

Received: 28.07.2024

Revised: 03.12.2024

Accepted: 06.12.2024



DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.170-183


## COMPARING THE MECHANICAL PROPERTIES OF RUBBER-DOPED CARBON-FIBER-REINFORCED PLASTICS PRODUCED BY VACUUM INFUSION AND COMPRESSION MOLDING

A. A. Filippov<sup>1, 2, a, \*</sup>, Yu. D. Karnaukhov<sup>2, b</sup>, E. A. Lutoshkin<sup>2, c</sup>, M. A. Yadrenkin<sup>2, d</sup>,  
V. M. Losev<sup>2, e</sup>, and M. R. Sukhova<sup>1, f</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*


<sup>2</sup>*Tekhnoresurs LLC, 16 Inzhenernaya St., Novosibirsk, 630090, Russia*



<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-1145-6356>  [filippov@itam.nsc.ru](mailto:filippov@itam.nsc.ru);

<sup>b</sup>  [pegasina92@gmail.com](mailto:pegasina92@gmail.com);

<sup>c</sup>  [grenich@me.com](mailto:grenich@me.com);

<sup>d</sup>  [yadrenkin@itam.nsc.ru](mailto:yadrenkin@itam.nsc.ru);

<sup>e</sup>  [losevvm@gmail.com](mailto:losevvm@gmail.com);

<sup>f</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0896-3090>  [murxus99@gmail.com](mailto:murxus99@gmail.com)

\*Corresponding author. Email: [filippov@itam.nsc.ru](mailto:filippov@itam.nsc.ru)

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia  
Tel.: +7 (343) 362-3029

The paper studies the microstructure and mechanical properties of composite materials produced by vacuum infusion and prepreg compression molding for a given specimen geometry with the addition of layers of vulcanized rubber sheet. Compared to the composites produced by vacuum infusion, those produced by compression molding have a twice as high bending elastic modulus and 1.8 times as high strength. It has been found that the use of rubber layers allows one to control the mechanical properties of the composite, namely to reduce the elastic modulus significantly, with an insignificant decrease in the strength parameters. It was possible to reduce the modulus by a factor of 5.5 for the composites produced by vacuum infusion, and by a factor of 4 for those produced by compression molding. The ultimate strength was halved for both technologies.

**Keywords:** carbon-fiber-reinforced plastic, mechanical properties, vacuum infusion, prepreg compression molding

### Acknowledgment

*The work was performed under to state assignment from the Russian Ministry of Science and Higher Education, theme No 124070500003-6. The equipment from the Plastometriya shared research facilities was used in the study.*

### References

1. Kopyrin, M.M., Markov, A.E., Dyakonov, A.A., Tuisov, A.G., Okhlopkova, A.A., Kychkin, A.K., and Lazareva, N.N. Investigation of butadiene-elastomer-based high modulus materials reinforced by basalt, glass, and carbon fabrics. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2022, 3, 6–12. DOI: 10.17804/2410-9908.2022.3.006-012. Available at: [http://dream-journal.org/issues/2022-3/2022-3\\_366.html](http://dream-journal.org/issues/2022-3/2022-3_366.html)

2. Bokhoeva, L.A., Baldanov, A.B., and Rogov, V.E. The features of interlayer fracture of composite materials with a variable layup angle under impact loading. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2024, 2, 50–60. DOI: 10.17804/2410-9908.2024.2.050-060. Available at: [http://dream-journal.org/issues/2024-2/2024-2\\_444.html](http://dream-journal.org/issues/2024-2/2024-2_444.html)
3. Ali, S.M. and Mahmood, S.S. Design and manufacturing of a low-cost prosthetic foot. *Ingeniería e Investigación*, 2023, 43 (3), 1–11. DOI: 10.15446/ing.investig.98916.
4. Pham, H.T., Nguyen, V.-K., and Mai, V.T. Shape optimization and fabrication of a parametric curved-segment prosthetic foot for amputee. *Tap chí Khoa học & Công nghệ*, 2014, 102, 089–095.
5. Hernández-Lara, D., Rodríguez-Cañizo, R.G., Merchán-Cruz, E.A., Santiago-Miguel, Á.M., Juárez-Velázquez, E.T., and Trejo-Villanueva, C.A. Optimal design of a foot prosthesis insole with composite materials applying metaheuristic algorithms. *Results in Engineering*, 2022, 13, 100322. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100322.
6. Arunkumar, S., Mahesh, S., Rahul, M., Ganesh, N., and Maheshwaran, K.J. Design and analysis of lower limb exoskeleton with external payload. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2023, 17, 2055–2072. DOI: 10.1007/s12008-023-01272-1.
7. Mason, Z.D, Pearlman, J., Cooper, R.A., and Laferrier, J.Z. Comparison of prosthetic feet prescribed to active individuals using ISO standards. *Prosthetics and Orthotics International*, 2011, 35 (4), 418–424. DOI: 10.1177/0309364611421692.
8. Elgamsy, R., Awad, M.I., Ramadan, N., Amer, A., Osama, Y., El-hilaly, R., and Elsabbagh, A. Localization of composite prosthetic feet: manufacturing processes and production guidelines. *Scientific Reports*, 2023, 13, 17421. DOI: 10.1038/s41598-023-44008-7.
9. Sehar, B., Waris, A., Gilani, S.O., Ansari, U., Mushtaq, S., Khan, N.B., Jameel, M., Khan, M.I., Bafakeeh, O.T., and Tag Eldin, E.M. The impact of laminations on the mechanical strength of carbon-fiber composites for prosthetic foot fabrication. *Crystals*, 2022, 12 (10), 1429. DOI: 10.3390/cryst12101429.
10. Vijayan, V., Kumar, S.A., Gautham, S., Masthan, M.M., and Piraichudan, N. Design and analysis of prosthetic foot using additive manufacturing technique. In: *Materials Today Proceedings*, 2020, 37 (8). DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.195.
11. Oleiwi, J.K., Hamad, Q.A., and Abdulrahman, S.A. Flexural, impact and max. shear stress properties of fibers composite for prosthetic socket. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56 (5), 3121–3128. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.368.
12. Leopaldi, M., Brugo, T.M., Tabucol, J., and Zucchelli, A. Parametric design of an advanced multi-axial energy-storing-and-releasing ankle-foot prosthesis. *Prosthesis*, 2024, 6 (4), 726–743. DOI: 10.3390/prosthesis6040051.
13. Talla, H.K., Oleiwi, J.K., and Hassan, A.K.F. Performance of athletic prosthetic feet made of various composite materials with PMMA matrix: numerical and theoretical study. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés—Journal of Composite and Advanced Materials*, 2021, 31 (4), 257–264. DOI: 10.18280/rcma.310410.
14. Warder, H.H., Fairley, J.K., Coutts, J., Glisson, R.R., and Gall, K. Examining the viability of carbon fiber reinforced three-dimensionally printed prosthetic feet created by composite filament fabrication. *Prosthetics and Orthotics International*, 2018, 42 (6), 644–651. DOI: 10.1177/0309364618785726.
15. Beck, O.N., Taboga, P., and Grabowski, A.M. Characterizing the mechanical properties of running-specific prostheses. *PLOS One*, 2016, 11 (12), e0168298. DOI: 10.1371/journal.pone.0168298.
16. Oleiwi, J.K. and Hadi, A.N. Properties of materials and models of prosthetic feet: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1094, 012151. DOI: 10.1088/1757-899X/1094/1/012151.

Подана в журнал: 28.07.2024

УДК 678



DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.170-183


## СРАВНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ С ДОБАВЛЕНИЕМ РЕЗИНЫ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИЯМ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ И ПРЯМОГО ПРЕССОВАНИЯ

А. А. Филиппов<sup>1, 2, а, \*</sup>, Ю. Д. Карнауков<sup>2, б</sup>, Е. А. Лутошкин<sup>2, в</sup>, М. А. Ядренкин<sup>2, г</sup>,  
В. М. Лосев<sup>2, д</sup>, М. Р. Сухова<sup>1, е</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

<sup>2</sup>ООО «Техноресурс», ул. Инженерная, 16, г. Новосибирск, 630090, Россия



<sup>а</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-1145-6356>  [filippov@itam.nsc.ru](mailto:filippov@itam.nsc.ru);

<sup>б</sup>  [pegasina92@gmail.com](mailto:pegasina92@gmail.com);

<sup>в</sup>  [grenich@me.com](mailto:grenich@me.com);

<sup>г</sup>  [yadrenkin@itam.nsc.ru](mailto:yadrenkin@itam.nsc.ru);

<sup>д</sup>  [losevvm@gmail.com](mailto:losevvm@gmail.com);

<sup>е</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0896-3090>  [murxus99@gmail.com](mailto:murxus99@gmail.com)

\*Ответственный автор. Электронная почта: [filippov@itam.nsc.ru](mailto:filippov@itam.nsc.ru)

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

Тел.: +7 (343) 362-30-29

В настоящей работе рассматриваются микроструктура и механические свойства композитных материалов, полученных по технологиям вакуумной инфузии и прямого прессования препрега, для заданной геометрии образца с добавлением слоев вулканизированного резинового полотна. Композиты, полученные методом прямого прессования, имеют в 2 раза больший модуль упругости при изгибе и в 1,8 раза большую прочность, чем образцы, полученные с помощью вакуумной инфузии. Установлено, что использование резиновых слоев позволяет управлять механическими свойствами композита – значительно снижать модуль упругости при незначительном снижении прочностных показателей. Для композитов, полученных по технологии вакуумной инфузии, удалось снизить модуль в 5,5 раз, а для образцов, полученных методом прямого прессования, – в 4 раза. При использовании обеих технологий предел прочности был снижен в 2 раза.

**Ключевые слова:** углепластик, механические свойства, вакуумная инфузия, прямое прессование препрега

### 1. Введение

Углепластиковые композиционные материалы (композиты) имеют ряд преимуществ, которые делают их привлекательными для использования в авиационной, автомобильной, строительной, спортивной и других отраслях промышленности [1, 2]. В частности, они обладают высокой прочностью и жесткостью при небольшом весе, обеспечивая широкие возможности проектирования легких, но прочных конструкций. Углепластиковые композиты имеют долгий срок службы и могут выдерживать длительные периоды эксплуатации без потери механических свойств. Одним из развивающихся направлений применения углепластиковых материалов является разработка и создание различных биомедицинских устройств: протезов и ортезов конечностей [3–5], элементов экзоскелетов [6] и др. В таких устройствах

увеличение веса конструкции существенно влияет на мобильность и процесс восстановления пациентов. Кроме того, такие конструкции, помимо упругих и прочностных показателей, должны обеспечивать запас необходимой упругой энергии при движении для различных уровней активности [7] и степеней ампутации пациента [8]. Использование углепластиковых композитов для изготовления протезов стоп широко применяется в настоящее время ведущими производителями таких изделий [7, 9]. В настоящее время совершенствуются геометрия протеза [10], используемые материалы [11] и технологии изготовления [8] для управления ключевыми физико-механическими свойствами протезов. Согласно классификации различных производителей протезов нижних конечностей, выделяют традиционные протезы (conventional foot, CF), протезы, позволяющие запасать и высвобождать энергию при движении (energy-storing-and-releasing, ESR), протезы с микроконтроллером, позволяющие поддерживать равновесие, и бионические протезы, позволяющие давать энергию при движении.

Настоящая работа направлена на экспериментальное определение механических свойств материалов, потенциально применимых в конструкциях протезов функциональных (ESR) стоп. Выбор технологии производства углепластиковых материалов, раскладки компонентов в объеме существенно влияет на упруго-прочностные свойства протезов [12]. Так, например, в работе [13] проведено численное моделирование процесса нагружения протеза стопы постоянной геометрии и показано, что наиболее подходящими материалами с точки зрения обеспечения необходимого прогиба, прочности и жесткости является сочетание полиметилметакрилатной матрицы, армированной стекловолокном. В работе [14] для изготовления протезов стопы использована технология 3D-печати CFF (экструзии пластика с волокном), а в качестве материала – нейлон с различным содержанием армирующего элемента – углеволокна. Большинство мировых производителей ESR-протезов стоп используют полимерные композиционные материалы, изготавливаемые по технологиям вакуумной инфузии и прямого прессования из препрега, применяемым для среднесерийного производства материалов [15]. Выбор данных технологий получения обусловлен в первую очередь минимизацией внутренних полостей по сравнению с традиционными методами выкладки и формования. Однако, сравнение механических свойств и микроструктуры сэндвич-конструкций для протезов, полученных по технологиям вакуумной инфузии и прямого прессования, в полной мере произведено не было, что не позволяет оценить перспективы применения данных технологий для производства углепластиковых протезов стоп. Раскладка слоев и добавление различных наполнителей или модифицирующих материалов позволяют обеспечить управление ключевыми упруго-прочностными механическими свойствами. Зачастую данная проблема решается созданием систем сложной геометрии или добавлением более гибких материалов. Так, например, в работах [4, 5, 13] представлены алгоритмы подбора количества и направления укладки слоев при изначально сформулированных нагрузках и перемещениях для данной конструкции. Однако в представленных работах не произведено сравнение различных технологий изготовления. Другим подходом является введение других армирующих элементов кроме углеволокна: стеклоткани [13], армирующих частиц и резиновых вставок [16], джутового волокна [11] и др. В настоящей работе рассмотрены конструкции, обеспечивающие в первую очередь прочность на изгиб, т. е. конструкции с ориентацией углеродного волокна по линии изгиба. Целью работы является определение механических свойств углепластиковых композитов для заданной толщины образцов, полученных по технологиям вакуумной инфузии и горячего прессования препрега, предназначенных для использования в конструкциях протезов ESR-стоп.

## 2. Технологии получения композитных материалов

В работе рассматривалось 4 типа композиционных материалов, перспективных для применения в изделиях биомедицинского назначения. Верхняя и нижняя часть композитов

покрыта углетканью саржевого переплетения для обеспечения целостности конструкции при сдвиговых нагрузках. Большая часть композиционного материала составлена из листов однонаправленной углеткани плотностью около 300–320 г/м<sup>2</sup> для обеспечения жесткости и прочности конструкции при изгибных нагрузках. Характеристики используемой углеткани были подобраны из свойственных распространенным и широкодоступным углетканям по удельной плотности ~300 г/м<sup>2</sup>. Они приведены в табл. 1. Количество слоев для каждого материала изначально подобрано таким образом, чтобы конечная толщина композиционного материала составила около 4 мм – толщина стандартных образцов при испытаниях на трехточечный изгиб согласно ГОСТ Р 56810-2015. Схема укладки волокна/препрега для каждого типа материала указана на рис. 2. Стоит отметить, что для обеспечения требуемой толщины материала при прессовании потребовалось увеличить число слоев препрега.

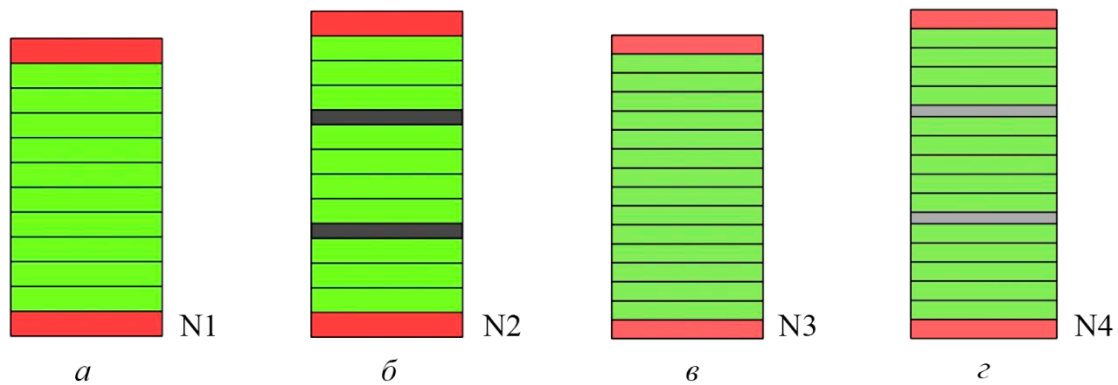


Рис. 1. Схема укладки слоев углеткани и вулканизированной резины в структуре изготавливаемых композитов, полученных с помощью вакуумной инфузии (а, б) и методом прямого прессования из препрега (в, г): зеленый цвет – однонаправленная углеткань, красный – саржевая углеткань, серый – слой вулканизированной резины

Композиционные материалы N1, N2 получены методом вакуумной инфузии (рис. 1 а, б), материалы N3, N4 – прямым прессованием препрега (рис. 1 в, г). В качестве связующих использованы термореактивные эпоксидные смолы, применяемые для технологий вакуумной инфузии и прямого прессования препрега, близкие по механическим характеристикам после полимеризации (табл. 2).

Таблица 1

Характеристики используемой углеткани

№ п/п	Тип материала	№ серии композиционного материала	Плотность г/м <sup>2</sup>	Количество ниток в жгуте	Наименование	Угол укладки
1.	Углеткань саржа	N1, N2	240	3К	T300.TW240	0°/90°
2.	Однонаправленная углеткань	N1, N2	320	12К	T700.UD320	0°
3.	Углеродный препрег саржа	N3, N4	400	12К	YZ-05. T700	0°/90°
4.	Углеродный однонаправленный препрег	N3, N4	300	12К	YZ-05. T700	0°

Два слоя вулканизированной резины толщиной 0,2 мм расположены внутри слоев однонаправленного волокна для материалов N2, N4. Использование тонких слоев вулканиро-

ванной резины в конструкции композиционного материала потенциально может позволить увеличить прогиб под нагрузкой, снизить локальные напряжения, возникающие в местах сжатия и сдвига эпоксидной смолы, снизить ударные нагрузки на материал. Процесс вакуумной инфузии (рис. 2 а) для материалов N1, N2 осуществлялся на закаленное стекло, покрытое разделительным составом для предотвращения адгезии смолы. На поверхность стекла, согласно схеме, слои углеткани выкладывали в матрицу с использованием спрей-клея временной фиксации в соответствии с размерами, количеством и направлением армирования. На слои углеткани укладывали технические слои (дренажная техническая ткань и дренажная сетка) поверх армирующего материала для обеспечения равномерной пропитки связующим. Весь набор слоев запечатывался в герметизирующую вакуумную пленку. Откачка воздуха и пропитка смолой осуществлялись через систему спиральных и вакуумных трубок ввода и откачки, установленных по периметру сборки. Пропитка связующим осуществлялась до достижения смолой емкости системы откачки (связующее 1 из табл. 2). Температурные параметры полимеризации представлены на рис. 3.

Таблица 2

Характеристики используемых связующих

№ п/п	Тип материала	№ серии композита	Плотность состава, г/м <sup>3</sup>	Вязкость при 25 °С, 10 <sup>-3</sup> Па·с	Наименование
1.	Эпоксидная смола: отвердитель (2:1)	N1, N2	1,13–1,14	850 (смола) 40 (отвердитель)	EPR320+ EPH943
2.	Связующее на основе эпоксидных смол	N3, N4	1,25	> 200000	YZ-05

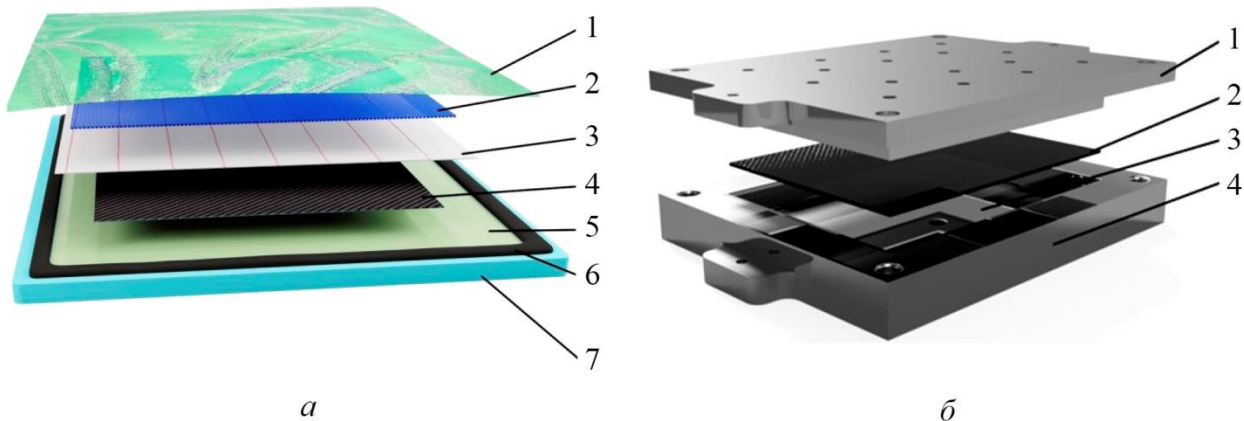


Рис. 2. Схема сборки пакетов углеволокна и дополнительных слоев для вакуумной инфузии (а): 1 – вакуумная пленка, 2 – дренажная сетка, 3 – техническая разделительная ткань, 4 – углеродная ткань, 5 – антиадгезив, 6 – герметизирующий жгут, 7 – оснастка; для прямого прессования (б): 1 – пуансон, 2 – углеродная ткань, 3 – антиадгезив, 4 – матрица

Материалы N3, N4 получены по технологии прямого прессования препрега. В подготовленную матрицу (матрица и пуансон выполнены из алюминиевого сплава Д16Т, покрыты разделительным составом) происходила укладка предварительно нарезанного препрега в со-

ответствии с количеством, направлением и размером слоев. После установки пуансона в матрицу производился монтаж сборки в гидравлическом термопрессе. Сборка прессовалась (усилие до 40 т) и полимеризовалась согласно диаграмме на рисунке 2 б. После полимеризации смолы происходил сьем сборки с матрицы и удаление облоя.

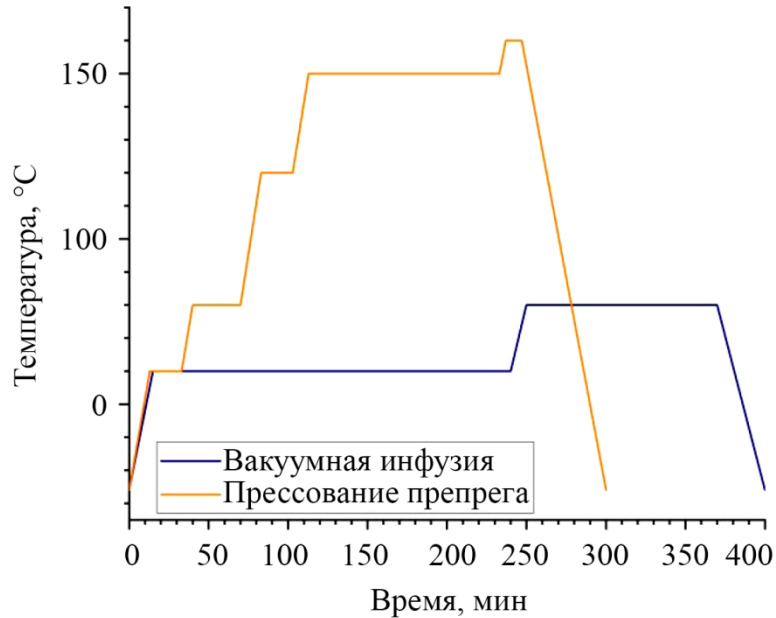


Рис. 3. Параметры отверждения подготовленных материалов для технологий вакуумной инфузии и прямого прессования

Таблица 3

Характерные размеры для каждого типа материалов

Номер серии	Толщина образца (пластины) $h$ , мм	Толщина одного слоя углеткани в образце, мм	Ширина образцов $b$ , мм	Толщина резинового слоя в образце	Расстояние между слоями резины
N1	$3,72 \pm 0,05$	$0,31 \pm 0,05$	$10,00 \pm 0,05$	-	-
N2	$4,18 \pm 0,05$	$0,32 \pm 0,05$	$10,00 \pm 0,05$	$0,17 \pm 0,05$	$1,25 \pm 0,05$
N3	$3,51 \pm 0,05$	$0,25 \pm 0,05$	$10,00 \pm 0,05$	-	-
N4	$3,87 \pm 0,05$	$0,25 \pm 0,05$	$10,00 \pm 0,05$	$0,16 \pm 0,05$	$1,19 \pm 0,05$

Полученные материалы представляли собой плоские пластины размером  $500 \times 255$  мм. Резка образцов размером  $10 \times 80$  мм из пластин производилась на фрезерном станке алмазной фрезой. Для каждого материала было вырезано по 10 образцов. Оценка толщины пластин, а также толщины слоев в пластине выполнялась с помощью сканирующего электронного микроскопа. Стоит отметить, что только образцы серии N2 достигли толщины в 4 мм. Для других серий необходимо добавление 1–2 слоев углеткани или препрега. Толщина полученных пластин указана в табл. 3, из которой видно, что толщина одного слоя при прессовании меньше, чем при вакуумной инфузии (0,25 мм и 0,31 мм соответственно). Поэтому, несмотря на большее число слоев углеткани в собранных пакетах для прессования, общая толщина образцов N3, N4 оказалась меньше, чем образцов N1, N2. По-видимому, прикладываемого давления прессования оказалось достаточно, чтобы смола вышла из слоев препрега при нагревании и дальнейшем прессовании. Таким образом, при близких парамет-

рах исходных компонентов (углеткань и эпоксидная смола) технология прямого прессования позволяет достичь большей плотности укладки углеткани в образце по сравнению с технологией вакуумной инфузии для плоских образцов рассматриваемых материалов. Однако стоит отметить, что технология прямого прессования требует больших энергетических затрат, прочных пресс-форм и не позволяет прессовать детали со сложной геометрией.

### 3. Структура

Оценка структуры полученных углепластиковых композитов проведена с помощью сканирующего электронного микроскопа на поперечном сечении рассматриваемых материалов для оценки размеров, геометрии укладки слоев и оценки дефектов и пор. Микроструктура полученных материалов существенно отличается из-за особенностей выбранной технологии. В образцах серий N1 и N2 практически отсутствуют поры, что свидетельствует о подходящих компонентах и применимости технологии инфузии, невозможно различить отдельные слои волокон, что свидетельствует о высоком качестве инфузии. Как видно из представленных рисунков микроструктуры (рис. 4 *а*), увеличение плотности укладки углеткани при вакуумной инфузии обеспечивается за счет сжатия пучков углочной ткани, скрепляющей однонаправленное волокно от распускания. Данные пучки сопоставимы по размеру и толщине слоя углеткани и изготовлены из полиэфирных нитей. В процессе вакуумной инфузии пучок уменьшается в толщине, а вокруг него формируются области толщиной около 200 мкм, длиной до 2–3 мм. В данных областях (рис. 4 *б*) отсутствуют углеродные волокна, а направление укладки волокон отлично от прямолинейного, что может привести к разрушению конструкции вдоль границы слоев.

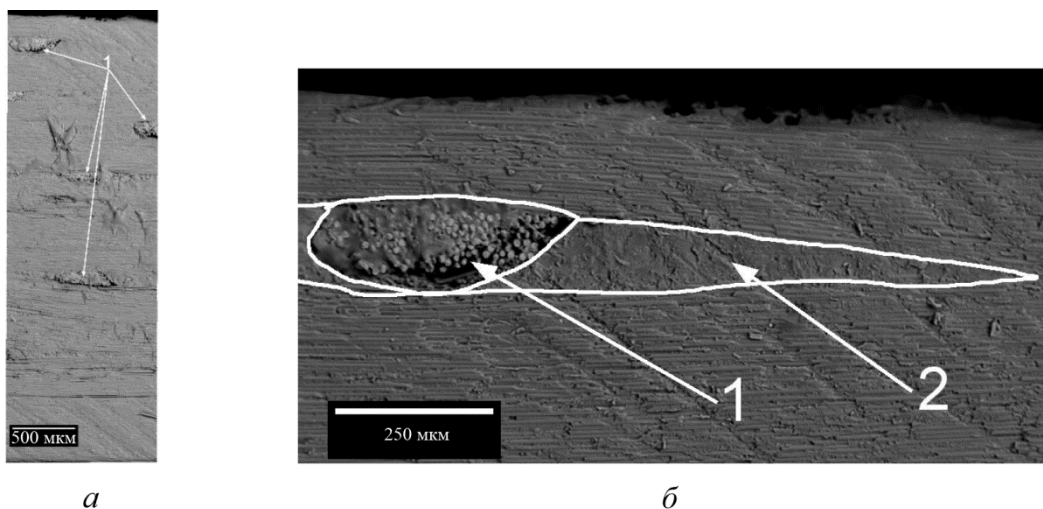


Рис. 4. Микроструктура образцов серии N1 при увеличении  $\times 250$  (*а*) и  $\times 500$  (*б*):  
1 – пучки углочной ткани, 2 – область без углеволокон

Для образцов, полученных по технологии прямого прессования, типы дефектов существенно отличаются (рис. 5 *а*). Исходные сформированные слои препрега имеют гладкую поверхность с локально образованными пузырями на поверхности. При прессовании слоев препрега формируются пористые области между слоями (рис. 5 *б*). Несмотря на то что размер пор составляет не более 5 мкм, общий объем пористых областей существенен и позволяет визуально определить количество слоев в конструкции. Направление углеволокон при данной технологии не изменяется и направлено строго вдоль длины образца.



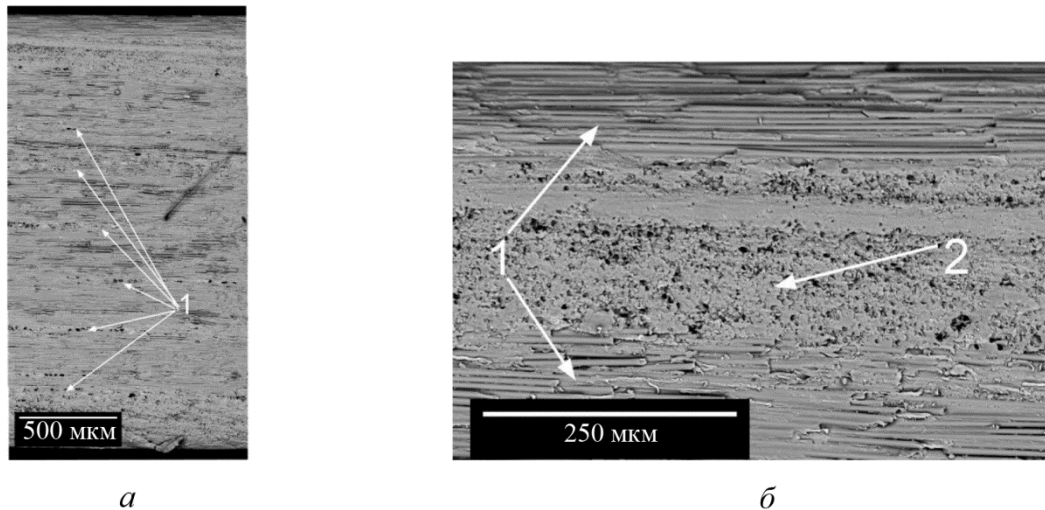


Рис. 5. Микроструктура образцов серии N3 при увеличении  $\times 250$  (а) и  $\times 500$  (б):  
1 – слои препрега, 2 – область без углеволокна

Для каждой из рассмотренных технологий и использованных типов связующих вулканизированная резина зафиксирована в структуре образцов без образования внутренних дефектов (рис. 6). Толщина слоев вулканизированной резины в структуре композиционных материалов практически не изменилась.

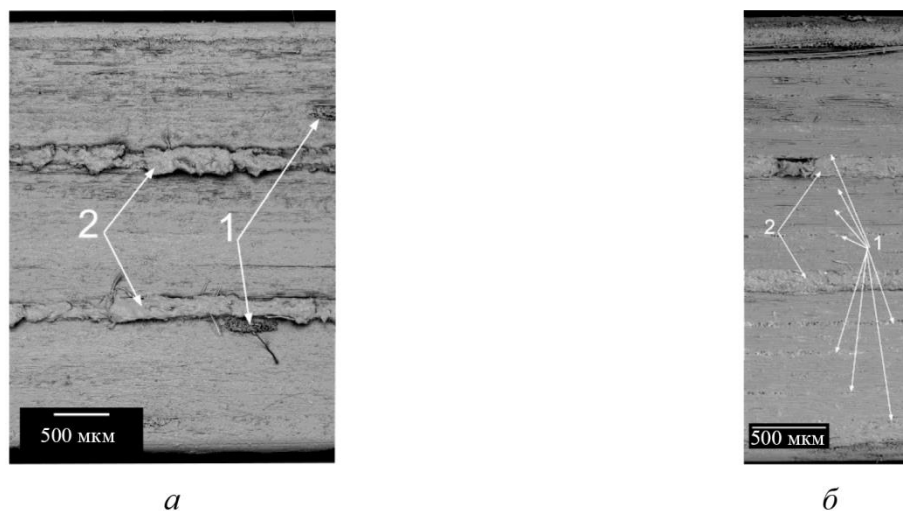


Рис. 6. Микроструктура образцов серий N2 (а) и N4 (б) при увеличении  $\times 250$ :  
1 – характерные внутренние дефекты, 2 – слои вулканизированной резины

#### 4. Механические испытания

Проведена серия испытаний на трехточечный изгиб на испытательной машине Zwick/Roell Z005 в соответствии со стандартом испытаний ГОСТ Р 56810-2015 для оценки модуля упругости, предела прочности и максимального прогиба образцов из композиционного углепластикового материала при 3-точечном изгибе (рис. 7). Длина пролета балки  $L$  составила 64 мм. Предварительная нагрузка во всех испытаниях была постоянной, 5 Н. Контроль нагружения осуществлялся по перемещению и составлял  $V = 1$  мм/мин.

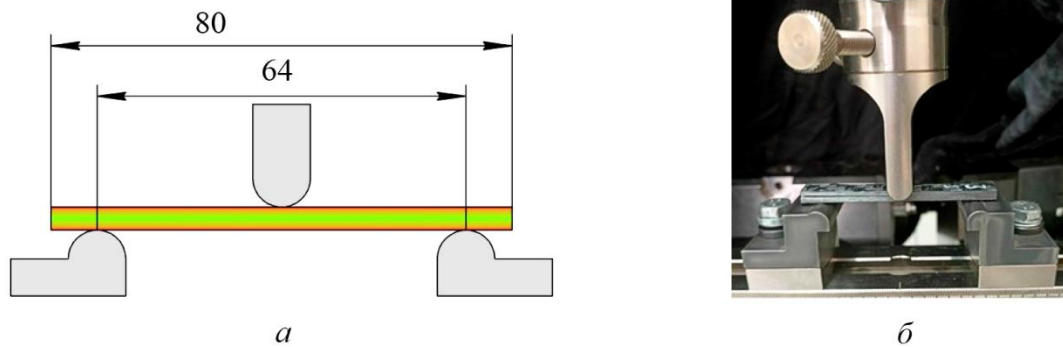


Рис. 7. Испытания на трехточечный изгиб образцов: схема испытания (а); испытанный образец с расслоением (б)

Для оценки механических параметров образцов были получены диаграммы нагрузки  $F$  от прогиба балки  $\omega$ . По диаграммам оценивалось максимальное усилие  $F_{\max}$  и прогиб  $\omega_{\max}$ . Угол наклона графиков  $m$  определялся на участке  $F_2 = 100$  Н,  $F_1 = 250$  Н. Напряжения  $\sigma_{II}^B$  и деформации в волокне  $\varepsilon_{II}$  при изгибе под нагрузкой оценивались по формулам:

$$\sigma_{II}^B = \frac{3FL}{2bh^2}, \quad \varepsilon_{II} = \frac{6\omega h}{L^2}.$$

Расчет модуля упругости  $E_{II}$  производился двумя способами: по тангенсу угла наклона графика,

$$E_{II}^n = \frac{L^3 m}{4bh^3},$$

и по методу хорды на участке  $F_2 = 100$  Н,  $F_1 = 250$  Н,

$$E_{II}^f = \frac{\sigma_{II2}^B - \sigma_{II1}^B}{\varepsilon_{II2} - \varepsilon_{II1}}.$$

Упругая энергия  $U$ , запасенная в материале, оценивалась как

$$U = \frac{\sigma_{II\max} \varepsilon_{II\max}}{2}.$$

#### 4.1. Образцы серии N1

Диаграмма зависимости прогиба образцов от прикладываемой нагрузки выглядела практически линейно вплоть до разрушения материала. Образцы хрупко разрушались: визуально наблюдалось расслаивание вдоль направления укладки волокна образца, однако образцы не теряли полностью свою жесткость. При повторном нагружении сломанного образца происходило повторное расслоение образца, однако максимальная прикладываемая нагрузка становилась существенно меньше (рис. 8 а). В результате нагружения модуль упругости снижался примерно в 2 раза, и снова наблюдалось разрушение (расслоение) материала. При третьем нагружении первого образца модуль упругости становился еще меньше. Таким образом установлено, что для данного типа материала при трехточечном изгибе происходит раз-

рушение эпоксидной смолы между слоями, по-видимому, из-за возникающих сдвиговых и растягивающих нагрузок.

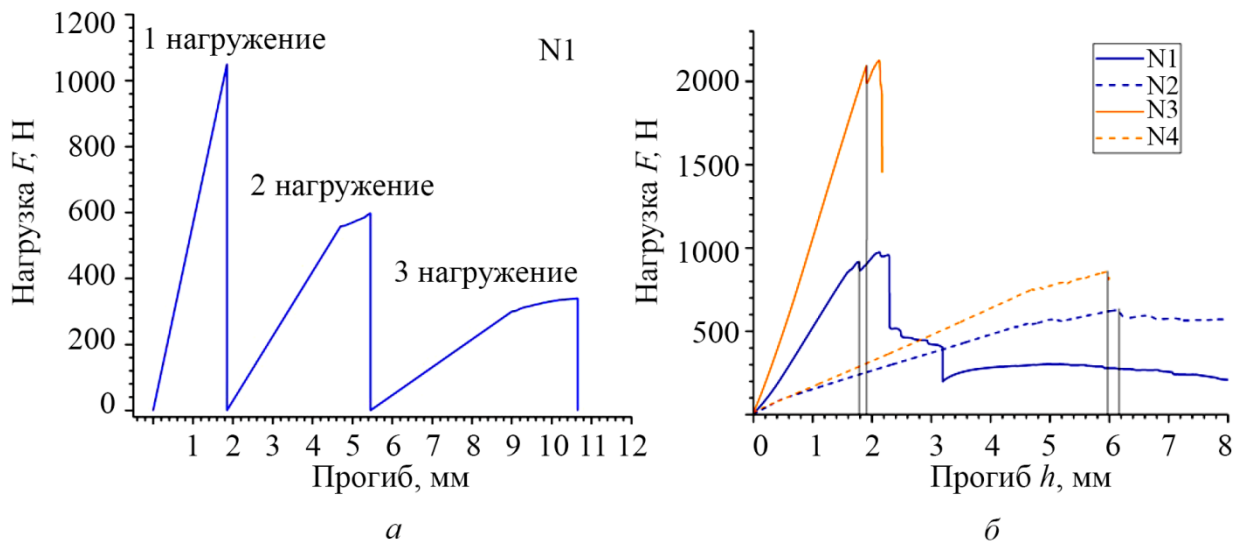


Рис. 8. Диаграммы «нагрузка – прогиб» для образцов серии N1–N4: повторное нагружение одного и того же образца серии N1 (а); сравнение характерных диаграмм для каждой из серий (б)

#### 4.2. Образцы серии N2

Для увеличения предельных сдвиговых деформаций в образце, а также для увеличения прогиба в образцах серии N2 использовались два слоя вулканизированной резины, обладающей большими величинами предельной деформации. При тех же параметрах испытания зависимости прогиба от усилия не выглядят линейно (рис. 8 б); кроме того, существенно уменьшилась величина предельной нагрузки, а прогиб, наоборот, значительно вырос. После разрушения образец продолжал сохранять остаточную жесткость. Повторное испытание образца не удалось завершить из-за значительных величин прогиба и изменения фактической длины пролета образца.

#### 4.3. Образцы серии N3

Полученные по данной технологии образцы отличались существенно большей жесткостью по сравнению с образцами углепластика, полученными по технологии инфузии. Графики (рис. 8 б) характеризовались высокой предельной нагрузкой и небольшим прогибом образцов. Деформирование образца происходило упруго, с разрушением образца вдоль направления укладки волокна (аналогично сериям N1, N2). Как и для серии образцов N1, расслоение образцов не приводило к полной потере жесткости.

#### 4.4. Образцы серии N4

График деформирования образцов материала N4 был близок к графикам для серии N2 (рис. 8 б), однако модуль упругости и предел прочности оказались выше, чем для серии N2. Данные механических свойств для каждого типа материалов сведены в табл. 4. Переход к технологии горячего прессования препрега дал прирост модуля Юнга в 2 раза по сравнению с технологией вакуумной инфузии, а предела прочности – на 90 %. Добавление слоев вулканизированной резины в структуру композита существенно снизило модуль упругости: в 5 раз для технологии инфузии и в 3 раза для технологии прессования из препрега. Предел

прочности снизился на 40 % для технологии инфузии и более чем в два раза для технологии прессования из препрега.

Таблица 4

Механические свойства полученных углепластиков

Материал\ характеристика	Макс. усилие	Предел прочности	Макс. деформация	Макс. прогиб	Упругая энергия	Модуль упругости при изгибе	Модуль упругости по хорде
	$F_{\max}$	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_{\max}$	$\omega_{\max}$	$U$	$E''_{II}$	$E_f$
	Н	МПа	%	мм	МДж	ГПа	ГПа
N1	923	622,4	0,972	2,04	3,1	73,52	27,35
N2	636	350,4	3,776	6,20	6,59	9,97	4,17
N3	2096	1562,0	0,983	2,05	8,03	157,47	55,27
N4	862	552,4	3,385	6,20	9,35	17,74	6,87

Полученные значения механических характеристик образцов при изгибе для всех серий образцов позволяют говорить о том, что варьированием рассматриваемых технологий производства и используемых компонентов возможно создавать протезы стоп с прочностью при изгибе от 500 до 1500 МПа. Прочность образцов и модуль упругости снижается в 2–3 раза и в 10 раз соответственно при добавлении слоев вулканизированной резины. С помощью использования вулканизированной резины удастся управлять модулем упругости материала, увеличивая его почти в 10 раз, практически без изменения массы конструкции, однако с потерей прочности в 2–3 раза. Максимальная деформация практически не зависела от способа получения композитного материала: около 1 % для композитов без использования вулканизированной резины и около 3,5 % – с использованием. Использование слоев вулканизированной резины в совокупности дало прирост упругой энергии деформации, что может быть успешно использовано для конструкций ESR-протезов.

## 5. Заключение

В работе проведен сравнительный анализ механических свойств слоистых материалов на основе эпоксидной смолы и углеткани, полученных методами вакуумной инфузии и прямого прессования препрега. Для рассматриваемых материалов характерны определенные дефекты, связанные прежде всего с технологией получения. Для образцов одинакового размера предел прочности и модуль упругости больше в 2,5 и 2,1 раза соответственно при прямом прессовании препрега. Обнаружено, что разрушение рассматриваемых материалов происходит на границе слоев углеткани из-за больших сдвиговых напряжений в связующем. Использование слоев вулканизированной резины позволяет существенно снизить сдвиговые напряжения и между слоями углеткани, существенно увеличив деформацию до разрушения. Рассматриваемые компоненты и технологии позволяют управлять упруго-прочностными характеристиками композиционного материала в широком диапазоне жесткости и прочности, что может быть перспективно в индивидуальных биомеханических изделиях.

## Благодарность

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме № 124070500003-6. При проведении исследований использовано оборудование ЦКП «Пластометрия».*

## Литература

1. Investigation of butadiene-elastomer-based high modulus materials reinforced by basalt, glass, and carbon fabrics / M. M. Kopyrin, A. E. Markov, A. A. Dyakonov, A. G. Tuisov, A. A. Okhlopkova, A. K. Kychkin, N. N. Lazareva // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2022. – Iss. 3. – P. 6–12. – DOI: 10.17804/2410-9908.2022.3.006-012. – URL: [http://dream-journal.org/issues/2022-3/2022-3\\_366.html](http://dream-journal.org/issues/2022-3/2022-3_366.html)
2. Bokhoeva L. A., Baldanov A. B., Rogov V. E. The features of interlayer fracture of composite materials with a variable layup angle under impact loading // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2024. – Iss. 2. – P. 50–60. – DOI: 10.17804/2410-9908.2024.2.050-060. – URL: [http://dream-journal.org/issues/2024-2/2024-2\\_444.html](http://dream-journal.org/issues/2024-2/2024-2_444.html)
3. Ali S. M., Mahmood S. S. Design and manufacturing of a low-cost prosthetic foot // *Ingeniería e Investigación*. – 2023. – Vol. 43 (3). – P. 1–11. – DOI: 10.15446/ing.investig.98916.
4. Pham H. T., Nguyen V.-K., Mai V. T. Shape optimization and fabrication of a parametric curved-segment prosthetic foot for amputee // *Tạp chí Khoa học & Công nghệ*. – 2014. – Vol. 102. – P. 089–095.
5. Optimal design of a foot prosthesis insole with composite materials applying metaheuristic algorithms / D. Hernández-Lara, R. G. Rodríguez-Cañizo, E. A. Merchán-Cruz, Á. M. Santiago-Miguel, E. T. Juárez-Velázquez, C. A. Trejo-Villanueva // *Results in Engineering*. – 2022. – Vol. 13. – P. 100322. – DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100322.
6. Design and analysis of lower limb exoskeleton with external payload / S. Arunkumar, S. Mahesh, M. Rahul, N. Ganesh, K. J. Maheshwaran // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. – 2023. – Vol. 17. – P. 2055–2072. – DOI: 10.1007/s12008-023-01272-1.
7. Comparison of prosthetic feet prescribed to active individuals using ISO standards / Z. D. Mason, J. Pearlman, R. A. Cooper, J. Z. Laferrier // *Prosthetics and Orthotics International*. – 2011. – Vol. 35 (4). – P. 418–424. – DOI: 10.1177/0309364611421692.
8. Localization of composite prosthetic feet: manufacturing processes and production guidelines / R. Elgamsy, M. I. Awad, N. Ramadan, A. Amer, Y. Osama, R. El-hilaly, A. Elsabbagh // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – Art. No. 17421. – DOI: 10.1038/s41598-023-44008-7.
9. The impact of laminations on the mechanical strength of carbon-fiber composites for prosthetic foot fabrication / B. Sehar, A. Waris, S. O. Gilani, U. Ansari, S. Mushtaq, N. B. Khan, M. Jameel, M. I. Khan, O. T. Bafakeeh, E. M. Tag Eldin // *Crystals*. – 2022. – Vol. 12 (10). – P. 1429. – DOI: 10.3390/cryst12101429.
10. Design and analysis of prosthetic foot using additive manufacturing technique / V. Vijayan, S. A. Kumar, S. Gautham, M. M. Masthan, N. Piraichudan // *Materials Today Proceedings*. – 2020. – Vol. 37 (8). – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.195.
11. Oleiwi J. K., Hamad Q. A., Abdulrahman S. A. Flexural, impact and max. shear stress properties of fibers composite for prosthetic socket // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol 56 (5). – P. 3121–3128. – DOI: 10.1016/j.matpr.2021.12.368.
12. Parametric design of an advanced multi-axial energy-storing-and-releasing ankle-foot prosthesis / M. Leopaldi, T. M. Brugo, J. Tabucol, A. Zucchelli // *Prosthesis*. – 2024. – Vol. 6 (4). – P. 726–743. – DOI: 10.3390/prosthesis6040051.
13. Talla H. K., Oleiwi J. K., Hassan A. K. F. Performance of athletic prosthetic feet made of various composite materials with PMMA matrix: numerical and theoretical study // *Revue des Composites et des Matériaux Avancés–Journal of Composite and Advanced Materials*. – 2021. – Vol. 31 (4). – P. 257–264. – DOI: 10.18280/rcma.310410.
14. Examining the viability of carbon fiber reinforced three-dimensionally printed prosthetic feet created by composite filament fabrication / H. H. Warder, J. K. Fairley, J. Coutts, R. R. Glis-

- son, K. Gall // *Prosthetics and Orthotics International*. – 2018. – Vol. 42 (6). – P. 644–651. – DOI: 10.1177/0309364618785726.
15. Beck O. N., Taboga P., Grabowski A.M. Characterizing the mechanical properties of running-specific prostheses // *PLOS One*. – 2016. – Vol. 11 (12). – P. e0168298. – DOI: 10.1371/journal.pone.0168298.
16. Olewi J. K., Hadi A. N. Properties of materials and models of prosthetic feet: a review // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1094. – P. 012151. DOI: 10.1088/1757-899X/1094/1/012151.