» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (Челябинск, Россия). E-mail: gforental@mail.ru

Сапожников Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, профессор кафедры «Техническая механика» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (Челябинск, Россия). E-mail: sapozhnikovsb@susu.ru

Игнатова Анастасия Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (Челябинск, Россия). E-mail: ignatovaav@susu.ru

Буслаева Ольга Станиславовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Цифровая экономика и информационные технологии» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (Челябинск, Россия). E-mail: buslaevaos@susu.ru

Херувимов Александр Вячеславович – начальник лаборатории «Композиционные материалы» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета) (Челябинск, Россия). E-mail: kheruvimovav@mail.ru

Information about the authors:

Forental' Galina A. (Researcher, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation). E-mail: gforental@mail.ru

Sapozhnikov Sergey B. (Doctor of Technical Sciences, Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation). E-mail: sapozhnikovsb@susu.ru

Ignatova Anastasiya V. (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation). E-mail: ignatovaav@susu.ru

Buslaeva Ol'ga S. (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation). E-mail: buslaevaos@susu.ru

Kheruvimov Aleksandr V. (Head of the Laboratory of Composite Materials, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation). E-mail: kheruvimovav@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24.07.2023; принята к публикации 03.10.2024

The article was submitted 24.07.2023; accepted for publication 03.10.2024