

*Г. Демирджан\**, *М. Киса*, *М. Озен*, *А. Аджикгоз*

*Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Harran University, Sanliurfa, Turkey*

## **ПОВЕДЕНИЕ ЭПОКСИДНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ, АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОВОЛОКНАМИ, ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ ВДАВЛИВАНИИ<sup>1</sup>**

*G. Demircan\**, *M. Kisa*, *M. Ozen*, and *A. Acikgoz*

### **QUASI-STATIC PENETRATION BEHAVIOR OF GLASS-FIBER- REINFORCED EPOXY NANOCOMPOSITES**

**Keywords:** quasi-static penetration, Charpy impact test, nano-composite, glass fibers, epoxy

The effect of  $Al_2O_3$  and  $B_4C$  nanoparticles on the quasi-static penetration test (QSPT) and Charpy impact test of glass-fiber-reinforced polymer composite plates has been studied with the aim to clear up whether there is a correlation between results of these two tests. Punch shear tests on the plates were carried. The data for the absorbed energy obtained from the Charpy impact test was feasible to predict whether fiber reinforced polymer nanocomposites will give positive results in the QSPT or ballistic tests. The predominant damage mechanisms were delamination and fiber break during the QSPT. Addition of 1 wt.%  $Al_2O_3$  nanoparticles to the composite increased its punch shear strength by 8.97%, but the addition of  $B_4C$  nanoparticles raised its hardness. It was also found that neither  $Al_2O_3$  nor  $B_4C$  increased the amount of absorbed energy.

**Ключевые слова:** вдавливание квазистатическое, испытание на удар по Шарпи, наноккомпозит, стекловолокна, смола эпоксидная

Влияние наночастиц  $Al_2O_3$  и  $B_4C$  при испытаниях на квазистатическое вдавливание и удар по Шарпи пластин из стеклопластика изучили с целью выявления корреляции между результатами этих видов испытаний. Провели испытания пластин на сдвиг

---

\*Автор, с которым следует вести переписку: [gdemircan@harran.edu.tr](mailto:gdemircan@harran.edu.tr)  
Corresponding author: [gdemircan@harran.edu.tr](mailto:gdemircan@harran.edu.tr)

<sup>1</sup>Перевод с англ.

пуансоном. Данные о поглощенной энергии, полученные в ходе испытания на удар по Шарпи, позволили предсказать, дадут ли испытания на квазистатическое вдавливание или баллистические испытания волокнисто-армированных полимерных нанокомпозитов позитивные результаты. Преобладающие механизмы повреждения в ходе испытания на квазистатическое вдавливание — расслоение и разрыв волокон. Введение в композит 1% по массе наночастиц  $Al_2O_3$  повысило его прочность на срез пуансоном на 8,97%, а введение наночастиц  $B_4C$  повысило его твердость. Также установили, что наличие наночастиц  $Al_2O_3$  и  $B_4C$  не увеличивает количество поглощенной энергии.

## Введение

Благодаря высокой способности рассеивать энергию и высокой удельной прочности [1, 2] волокнисто-армированные композиты широко используют во многих отраслях промышленности. В зависимости от области применения эти композиты подвержены разным видам ударных нагрузок. Многие исследователи проводили эксперименты по изучению их повреждения и ударных свойств [3—10]. Для этой цели часто используют квазистатические испытания, в которых инерционные эффекты незначительны и ими можно пренебречь.

В случае баллистических ударных нагрузок силы инерции нельзя игнорировать [11, 12]. Баллистическое поведение композитных материалов зависит от таких факторов, как скорость удара, размер цели, свойства снаряда, граничные условия и др. [13]. В литературе обсуждают возможность оценки поведения композита при баллистическом ударе с помощью испытания на квазистатический сдвиг пуансоном (КСИП) (quasi-static punch shear test) [14—17]. В [18] методом “мокрой” укладки изготовили эпоксидные слоистые композиты из ткани E-стекловолокон полотняного плетения с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]_{10}$  и исследовали их баллистические и квазистатические характеристики при сдвиге пуансоном, используя модель статического вдавливания для моделирования динамического удара. Предложенная модель оказалась пригодной для определения баллистических пределов при учете высокоскоростных упругих свойств цели. В [19] изучали квазистатические и баллистические свойства композитов, изготовленных из слоев ткани эпоксидного препрега T-300/934. Установили, что основные механизмы локализованного повреждения — разрыв волокон, расслоение, распространение трещин, увеличение размера отверстий и трение. Согласование расчетных и экспериментальных значений конечных скоростей оказалось вполне приемлемым в случае самых тонких и самых толстых пластин, но было значительно хуже для пластин средней толщины при высокой скорости удара. В [20] получили аналитические решения для вдавливания, деформирования и перфорации композитных пластин и сэндвич-панелей в ходе испытаний на квазистатический сдвиг пуансоном

и пробивание снарядам. Модели поведения при ударе классифицировали в соответствии с тремя основными факторами: (i) продолжительностью контакта нагрузки, (ii) временем прохождения сквозь толщину и (iii) временем бокового прохождения. Эти модели определяли реакцию на удар, при которой время нагружения превышало время бокового прохождения.

Испытание на удар по Шарпи — это эксперимент с высокой скоростью деформирования для определения количества энергии, поглощаемой материалом в ходе его разрушения [21]. Это недорогое испытание позволяет легко и быстро получить экспериментальные результаты, и его широко используют при исследовании свойств полимерных волокнисто-армированных композитов [22—25]. Поведение разных волокнисто-армированных композитов при ударе по Шарпи вызывает интерес многих исследователей. В [26] изучали влияние геометрии образца, распределения длин волокон и температуры на ударную вязкость по Шарпи полипропиленовых стеклопластиков. Установили, что максимальная нагрузка и ударная вязкость возрастали с увеличением длины стекловолокна и размера образца. Однако при повышении температуры наблюдали их уменьшение. В [27] изготовили эпоксидные композиты, армированные необработанными и обработанными волокнами мальвы, и исследовали их ударные свойства по Шарпи. Композит с 30% по объему необработанных волокон мальвы продемонстрировал наилучшие результаты с точки зрения энергии удара по Шарпи. Таким образом, сделали вывод о том, что обработка натуральных волокон нецелесообразна для эпоксидных композитов. Также установили, что разрушение композита имеет преимущественно хрупкий характер.

В научной литературе основное внимание уделено испытаниям на удар по Шарпи и квазистатический сдвиг пуансоном волокнисто-армированных композитов. Выполнено мало исследований стеклопластиков, армированных наночастицами. Хотя в [28—30] изучали поведение волокнисто-армированных композитов при ударе по Шарпи, а в [31, 32] — при квазистатическом сдвиге пуансоном, работ, в которых оба типа поведения исследовали одновременно, найти не удалось.

Основная цель настоящей работы — оценить результаты испытаний на ударную вязкость по Шарпи и КСИП эпоксидных стеклопластиков, армированных наночастицами. Попытки предсказать поведение при баллистическом ударе по результатам КСИП в литературе известны. В нашем исследовании выявлена линейная зависимость между результатами удара по Шарпи и КСИП и подтверждено, что испытания на удар по Шарпи могут дать предварительную информацию о результатах КСИП и испытании на баллистический удар.

В настоящей работе использовали наночастицы карбида бора  $B_4C$  и оксида алюминия  $Al_2O_3$ . Композитные пластины изготовили методом вакуумного литьевого прессования. Исследовали процесс повреждения, механизм разрушения, способность поглощения энергии и твердость нанокompозитов.

Табл. 1

## Свойства смолы и отвердителя

Свойство	Смола L285	Отвердитель H287
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,18—1,23	0,93—0,96
Вязкость, мПа	600—900	80—120
Молекулярный вес смолы, г/эквивалент	155—170	—
Аминоное число, мг КОН/г	—	450—500
Коэффициент преломления	1,525—1,530	1,495—1,499

## 1. Эксперимент

**1.1. Изготовление нанокompозита.** В качестве матрицы использовали эпоксидную смолу MGS L285 и отвердитель H287 в стехиометрическом соотношении 100:40. Технические свойства смолы и отвердителя приведены в табл. 1.

16-слойные композитные пластины изготовили из стеклоткани с массой на единицу площади 200 г/м<sup>2</sup>. Технические свойства наночастиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и B<sub>4</sub>C приведены в табл. 2.

Для равномерного распределения наночастиц в эпоксидной смоле использовали метод ультразвукового двойного смешения (УДС) [33, 34]. В эпоксидную смолу добавили три фракции наночастиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и B<sub>4</sub>C (1, 2 и 3% по массе). Затем смолу поместили в контейнер, пригодный для использования в ледяной бане во избежание чрезмерного повышения температуры, обусловленного ультразвуковыми волнами. Смолу в ледяной ванне сначала поместили в магнитную мешалку и погрузили в нее ультразвуковой зонд для выполнения УДС, схема которого представлена на рис. 1. Магнитная мешалка работала со скоростью 400 об/мин, а ультразвуковая — со 100% амплитудой 2 с с включенным импульсным режимом и 3 с — с выключенным. После 2 ч перемешивания приготовленную смесь поместили в камеру вакуумной дегазации для удаления пузырьков воздуха. Вакуумная дегазация смолы с наночастицами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> потребовала

Табл. 2

Свойства наночастиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и B<sub>4</sub>C

Характеристика	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>4</sub> C
Чистота	99,5+	99,5+
Цвет	Белый	Черный
Средний размер частиц, нм	78	40—60
Удельная площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г	20	55
Морфология	Почти сферическая	Гексагональная

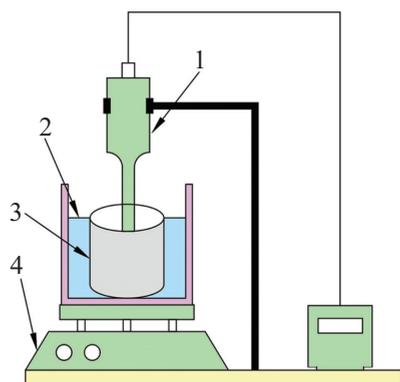


Рис. 1. Метод ультразвукового двойного смешивания: 1 — ультразвуковой гомогенизатор; 2 — ледяная баня; 3 — смола; 4 — магнитная мешалка.

~ 10—12 мин, а смолы с наночастицами  $V_4C$  — ~ 90 мин. Различие обусловлено морфологической структурой наночастиц. Пузырьки воздуха могли легко выходить сквозь совокупность почти сферических наночастиц  $Al_2O_3$ , но с трудом сквозь наночастицы  $V_4C$  гексагональной формы. В дегазированную смесь добавили требуемое количество отвердителя и методом вакуумного литьевого прессования изготовили пластины из 16-слойного наностеклопластика. Пластины отверждали в течение 15 ч при температуре  $80\text{ }^\circ\text{C}$ , а затем вырезали из них образцы размером  $200\times 200$  мм по стандарту ASTM 6264 [35] для испытаний на квазистатическое вдавливание и размером  $80\times 10$  мм для испытания на удар по Шарпи (см. рис. 2).

**1.2. Испытания на квазистатический сдвиг** пуансоном провели на машине Shimadzu AGX Plus с контролируемым устройством для испытания на растяжение и датчиком нагрузки до 100 кН. Установка (рис. 3) включала опорную плиту  $200\times 200$  мм толщиной 50,8 мм с круглым отверстием в центре, накладную плиту  $200\times 200$  мм толщиной 12,7 мм с



Рис. 2. Образцы нанокomпозитов после испытаний.

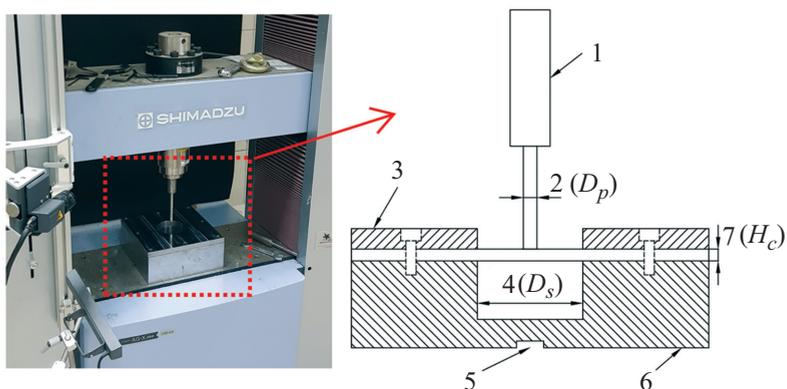


Рис. 3. Установка для испытания на квазистатический сдвиг пуансоном: 1 — пуансон; 2 — диаметр пуансона  $D_p$ ; 3 — накладная плита; 4 — пролет между опорами  $D_s$ ; 5 — юстированное отверстие; 6 — опорная плита; 7 — толщина пластины  $H_c$ .

круглым отверстием, таким же, как в опорной плите, и цилиндрической головки пуансона диаметром 9 мм с плоским наконечником. Отношение пролета между опорами  $D_s$  к диаметру пуансона  $D_p$  равно 8 ( $SPR = D_s / D_p = 8$ ). Перемещение пуансона было постоянным и равным 12 мм, скорость перемещения траверсы 2,54 мм/мин [36, 37]. КСИП выполняли четыре раза для каждого параметра.

Определяли зависимость между усилием вдавливания  $P$  и перемещением пуансона  $\Delta$ . Поглощенную энергию определяли, вычисляя площадь под графиком усилие—перемещение  $P-\Delta$ . Прочность на срез  $PSS$  вокруг головки пуансона вычисляли по формуле [44]

$$PSS = \frac{P_{\max}}{\pi D_p H_c}, \quad (1)$$

где  $P_{\max}$  — максимальное усилие вдавливания;  $D_p$  — диаметр головки пуансона;  $H_c$  — толщина пластины.

**1.3. Испытание на удар по Шарпи** — это стандартизованная процедура, позволяющая определить, сколько энергии материал поглощает при разрушении. В силу легкости и удобства его широко применяют в промышленности [38].

Испытание проводили по стандарту ISO 179-1 [39] с использованием ударной машины КТ-CR и образцов без надреза с длиной пролета 62 мм. Масса молота 21,9 кг, центральная длина 0,752 м. Испытания провели при комнатной температуре пять раз для каждого параметра. Значение поглощенной энергии считывали с монитора машины для испытаний на удар. Основная цель — определение взаимосвязи между значениями поглощенной энергии в испытаниях на удар по Шарпи и квазистатическом сдвиге пуансоном.

**1.4. Испытание на твердость.** Твердость материала определяют как его сопротивление локальному деформированию [40]. Существуют разные виды испытаний на твердость, различающиеся формой и материалом индентора, а также величиной прикладываемой нагрузки. В настоящей работе испытание на твердость провели с использованием машины AOB Lab Digital Rockwell. Испытание квадратного образца со стороной 25 мм выполнили по стандарту ASTM D785 при нагрузке 100 кгс использованием стального шара диаметром 6,35 мм. Твердость определили, прикладывая нагрузку в течение 10 с и используя шкалу Роквелла. Среднее значение определили по отпечаткам, снятым с матовой поверхности образца.

## 2. Результаты и обсуждение

**2.1. Результаты испытаний на квазистатический сдвиг пуансоном.** КСИП выполнили на образцах эпоксидных стеклопластиков, содержащих наночастицы  $Al_2O_3$  и  $B_4C$ . Такую экспериментальную методику также использовали, например, в [41, 42]. В настоящей работе  $SPR = 8$ , а перемещение пуансона ограничили значением  $\Delta = 12$  мм. Изучили влияние типа и массового содержания наночастиц на механизм повреждения и поглощенную энергию. Полученные результаты представлены в табл. 3, а изменения поглощенной энергии  $E_a$  и прочности на срез  $PSS$  иллюстрируют данные рис. 4 и 5 соответственно.

Исследование энергии, поглощенной наноккомпозитами, не выявило положительного эффекта от введения наночастиц. Согласно экспериментальным кривым усилие—перемещение  $P—\Delta$  с увеличением содержания наночастиц  $B_4C$  поглощенная энергия уменьшалась. Карбид бора  $B_4C$  — один из самых твердых материалов, используемый в качестве абразива. Поэтому жесткость наноккомпозита, содержащего наночастицы  $B_4C$ , возросла; он стал хрупче с меньшей площадью под графиком усилие— пере-

Табл. 3

Результаты КСИП

Композит	$P_{max}$ , кН	$H_c$ , мм	$PSS$ , МПа	$E_a$ , Дж
Без наночастиц	6,06	2,8	76,58	22,69
1% по массе $Al_2O_3$	5,66	2,4	83,45	16,81
2% по массе $Al_2O_3$	5,71	2,6	77,71	18,54
3% по массе $Al_2O_3$	5,34	2,8	67,49	19,01
1% по массе $B_4C$	5,74	2,5	81,25	19,35
2% по массе $B_4C$	5,53	2,5	78,27	17,88
3% по массе $B_4C$	5,41	2,5	76,43	17,19

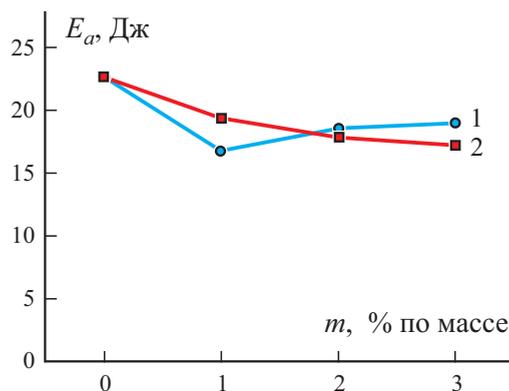


Рис. 4. Зависимость поглощенной энергии  $E_a$  от массового содержания  $m$  наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (1) и  $\text{B}_4\text{C}$  (2).

мещение. Жесткость композита, содержащего 1% по массе наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , уменьшалась, а содержащего 3% по массе возросла, но не достигла таковой у композита без наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Известно, что наночастицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  улучшают межповерхностное сцепление волокон и матрицы в волокнисто-армированных полимерных композитах и улучшают их механические свойства [43].

Введение 1% по массе наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  или  $\text{B}_4\text{C}$  увеличивало прочность композитов на срез на 8,97 и 6,09% соответственно. Дальнейшее увеличение содержания наночастиц уменьшало ее и при содержании наночастиц 3% по массе достигало минимального значения. Линейной зависимости между прочностью на срез пуансоном и количеством энергии, поглощенной при увеличении содержания наночастиц, не наблюдали. В [44] также исследовали квазистатическое сопротивление гибридных

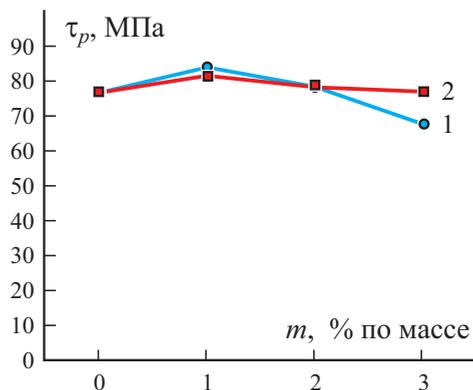


Рис. 5. Зависимость прочности на срез пуансоном  $\tau_p$  от массового содержания  $m$  наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (1) и  $\text{B}_4\text{C}$  (2).

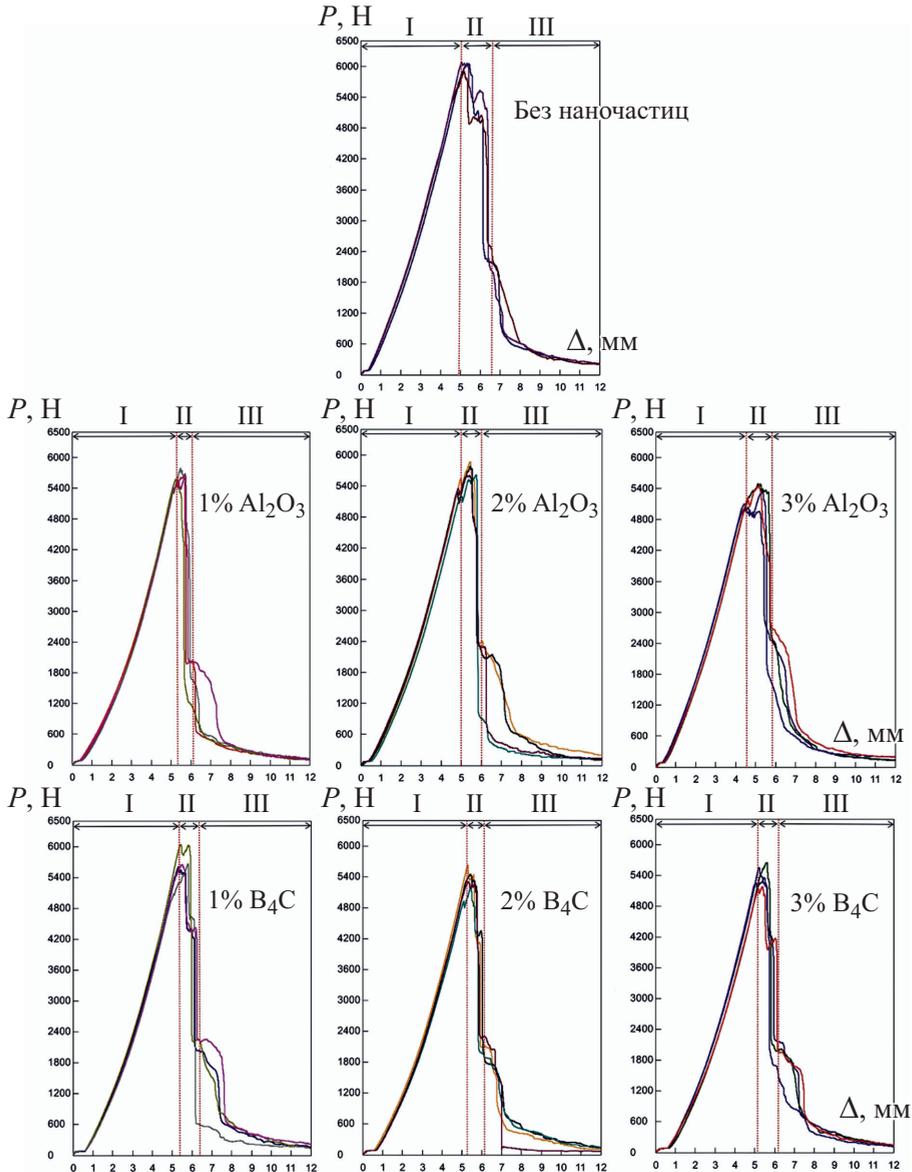


Рис. 6. Зависимости усилие пуансона—перемещение  $P$  —  $\Delta$  при разном массовом содержании  $m$  наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{B}_4\text{C}$ . Пояснения в тексте.

волокнисто-армированных композитов вдавливаю и не смогли установить четкой корреляции между их прочностью на срез пуансоном и количеством поглощенной энергии. Это обусловлено тем, что прочность на срез пуансоном связана с максимальным усилием, которое может выдержать наноккомпозит, а поглощенная энергия — с площадью под кривой усилие—перемещение. При этом максимальное усилие, выдерживаемое

нанокompозитом, может уменьшиться в силу механических связей, а количество поглощенной энергии может возрасти в силу повышенной ударной вязкости.

Экспериментальные кривые усилие вдавливания пуансона—перемещение  $P—\Delta$  нанокompозитов представлены на рис. 6. Процесс вдавливания включал три этапа. На первом (I), называемом упругой областью, усилие линейно возрастало до определенного значения. На втором (II), называемом областью повреждения, произошло критическое разрушение волокон, обусловившее явление “выбивания пробки”. На этом упругая область закончилась и начался процесс внутреннего разрушения. Затем при резком падении нагрузки произошел переход к третьей стадии (III), называемой областью трения. Перфорация закончилась, и усилие, обусловленное трением между головкой пуансона и композитной пластиной, оставалось постоянным вплоть до достижения максимального перемещения. Такой ход событий аналогичен описанному в [31], где эпоксидные волокнисто-армированные стеклопластики с наночастицами кремнезема подвергли испытаниям на растяжение, изгиб, баллистическое и квазистатическое вдавливание. Квазистатические испытания с цилиндрической стальной головкой диаметром 10 мм провели со скоростью 2 мм/мин. На полученных кривых усилие—перемещение наблюдали три области: упругую, разрушения и трения.

Как видно из данных рис. 6, введение наночастиц  $Al_2O_3$  и  $V_4C$  также уменьшило область повреждения и, как результат, уменьшило площадь под графиком и количество поглощенной энергии. Максимальное усилие в случае композита без наночастиц было больше, т.е. добавление наночастиц не увеличило максимальную нагрузку в испытаниях на квазистатический сдвиг пуансоном эпоксидных наностеклопластиков. Однако при содержании 1% по массе наночастиц наблюдали увеличение прочности на срез пуансоном, что обусловлено учетом толщины пластин нанокompозита при вычислении прочности на срез. Следует отметить, что толщина пластин в настоящей работе не была постоянной.

Механизмы повреждения в КСИП регистрировали, фотографируя лицевую и заднюю поверхности пластин (рис. 7). В ходе трехэтапного испытания на квазистатический сдвиг пуансоном наблюдали следующие повреждения: расслоение, выбивание пробки, разрыв и расщепление волокон, вспучивание. При этом на лицевой поверхности наблюдали преимущественно расслоение и выбивание пробки, а на задней поверхности — разрыв и расщепление волокон, вспучивание. Поскольку на лицевой поверхности пластин нанокompозита преобладали силы сжатия, расслоения там были больше, чем на задней поверхности. Преобладание растягивающих усилий на задней поверхности обусловило растяжение волокон, их разрыв, расщепление и вспучивание. Кроме того, начало разрушения волокон и выбивание пробки также было обусловлено нормальными напряжениями в силу изгибающего момента, поскольку в наших испытаниях  $SPR = 8$ . В [44] при изучении гибридных композитов

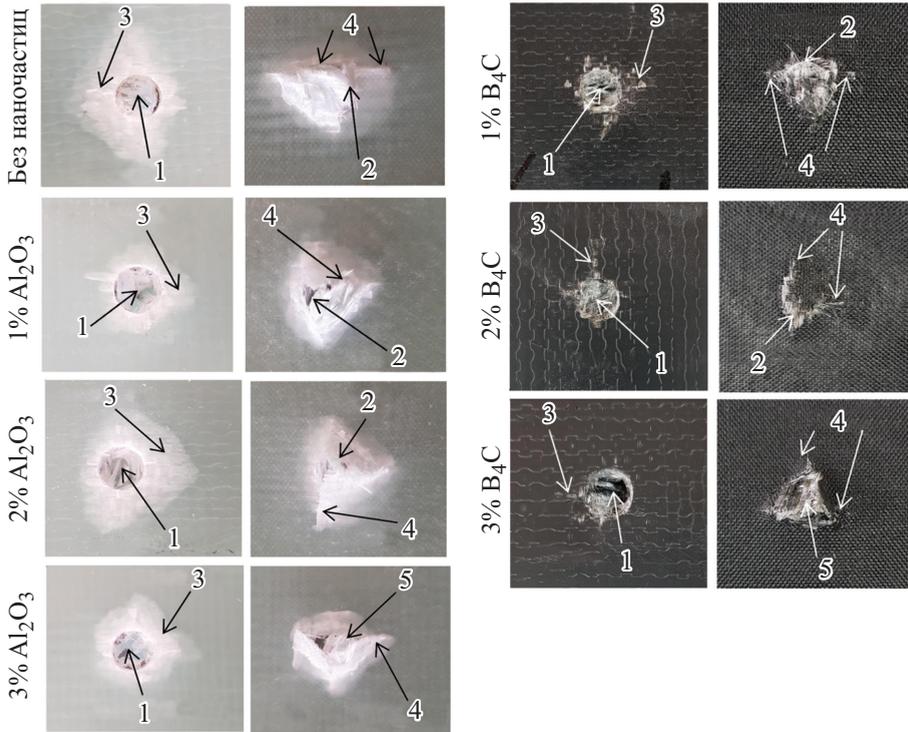


Рис. 7. Изображения лицевой и задней поверхностей пластин из композитов с разным массовым содержанием наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{B}_4\text{C}$  после КСИП: 1 — выдавливание пробки; 2 — разрыв волокон; 3 — расслоение; 4 — расщепление волокон; 5 — вспучивание.

использовали два значения —  $SPR = 2$  и  $5$  и установили, что начало разрушения и выбивание пробки при  $SPR = 2$  вызвано напряжениями сжатия и поперечного сдвига, а разрушение растяжением при  $SPR = 5$  — изгибом.

Табл. 4

Энергия  $E_a$ , поглощенная в испытаниях на удар по Шарпи и КСИП

Композит	$E_a$ , Дж (Шарпи)	Уменьшение, %	$E_a$ , Дж (КСИП)	Уменьшение, %
Без наночастиц	5,52	—	22,69	—
1% по массе $\text{Al}_2\text{O}_3$	4,98	9,78	16,81	25,91
2% по массе $\text{Al}_2\text{O}_3$	5,29	4,17	18,54	18,29
3% по массе $\text{Al}_2\text{O}_3$	5,41	1,99	19,01	16,22
1% по массе $\text{B}_4\text{C}$	4,47	19,02	19,35	14,72
2% по массе $\text{B}_4\text{C}$	4,21	23,9	17,88	21,20
3% по массе $\text{B}_4\text{C}$	3,98	27,9	17,19	24,24

С увеличением значения  $SPR$  влияние изгиба возрастало и соответственно изменялся механизм начального разрушения и выбивания пробки.

При оценке влияния наночастиц в рассматриваемых эпоксидных стеклопластиках стало очевидно, что увеличение содержания наночастиц не вызывает каких-либо значительных изменений в механизме их повреждения. Однако раздельная оценка влияния каждого типа наночастиц выявила некоторые различия. При добавлении наночастиц  $Al_2O_3$  расслоение между слоями и разрыв волокон были очень похожи на таковые в композите без наночастиц, а при добавлении наночастиц  $B_4C$  площадь расслоения между слоями и разрыв волокон значительно уменьшились. Это можно объяснить тем, что наночастицы  $B_4C$  тверже наночастиц  $Al_2O_3$  [45]. В результате твердость нанокомпозита с  $B_4C$  больше, а материал с большей твердостью хрупче и легче ломается и повреждается [46].

**2.2. Результаты испытаний на удар по Шарпи.** Исследовано влияние добавления наночастиц  $Al_2O_3$  и  $B_4C$  на поглощенную энергию при испытаниях на удар по Шарпи эпоксидных стеклопластиков, и результаты сопоставлены с полученными при квазистатическом сдвиге пуансоном (табл. 4, рис. 8).

Как видно из данных рис. 8, изменение поглощенной энергии в испытаниях на удар по Шарпи и КСИП аналогичны при введении обоих типов наночастиц. Эти результаты свидетельствуют о том, что испытание на удар по Шарпи можно использовать для предсказания, дадут ли баллистические испытания и КСИП волокнисто-армированных нанокомпозитов позитивные результаты. Поскольку испытание на удар по Шарпи дает быстрые результаты, оно более практично.

Из данных рис. 8—*а* видно, что наименьшее и наибольшее значения поглощенной энергии получены при содержании 1 и 3% по массе нано-

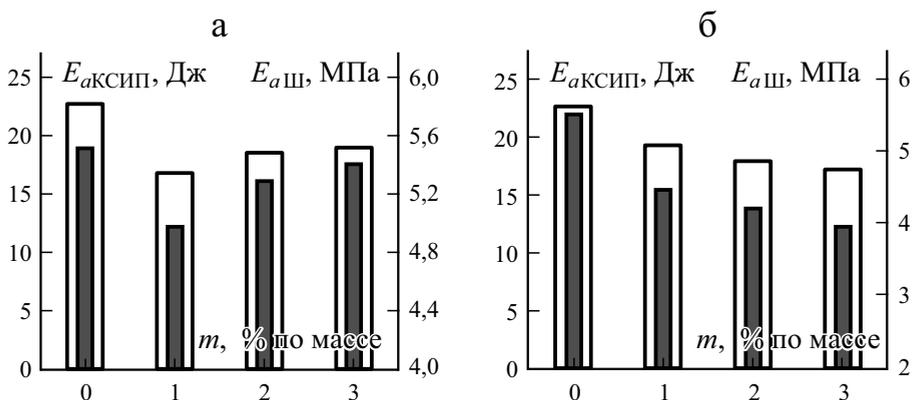


Рис. 8. Сравнение энергии  $E_a$ , поглощенной нанокомпозитами с разным массовым содержанием наночастиц  $Al_2O_3$  (а) и  $B_4C$  (б), в испытаниях на удар по Шарпи (■) и КСИП (□).

Табл 5

## Твердость нанокомпозитов по Роквеллу (HRC)

Композит	HRC	Увеличение, %
Без наночастиц	100,77	—
1% по массе $Al_2O_3$	101,04	0,27
2% по массе $Al_2O_3$	102,31	1,52
3% по массе $Al_2O_3$	102,78	1,99
1% по массе $B_4C$	102,16	1,41
2% по массе $B_4C$	102,51	1,76
3% по массе $B_4C$	103,08	2,34

частиц  $Al_2O_3$ . Однако величину энергии, поглощенной композитом без наночастиц, не удалось превзойти путем увеличения содержания наночастиц больше 3% по массе в силу их агломерации [47]. Согласно данным табл. 4 уменьшение энергии, поглощенной в случае КСИП, больше, чем при ударе по Шарпи. Так, при введении 1% по массе наночастиц  $Al_2O_3$  наблюдали уменьшение поглощенной энергии в испытании на удар по Шарпи на 9,78%, а КСИП — на 25,91%.

Согласно данным рис. 8—б при введении наночастиц  $B_4C$  до 3% по массе поглощенная энергия уменьшалась при обоих видах испытаний. В испытании на удар по Шарпи наблюдали максимальное уменьшение поглощенной энергии при введении 1% по массе наночастиц  $Al_2O_3$  (на 9,78%) и 3% по массе наночастиц  $B_4C$  (на 27,9%).

**2.3. Результаты испытаний на твердость.** Твердость вычисляли по шкале Роквелла; результаты представлены в табл. 5 и на рис. 9.

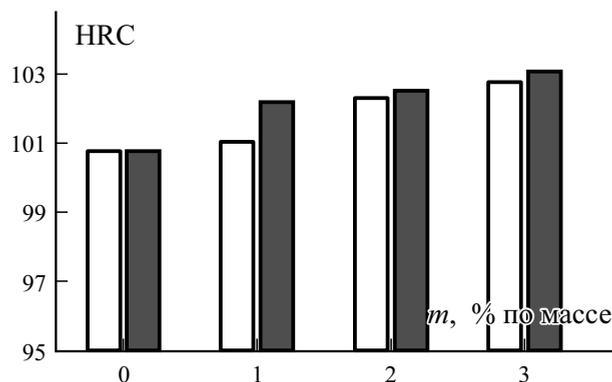


Рис. 9. Сравнение твердости нанокомпозитов по Роквеллу (HRC) от от массового содержания наночастиц  $Al_2O_3$  (□) и  $B_4C$  (■).

Из гистограммы видно, что твердость при введении в композит обоих типов наночастиц возрастала по мере увеличения их содержания. Наибольшее увеличение твердости в образцах с 3% по массе наночастиц составило 1,99% при введении  $Al_2O_3$  и 2,23% — при введении  $B_4C$ . Введение  $B_4C$  в большей степени повысило твердость нанокompозита. В [48] также показали, что введение в эпоксидные стеклопластики наночастиц  $Al_2O_3$  повышает их твердость по Шору с увеличением массового содержания наночастиц.

Если твердость используемых наночастиц высока, то твердость нанокompозитов возрастет с увеличением их содержания [49]. При этом чем выше твердость композитного материала, тем больше его сопротивление абразивному износу [50].

### Заключение

В настоящей работе изготовили эпоксидные стеклопластики, армированные наночастицами  $Al_2O_3$  и  $B_4C$ , и исследовали их поведение при испытаниях на удар по Шарпи и квазистатический сдвиг пуансоном. Основные результаты исследования можно резюмировать следующим образом.

- Данные по энергии, поглощенной при ударе Шарпи и КСИП, аналогичны. Это означает, что испытание на удар по Шарпи пригодно для предсказания того, могут ли результаты испытаний КСИП и баллистического удара быть позитивными.
- Максимальное увеличение прочности наностеклопластика на срез наблюдали при добавлении 1% по массе частиц  $Al_2O_3$  (на 8,97%) и 1% по массе частиц  $B_4C$  (на 6,09%)
- Добавление наночастиц  $Al_2O_3$  и  $B_4C$  не дало положительных результатов с точки зрения энергии, поглощенной эпоксидными наностеклопластками.
- Анализ кривых усилие вдавливания пуансона—перемещение показал, что добавление наночастиц уменьшило область повреждения нанокompозитов и, как результат, уменьшило количество поглощенной энергии в силу увеличения жесткости и уменьшения вязкости разрушения композита.
- Расслоение, выбивание пробки, разрыв и расщепление волокон, вспучивание и начало разрушения волокон происходили в силу действия нормальных напряжений, обусловленных изгибающим моментом.
- Введение наночастиц  $B_4C$  увеличило твердость композитов в большей степени, чем добавление наночастиц  $Al_2O_3$ . Введение наночастиц  $B_4C$  значительно увеличило хрупкость композитов и уменьшило расслоение между слоями и область повреждения волокон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Özen M., Demircan G., Kisa M., and Ilik Z.* Investigation of usability of waste textile fabrics in composites // *Emerg. Mater. Res.* — 2020. — Vol. 9, No. 1. — P. 1—6.
2. *Rajak D. K., Pagar D. D., Menezes P. L., and Linul E.* Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications // *Polymers.* — 2019. — Vol. 11, No. 10. — P. 1667.
3. *Shishevan F. A., Akbulut H., and Mohtadi-Bonab M. A.* Low velocity impact behavior of basalt fiber-reinforced polymer composites // *J. Mater. Eng. Perform.* — 2017. — Vol. 26, No. 6. — P. 2890—2900.
4. *Lai W. L., Saeedipour H., and Goh K. L.* Mechanical properties of low-velocity impact damaged carbon fibre reinforced polymer laminates: Effects of drilling holes for resin-injection repair // *Compos. Struct.* — 2020. — Vol. 235. — P. 111806.
5. *Liu J., Liu H., Kaboglu C., Kong X., Ding Y., Chai H., Blackman B. R. K., Kinloch A. J., and Dear J. P.* The impact performance of woven-fabric thermoplastic and thermoset composites subjected to high-velocity soft- and hard-impact loading // *Appl. Compos. Mater.* — 2019. — Vol. 26, Nos. 5—6. — P. 1389—1410.
6. *Shimamoto A., Kubota R., and Takayama K.* High-velocity impact characteristic of carbon fiber reinforced plastic composite at low temperature // *J. Strain Anal. Eng. Des.* — 2012. — Vol. 47, No. 7. — P. 471—479.
7. *Domun N., Kaboglu C., Paton K. R., Dear J. P., Liu J., Blackman B. R. K., Liaghat G., and Hadavinia H.* Ballistic impact behaviour of glass fibre reinforced polymer composite with 1D/2D nanomodified epoxy matrices // *Composites: Part B.* — 2019. — Vol. 167. — P. 497—506.
8. *Naveen J., Jawaid M., Zainudin E. S., Sultan M. T. H., and Yahaya R.* Evaluation of ballistic performance of hybrid kevlar®/cocos nucifera sheath reinforced epoxy composites // *J. Text. Inst.* — 2019. — Vol. 110, No. 8. — P. 1179—1189.
9. *Li Y., Zhang W., Yang Z., Zhang J., and Tao S.* Low-velocity impact damage characterization of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) using infrared thermography // *Infrared Phys. Technol.* — 2016. — Vol. 76. — P. 91—102.
10. *Margem J. I., Margem F. M., Margem M. R., Gomes V. A., and Monteiro S. N.* Charpy impact tests in epoxy matrix composites reinforced with malva fibers // *Proc. The Minerals, Metals & Materials Society (eds) TMS 2014: 143rd Annual Meeting & Exhibition, 2014.* — P. 425—432.
11. *Wagner P.* The dynamics of impact on composite structures // *Key Eng. Mater.* — 1997. — Vol. 141. — P. 671—694.
12. *Abteu M. A., Boussu F., Bruniaux P., Loghin C., and Cristian I.* Ballistic impact mechanisms. A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses // *Compos. Struct.* — 2019. — Vol. 223. — P. 110966.
13. *Shahkarami A., Cepus E., Vaziri R. V., and Poursartip A.* Material Responses to Ballistic Impact, Lightweight Ballistic Composites. — N. Y.: Woodhead Publishing, USA, 2006. — P. 72—100.
14. *Sun C. T. and Potti S. V.* A simple model to predict residual velocities of thick composite laminates subjected to high velocity impact // *Int. J. Impact Eng.* — 1996. — Vol. 18, No. 3. — P. 339—353.
15. *Gama B. A. and Gillespie J. W.* Punch shear based penetration model of ballistic impact of thick-section composites // *Compos. Struct.* — 2008. — Vol. 86, No. 4. — P. 356—369.

16. *Jordan J. B., Naito C. J., and Haque B. Z.* Quasi-static, low-velocity impact and ballistic impact behavior of plain weave E-glass/Phenolic Composites // *J. Compos. Mater.* — 2014. — Vol. 48, No. 20. — P. 2505—2516.

17. *Gu B. and Ding X.* A refined quasi-microstructure model for finite element analysis of three-dimensional braided composites under ballistic penetration // *J. Compos. Mater.* — 2005. — Vol. 39, No. 8. — P. 685—710.

18. *Jenq S. T., Jing H. S., and Chung C.* Predicting the ballistic limit for plain woven glass/epoxy composite laminate // *Int. J. Impact Eng.* — 1994. — Vol. 15, No. 4. — P. 451—464.

19. *Goldsmith W., Dharan C. K. H., and Chang H.* Quasi-static and ballistic perforation of carbon fiber laminates // *Int. J. Solids Struct.* — 1995. — Vol. 32, No. 1. — P. 89—103.

20. *Lin C. and Fatt M. S. H.* Perforation of composite plates and sandwich panels under quasi-static and projectile loading // *J. Compos. Mater.* — 2006— Vol. 40, No. 20. — P. 1801—1840.

21. *Nagai M. and Miyairi H.* The study on Charpy impact testing method of CFRP // *Adv. Compos. Mater.* — 1994. — Vol. 3, No. 3. — P. 177—190.

22. *Simeoli G., Sorrentino L., Touchard F., Mellier D., Oliviero M., and Russo P.* Comparison of falling dart and charpy impacts performances of compatibilized and not compatibilized polypropylene/woven glass fibres composites // *Composites: Part B.* — 2019. — Vol. 165. — P. 102—108.

23. *Pereira A. C., Monteiro S. N., de Assis F. S., Margem F. M., da Luz F. S., and Braga F. de O.* Charpy impact tenacity of epoxy matrix composites reinforced with aligned jute fibers // *J. Mater. Res. Technol.* — 2017. — Vol. 6, No. 4. — P. 312—316.

24. *Glória G. O., Margem F. M., Ribeiro C. G. D., de Moraes Y. M., da Cruz R. B., Silva F. de A., and Monteiro S. N.* Charpy impact tests of epoxy composites reinforced with giant bamboo fibers // *Mater. Res.* — 2015. — Vol. 18. — P. 178—184.

25. *Andrew J. J., Srinivasan S. M., Arockiarajan A., and Dhakal H. N.* Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review // *Compos. Struct.* — 2019. — Vol. 224. — P. 111007.

26. *Rahman N. A., Hassan A., Yahya R., and Lafia-Araga R. A.* Impact properties of glass-fiber/polypropylene composites: The influence of fiber loading, specimen geometry and test temperature // *Fibers Polym.* — 2013. — Vol. 14, No. 11. — P. 1877—1885.

27. *Nascimento L. F. C., Monteiro S. N., Louro L. H. L., da Luz F. S., dos Santos J. L., Braga F. D. O., and Marçal R. L. S. B.* Charpy impact test of epoxy composites reinforced with untreated and mercerized mallow fibers // *J. Mater. Res. Technol.* — 2018. — Vol. 7, No. 4. — P. 520—527.

28. *Safi S., Zadhoush A., and Ahmadi M.* Flexural and Charpy impact behaviour of epoxy/glass fabric treated by nano-SiO<sub>2</sub> and silane blend // *Plast. Rubber Compos.* — 2017. — Vol. 46, No. 7. — P. 314—321.

29. *Mohanty A. and Srivastava V. K.* Effect of alumina nanoparticles on the enhancement of impact and flexural properties of the short glass/carbon fiber reinforced epoxy based composites // *Fibers Polym.* — 2015. — Vol. 16, No. 1. — P. 188—195.

30. *Bozkurt Ö. Y., Özbek Ö., and Abdo A. R.* The effects of nanosilica on Charpy impact behavior of glass/epoxy fiber reinforced composite laminates // *Period. Eng. Nat. Sci.* — 2017. — Vol. 5, No. 3. — P. 322—327.

31. *Afrouzian A., Aleni H. M., Liaghat G., and Ahmadi H.* Effect of nano-particles on the tensile, flexural and perforation properties of the glass/epoxy composites // *J. Reinf. Plast. Compos.* — 2017. — Vol. 36, No. 12. — P. 900—916.

32. *Pol M. H. and Liaghat G. H.* Studies on the mechanical properties of composites reinforced with nanoparticles // *Polym. Compos.* — 2017. — Vol. 38, No. 1. — P. 205—212.
33. *Halder S., Ghosh P. K., Goyat M. S., and Ray S.* Ultrasonic dual mode mixing and its effect on tensile properties of SiO<sub>2</sub>-epoxy nanocomposite // *J. Adhes. Sci. Technol.* — 2013. — Vol. 27, No. 2. — P. 111—124.
34. *Ghosh P. K., Kumar K., and Chaudhary N.* Influence of ultrasonic dual mixing on thermal and tensile properties of MWCNTs-epoxy composite // *Composites: Part B.* — 2015. — Vol. 77. — P. 139—144.
35. ASTM D6264 / D6264M-17, Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite to a Concentrated Quasi-Static Indentation Force, ASTM Int., West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org
36. *Yahaya R., Sapuan S. M., Jawaid M., Leman Z., and Zainudin E. S.* Quasi-static penetration and ballistic properties of kenaf-aramid hybrid composites // *Mater. Des.* — 2014. — Vol. 63. — P. 775—782.
37. *Sun Y., Burgueño R., Wang W., and Lee I.* Modeling and simulation of the quasi-static compressive behavior of Al/Cu hybrid open-cell foams // *Int. J. Solids Struct.* — 2015. — Vol. 54. — P. 135—146.
38. *Rossoll A., Berdin C., Forget P., Prioul C., and Marini B.* Mechanical aspects of the Charpy impact test // *Nucl. Eng. Des.* — 1999. — Vol. 188, No. 2. — P. 217—229.
39. EN ISO 179-1, *Plastics—Determination of Charpy impact properties, Part 1: Non-instrumented impact test*, 2010.
40. *Mansor M. R., Mustafa Z., Fadzullah S. H. S. M., Omar G., Salim M. A., and Akop M. Z.* Recent advances in polyethylene-based biocomposites // *Natural Fibre Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites.* — N. Y.: Woodhead Publishing, 2018. — P. 71—96.
41. *Xiao J. R., Gama B. A., and Gillespie J. W.* Progressive damage and delamination in plain weave S-2 glass/SC-15 composites under quasi-static punch-shear loading // *Compos. Struct.* — 2007. — Vol. 78, No. 2. — P. 182—196.
42. *Fernandes A. J. G., de Amorim Jr. W. F., Filho W. B., Guedes I. P., Silva A. L., and Porto W. L.* Behavior of fiberglass polymer composites under ballistic impact and quasi-static punch shear tests // *Mater. Sci. Forum.* — 2016. — Vol. 881. — P. 300—306.
43. *Fathy A., Shaker A., Hamid M. A., and Megahed A. A.* The effects of nano-silica/nano-alumina on fatigue behavior of glass fiber-reinforced epoxy composites // *J. Compos. Mater.* — 2017. — Vol. 51. — P. 1667—1679.
44. *Bulut M., Erklığ A., and Yeter E.* Hybridization effects on quasi-static penetration resistance in fiber reinforced hybrid composite laminates // *Composites: Part B.* — 2016. — Vol. 98. — P. 9—22.
45. *Öksüz K. E. and Şahin Y.* Microstructure and hardness characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>4</sub>C particle-reinforced Cu matrix composites // *Acta Phys. Pol., A.* — 2016. — Vol. 129, No. 4. — P. 650—652.
46. *Rosato D. and Rosato D.* Design Parameter, *Plastics Engineered Product Design.* — N. Y.: Elsevier, USA, 2003. — P. 161—197.
47. *Demircan G., Kisa M., Ozen M., and Aktas B.* Surface-modified alumina nanoparticles-filled aramid fiber-reinforced epoxy nanocomposites: Preparation and mechanical properties // *Iran. Polym. J.* — 2020. — Vol. 29, No. 3. — P. 253—264.
48. *Abdul-Hussein A. B., Hashim F. A., and Kadhim T. R.* Effect of nano powder on mechanical and physical properties of glass fiber reinforced epoxy composite // *Al-Khwarizmi Eng. J.* — 2016. — Vol. 12, No. 3. — P. 72—79.

49. *Megahed A. A., Agwa M. A., and Megahed M.* Improvement of hardness and wear resistance of glass fiber-reinforced epoxy composites by the incorporation of silica/carbon hybrid nanofillers // *Polym. Plast. Technol. Eng.* — 2018. — Vol. 57, No. 4. — P. 251—259.

50. *Agarwal G., Patnaik A., and Sharma R. K.* Thermo-mechanical properties and abrasive wear behavior of silicon carbide filled woven glass fiber composites // *Silicon.* — 2014. — Vol. 6, No. 3. — P. 155—168.

Поступила в редакцию 25.09.2020

Окончательный вариант поступил 29.12.2020

Received Sept. 25, 2020 (Dec. 29, 2020)

---