

*О. А. Кудрявцев**, *Н. А. Оливенко*, *С. Б. Сапожников*, *А. В. Игнатова*,
А. В. Безмельницын

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕНИЙ И ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ СЛОИСТОГО КОМПОЗИТА ПОСЛЕ НИЗКОСКОРОСТНОГО УДАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДИКАТОРНЫХ ПОКРЫТИЙ

*O. A. Kudryavtsev**, *N. A. Olivenko*, *S. B. Sapozhnikov*, *A. V. Ignatova*, *A. V. Bezmelnitsyn*

CHARACTERIZATION OF DAMAGES AND THE RESIDUAL FLEXURAL STRENGTH OF LAYERED COMPOSITES AFTER LOW-VELOCITY IMPACTS USING INDICATOR COATINGS

Keywords: glass fibers-reinforced plastics (GFRP), coatings, low-velocity impact, bending, residual strength

The low impact resistance is one of the main factors limiting the wide use of composites in thin-walled aircraft structures. The delaminations and intralaminar damages appearing in them after a low-velocity impact, significantly reduce their strength and, in most cases, require repairing. Indicator coatings facilitate the search for impact sites for further non-destructive testing and characterization of material defects. A reflective acrylic film and polymer composite based on hollow glass microspheres were considered as indicator coatings. They irreversibly change the reflective properties after an impact. GFRP specimens with two types of coatings were subjected to low-velocity impact tests, followed by a residual bending strength assessment. Tests results showed that the indentation diameter on the coating noticeably depended on the impact energy and could indirectly characterize barely visible impact damages and the residual strength of the material. Besides, the coating based on hollow glass microspheres acts as a protective layer and increases the damage tolerance of composites.

*Автор, с которым следует вести переписку: kudriavtcevoa@susu.ru
Corresponding author: kudriavtcevoa@susu.ru

Ключевые слова: стеклопластик, покрытия, удар низкоскоростной, изгиб, прочность остаточная

Низкая стойкость к ударам является одним из основных факторов, ограничивающих широкое внедрение композитов в конструкцию самолетов. При низкоскоростном ударе в композите возникают расслоения и межслойные повреждения, которые могут значительно снижать прочность конструкции и в определенных случаях требуют проведения ремонта. Индикаторные покрытия облегчают поиск места удара для дальнейшего неразрушающего контроля и характеристики дефектов в материале. В работе в качестве индикаторных покрытий рассмотрены световозвращающая акриловая пленка и эпоксидный композит на основе полых стеклянных микросфер. При ударе эти покрытия необратимо меняют коэффициент отражения, делая блестящую поверхность матовой в зоне отпечатка определенного диаметра. Образцы стеклопластика с покрытиями двух типов испытывали на низкоскоростной удар с разной энергией, после чего оценивали остаточную изгибную прочность. По результатам испытаний установлено, что диаметр отпечатка на покрытии зависит от энергии удара и может косвенно характеризовать остаточную прочность материала. Кроме того, установлено, что покрытие на основе полых стеклянных микросфер выступает в качестве бамперного слоя и снижает повреждения в композите при ударе.

Введение

Полимерные композитные материалы (ПКМ) очень привлекательны для создания современных авиационных конструкций за счет сочетания высокой прочности и низкой плотности. Их использование в конструкции планера и двигателей позволяет достичь требуемой экономии топлива и снижения объема вредных выбросов в атмосферу. В конструкции некоторых современных гражданских самолетов доля композитов превышает 50%.

На протяжении всего срока службы авиационные конструкции чаще всего подвержены низкоскоростному удару: падение инструмента, попадание гравия со взлетно-посадочной полосы, столкновение с птицами, удар градом. Основная опасность низкоскоростного удара заключается в том, что он может приводить к возникновению малозаметных повреждений в композите, например, расслоений, внутрислойных повреждений, разрывов волокон, существенно снижающих остаточную прочность композита [1, 2].

ASTM рекомендует испытания при сжатии после удара (CAI) в качестве основного метода оценки остаточной прочности композита после

низкоскоростного удара. К настоящему времени опубликовано большое количество работ, посвященных влиянию разных факторов на остаточную прочность композитов при сжатии после удара (включая свойства матрицы [3—6], форму образцов [7], гибридизацию [8—10], полимерные вуали [11] и структуру армирования [12]). Несмотря на широкое распространение, САI имеет и существенные недостатки: чувствительность к условиям закрепления образца, ограничение по толщине образца, оценка прочности только при сжатии [13]. Альтернативные методы оценки остаточной прочности, например изгиб после удара (FAI), в настоящее время активно исследуются [13—20]. Во многих случаях прочность образца при изгибе более чувствительна к наличию повреждений, чем при сжатии. Например, в [13] оценили деформирование и разрушение 2D- и 3D-композитов из стеклоткани/эпоксидной смолы после удара, используя протоколы САI и FAI. Было показано, что протокол тестирования FAI показывает большее снижение механических характеристик по сравнению с протоколом тестирования САI. Прочность при изгибе после удара и модуль упругости при изгибе образцов балки более чувствительны к расслоению, нанесенному во время удара. Тем не менее авторы отметили, что при выборе протокола испытаний на удар необходимо действовать по своему усмотрению, чтобы гарантировать, что метод испытаний точно отражает конечное использование исследуемого материала. Заметим, что большинство авторов использовали балочные образцы для тестирования FAI. В этом случае требуется меньше материала. В то же время повреждения образца балки могут существенно отличаться от повреждений композитной конструкции при ударе из-за ее размеров и другого напряженно-деформированного состояния. В этом случае предпочтительнее выглядит использование полноразмерных тарелок. Также возможно провести корректное сравнение с результатами тестов САI.

Последствия удара могут быть практически незаметны на поверхности композита, что осложняет их обнаружение при визуальном осмотре [21]. Обнаружение и характеристика дефектов для оценки их влияния на прочность конструкции требуют применения разных методов неразрушающего контроля [22]. В то же время применение ультразвуковой диагностики или термографии требует знания места удара. В предыдущих работах [23, 24] были предложены два новых типа функциональных покрытий для индикации места удара на конструкциях из ПКМ: самоклеящаяся световозвращающая пленка (СВП) и покрытие на основе полимерной матрицы и полых стеклянных микросфер (полимерное покрытие, ПП). СВП и ПП при ударе необратимо меняют коэффициент отражения при направленном или рассеянном освещении за счёт деформирования и разрушения элементов микроструктуры: для СВП — микропризмы, а для ПП — стеклянные микросферы.

Основная цель работы — изучить взаимосвязь между диаметром отпечатка на покрытии и повреждениями композитного материала. Диаметр отпечатка зависит от энергии удара и может использоваться для прогнозирования остаточной прочности композита после предварительной калибровки.

1. Материалы, образцы и методы

1.1. Материалы. Наиболее распространенным композитным материалом в аэрокосмической промышленности является углепластик, но в данном исследовании его использование было сочтено непрактичным. Основная причина заключается в том, что невозможно определить размер поврежденного участка после удара в образце углепластика путем визуального наблюдения. Требуется применение разных методов неразрушающего контроля, например, термографии или компьютерной томографии, которые значительно удлинляют и удорожают исследование с учетом ожидаемого количества образцов (более 100). В данной работе был использован стеклопластик в силу его прозрачности и дешевизны; углепластик же будет использован на следующих этапах изучения с меньшим количеством испытаний.

Исследовали коммерческий стеклопластик СТЭФ (PJSC «Electroizolit» [25]) толщиной $4,2 \pm 0,1$ мм на основе эпоксифенольного связующего горячего отверждения. Использовали два вида индикаторных покрытий. Первый — светоотражающая пленка 3M™ Diamond Grade™ Film 4090 (White), разработанная для использования в дорожных знаках [26]. Толщина пленки после удаления защитного слоя 0,35 мм, поверхностная плотность 400—410 г/м². Сетка на СВП имеет форму ромбов с горизонтальным

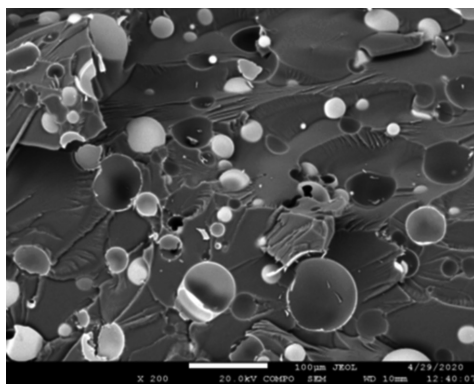


Рис. 1. Изображение СЭМ поверхности разрушения покрытия с полыми стеклянными сферами.

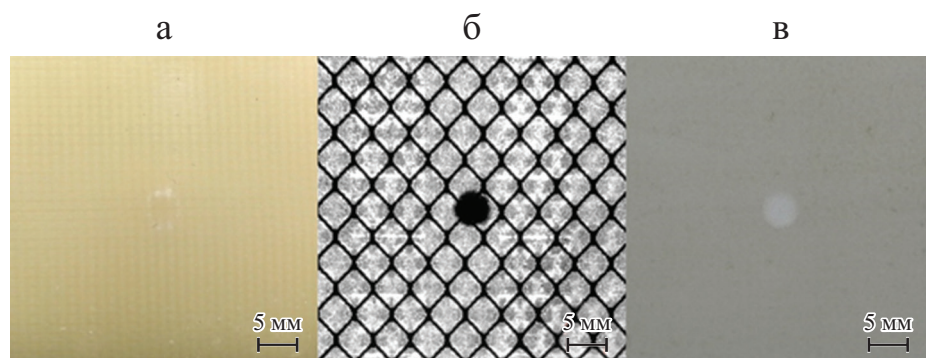


Рис. 2. Отпечатки на образцах после удара с энергией 5 Дж: *а* — без покрытия; *б* — с СВП, *в* — с ПП.

размером 4 мм, что позволяет оперативно оценивать размер отпечатка без приборов. Второе покрытие представляло собой дисперсно-наполненный композит, в котором в качестве наполнителя использовали полые стеклянные микросферы со средним диаметром 40 мкм и толщиной стенки около 2 мкм. В качестве связующего использовали эпоксидную смолу ЭД-20 с отвердителем ТЭТА. Средняя объемная доля стеклянных микросфер 30% (11% по массе). На рис. 1 представлена микрофотография излома покрытия, полученная с помощью СЭМ. Отпечаток на пленке при прямом освещении представлял собой темную окружность (рис. 2—*б*), а на покрытии выглядел как светлое пятно (рис. 2—*в*). При такой энергии удара отпечаток на образце без покрытия был практически незаметен (рис. 2—*а*). Подробнее о свойствах композита и индикаторных покрытиях см. в [23, 24].

1.2. Образцы. Испытания на низкоскоростной удар (НСУ) были проведены на образцах трех типов: без покрытия, с СВП и с ПП. Образцы с размерами в плоскости 100×100 мм были вырезаны из одного листа стеклопластика. После удара падающим грузом из образцов-пластинок вырезали балочные образцы с размерами 40×100 мм, при этом направление основы композита совпадало с продольной осью балки (рис. 3).

1.3. Низкоскоростные ударные испытания. Испытания на НСУ были проведены на вертикальном башенном копре INSTRON CEAST 9350. В качестве опоры использовали стальное кольцо с внешним / внутренним диаметром 100/72 мм. Плоские образцы помещали на опорное приспособление без дополнительного закрепления.

Во всех испытаниях на удар использовали конусный ударник INSTRON 7529.841 с полусферическим наконечником (радиус 12,7 мм). Образцы подвергались ударам с энергией до 25 Дж. Масса бойка во всех случаях 5,095 кг. Информация об условиях тестирования НСУ и количестве образцов представлена в таблице.

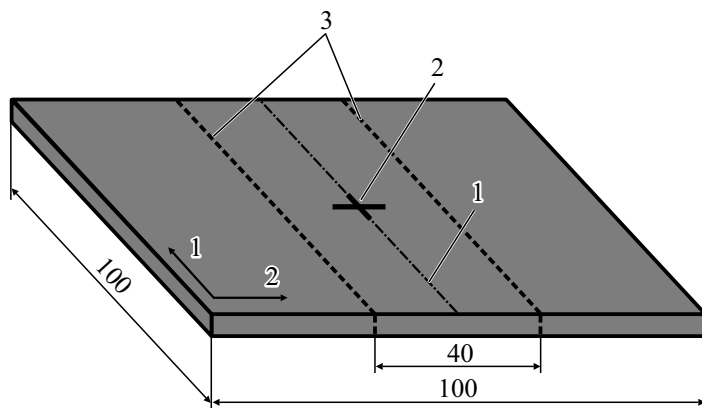


Рис. 3. Вырезание балки из образца, подвергнутого удару: 1 — ось балки; 2 — место удара; 3 — линии вырезания.

Общую площадь повреждения после НСУ, длину трещин и диаметр отпечатка оценивали для каждого образца по результатам обработки фотографий.

1.4. Испытания на изгиб после удара. Испытания балочных образцов проводили на универсальной испытательной машине INSTRON 5900R с использованием приспособления для трехточечного изгиба. Расстояние между опорами 40 мм, диаметр опорных и нагружающего роликов 10 мм, скорость нагружения задавали равной 5 мм/мин.

Для определения изгибной прочности образцов без дефектов также проведены испытания на изгиб с базой 40 мм. Были рассмотрены образцы шириной от 15 до 40 мм (пять образцов на одно значение ширины).

Условия испытаний на НСУ и количество испытанных образцов

E , Дж	Образцы без покрытия	Образцы с СВП	Образцы с ПП
2,5	3	-	-
5,0	3	3	3
7,5	3	-	-
10,0	3	3	3
12,5	3	-	-
15,0	3	3	3
17,5	3	-	-
20,0	3	3	3
22,5	3	-	-
25,0	3	3	3

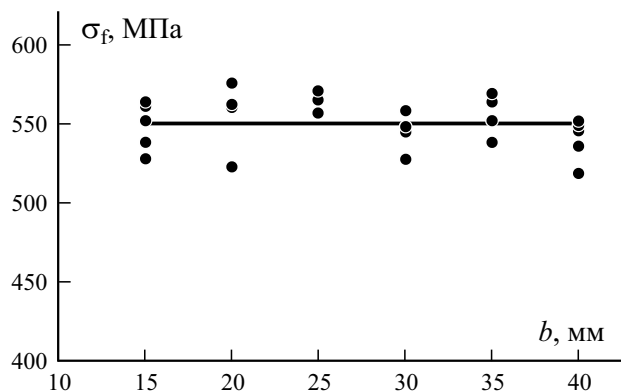


Рис. 4. зависимости прочность при изгибе σ_f от ширины образца b .

По результатам испытаний установлено, что изгибная прочность практически не зависит от ширины образца и равна 540—560 МПа (рис. 4). В результате осреднения всех полученных данных изгибная прочность образцов без дефектов была принята равной $\sigma_{f_0} = 551$ МПа.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Испытания на НСУ. На рис. 5 представлены фотографии ударной и тыльной сторон образцов без покрытия после удара с разной энергией. Разрушение на границе волокно—матрица и расслоения были основными

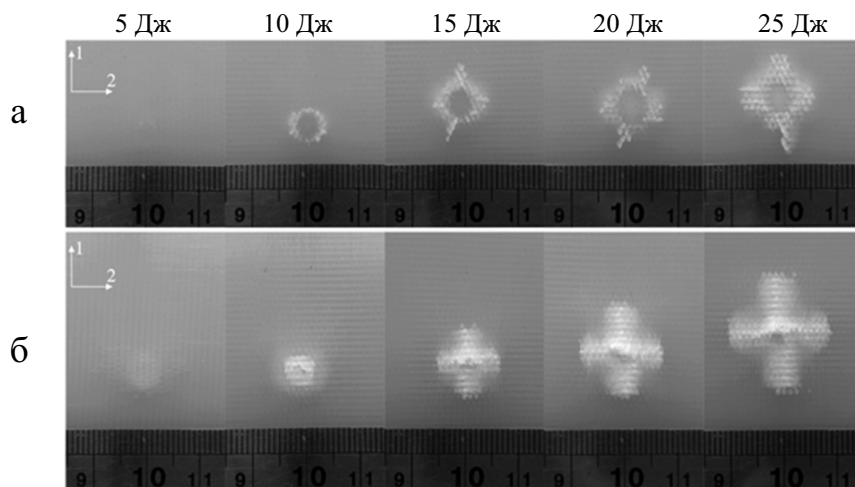


Рис. 5. Ударная (а) и тыльная сторона (б) образцов без покрытия.

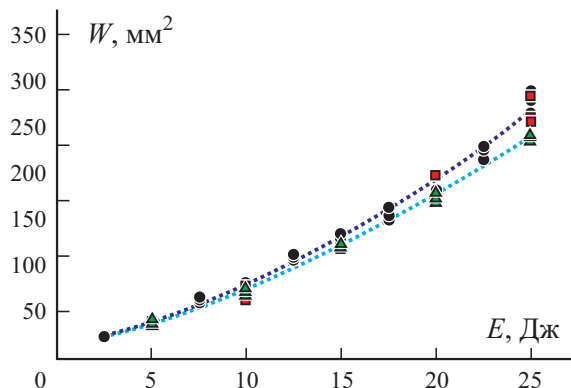


Рис. 6. Зависимость общей площади повреждения W от величины E образцов без покрытия (●); с СВП (■); с ПП (▲).

видами разрушения при $E = 2,5—7,5$ Дж. Верхние слои непосредственно под ударником были повреждены меньше. Это связано с состоянием всестороннего сжатия в них, которое предотвращает развитие дефектов.

В дополнение к упомянутым видам повреждения наблюдали и разрушение нитей от растяжения при $E = 10$ Дж. При дальнейшем увеличении энергии удара на обратной стороне образца образовывалась ярко выраженная крестообразная трещина. Трещина была более вытянутой в направлении основы (примерно на 10%), что объясняется различием прочностных свойств композита в направлении основы и утка. Характер повреждений образцов с покрытиями был таким же.

Зависимость общей площади повреждения W от энергии удара E отражают данные рис. 6. Как видно, эти зависимости имели одинаковый характер у образцов всех типов. Однако площадь повреждения на образцах с ПП была в среднем на 10% меньше, чем на образцах других типов, при $E > 10$ Дж. Можно предположить, что ПП действует не только как индикаторное покрытие, но и как защитный слой. Этот эффект не наблюдали на образцах, покрытых СВП.

Для обоих типов покрытий прослеживалась четкая зависимость диаметра отпечатка D от энергии удара E . Диаметр отпечатка на обоих типах покрытий увеличивался одинаково при энергии удара до 15 Дж (рис. 7). При $E = 20$ Дж и выше диаметр отпечатка на СВП начал приближаться к 10—11 мм из-за его отслаивания, в то время как диаметр отпечатка на ПП продолжал увеличиваться. Разброс значений диаметров отпечатков на ПП увеличивается при высоких энергиях. Это связано с тем, что при энергии выше 15 Дж трещины в композите в месте удара

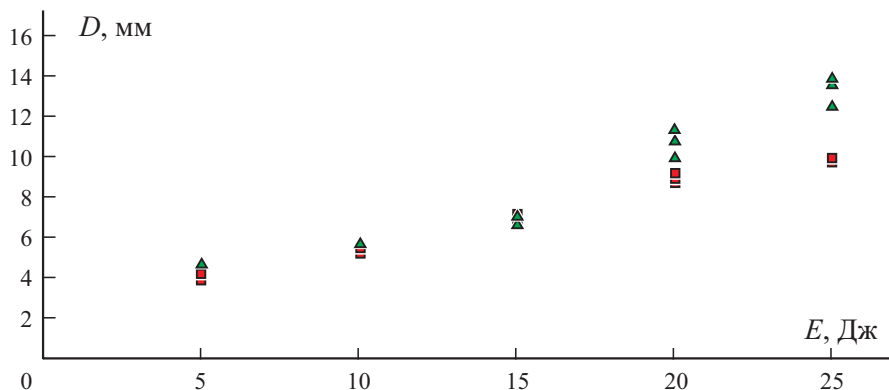


Рис. 7. Зависимость диаметра отпечатка D от величины E образцов: с СВП (■); с ПП (▲).

приводили к дополнительному повреждению ПП и размытию границ отпечатка (рис. 8). Таким образом, отсутствие четкой границы отпечатка на ПП может служить косвенным признаком появления трещин на обратной стороне композита.

2.2. Изгиб после удара. Остаточная прочность при изгибе изменялась нелинейно с увеличением энергии удара (рис. 9): величина σ_f / σ_{f_0} образцов без покрытия снизилась не более чем на 10% при $E < 10$ Дж, а при $E = 10—20$ Дж это снижение ускорилось и составило около 20% на каждые 5 Дж. Прочность образцов без покрытия при максимальной энергии удара составила 60% от начальной прочности. Остаточная прочность

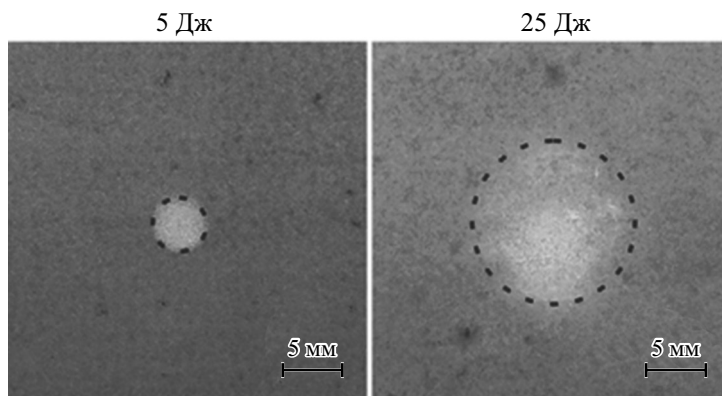


Рис. 8. Отпечатки на покрытии после воздействия удара с разной энергией.

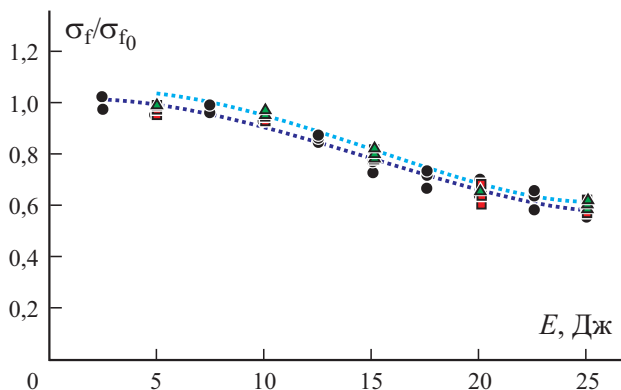


Рис. 9. Зависимость относительной остаточной прочности при изгибе σ_f / σ_{f_0} от величины E образцов без покрытия (●); с СВП (■); с ПП (▲).

образцов с СВП изменялась аналогичным образом с увеличением энергии удара.

Как уже было отмечено (см. рис. 6), общая площадь повреждений образцов с ПП была в среднем на 10% меньше, чем других типов образцов при $E = 15$ Дж и выше. Ожидали, что остаточная прочность образцов с ПП также будет заметно выше в этом диапазоне значений энергий. Однако средняя остаточная прочность образцов с ПП практически не изменилась. Следует отметить, что удар оказывает значительное влияние на остаточную изгибную прочность композита в том случае, если преобладающим видом повреждения образцов является разрыв волокон. На

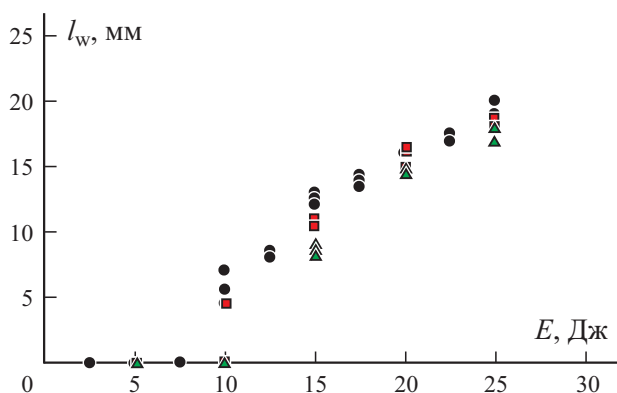


Рис. 10. Зависимость длины трещины по утку l_w от величины E . Обозначения те же, что на рис. 9.

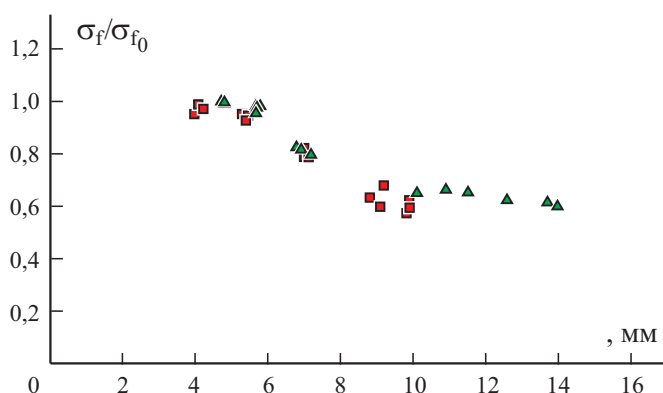


Рис. 11. Зависимости относительной остаточной прочности σ_f / σ_{f_0} при изгибе от величины D образцов с СВП (■); с ПП (▲).

рис. 10 приведены зависимости длины трещины по утку от энергии удара. Разность составила около 5% для всех типов образцов, что хорошо согласуется с результатами испытаний FAI. Возможно, что положительный эффект присутствия ПП будет выше в случае использования протокола CAI, поскольку растрескивание и расслоение матрицы сильно влияют на результаты испытаний при сжатии.

Остаточная прочность при изгибе образцов четко коррелировала с диаметром отпечатка на обоих типах покрытий (рис. 11): при $D < 6$ мм остаточная прочность была близка к 100%, а при $D > 8$ мм прочность композита при изгибе снижалась на 40% или более.

Заключение

Образцы из стеклопластика с двумя типами индикаторных покрытий были испытаны при низкоскоростном ударе с последующим определением остаточной прочности при изгибе. Результаты испытаний показали, что чем больше энергия удара, тем больше был диаметр отпечатка на обоих типах покрытий. Кроме того, наличие покрытия на основе стеклянных микросфер привело к снижению общей площади повреждений образцов стеклопластика на 10%. Остаточная прочность образцов при изгибе четко зависела от энергии удара. Было обнаружено, что для обоих типов покрытий существует критический диаметр отпечатка. Прочность композита при изгибе начала снижаться, когда диаметр отпечатков на обоих типах покрытий достиг критического значения 6 мм. Кроме того, образцы из стеклопластика с полимерным покрытием на основе полых

стеклянных микросфер обладали более высокой остаточной прочностью (около 5%) по сравнению с остальными образцами.

Полученные результаты могут свидетельствовать о перспективности использования покрытий на основе стеклянных микросфер не только для индикации места удара, но и для защиты композитной конструкции. Несомненно, необходимы дальнейшие исследования в этом направлении, в частности оценка влияния толщины покрытия, размеров и формы ударника на площадь повреждения и остаточную прочность. Авторы также планируют сравнить протоколы FAI и CAI для образцов с покрытием.

Исследование выполнено за счёт средств гранта РФФИ № 19-29-13007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Richardson M. O. W. and Wisheart M. J. Review of low-velocity impact properties of composite materials // *Composites: Part A*. — 1996. — Vol. 27A, No. 12. — P. 1123—1131.
2. Abrate S. *Impact on Composite Structures*. Cambridge Univ. Press, 1998.
3. Iqbal K., Khan S. -U., Munir A., and Kim J. -K. Impact damage resistance of CFRP with nanoclay-filled epoxy matrix // *Composites Sci. Technol.* — 2009. — Vol. 69. — P. 1949—1957.
4. Kostopoulos V., Baltopoulos A., Karapappas P., Vavouliotis A., and A. Paipetis. Impact and after-impact properties of carbon fibre reinforced composites enhanced with multi-wall carbon nanotubes // *Composites Sci. Technol.* — 2010. — Vol. 70. — P. 556—563.
5. Vieille B., Casado V. M., and Bouvet C. Influence of matrix toughness and ductility on the compression-after-impact behavior of woven-ply thermoplastic- and thermosetting-composites: A comparative study // *Composite Struct.* — 2014. — Vol. 110. — P. 207—218.
6. Siegfried M., Tola C., Claes M., Lomov S. V., Verpoest I., and Gorbatikh L. Impact and residual after impact properties of carbon fiber/epoxy composites modified with carbon nanotubes // *Composite Struct.* — 2014. — Vol. 111. — P. 488-496.
7. Ghelli D. and Minak G. Low velocity impact and compression after impact tests on thin carbon/epoxy laminates // *Composites: Part B*. — 2011. — Vol. 42. — P. 2067—2079.
8. Dehkordi M. T., Nosrati H., Shokrieh M., Minak G., and Ghelli D. The influence of hybridization on impact damage behavior and residual compression strength of intraply basalt/nylon hybrid composites // *Mater. Des.* — 2013. — Vol. 43. — P. 283-290.
9. González E. V., Maimí P., Sainz de Aja J. R., Cruz P., and Camanho P. P. Effects of interply hybridization on the damage resistance and tolerance of composite laminates // *Composite Struct.* — 2014. — Vol. 108. — P. 319—331.
10. Sasikumar A., Trias D., Costa J., Blanco N., Orr J., and Linde P. Effect of ply thickness and ply level hybridization on the compression after impact strength of thin laminates // *Composites: Part A*. — 2019. — Vol. 121. — P. 232—243.

11. *Daelemans L., Cohades A., Meireman T., Beckx J., Spronk S., Kersemans M., Baere I. D., Rahier H., Michaud V., Paeppegem W. V., and Clerck K. D.* Electrospun nanofibrous interleaves for improved low velocity impact resistance of glass fibre reinforced composite laminates // *Mater. Des.* — 2018. — Vol. 141, 170—184.

12. *Sasikumar A., Trias D., Costa J., Blanco N., Orr J., and Linde P.* Impact and compression after impact response in the thin laminates of spread-tow woven and non-crimp fabrics // *Composite Struct.* — 2019. — Vol. 215. — P. 432—445.

13. *Hart K. R., Chia P. X. L., Sheridan L. E., Wetzel E. D., Sottos N. R., and White S. R.* Comparison of Compression-After-Impact and Flexure-After-Impact protocols for 2D and 3D woven fiber-reinforced composites // *Composites: Part A.* — 2017. — Vol. 101. — P. 471—479.

14. *Yuan B., Ye M., Hu Y., Cheng F., and Hu X.* Flexure and flexure-after-impact properties of carbon fibre composites interleaved with ultra-thin non-woven aramid fibre veils // *Composites: Part A.* — 2020. — Vol. 131. — P. 105813.

15. *Sarasini F., Tirillò J., Valente M., Ferrante L., Cioffi S., Iannace S., and Sorrentino L.* Hybrid composites based on aramid and basalt woven fabrics: Impact damage modes and residual flexural properties // *Mater. Des.* — 2013. — Vol. 49. — P. 290—302.

16. *Liu Q., Guo O., Ju Y., Lin Y., and Li Q.* Impact responses and residual flexural properties of narrow CFRP laminates // *Composite Struct.* — 2014. — Vol. 111. — P. 332—339.

17. *Zhang Z. Y. and Richardson M. O. W.* Low velocity impact induced damage evaluation and its effect on the residual flexural properties of pultruded GRP composites // *Composite Struct.* — 2007. — Vol. 81. — P. 195—201.

18. *Wagih A., Sebaey T. A., Yudhanto A. and Lubineau G.* Post-impact flexural behavior of carbon-aramid/epoxy hybrid composites // *Composite Struct.* — 2020. — Vol. 239. — P. 112022.

19. *Santiuste C., Sanchez-Saez S. and Barbero E.* Residual flexural strength after low-velocity impact in glass/polyester composite beams // *Composite Struct.* — 2010. — Vol. 92. — P. 25-30.

20. *Shim V. P. W. and Yang L. M.* Characterization of the residual mechanical properties of woven fabric reinforced composites after low-velocity impact // *Int. J. Mech. Sci.* — 2005. — Vol. 47. — P. 647-665.

21. *Bouvet C. and Rivallant S.* Damage tolerance of composite structures under low-velocity impact // *Silberschmidt V. V. (eds.). Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures.* — Cambridge: Woodhead Publ., Elsevier, 2016. — P. 7-33.

22. *Raut N. P., Kolekar A. B., and Gombi S. L.* Methods of damage detection on composites under low velocity impact: Review // *Mater. Today: Proc.* — 2020. — Vol. 27. — P. 2823-2827.

23. *Buslaeva O. S., Sapozhnikov S. B., Bezmelnitsyn A. V., Igantova A. V., and Kudryavtsev O. A.* Thin indicator films to assess the residual strength of a GFRP after a local contact action // *Mech. Compos. Mater.*, 57, March No.1, 47-56 (2021).

24. *Buslaeva O. S., Sapozhnikov S. B., Bezmelnitsyn A. V., Igantova A. V., and Kudryavtsev O. A.* The new indicator coating to detect the place of barely visible impacts on aircraft composite structures // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* — 2021. — Vol. 1024, No. 1. — P. 012002.

25. URL: <http://www.electroizolit.ru/> (дата обращения: 08.06.2021)

26. URL: https://www.3m.com/3M/en_US/p/d/b00011967/ (дата обращения: 08.06.2021)

Поступила в редакцию 09.06.2021

Received June 9, 2021
