

УДК 678.046.3

**О. М. Касперович, А. В. Касперович, А. Ф. Петрушеня, А. Г. Любимов,
Л. А. Ленартович, Д. И. Семёнова**

Белорусский государственный технологический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ
С ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ
НА СВОЙСТВА ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ**

В настоящей работе исследованы физико-механические и технологические характеристики полимерных композиционных материалов на основе линейного полиэтилена низкой плотности с различными дисперсными наполнителями, обладающими повышенной теплопроводностью, такими как оксид цинка, алюминиевая пудра, карбид кремния и нитрид бора, с целью дальнейших разработок в области повышения теплопроводности полимеров и создания полимерных композиционных материалов с заданным комплексом свойств. Были проанализированы результаты введения наполнителей в полимер в широком концентрационном диапазоне – от 5 до 60 мас. %. Также вследствие различного влияния наполнителей на свойства полимерной композиции был проведен эксперимент по совместному введению некоторых наполнителей. В ходе работы исследовались такие характеристики полимерных композиций, как прочность и относительное удлинение при разрыве, предел текучести при растяжении, модуль упругости при растяжении, а также оценивались твердость по Шору, плотность и показатель текучести расплава, поскольку он является важным показателем перерабатываемости разработанных композиций. В ходе исследований была определена оптимальная концентрация каждого типа наполнителя, а также оценена возможность создания высоконаполненных композиций на основе термопластов с целью создания оптимальных условий для максимального теплопереноса.

Ключевые слова: полимерная композиция, теплопроводность, термопластичная матрица, дисперсный наполнитель, перерабатываемость.

Для цитирования: Касперович О. М., Касперович А. В., Петрушеня А. Ф., Любимов А. Г., Ленартович Л. А., Семёнова Д. И. Исследование влияния дисперсных наполнителей с повышенной теплопроводностью на свойства термопластичных полимеров // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2024. № 2 (283) С. 59–64.

DOI: 10.52065/2520-2669-2024-283-8.

**V. M. Kasperovich, A. V. Kasperovich, A. F. Petrushenya, A. G. Liubimau,
L. A. Lenartovich, D. I. Semenova**

Belarusian State Technological University

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF DISPERSED FILLERS
WITH INCREASED THERMAL CONDUCTIVITY
ON THE PROPERTIES OF THERMOPLASTIC POLYMERS**

In the present work the physico-mechanical and technological characteristics of polymer composite materials based on linear low-density polyethylene with various dispersed fillers with increased thermal conductivity, such as zinc oxide, aluminium powder, silicon carbide and boron nitride, have been investigated for the purpose of further developments in the field of increasing the thermal conductivity of polymers and creating polymer composites with a given complex of properties. The results of introduction of fillers into the polymer in a wide concentration range from 5 to 60 wt. % were analysed. Also due to the different influence of fillers on the properties of polymer composition, an experiment on the joint introduction of some fillers was carried out. In the course of work such characteristics of polymer compositions as strength and relative elongation at break, tensile yield strength, tensile modulus of elasticity, as well as Shore hardness, density and melt flow index were investigated, as it is an important indicator of recyclability of developed compositions. In the course of the research, the optimum concentration of each type of filler was determined and the possibility of creating highly filled compositions based on thermoplastics was evaluated in order to create optimal conditions for maximum heat transfer.

Keywords: polymer composition, thermal conductivity, thermoplastic matrix, dispersed filler, recyclability.

For citation: Kasperovich V. M., Kasperovich A. V., Petrushenya A. F., Liubimau A. G., Lenartovich L. A., Semenova D. I. Investigation of the influence of dispersed fillers with increased thermal conductivity on the properties of thermoplastic polymers. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2024, no. 2 (283), pp. 59–64 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2024-283-8.

Введение. Полимеры широко используются в промышленности и в повседневной жизни из-за их высокой технологичности, малого веса и низкой стоимости, однако большинство полимеров являются теплоизоляторами и имеют теплопроводность от 0,1 до 0,5 Вт/(м · К) [1].

Проблема отвода тепла, выделяющегося при работе полупроводниковых приборов и устройств (например, микросхем, компонентов компьютерной техники и светодиодных источников света), в последние годы становится доминирующей. Низкая теплопроводность может привести к сильным локальным перегревам материала в экстремальных условиях эксплуатации и, как следствие, к его разрушению.

Повышение коэффициентов теплопроводности и температуропроводности полимерных материалов возможно за счет модификации свойств базовых полимеров путем введения микро-, субмикро- или наноразмерных наполнителей с высокой теплопроводностью [2, 3]. При этом следует учесть, что теплопроводящие полимеры дешевле, легче и технологичнее металлических конструкций, они устойчивы к агрессивным средам, обладают низкой электропроводностью, что имеет определяющее значение в некоторых применениях.

Среди дисперсных наполнителей с повышенной теплопроводностью наиболее распространенными являются металлические частицы, наполнители на основе углерода, а также керамика, в частности частицы оксида алюминия (Al_2O_3), карбида кремния (SiC) и гексагонального нитрида бора (BN) [4, 5].

Применение наполнителей в виде различных углеродосодержащих материалов позволяет получить материалы с высокой тепло- и электропроводностью. С другой стороны, наполнение полимерных матриц порошками нитридов, карбидов или оксидов металлов с высоким коэффициентом теплопроводности (BN, SiC, ZnO и SiO_2) обеспечивает хорошие диэлектрические свойства наряду с высокой теплопроводностью [6].

Среди различных типов керамических наполнителей для полимеров, изучаемых в настоящее время, BN занимает одно из первых мест [7–9]. При этом электроизоляционные характеристики при добавлении частиц BN к полимерам существенно не изменяются.

Применение таких теплопроводящих дисперсных наполнителей позволяет отказаться от использования металлов при изготовлении теплоотводящих элементов конструкций. Замена дорогостоящих металлов теплопроводящими полимерными композициями дает возможность значительно снизить себестоимость полупроводниковых приборов и устройств и сократить импорт теплопроводящих полимерных материалов.

Основная часть. Цель работы – оценить влияние наполнителей, воздействующих на теплопроводность полимерной матрицы, на физико-механические и

технологические свойства композиций и определить концентрационный диапазон их введения.

В качестве объектов исследования были использованы смеси на основе полиэтилена марки M3204RUP, который представляет собой линейный полиэтилен низкой плотности (ЛПЭНП), доступный в форме порошка, наполненные гексагональным нитридом бора (BN) с массовой долей BN не менее 98,0%, прошедшим через сито со стороной ячейки в свету 100 мкм по ДСТУ ISO 3310-1:2007 не менее 90%; карбидом кремния (SiC) марки 63C F2000 с размером частиц 0,9–1,5 мкм; алюминиевой пудрой марки ПАП-2 с размером частиц 20–30 мкм и насыпной плотностью 0,15–0,3 г/см³, а также оксидом цинка (ZnO) с размером частиц 21–23 нм.

В работе изучена возможность введения наполнителя в достаточно большом процентном соотношении. Известно, что процесс теплопереноса может быть достигнут при высоких степенях наполнения, поскольку при низких концентрациях вероятность контакта между частицами мала, с увеличением она монотонно повышается, образуя в системе непрерывные пространственные цепочки, по которым и осуществляется перенос тепла.

Предполагая возможные технологические сложности, связанные со значительным увеличением вязкости и абразивным износом оборудования, было принято решение применить технологию прессования для получения экспериментальных образцов.

Получение смеси проводилось по авторской методике. Подготовленную навеску из полимера и наполнителя высушивали, перетирали вручную в ступке в течение 10–15 мин и «спекали» с помощью вискозиметра, продавливая через стандартный капилляр с внутренним диаметром ($2,095 \pm 0,005$) мм при температуре обогреваемого цилиндра 180–190°C с последующим механическим нарезанием экструдата на гранулы. Полученные гранулы загружали в формообразующую конструкцию для прессования.

Таким образом были приготовлены композиции с содержанием наполнителей от 5 до 60 мас. %.

Испытания на одноосное растяжение проводили в соответствии с ГОСТ 11262 [10] на тензометре Instron серии 2020 при температуре (23 ± 2)°C при скорости раздвижения зажимов 100 мм/мин. Твердость по Шору определялась в соответствии с ГОСТ 24621 [11] по шкале D. Определение плотности композиций производилось методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 15139 [12]. Измерение показателя текучести расплава (ПТР) осуществляется в соответствии с ГОСТ 11645 [13] при температуре 230°C и массе груза 1,25 кг на капилляре длиной 8 мм с внутренним диаметром 2,095 мм. Расчет усадки вели в соответствии с ГОСТ 18616 [14].

Исследовано влияние массового содержания алюминиевой пудры, оксида цинка, нитрида бора и карбида кремния на прочностные, деформационные

и технологические характеристики композиционных материалов.

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы: композиции на основе линейного полиэтилена и алюминиевой пудры обладают удовлетворительными прочностными свойствами при небольшом содержании наполнителя (до 10–20 мас. %) по сравнению с образцами на основе чистого полимера. При этом деформационные характеристики монотонно снижаются при увеличении содержания наполнителя.

Для композиций, полученных путем добавления наночастиц оксида цинка в ЛПЭНП, наблюдается улучшение деформационных свойств при содержании наполнителя в количестве до 15 мас. % (рис. 1) и улучшение прочностных характеристик при больших концентрациях наполнителя (до 40 мас. %). Прочность при разрыве возрастает с 10,5 до 15 МПа (рис. 2).

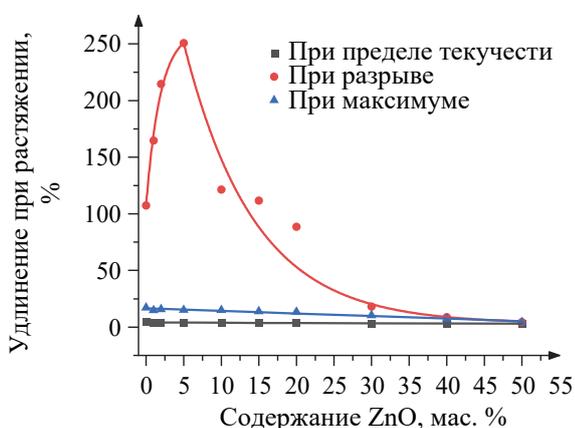


Рис. 1. Деформационные характеристики композиций с разным содержанием оксида цинка

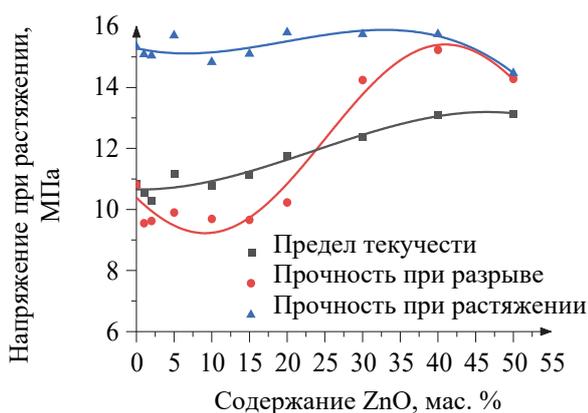


Рис. 2. Прочностные характеристики композиций с разным содержанием оксида цинка

Также при увеличении содержания наночастиц оксида цинка наблюдается устойчивый рост твердости композиций, которая достигает своего максимального значения при концентрации наполнителя 50 мас. %.

Увеличение содержания алюминиевой пудры практически не оказывает влияния на твердость композиций, приводя к незначительному ее увеличению при концентрациях алюминиевой пудры до 20 мас. % и несущественно снижая ее при больших концентрациях.

В то же время введение и алюминиевой пудры, и оксида цинка приводит к увеличению модуля упругости при растяжении практически в два раза, как показано на рис. 3.

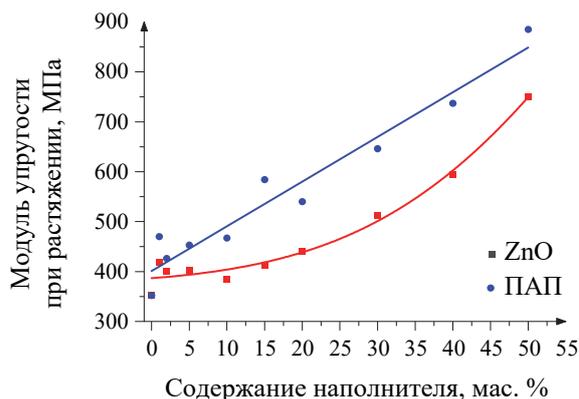


Рис. 3. Зависимость модуля упругости при растяжении от массового содержания алюминиевой пудры и оксида цинка в композициях

Для обоих наполнителей наблюдается увеличение плотности и пористости композиций при повышении их содержания. Для наночастиц оксида цинка показания пористости оказываются больше, чем для частиц алюминиевой пудры. Это подтверждает предположение, выдвинутое в работе [15], о том, что межфазное взаимодействие между оксидом цинка и полиолефинами очень слабое.

Усадка композиций с оксидом цинка практически при любых концентрациях наполнителя имела повышенное значение по сравнению с усадкой чистого ЛПЭНП, что также косвенно может свидетельствовать о снижении межмолекулярного взаимодействия в композиции.

Усадка композиций с алюминиевой пудрой при наполнении до 10–15 мас. % увеличивается, а при дальнейшем увеличении содержания наполнителя – уменьшается.

Показатель текучести расплава монотонно снижается при введении обоих наполнителей. При этом снижение ПТР было более выражено для композиций с алюминиевой пудрой (до 0,3 г/10 мин при 50%-ном наполнении). Для оксида цинка значения ПТР сохранялись на уровне 2–3 г/10 мин даже при степени наполнения 50 мас. %.

Таким образом установлено, что увеличение содержания алюминиевой пудры в качестве наполнителя в композициях на основе ЛПЭНП приводит к снижению таких физико-механических свойств композиций, как прочность при разрыве,

предел текучести, относительное удлинение при растяжении, что можно объяснить плохим распределением частиц в полимерной матрице, недостаточной смачиваемостью их полимером, формированием дефектных граничных слоев, увеличением вероятности контакта частиц наполнителя друг с другом, а в предельном случае – агломерацией частиц, приводящей к снижению прочностных характеристик.

Для композиций, наполненных оксидом цинка, отмечалось «пластифицирующее» воздействие наполнителя при введении в малых количествах (до 5 мас. %), когда наблюдается значительное увеличение относительного удлинения при разрыве (с 110 до 250%). Также при больших степенях наполнения (до 40%) прослеживается монотонный рост прочностных показателей и модуля упругости.

Наиболее перспективными с точки зрения теплопроводящих свойств являются нитрид бора и карбид кремния. Теплопроводность нитрида бора достигает 1700–2000 Вт/(м·К), в то время как электропроводность композиционного материала остается минимальной.

Было изучено влияние нитрида бора и карбида кремния на физико-механические и технологические характеристики полиэтиленовых композиций. В ходе исследований были получены следующие результаты.

Введение нитрида бора приводит к закономерному изменению деформационно-прочностных свойств. Так, при введении до 10 мас. % нитрида бора происходит упрочнение композиции, прочность при разрыве возрастает на 38%, одновременно увеличивается модуль упругости на 36%, однако при этом происходит резкое уменьшение деформационных характеристик, относительное удлинение снижается с 506,7 до 17,7%.

При дальнейшем увеличении содержания наполнителя происходит потеря эластичности композиции, относительное удлинение снижается до 2,9%, но при этом значительно возрастает модуль упругости – до 780 МПа.

Введение карбида кремния, напротив, не так резко влияет на деформационные свойства композиции (введение 5 мас. % карбида кремния уменьшает относительное удлинение лишь до 121,4%), однако при этом происходит уменьшение прочности при разрыве, в то время как у нитрида бора наблюдалось увеличение этого показателя на 38%. Модуль упругости практически сохраняет свои значения при 5%-ном введении карбида кремния, в то время как при введении нитрида бора происходит значительное увеличение этого показателя.

Таким образом, нитрид бора и карбид кремния оказывают различное влияние на полимерную

матрицу, и каждый из них формирует определенный комплекс деформационно-прочностных свойств.

Поскольку для изменения теплопроводящих свойств композиции, как известно из литературных источников, требуется введение значительного количества наполнителя, нами была изготовлена композиция с содержанием карбида кремния 60 мас. %. При этом наблюдалось увеличение прочности при разрыве и значительный, практически в 4 раза, рост модуля упругости, значение которого составило 1790 МПа. Но при этом следует отметить, что относительное удлинение при разрыве составило всего 1,4%, в то время как при введении 60 мас. % нитрида бора измерить деформационно-прочностные свойства не представлялось возможным, поскольку наполнитель недостаточно смачивался полимерной матрицей и образец получался рыхлым.

Карбид кремния лучше нитрида бора распределяется в полимерной матрице и способствует ее кристаллизации, о чем свидетельствует сохранение значительной прочности при растяжении, увеличение предела текучести. Нагрузка при этом равномерно распределяется в объеме изделия и не создает напряженного состояния в полимере.

Поскольку исследуемые наполнители имеют различное влияние на полимерную матрицу, был проведен эксперимент по их совместному введению. При различных соотношениях наполнителей наблюдалось преимущественное влияние того или иного компонента на деформационно-прочностные свойства. В целом совместное применение наполнителей не привело к значительному изменению свойств. Нитрид бора позволяет скомпенсировать уменьшение прочности при разрыве композиций с карбидом кремния, и совместное использование наполнителей повысило прочность при разрыве, а также привело к повышению модуля упругости.

Интересный результат был получен при введении нитрида бора в количестве 10 мас. % в композицию, содержащую 30 мас. % алюминиевой пудры. При незначительном снижении прочностных характеристик модуль упругости вырос с 646 до 1312 МПа.

Таким образом, нитрид бора можно вводить в композиции с другими дисперсными наполнителями для повышения прочности при разрыве и модуля упругости при растяжении.

Заключение. Введение всех типов наполнителей приводило к снижению показателя текучести расплава, однако даже при максимальных концентрациях наполнителя ПТР оставался достаточным для переработки этих композиций стандартными методами.

Список литературы

1. Enhancement of conductivity by diameter control of polyimide-based electrospun carbon nanofibers / N. T. Xuyen [et al.] // *J. Phys. Chem. B*. 2007. Vol. 111. P. 11 350–11 353.
2. Factors affecting thermal conductivities of the polymers and polymer composites: a review / Y. Guo [et al.] // *Compos. Sci. Technol.* 2020. Vol. 193. Article 108134.
3. Wang Z.-C., Aldinger F., Riedel R. Novel silicon-boron-carbon-nitrogen materials thermally stable up to 2200°C // *Journal of the American Ceramic Society*. 2001. Vol. 84, no. 10. P. 2179–2183.
4. Han Z., Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: a review // *Prog. Polym. Sci.* 2011. Vol. 36. P. 914–944.
5. Development of stable boron nitride nanotube and hexagonal boron nitride dispersions for electrophoretic deposition / B. J. Mapleback [et al.] // *Langmuir*. 2020. Vol. 36. P. 3425–3438.
6. Design and characteristics of a newly developed cavity-up plastic and ceramic laminated thin BGA package / H. Asai [et al.] // *IEEE Trans. Adv. Packag.* 1999. Vol. 22. P. 460–467.
7. Exfoliated hexagonal boron nitride-based polymer nanocomposite with enhanced thermal conductivity for electronic encapsulation / Z. Lin [et al.] // *Compos. Sci. Technol.* 2014. Vol. 90. P. 123–128.
8. Enhanced thermal-mechanical properties of polymer composites with hybrid boron nitride nanofillers / H. Yan [et al.] // *Appl. Phys. A*. 2014. Vol. 114. P. 331–337.
9. Wang X., Wu P. Preparation of highly thermally conductive polymer composite at low filler content via a self-assembly process between polystyrene microspheres and boron nitride nanosheets // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017. Vol. 9. P. 19 934–19 944.
10. Пластмассы. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 11262–2017. М.: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2018. 24 с.
11. Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору): ГОСТ 24621–2015. М.: Стандартиформ, 2016. 11 с.
12. Пластмассы. Метод определения плотности (объемной массы): ГОСТ 15139–69. М.: Издательство стандартов, 1988. 18 с.
13. Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава термопластов: ГОСТ 11645–73. М.: Издательство стандартов, 1994. 12 с.
14. Пластмассы. Метод определения усадки: ГОСТ 18616–80. М.: Издательство стандартов, 1980. 10 с.
15. Polyolefin/ZnO composites prepared by melt processing / A. Anžlovar [et al.] // *Molecules*. 2019. Vol. 24 (13). Article 2432.

References

1. Xuyen N. T., Ra E. J., Geng H.-Z., Kim K. K., An K. H., Lee Y. H. Enhancement of conductivity by diameter control of polyimide-based electrospun carbon nanofibers. *J. Phys. Chem. B*, 2007, vol. 111, pp. 11 350–11 353.
2. Guo Y., Ruan K., Shi X., Yang X., Gu J. Factors affecting thermal conductivities of the polymers and polymer composites: a review. *Compos. Sci. Technol.*, 2020, vol. 193, article 108134.
3. Wang Z.-C., Aldinger F., Riedel R. Novel silicon-boron-carbon-nitrogen materials thermally stable up to 2200°C. *Journal of the American Ceramic Society*, 2001, vol. 84, no. 10, pp. 2179–2183.
4. Han Z., Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: a review. *Prog. Polym. Sci.*, 2011, vol. 36, pp. 914–944.
5. Mapleback B. J., Brack N., Thomson L., Spencer M. J. S., Osborne D. A., Doshi S., Thostenson E. T., Rider A. N. Development of stable boron nitride nanotube and hexagonal boron nitride dispersions for electrophoretic deposition. *Langmuir*, 2020, vol. 36, pp. 3425–3438.
6. Asai H., Yano K., Iyogi K., Iwase N., Fujiwara T. Design and characteristics of a newly developed cavity-up plastic and ceramic laminated thin BGA package. *IEEE Trans. Adv. Packag.*, 1999, vol. 22, pp. 460–467.
7. Lin Z., Mcnamara A., Liu Y., Moon K., Wong C. P. Exfoliated hexagonal boron nitride-based polymer nanocomposite with enhanced thermal conductivity for electronic encapsulation. *Compos. Sci. Technol.*, 2014, vol. 90, pp. 123–128.
8. Yan H., Tang Y., Su J., Yang X. Enhanced thermal-mechanical properties of polymer composites with hybrid boron nitride nanofillers. *Appl. Phys. A*, 2014, vol. 114, pp. 331–337.
9. Wang X., Wu P. Preparation of highly thermally conductive polymer composite at low filler content via a self-assembly process between polystyrene microspheres and boron nitride nanosheets. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, vol. 9, pp. 19 934–19 944.

10. GOST 11262–2017. Plastics. Determination of tensile properties. Moscow, Interstate council for standardization, metrology and certification Publ., 2018. 24 p. (In Russian).

11. GOST 24621–2015. Plastics and ebonite. Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness). Moscow, Standartinform Publ., 2016. 11 p. (In Russian).

12. GOST 15139–69. Plastics. Methods for the determination of density (mass density). Moscow, Publishing house of standards Publ., 1988. 14 p. (In Russian).

13. GOST 11645–73. Plastics. Determination of flow index of thermoplastics melt by extrusion plastometer. Moscow, Publishing house of standards Publ., 1994. 12 p. (In Russian).

14. GOST 18616–80. Plastics. Method of determination of shrinkage. Moscow, Publishing house of standards Publ., 1980. 10 p. (In Russian).

15. Anžlovar A., Primožič M., Švab I., Leitgeb M., Knez Ž., Žagar E. Polyolefin/ZnO composites prepared by melt processing. *Molecules*, 2019, vol. 24 (13), article 2432.

Информация об авторах

Касперович Ольга Михайловна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by

Касперович Андрей Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: andkasp@belstu.by

Петрушеня Александр Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: petraf@belstu.by

Любимов Александр Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lubimov@belstu.by

Ленартович Лилия Алексеевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lenartovich@belstu.by

Семёнова Дарья Ивановна – магистрант кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dashenka.semenova.02@gmail.com

Information about the authors

Kasperovich Volha Michailovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by

Kasperovich Andrey Viktorovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andkasp@belstu.by

Petrushenya Alexander Fedorovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: petraf@belstu.by

Liubimau Aleksandr Gennadievich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Republic of Belarus). E-mail: lubimov@belstu.by

Lenartovich Liliya Alekseevna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lenartovich@belstu.by

Semenova Dar'ya Ivanovna – Master's degree student, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dashenka.semenova.02@gmail.com

Поступила 02.07.2024