

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-93-104

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ СОУДАРЕНИЯ НА ОСТАТОЧНУЮ ПРОЧНОСТЬ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Е.А. Васильчук¹, И.Н. Гуляев¹, Н.О. Яковлев¹, С.И. Мишкин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Показаны результаты исследования влияния скорости соударения бойка с поверхностью углепластика на площадь повреждения (межслоевые расслоения) и остаточную прочность углепластиков. Исследования проводились на образцах углепластиков на основе однонаправленного и равнопрочного (саржевого переплетения) армирующих наполнителей и эпоксидной матрицы с добавлением термопластичного дисперсного наполнителя, изготовленных методом автоклавного формования. Скорость соударения изменялась за счет изменения высоты падения бойка на вертикальном копре. Площадь повреждения оценивалась методом ультразвукового контроля.

Ключевые слова: удар, остаточная прочность при сжатии после удара, углепластики, автоклавное формование, масса груза, скорость соударения, площадь повреждения

Для цитирования: Васильчук Е.А., Гуляев И.Н., Яковлев Н.О., Мишкин С.И. Влияние скорости соударения на остаточную прочность углепластиков // Труды ВИАМ. 2024. № 9 (139). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-93-104.

Scientific article

INFLUENCE OF COLLISION SPEED ON THE RESIDUAL DURABILITY OF CFRP

E.A. Vasilchuk¹, I.N. Gylyaev¹, N.O. Yakovlev¹, S.I. Mishkin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The results of research of the influence of the collision speed of the striker with the surface of CFRP on the damage square (interlayer delamination) and residual strength of CFRP are shown. The researches were carried out on the samples of CFRP based on unidirectional and equal-strength (twill weave) reinforcing fillers and epoxy matrix with addition of the thermoplastic dispersed filler, made by method of autoclave molding. The speed of collision was changed by changing the height of falling of the striker of the vertical coper. The area of damage was evaluated by method of ultrasonic control.

Keywords: impact, residual compressive strength after impact, CFRP, autoclave molding, mass of load, collision speed, damage area

For citation: Vasilchuk E.A., Gylyaev I.N., Yakovlev N.O., Mishkin S.I. Influence of collision speed on the residual durability of CFRP. *Trudy VIAM*, 2024, no. 9 (139), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-93-104.

Введение

Применение углепластиков в различных отраслях промышленности связано с их уникальными свойствами. Углепластики обладают низкой плотностью, высокими упруго-прочностными характеристиками и износостойкостью, хорошей коррозионной стойкостью, устойчивостью к агрессивным средам и различным климатическим условиям, истиранию и вибрационным нагрузкам, что позволяет им конкурировать с металлами, поэтому материалы из углеродных наполнителей используют во многих силовых конструкциях [1–4].

Слоистые композиционные материалы на основе углеродных наполнителей в виде однонаправленных волокон или лент, а также тканых форм в основном получают методом предварительной пропитки армирующего наполнителя полимерным связующим (изготовление препрега) с последующим совмещением слоев в блоки или заготовки в соответствии с требованиями конструкции и формованием при повышенной температуре. В результате формируется слоистая структура, условно состоящая из слоев пропитанного армирующего наполнителя и полимерного связующего, находящегося в межслоевом пространстве и связанного в трехмерную структуру за счет проникновения в межволоконное пространство. В однонаправленном материале граница слоев может не проявляться за счет смещения и уплотнения волокон, но четко проявляется при изменении углов армирования в соседних слоях, а также при использовании тканых армирующих наполнителей. Такая же слоистая структура образуется и в случае применения иных технологических методов формообразования (инфузии, вакуумной пропитки и т. п.) пакета слоев сухого армирующего наполнителя.

В случае воздействия критических напряжений в слоистом пластике появляются микротрещины, накопление которых приводит к разрушению материала. Поскольку полимерная матрица обладает меньшими характеристиками прочности по сравнению с углеродным волокном, то большинство трещин возникают именно в матрице или на границе раздела «волокно–матрица».

Основным и очень существенным недостатком большинства углепластиков является низкая трещиностойкость и малая остаточная прочность после ударных воздействий. Поэтому повышение ударной стойкости углепластиков является актуальной проблемой [5–10].

Наиболее опасными повреждениями для деталей из углепластиков, применяемых в элементах конструкций и деталях летательных аппаратов, являются повреждения, возникающие в результате низкоскоростных ударов (град, гравий, удары посторонними предметами при обслуживании самолета и т. д.). В результате таких воздействий на поверхности изделия могут не образовываться остаточные вмятины, свидетельствующие о локальном повреждении материала. Однако в них могут возникать внутренние повреждения, которые приводят к снижению прочности материала и деталей, выполненных из него, – в особенности при повреждениях вдоль слоев. Для оценки устойчивости композиционного материала к удару определяют параметр остаточной прочности при сжатии после ударного воздействия с постоянной или изменяемой энергией [11–17]. Существует ряд стандартов для проведения испытаний по нанесению удара и по определению остаточной прочности при сжатии после удара [18–24]. Основным различием является метод закрепления образца в испытательном оборудовании.

Так, в ASTM D7136/D7136M-15 образец размером 100×150 мм и толщиной от 4 до 6 мм с квазиизотропной схемой армирования закрепляется на раме с прямоугольным отверстием размером 75×125 мм и удар наносится перпендикулярно к плоскости образца полусферическим бойком диаметром 16 мм.

В соответствии со стандартом СТО 1-595-30-409–2011 – метод испытания полимерных композиционных материалов на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом – испытания проводятся в диапазоне энергий удара от 9 до 40 Дж, что

удовлетворяет нормированной энергии от 2 до 8 Дж/мм для образцов углепластика толщиной ~5 мм.

В результате ударного воздействия в слоистом материале возникают расслоения, которые могут образовываться во всех слоях по всей толщине пластика. Так, в слоях, расположенных ближе к поверхности, на которую воздействует удар, расслоения незначительно превышают площадь тела, вызвавшего соударение. Однако расслоения в последующих слоях увеличиваются, а в слоях, близких к противоположной поверхности изделия, могут увеличиваться от воздействия удара в несколько раз [25, 26]. Картина характерного расслоения, возникающего вследствие ударного воздействия, представлена на рис. 1.

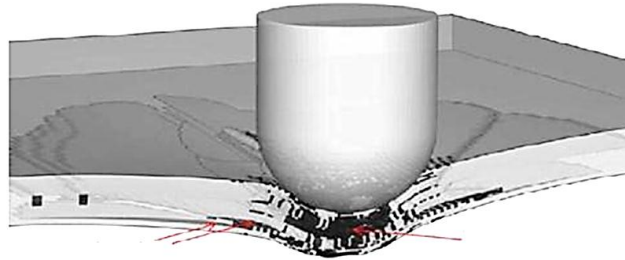


Рис. 1. Расслоение и трещинообразование в слоистом полимерном композиционном материале при ударном воздействии [13]

В данной работе исследовали влияние скорости соударения при постоянной удельной энергии удара на межслоевые расслоения и остаточную прочность углепластика. Скорость соударения изменяли за счет изменения высоты падения бойка с разной массой.

Вызывают интерес также условия проведения испытаний на ударное воздействие в связи с ограничениями, накладываемыми стандартами ASTM D7136/D7136M-15 и ГОСТ 33495–2015, а именно на ограничение массы груза и расстояние между образцом и ударным наконечником бойка. В стандарте указано, что ударник должен иметь массу $5,50 \pm 0,25$ или $2,00 \pm 0,25$ кг, если необходимая энергия удара не может быть обеспечена при использовании ударника массой $5,50 \pm 0,25$ кг, падающего с высоты не менее 300 мм.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [27, 28].

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны углепластики на основе равнопрочного тканого наполнителя саржевого переплетения или наполнителя из однонаправленных высокопрочных углеродных волокон и эпоксидной матрицы, наполненной термoplastом. Препреги углепластиков изготавливали по расплавной технологии на горизонтальной пропиточной машине. Формование углепластиков осуществляли в автоклаве после предварительного вакуумирования.

Испытания проводили на образцах с квазиизотропной укладкой $[+45/0/-45/90]_{3s}$ – для однонаправленного наполнителя и $[(+45/-45)/(0/90)]_{6s}$ – для тканого наполнителя. Размер испытываемых образцов составлял по ширине $100 \pm 0,25$ мм, по длине $150 \pm 0,25$ мм. Количество образцов на каждую серию испытаний составляло 6 шт., которые вырезали из одной плиты отформованного углепластика.

Толщина монослоя составляла:

- для образцов с однонаправленным наполнителем – от 0,188 до 0,200 мм;
- для образцов с тканым наполнителем – от 0,193 до 0,210 мм.

Испытания на остаточную прочность при сжатии после удара проводили при комнатной температуре в несколько этапов.

На *первом этапе* на вертикальном копре образцы углепластика подвергали поперечному локальному удару с удельной энергией 6,67 Дж/мм.

Удельную энергию удара рассчитывали по формуле

$$E_{\text{уд}} = \frac{E}{h_{\text{обр}}},$$

где $E_{\text{уд}}$ – удельная энергия удара, Дж/мм; E – энергия удара, Дж; $h_{\text{обр}}$ – толщина образца, мм.

Энергию удара вычисляли по формуле

$$E = mgh = \frac{mv^2}{2},$$

где E – энергия удара, Дж; m – масса падающего груза, г; g – ускорение свободного падения $g = 9,8 \text{ м}^2/\text{с}$; h – высота падения груза, м; v – скорость, м/с.

Для обеспечения различной скорости соударения бойка с образцом углепластика варьировали высоту падения бойка. Удельная энергия удара при этом оставалась постоянной за счет того, что использовали бойки с различной массой (5, 7, 10 и 15 кг). Чем больше масса бойка, тем меньше высота его подъема над образцом и меньше скорость соударения.

На рис. 2 представлен вид образцов углепластика с нанесенным ударным воздействием.

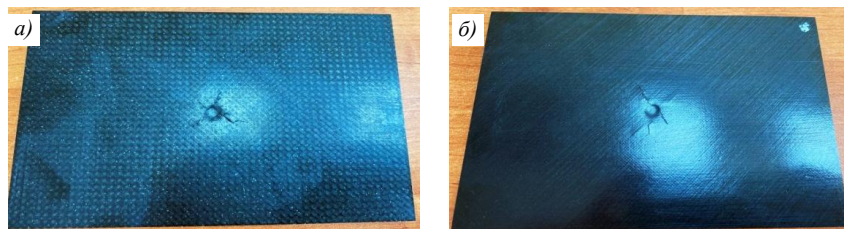


Рис. 2. Образцы углепластика на основе равнопрочного тканого (а) и однонаправленного (б) наполнителей после ударного воздействия

На *втором этапе* определяли площадь повреждения путем исследования образцов ультразвуковым эхо-импульсным методом. Чувствительность исследования соответствовала выявлению плоскодонного отражателя диаметром 5 мм. Результаты сохраняли в виде С-скана (рис. 3). Расчет площади повреждения проводили с помощью программного обеспечения на персональном компьютере.

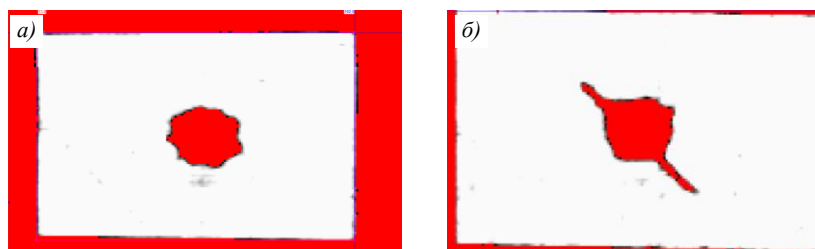


Рис. 3. С-скан образцов углепластика на основе равнопрочного тканого (а) и однонаправленного (б) наполнителей после ударного воздействия

На *третьем этапе* определяли остаточную прочность при сжатии после удара. Перед испытанием все образцы подвергали кондиционированию в течение 36 ч. Испытания проводили в соответствии с ASTM D7137/D7137M-12. Нагрузку на образец подавали последовательно с постоянной скоростью перемещения подвижных плит на универсальной электромеханической испытательной машине, фиксируя максимальную нагрузку, предшествующую разрушению образца. Типичная диаграмма нагружения представлена на рис. 4.

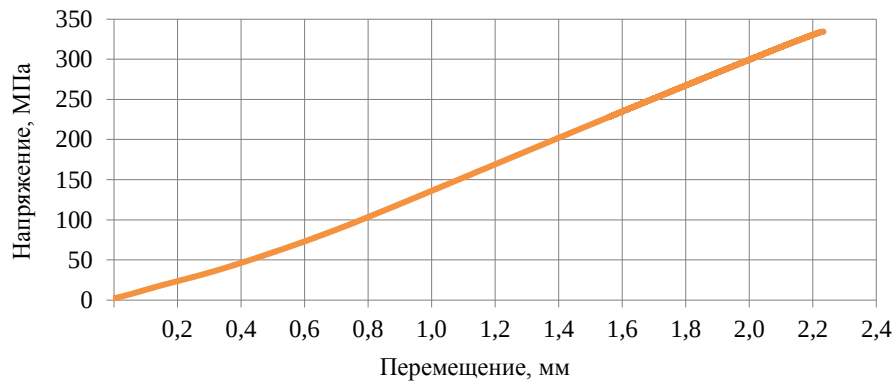


Рис. 4. Типичная диаграмма нагружения углепластика «напряжение–перемещение»

Методом оптической микроскопии исследованы структуры углепластика в месте ударных воздействий, производимых с минимальной и максимальной скоростью соударения.

Результаты и обсуждение

В процессе исследования скорость соударения варьировали от 2 до 3,6 м/с. Скорость нанесения удара бойком составила:

- 3,5±0,1 м/с – для массы 5 кг,
- 3,0±0,1 м/с – для массы 7 кг,
- 2,6±0,1 м/с – для массы 10 кг,
- 2,0 ±0,1 м/с – для массы 15 кг.

На рис. 5 представлены результаты определения площади повреждения углепластиков на основе равнопрочного и однонаправленного армирующих наполнителей при различной скорости соударения. Значение параметра для каждого образца – точка на диаграмме.

Для углепластика на основе равнопрочного тканого наполнителя при скорости соударения 2 м/с (масса бойка 15 кг) площадь повреждения находится в диапазоне 600–780 мм², а при скорости соударения 3,5 м/с (масса бойка 5 кг) – в диапазоне 700–980 мм². Для углепластика на основе однонаправленного углеродного волокна при скоростях соударения 2 м/с (масса бойка 15 кг) и 3,5 м/с (масса бойка 5 кг) площадь повреждения существенно не изменяется и находится в диапазоне 600–850 мм². Однако наибольшими значениями площадей разрушения равнопрочного углепластика при скорости 3,5 м/с и однонаправленного углепластика при скорости 3,0 м/с можно пренебречь ввиду статистической погрешности эксперимента. На основании данных рис. 5 можно сделать вывод, что скорость соударения не влияет площади разрушения двух видов углепластиков.

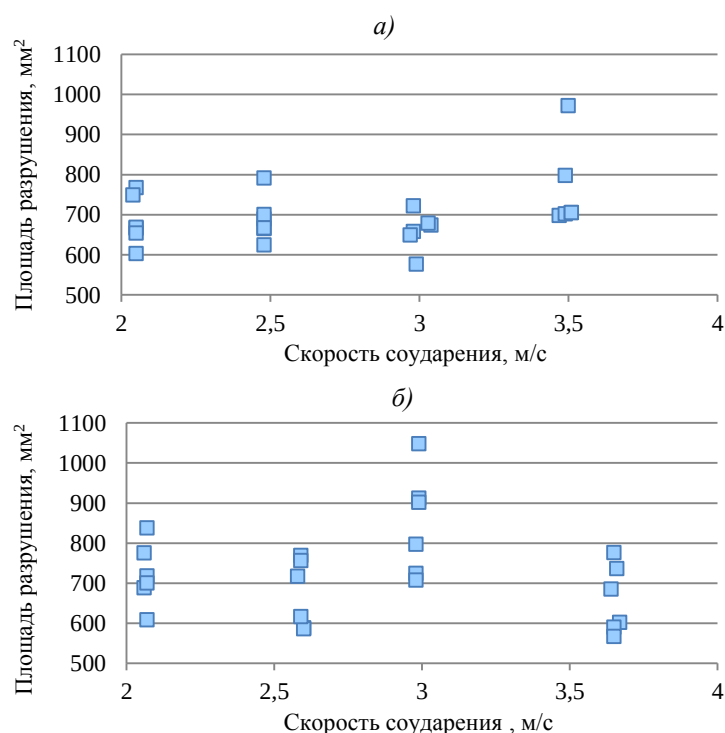


Рис. 5. Результаты определения площади повреждения углепластика на основе равнопрочного тканого (а) и однонаправленного (б) наполнителей при изменении скорости соударения

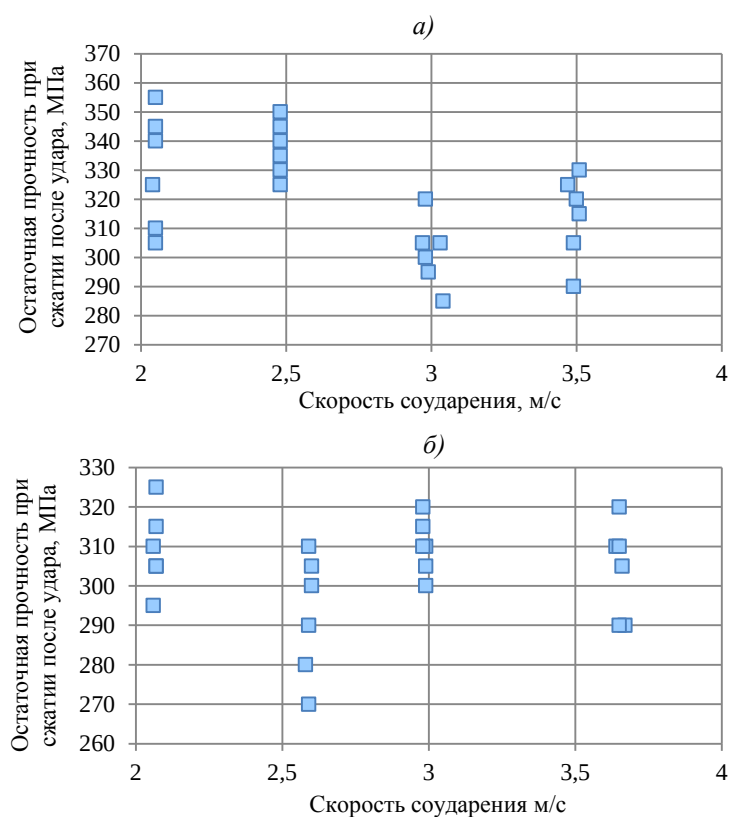


Рис. 6. Результаты определения остаточной прочности при сжатии после ударного воздействия углепластика на основе равнопрочного тканого (а) и однонаправленного (б) наполнителей при изменении скорости соударения

На рис. 6 показаны зависимости значений остаточной прочности при сжатии после удара углепластиков от скорости соударения. При различной скорости соударения остаточная прочность при сжатии после ударного воздействия для равнопрочного углепластика находится в диапазоне от 285 до 355 МПа, а у однонаправленного углепластика – от 270 до 325 МПа. Незначительное снижение остаточной прочности наблюдается у равнопрочного углепластика при скорости соударения >3 м/с, а у однонаправленного – при 2,6 м/с. Прочность при сжатии является комплексной механической характеристикой углепластика, которая характеризует работу и полимерного связующего, и углеродного волокна. Чаще всего значение прочности при сжатии имеет максимум при определенном содержании связующего в углепластике. При малом количестве связующего в углепластике ($<31\%$ (по массе)) могут образовываться непропитанные участки и значение прочности при сжатии снижается. Повышенное содержание связующего в образцах углепластика ($>37\%$ (по массе)) также уменьшает значение показателя прочности при сжатии за счет меньшего количества углеродного наполнителя. В данном случае связующее принимает на себя основную нагрузку [29]. Поэтому незначительное колебание значений остаточной прочности при сжатии после удара при одинаковых условиях формования углепластика, по-видимому, связано с разными значениями содержания связующего в образцах для серии испытаний. С учетом статистической погрешности испытаний можно сделать вывод, что скорость соударения в диапазоне от 2 до 3,5 м/с не влияет на значения остаточной прочности после удара как для однонаправленного, так и для равнопрочного углепластика.

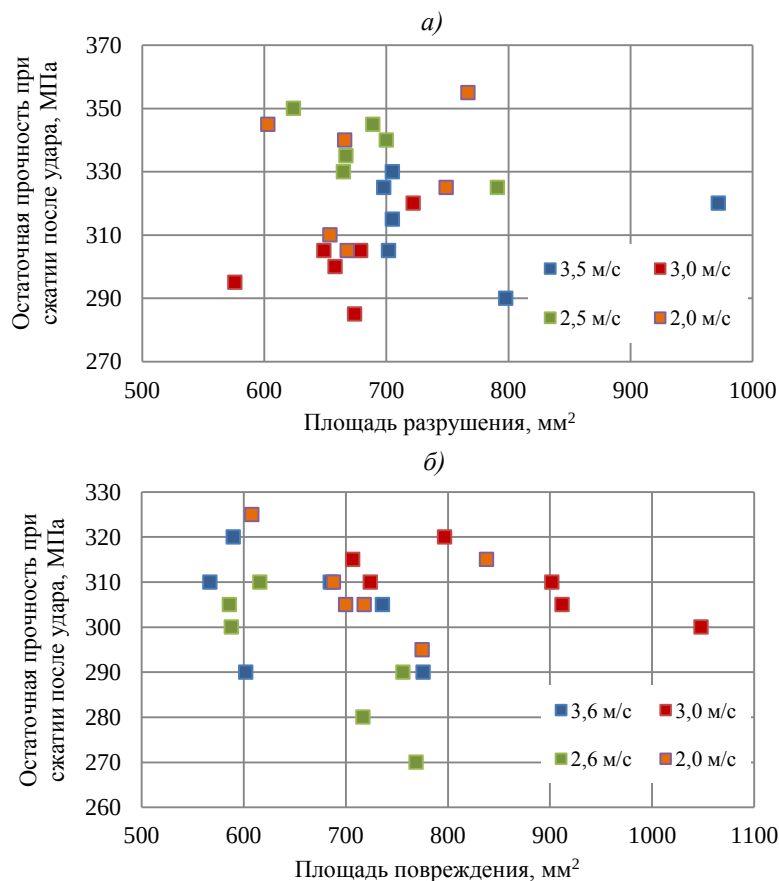


Рис. 7. Результаты определения остаточной прочности при сжатии после удара и площади повреждения углепластика на основе равнопрочного тканого (а) и однонаправленного (б) наполнителей при изменении скорости соударения

На рис. 7 показаны зависимости значений площади повреждения от параметра остаточной прочности при сжатии после удара при различных скоростях удара. Видно, что для равнопрочного и однонаправленного углепластиков не наблюдается какой-либо закономерности. Распределения точек для углепластиков, подверженных удару при скоростях соударения 2 и 3,5 м/с, располагаются приблизительно в одной области. Значения остаточной прочности при сжатии после удара не зависят от площади разрушения для обоих углепластиков.

На рис. 8 и 9 показаны результаты исследования микроструктуры углепластиков в зоне ударного воздействия с минимальной и максимальной скоростями соударения.

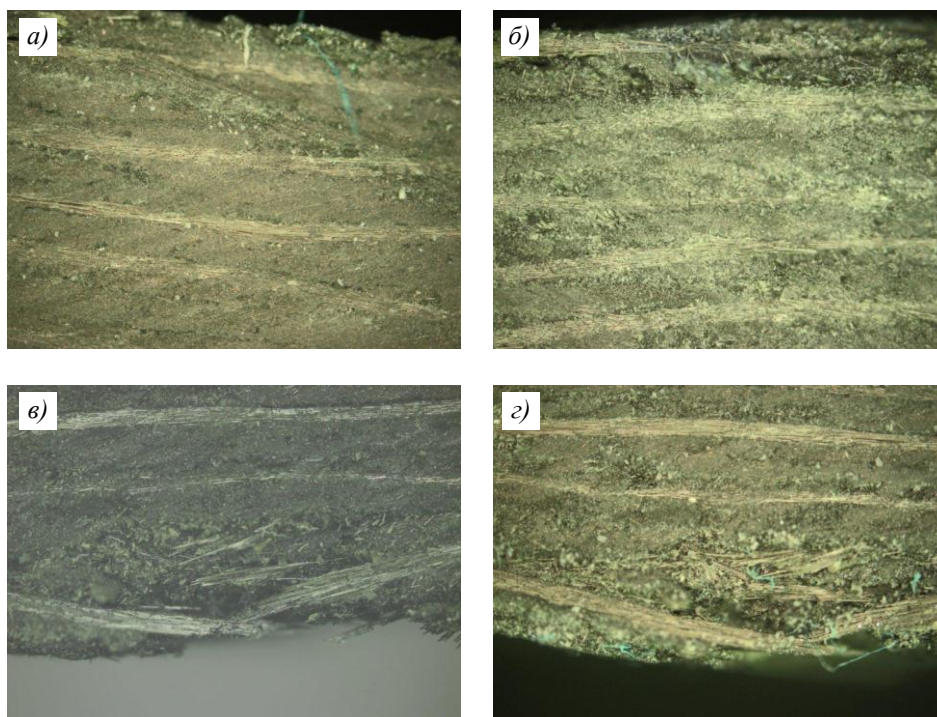


Рис. 8. Микроструктуры поперечного сечения образцов углепластика на основе равнопрочного армирующего наполнителя со стороны нанесения ударного воздействия (а, б) и с обратной стороны (в, г) с минимальной (а, в) и максимальной (б, г) скоростью соударения

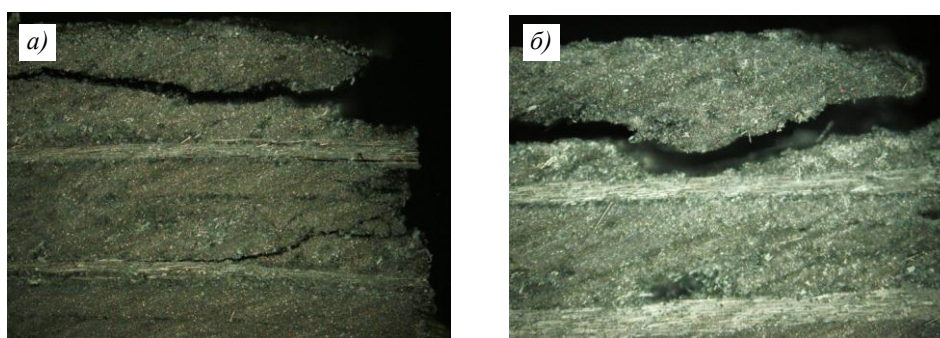


Рис. 9. Микроструктура поперечного сечения образца углепластика на основе однонаправленного армирующего наполнителя после ударного воздействия с минимальной (а) и максимальной (б) скоростью соударения

На микроструктурах, приведенных на рис. 8, видно, что для углепластика на основе равнопрочного армирующего наполнителя скорость соударения существенным образом не влияет на общий характер разрушения. Со стороны ударного воздействия

образуется вмятина, а с противоположной стороны формируется отдулина, характеризующаяся разрушением верхнего слоя полимерной матрицы и армирующего наполнителя с частичным вырывом из матрицы. При этом межслоевые трещины наблюдаются по границам слоев.

На микроструктурах, приведенных на рис. 9, видно, что у однонаправленного углепластика при ударном воздействии трещины распространяются не только вдоль слоев, но и в поперечном направлении – через волокна армирующего наполнителя. Однако существенной разницы в разрушении структуры композиционного материала в зависимости от скорости удара не наблюдается.

Заключения

Исследовано влияние ударного воздействия с различной скоростью соударения на остаточную прочность при сжатии, характер разрушения и площадь повреждения образцов углепластиков с квазиизотропной структурой армирования $[+45/0/-45/90]_{3s}$ – для однонаправленного наполнителя и $[(+45/-45)/(0/90)]_{6s}$ – для тканого наполнителя. Показано, что при испытаниях ударным воздействием с постоянной энергией 6,67 Дж/мм не наблюдается существенного влияния скорости соударения в диапазоне от 2 до 3,6 м/с на величину остаточной прочности при сжатии после удара и площади повреждения углепластика.

Список источников

1. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: Химия, 1981. 232 с.
2. Молчанов Б.И., Гудимов М.М. Свойства углепластиков и области их применения // Авиационная промышленность, 1997. № 3–4. С. 58–60.
3. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
4. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
5. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
7. Шепель В.Н. Создание изделий из полимеркомпозитов. М.: Издатель Шепель Владислав Николаевич, 2020. 388 с.
8. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
9. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
10. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
11. Беклемышева К.А., Петров И.Б. Моделирование разрушения гибридных композитов под действием низкоскоростного удара // Математическое моделирование. 2018. Т. 30. № 11. С. 27–43.
12. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Оценка площади ударных повреждений ПКМ различными методами ультразвукового контроля // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-125-133.

13. Кудрявцев О.А., Оливенко Н.А., Сапожников С.Б., Игнатова А.В. Оценка повреждений и остаточной прочности слоистого композита после низкоскоростного удара с использованием индикаторных покрытий // *Механика композитных материалов*. 2021. Т. 57. № 5. С. 839–852. DOI: 10.22364/mkm.57.5.03.
14. Староверов О.А., Бабушкин А.В., Горбунов С.М. Оценка степени повреждаемости углепластиковых композиционных материалов при ударном воздействии // *Вестник ПНИПУ. Сер.: Механика*. 2019. № 1. С. 162–172. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.14.
15. Сергачев И.В., Антонов Ф.К., Сафонов А.А., Ушаков А.Е. Оценка остаточной прочности элементов композиционных конструкций после низкоскоростного удара // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2013. № 1. С. 36–44.
16. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Кулагина Г.С., Шульдешова П.М. Исследование возможности повышения стойкости к удару тонколистовых углепластиков за счет плакирования арамидным органопластиком // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-35-42.
17. Ерасов В.С., Крылов В.Д., Панин С.В., Гончаров А.А. Испытания полимерного композиционного материала на удар падающим грузом // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 3. С. 60–64.
18. ASTM D7137/D7137M-12. Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates. ASTM International, 2012. P. 1–16.
19. Boeing Specification Support Standard BSS 7260: Advanced composite compression test. Boeing Corp., 1988. 48 p.
20. AITM1.0010-94. Airbus Industry Test Method/Fiber Reinforced Plastics. Determination of compression strength after impact. Blagnac, 1994. Is. 2. 26 p.
21. ASTM D7136/D7136M-15. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. ASTM International, 2015. P. 1–16.
22. SACMA Recommended methods S.R.M. 2R-94. Suppliers of Advanced Composites Materials Association, 1994. P. 1–7.
23. DIN 65561. Fiber reinforced plastics; testing of multidirectional laminates; determination of the compression strength after impact test. Aerospace, 1991. P. 1–6.
24. ASD-STAN PREN 6038 EN. Aerospace Series. Fiber Reinforced Plastics Test Method Determination of the Compression Strength After Impact-*Edition P1*. Aerospace, 1995. 12 p.
25. Ogasawara T., Mikomi T., Takamoto K. et al. Experimental evaluation of filled-hole compressive strengths of thin-ply carbon fiber/epoxy composite laminates // *Composites Science and Technology*. 2023. Vol. 237. Art. 109996.
26. Дубинский С.В., Фейгенбаум Ю.М., Сенник В.Я. Развитие методов статистического анализа экспериментальных данных об обнаруживаемости ударных повреждений композитной конструкции при визуальном контроле. М.: ЦАГИ, 2017. 21 с.
27. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
28. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
29. Мишкин С.И., Жакова Л.С., Клименко О.Н., Васильчук Е.А. Исследование влияния содержания связующего в углепластике на их механические свойства // *Труды ВИАМ*. 2023. № 2 (120). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2024) DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-77-86.

References

1. Gunyaev G.M. *Structure and properties of polymer fiber composites*. Moscow: Chemistry, 1981, 232 p.
2. Molchanov B.I., Gudimov M.M. Properties of carbon fiber reinforced plastics and their areas of application. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1997, no. 3–4, pp. 58–60.

3. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft construction and industry: present and future. *Direktor po marketingu i sbytu*, 2017, no. 5–6, pp. 40–44.
4. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vol. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
5. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
6. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
7. Shepel V.N. *Creation of products from polymer composites*. Moscow: Publisher Shepel Vladislav Nikolaevich, 2020, 388 p.
8. Imametdinov E.S., Valueva M.I. Composites for piston engines (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
9. Kolobkov A.S. Polymer composite materials for various aircraft structures (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
10. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
11. Beklemysheva K.A., Petrov I.B. Modeling the destruction of hybrid composites under the action of a low-speed impact. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2018, vol. 30, no. 11, pp. 27–43.
12. Boychuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S. Estimation of impact damages area in FRP by various ultrasonic techniques. *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-125-133.
13. Kudryavtsev O.A., Olivenko N.A., Sapozhnikov S.B., Ignatova A.V. Assessment of damage and residual strength of a layered composite after a low-speed impact using indicator coatings. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 839–852. DOI: 10.22364/mkm.57.5.03.
14. Staroverov O.A., Babushkin A.V., Gorbunov S.M. Assessment of the degree of damage to carbon fiber composite materials under impact action. *Vestnik PNIPU. Ser.: Mekhanika*, 2019, no. 1, pp. 162–172. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.14.
15. Sergachev I.V., Antonov F.K., Safonov A.A., Ushakov A.E. Evaluation of residual strength of composite structure elements after low-speed impact. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 2013, no. 1, pp. 36–44.
16. Zhelezina G.F., Solovieva N.A., Kulagina G.S., Shuldeshova P.M. Study of the possibility of increasing the impact resistance of thin-sheeted carbon fiber-reinforced plastics due to cladding with aramid organoplastics. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-35-42.
17. Erasov V.S., Krylov V.D., Panin S.V., Goncharov A.A. Drop-weight impact testing of polymer composite material. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. 3, pp. 60–64.
18. ASTM D7137/D7137M-12. *Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates*. ASTM International, 2012, pp. 1–16.
19. *Boeing Specification Support Standard BSS 7260: Advanced composite compression test*. Boeing Corp., 1988, 48 p.
20. AITM1.0010-94. *Airbus Industry Test Method/Fiber Reinforced Plastics. Determination of compression strength after impact*. Blagnac, 1994, is. 2, 26 p.
21. ASTM D7136/D7136M-15. *Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event*. ASTM International, 2015, pp. 1–16.

22. SACMA Recommended methods S.R.M. 2R-94. Suppliers of Advanced Composites Materials Association, 1994, pp. 1–7.
23. DIN 65561. *Fiber reinforced plastics; testing of multidirectional laminates; determination of the compression strength after impact test*. Aerospace, 1991, pp. 1–6.
24. ASD-STAN PREN 6038 EN. *Aerospace Series. Fiber Reinforced Plastics Test Method Determination of the Compression Strength After Impact-Edition P1*. Aerospace, 1995, 12 p.
25. Ogasawara T., Mikomi T., Takamoto K. et al. Experimental evaluation of filled-hole compressive strengths of thin-ply carbon fiber/epoxy composite laminates. *Composites Science and Technology*, 2023, vol. 237, art. 109996.
26. Dubinsky S.V., Feigenbaum Yu.M., Senik V.Ya. *Development of methods for statistical analysis of experimental data on the detectability of impact damage to a composite structure during visual inspection*. Moscow: TsAGI, 2017, 21 p.
27. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
28. Grashchenkov D.V. Strategy of development of non-metallic materials, metal composite materials and heat-shielding. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
29. Mishkin S.I., Zhakova L.S., Klimenko O.N., Vasilchuk E.A. Research of influence of the contents resin in CFRP on their mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 16, 2024) DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-77-86.

Информация об авторах

Васильчук Екатерина Александровна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Гуляев Иван Николаевич, заместитель начальника по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Яковлев Николай Олегович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мишкин Сергей Игоревич, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ekaterina A. Vasilchuk, Technican, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ivan N. Gulyaev, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikolay O. Yakovlev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey I. Mishkin, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 26.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.07.2024.
The article was submitted 26.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 30.07.2024.