

DOI: 10.15593/2224-9400/2024.3.08
УДК 544.03

Научная статья

**Е.А. Лебедева, С.А. Астафьева,
Д.К. Трухинов, Е.В. Иванова**

Институт технической химии Уральского отделения
Российской академии наук – филиал ФГБУН Пермского федерального
исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

Д.С. Минина, М.И. Старцева

Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА, НАПОЛНЕННОГО МОДИФИЦИРОВАННЫМ УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ

Использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) является неотъемлемой составляющей современной промышленности. Для обеспечения высоких эксплуатационных свойств в ПКМ, как правило, вводят функциональные наполнители. Углеродное волокно (УВ) является одним из распространенных компонентов вследствие его уникальных прочностных свойств и малого удельного веса. Основной проблемой считается его инертная поверхность, которая не обеспечивает необходимого межфазного взаимодействия с полимерным связующим. В связи с этим актуальными являются исследования, направленные на модификацию УВ различными методами для решения этой проблемы и придания новых функциональных свойств ПКМ. Одним из таких методов является осаждение частиц различной природы.

*В данной работе были исследованы термические и физико-механические свойства композиционного материала на основе акрилонитрил-бутадиен-стирола (АБС). В качестве наполнителя использовалось короткое углеродное волокно, модифицированное частицами магнетита методом *in situ*. Методом сканирующей электронной микроскопии было доказано наличие покрытия из наночастиц магнетита. Получение полимерного композита включало стадии приготовления полуфабриката методом экструзии с последующим его ручным измельчением до размеров 1–2 мм. Изготовление образцов в виде лопаток осуществлялось методом литья под давлением с помощью термопластавтомата. Содержание наполнителя в полимерном композиционном материале составляло 3 мас. %. Результаты термического анализа показали, что введение модифицированного магнетитом углеродного волокна не изменило общего характера хода кривой потери массы. Снижение термической стабильности полученного композита может быть следствием эффекта ускоренной деградации металлов. Исследование физико-механических характеристик показало, что использование модифицированного углеродного волокна привело к увеличению максимальной прочности на 16 % и модуля Юнга на 40 % по сравнению с ненаполненным АБС-пластиком.*

Ключевые слова: акрилонитрил-бутадиен-стирол, модифицированное углеродное волокно, магнетит, термическая стабильность АБС-пластика.

**E.A. Lebedeva, C.A. Astaf'eva,
D.K. Trukhinov, E.V. Ivanova**

Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (a branch of the Perm Federal Researcher Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences), Perm, Russian Federation

D.S. Minina, M.I. Starceva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF A POLYMER COMPOSITE REINFORCED BY MODIFIED CARBON FIBER

The use of polymer composite materials (PCM) is an integral part of modern industry. To ensure high performance properties, functional fillers are usually introduced into the PCM. Carbon fiber (CF) is one of the most common components due to its unique strength properties and light weight. The main problem is considered to be its inert surface, which does not provide the necessary interfacial interaction with the polymer binder. In this regard, studies aimed at modifying CF by various methods in order to solve this problem and give new functional properties to PCM are relevant. One of these methods is the deposition of different particles.

In this work, the thermal and physico-mechanical properties of a composite material based on acrylonitrile butadiene styrene (ABS) were investigated. A short carbon fiber modified with magnetite particles by in situ method was used as a filler. The presence of a coating of deposited magnetite was proved by scanning electron microscopy. The preparation of a polymer composite included the stages of preparation of a semi-finished product by extrusion, followed by its manual grinding to a size of 1-2 mm. The production of samples in the form of dogbone was carried out by injection molding using a injection molding machine. The filler content in the polymer composite material was 3 wt. %. The results of thermal analysis showed that the introduction of carbon fiber modified with magnetite did not change the general character of the course of the mass loss curve. A decrease in the thermal stability of the resulting composite may be a consequence of the effect of accelerated metal degradation. A study of the physical and mechanical characteristics showed that the use of modified carbon fiber led to an increase in maximum strength by 16% and Young's modulus by 40% compared with unfilled ABS plastic.

Keywords: *acrylonitrile butadiene styrene, modified carbon fiber, magnetite, thermal stability ABS plastic.*

Полимерные композиционные материалы благодаря уникальному сочетанию эксплуатационных и технологических свойств широко применяются в различных отраслях машиностроения, в том числе в авиационной, космической технике, автомобиле- и судостроении, атомной энергетике и медицине [1]. К современным материалам все чаще предъявляются высокие требования к комплексу функциональных свойств: высокие прочностные и деформационные характери-

ки, низкая плотность, устойчивость к различным видам химических воздействий, диэлектрические свойства и т.д. [2]. В то же время новые разрабатываемые полимерные композиционные материалы (ПКМ) должны решать существующие проблемы, такие как высокая стоимость, пригодность к переработке, надежность и энергопотребление [3]. Одним из компонентов перспективных ПКМ является углеродное волокно (УВ), характеризующееся высокой прочностью, устойчивостью к высоким температурам и хорошей химической стойкостью [3]. Композиты на основе полимерной матрицы, армированные углеродным волокном, как высокотехнологичные материалы, обладают высоким удельным модулем и высокой удельной прочностью. Они идеально подходят для промышленных применений, где критически важными требованиями являются высокая прочность и жесткость, малый вес и выдающиеся усталостные характеристики [4]. Совокупный среднегодовой темп прироста ПКМ, армированных УВ, во всем мире составляет около 12,5 % за последние два десятилетия [4]. Композиты на основе термопластичной матрицы, армированные коротким углеродным волокном, снижают количество отходов углеродной ткани, присущих при переработке терморезактивных композитов. Исследования по созданию и изучению свойств композитов на основе термопластичных матриц и коротких углеродных волокон были обобщены в недавнем обзоре [5].

Крупноформатное аддитивное производство быстро развивается и использует большие объемы термопластов, наполненных коротким волокном [6, 7]. Сополимер акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (АБС-пластик) относится к доступным крупнотоннажным конструкционным термопластичным полимерам. Благодаря высокой механической прочности и ударостойкости АБС-пластик получил широкое применение в области 3D-печати [8, 9].

Возможность вторичной переработки не только базовых полимеров, но и композитов на их основе является очевидным преимуществом по сравнению с композитами на основе терморезактивных полимеров [10]. Для улучшения межфазной адгезии на границе раздела между термопластичной матрицей и углеродными волокнами и введения поверхностных функциональных групп применяют различные методы обработки поверхности углеродных волокон, такие как химические, плазменные и электрохимические методы [4, 11]. Одним из способов модификации поверхности углеродных материалов является осаждение на их поверхности частиц металлов или их оксидов [12–14].

Цель нашей работы – получение полимерного композиционного материала на основе АБС-пластика, наполненного модифицированным магнетитом углеродным волокном, и исследование его термических и физико-механических свойств.

Экспериментальная часть. Для получения композита использовали АБС-пластик марки 1525 (ОАО «Пластик» (Узловая), Россия), углеродное волокно Toho Tenax 3K, 200 текс (Toho Tenax, Германия). Химические реактивы для модификации поверхности углеродного волокна: железа (III) хлорид гексагидрат ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), железа (II) сульфат гептагидрат ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), водный раствор аммиака (NH_4OH) (ООО «АО Реахим»).

Визуальная оценка модифицированного углеродного волокна проведена с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) S-3400N (Hitachi, Япония) в режиме BSE при напряжении 25 кВ и рабочей дистанции ~10 мм. Термические исследования полимерной основы и полученного композита выполнены на термоанализаторе TGA (Mettler Toledo, Швейцария) в температурном интервале 25–1000 °С со скоростью нагрева 10 К·мин⁻¹ в атмосфере воздуха. Держатель образца – тигель из оксида алюминия объемом 70 мкл, навеска образца 13,5±0,2 мг. Механические характеристики образцов определяли на универсальной испытательной машине INSTRON-336550 с относительной скоростью растяжения 10 мм/мин. Количество параллельных испытаний – 3. Температура испытаний – 298 К. Расчеты выполняли по средним значениям из трех измерений.

Модификация углеродного волокна была проведена по ранее описанной нами методике [15]. После пропитки углеродных волокон водными растворами солей железа на их поверхности при синтезе *in situ* образуется покрытие, представляющее магнетит (рис. 1).

Для изготовления композита АБС-пластик и модифицированные углеродные волокна предварительно смешивали в дисковом экструдере Dupisco (США) в соотношении 97 и 3 мас. % соответственно. Полученный филамент вручную измельчали до размера 1–2 мм. Изготовление лопаток для механических испытаний было проведено литьем под давлением с помощью термопласт автомата (ТПА) WITBOY UM-7eL (Китай). Полученные образцы исходного АБС-пластика (далее – АБС) и композита, содержащего 3 мас. % модифицированного магнетитом углеродного волокна (далее – образец АБС/УВ@Fe₃O₄), представлены на рис. 2.

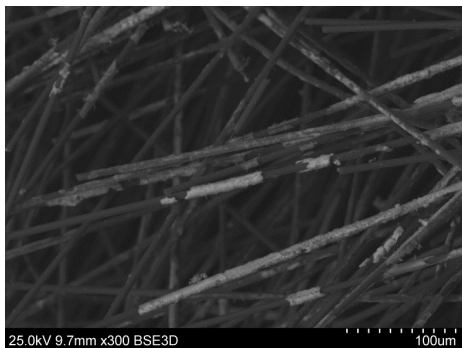


Рис. 1. СЭМ-изображение углеродных волокон, модифицированных магнетитом методом *in situ*, увеличение $\times 300$



Рис. 2. Лопатки для механических испытаний, полученные с помощью ТПА: исходный АБС-пластик (слева) и композит на его основе (справа)

Результаты и их обсуждение. Был проведен термический анализ и исследованы физико-механические характеристики полученных образцов исходного АБС-пластика и композита на его основе, наполненного модифицированным коротким углеродным волокном. Результаты представлены на рис. 3, 4 и в таблице.

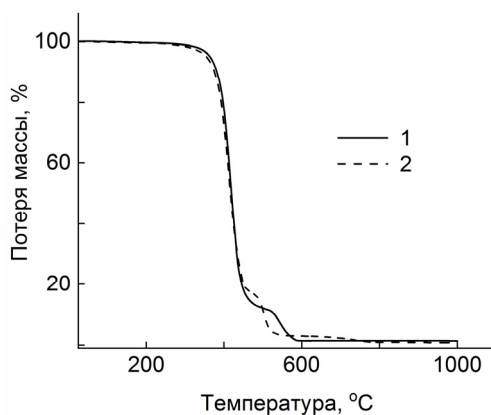


Рис. 3. Термограммы образцов АБС (1) и АБС/УВ@Fe₃O₄ (2)

Методом термогравиметрического анализа изучено влияние модифицированного углеродного волокна на термоокислительную устойчивость АБС-пластика. Как видно на рис. 3, введение наполнителя не изменяет общего характера хода кривой потери массы. Разложе-

ние образцов происходит в две стадии. На первой стадии происходят термоокислительные процессы полимерной матрицы, протекающие в диапазоне температур 45–485 °С, а на второй стадии – выгорание образовавшегося коксового остатка. В случае исходного АБС-пластика остаток составляет 1,40 %, для АБС, наполненного углеродным волокном, – 0,79 %. Введение углеродного волокна может улучшить термическую стабильность композита АБС/УВ из-за более высокой температуры деградации УВ, чем у исходного АБС [16–18]. Но как видно на рис. 3 наблюдается более быстрое снижение веса для образца композита с модифицированным углеродным волокном, по сравнению с исходным АБС-пластиком, что может быть связано с повышением теплопроводности композита [19]. Также эти результаты можно объяснить эффектом ускоренной деградации АБС-пластика в присутствии оксидов металлов [20, 21].

Введение модифицированного углеродного волокна привело к повышению прочности на разрыв на 16 % и модуля Юнга 40 % по сравнению с исходным АБС-пластиком (таблица).

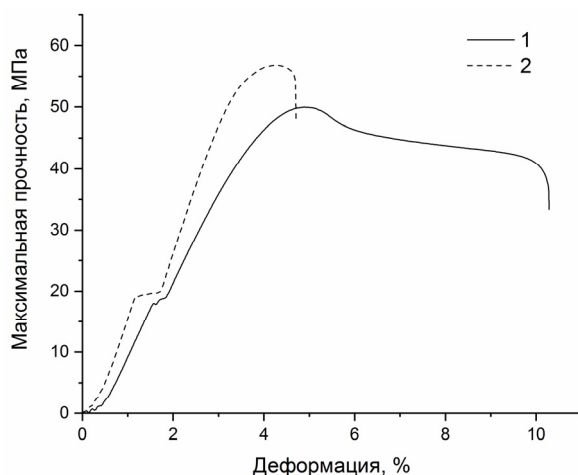


Рис. 4. Диаграмма напряжения-деформации для полученных образцов АБС пластика: 1 – АБС; 2 – АБС/УВ@Fe₃O₄

Физико-механические свойства полученных образцов

Образец	Максимальная прочность, МПа	Деформация, %	Модуль Юнга, МПа
АБС	50,3 ± 0,9	11,0 ± 2,1	1548 ± 127
АБС/УВ@Fe ₃ O ₄	58,8 ± 5,8	5,0 ± 0,6	2195 ± 218

Таким образом, получен композит на основе АБС-пластика, наполненного модифицированным магнетитом углеродным волокном. Проведены термический анализ и механические испытания полученных образцов АБС-пластика. Использование короткого углеродного волокна привело к увеличению жесткости материала с увеличением прочности на 16 % и модуля Юнга на 40 %. В перспективе представленный композиционный материал может быть использован не только при литье под давлением, но и в производстве филаментов для 3D-печати.

Список литературы

1. Влияние способа функционализации углеродных нанотрубок на технологические и эксплуатационные свойства филаментов для FDM-печати на основе АБС-пластика / Е.Н. Каблов, А.А. Пыхтин, А.Е. Сорокин, С.А. Ларионов // *Российские нанотехнологии*. – 2022. – Т. 17, № 6. – С. 745–752.
2. Полимерные композиционные материалы на термопластичной матрице / Е.Н. Каблов, Л.В. Семенова, Г.Н. Петрова, С.А. Ларионов, Д.Н. Перфилова // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. – 2016. – Т. 59, № 10. – С. 61–71.
3. Comprehensive Review of the Properties and Modifications of Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites / В.А. Alshammari, М.С. Alsuhybani, А.М. Almushaikeh, В.М. Alotaibi, А.М. Alenad, N.B. Alqahtani, А.Г. Alharbi // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – P. 2474.
4. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications / J. Zhang, G. Lin, U. Vaidya, H. Wang // *Composites Part B: Engineering*. – 2023. – Vol. 250. – P. 110463.
5. Overview of automotive structural composites technology developments in Japan / Т. Ishikawa, K. Amaoka, Y. Masubuchi, Т. Yamamoto, А. Yamanaka, М. Arai, J. Takahashi // *Composites Science and Technology*. – 2018. – Vol. 155. – P. 221–246.
6. Recycling of CF-ABS machining waste for large format additive manufacturing / R. Walker, M. Korey, А.М. Hubbard, С.М. Clarkson, Т. Corum, Т. Smith, С.Ј. Hershey, J. Lindahl, S. Ozcan, С. Duty // *Composites Part B: Engineering*. – 2024. – Vol. 275. – P. 111291.
7. Designing for Big Area Additive Manufacturing / А. Roschli, K.T. Gaul, А.М. Boulger, В.К. Post, P.C. Chesser, L.J. Love, F. Blue, М. Borish // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 25. – P. 275–285.
8. Comparison of mechanical properties of 3D-printed ABS, PA12 and PET-G reinforced with short fiber / А. Pepeliaev, E. Lobov, I. Vindokurov, М. Tashkinov // *Procedia Structural Integrity*. – 2024. – Vol. 61. – P. 224–231.
9. Исследование комплекса характеристик базовых материалов для FDM технологии аддитивного синтеза. Физико-механические и теплофизиче-

ские свойства / Г.Н. Петрова, М.М. Платонов, В.А. Большаков, С.А. Пономаренко // Пластические массы. – 2016. – № 5-6. – С. 53–58.

10. Thermoplastic polymer composites production by automated fiber placement method / A.M. Iuvshin, S.D. Tretyakov, Y.S. Andreev, I.N. Gibadullin // Key Engineering Materials. – 2020. – Vol. 836. – P. 78–83.

11. Investigation on the thermo-oxidative stability of carbon fiber sizings for application in thermoplastic composites / J. Duchoslav, C. Unterweger, R. Steinberger, C. Fürst, D. Stifter // Polymer Degradation and Stability. – 2016. – Vol. 125. – P. 33–42.

12. Влияние поверхностной модификации микро- и нанодисперсных порошков алюминия на реологические свойства олигодиеуретановой композиции / Е.А. Лебедева, К.О. Ухин, С.А. Астафьева, В.А. Вальцифер, В.Н. Стрельников // Перспективные материалы. – 2014. – № 3. – С. 72–77.

13. Novel parameter predicting stability of magnetic fluids for possible application in nanocomposite preparation / S.N. Lysenko, S.A. Astafeva, D.E. Yakusheva, M. Balasoju // Applied Surface Science. – 2019. – Vol. 463. – P. 217–226.

14. Lebedeva, I.I. Preparation of mesoporous magnetite-titanium-dioxide composites under hydrothermal and ultrasonic treatment / I.I. Lebedeva, K.O. Ukhin // Polymer Science, Series D. – 2023. – Vol. 16. – P. 563–566.

15. Синтез in situ магнетита на поверхности углеродного волокна / Е.В. Иванова, Е.А. Лебедева, Д.К. Трухинов, А.В. Лебедев, М. Балашою, С.А. Астафьева // Известия АН. Серия химическая. – 2024. – Т. 73, № 8. – С. 2177–2183.

16. Термическая стабильность угленаполненных АБС-пластиков [Электронный ресурс] / М.И. Абдуллин, А.А. Басыров, С.Н. Николаев, А.С. Гадеев, А.В. Николаев // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2014. – № 5-1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termicheskaya-stabilnost-uglenapolnennyh-abs-plastikov> (дата обращения: 02.08.2024).

17. Decomposition of waste carbon fiber reinforced epoxy resin composites in molten potassium hydroxide / W. Nie, J. Liu, W. Liu, J. Wang, T. Tang // Polymer Degradation and Stability. – 2015. – Vol. 111. – P. 247–256.

18. Влияние антипиреновой добавки на теплофизические и физико-механические свойства АБС-пластика / О.М. Ишмухаметов, А.Ю. Ковшов, Е.М. Захарова, А.Г. Хуснуллин, А.Р. Садритдинов, В.П. Захаров, А.А. Псянчин // Полимерные материалы и технологии. – 2020. – Т. 6, № 3. – С. 77–82.

19. Flexure behaviors of ABS-based composites containing carbon and kevlar fibers by material extrusion 3D printing / K. Wang, S. Li, Y. Rao, Y. Wu, Y. Peng, S. Yao, H. Zhang, S. Ahzi // Polymers. – 2019. – Vol. 11. – P. 1878.

20. Accelerating effect of pigments on poly(acrylonitrile butadiene styrene) degradation / E. Andersen, L.H. Bertelsen, M. Salomonsen, M. Kristensen, P. Kybelund, M.B. Sørensen, M. Hinge // Polymer Degradation and Stability. – 2020. – Vol. 178. – P. 109183.

21. Electrophysical Characteristics of Acrylonitrile Butadiene Styrene Composites Filled with Magnetite and Carbon Fiber Fillers / E.A. Lebedeva, E.V. Ivanova, D.K. Trukhinov, T.S. Istomina, N.S. Knyazev, A.I. Malkin, V.A. Chechetkin, A.N. Korotkov, M. Balasoiu, S.A. Astaf'eva // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16. – P. 2153.

References

1. Kablov E.N., Pyhtin A.A., Sorokin A.E., Larionov S.A. Vliyanie sposoba funkcionalizatsii uglerodnyh nanotrubok na tekhnologicheskie i ekspluatatsionnye svoystva filamentov dlya FDM-pechati na osnove ABS-plastika [Influence of the method of functionalization of carbon nanotubes on the technological and operational properties of filaments for FDM-printing based on ABS plastic]. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2022. Vol. 17, no. 6. pp. 745–752.

2. Kablov E.N., Semenova L.V., Petrova G.N., Larionov S.A., Perfilova D.N. Polimernye kompozitsionnye materialy na termoplastichnoy matrice [Polymer composite materials on thermoplastic matrix]. *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2016. Vol. 59, no.10. pp. 61–71.

3. Alshammari B.A., Alsuhybani M.S., Almushaikh A.M., Alotaibi B.M., Alenad A.M., Alqahtani N.B., Alharbi A.G. Comprehensive Review of the Properties and Modifications of Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites. *Polymers*. 2021. Vol. 13. pp. 2474.

4. Zhang J., Lin G., Vaidya U., Wang H. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications. *Composites Part B: Engineering*. 2023. Vol.250. 110463 p.

5. Ishikawa T., Amaoka K., Masubuchi Y., Yamamoto T., Yamanaka A., Arai M., Takahashi J. Overview of automotive structural composites technology developments in Japan. *Composites Science and Technology*. 2018. Vol. 155. pp. 221-246.

6. Walker R., Korey M., Hubbard A.M., Clarkson C.M., Corum T., Smith T., Hershey C.J., Lindahl J., Ozcan S., Duty C. Recycling of CF-ABS machining waste for large format additive manufacturing. *Composites Part B: Engineering*. 2024. Vol. 275. pp. 111291.

7. Roschli A., Gaul K.T., Boulger A.M., Post B.K., Chesser P.C., Love L.J., Blue F., Borish M. Designing for Big Area Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 25. pp. 275-285.

8. Pepeliaev A., Lobov E., Vindokurov I., Tashkinov M. Comparison of mechanical properties of 3D-printed ABS, PA12 and PET-G reinforced with short fiber. *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 61. pp. 224-231.

9. Petrova G.N., Platonov M.M., Bolshakov V.A., Ponomarenko S.A. Issledovanie kompleksa harakteristik bazovykh materialov dlya FDM tekhnologii additivnogo sinteza. Fiziko-mekhanicheskie i teplofizicheskie svoystva [Research of the complex of characteristics of base materials for fdm of technology of the additive

synthesis. Physico-mechanical and heat-physical properties]. *Plasticheskie massy*. 2016, no. 5-6. pp. 53-58.

10. Iuvshin A.M., S. D. Tretyakov, Y.S. Andreev, I.N. Gibadullin Thermo-plastic polymer composites production by automated fiber placement method. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 836. pp. 78-83.

11. Duchoslav J., Unterweger C., Steinberger R., Fürst C., Stifter D. Investigation on the thermo-oxidative stability of carbon fiber sizings for application in thermoplastic composites. *Polymer Degradation and Stability*. 2016. Vol. 125. pp. 33-42.

12. Lebedeva Ye.A., Ukhin K.O., Astafyeva S.A., Valtsifer V.A., Strelnikov V.N. Vliyaniye poverkhnostnoy modifikatsii mikro- i nanodispersnykh poroshkovoaluminiuma na reologicheskiye svoystva oligodiyenuretanovoy kompozitsii [The effect of surface modification of micro- and nanodispersed aluminum powders on the rheological properties of oligodienurethane compositions]. *Perspektivnye Materialy*, 2014, no. 3, pp. 72-77.

13. Lysenko S.N., Astafeva S.A., Yakusheva D.E., Balasoiu M. Novel parameter predicting stability of magnetic fluids for possible application in nanocomposite preparation. *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 463. pp. 217-226.

14. Lebedeva I.I., Ukhin K.O. Preparation of mesoporous magnetite-titanium-dioxide composites under hydrothermal and ultrasonic treatment. *Polymer Science, Series D*. 2023. Vol. 16. pp. 563-566.

15. Ivanova E.V., Lebedeva E.A., Trukhinov D.K., Lebedev A.V., Balasoiu M., Astafeva S. A. Sintez *in situ* magnetita na poverhnosti uglerodnogo volokna [In situ synthesis of magnetite on the carbon fiber surface]. *Izvestiya AN. Seriya himicheskaya*. 2024. Vol. 73, no. 8. pp. 2177-2183.

16. Abdullin M.I., Basyrov A.A., Nikolaev S.N., Gadeev A.S., Nikolaev A.V. Termicheskaya stabil'nost' uglenapolnennykh abs plastikov [Thermal stability of carbon-filled ABS plastics]. Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk. 2014. No. 5-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termicheskaya-stabilnost-uglenapolnennykh-abs-plastikov> (дата обращения: 02.08.2024).

17. Nie W., Liu J., Liu W., Wang J., Tang T. Decomposition of waste carbon fiber reinforced epoxy resin composites in molten potassium hydroxide. *Polymer Degradation and Stability*. 2015. Vol. 111. pp. 247-256.

18. Ishmuhametov O.M., Kovshov A.Y., Zaharova E.M., Husnullin A.G., Sadritdinov A.R., Zaharov V.P., Psyanchin A.A. Vliyanie antipirenovoj dobavki na teplofizicheskie i fiziko-mekhanicheskie svoystva ABS-plastika [The influence of fire retardant additives on the thermophysical and physical-mechanical properties of ABS plastic]. *Polimernye materialy i tekhnologii*. 2020. Vol. 6, no. 3. pp. 77-82.

19. Wang K., Li S., Rao Y., Wu Y., Peng Y., Yao S., Zhang H., Ahzi S. Flexure behaviors of ABS-based composites containing carbon and kevlar fibers by material extrusion 3D printing. *Polymers*. 2019. Vol. 11. pp. 1878.

20. Andersen E., Bertelsen L.H., Salomonsen M., Kristensen M., Kybelund P., Sørensen M.B., Hinge M. Accelerating effect of pigments on poly(acrylonitrile butadiene styrene) degradation. *Polymer Degradation and Stability*. 2020. Vol. 178. 109183 p.

21. Lebedeva E.A., Ivanova E.V., Trukhinov D.K., Istomina T.S., Knyazev N.S., Malkin A.I., Chechetkin V.A., Korotkov A.N., Balasoiu M., Astaf'eva S.A. Electrophysical Characteristics of Acrylonitrile Butadiene Styrene Composites Filled with Magnetite and Carbon Fiber Fillers. *Polymers*. 2024. Vol. 16. pp. 2153.

Об авторах

Лебедева Елена Анатольевна (Пермь, Российская Федерация) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории структурно-химической модификации полимеров, Институт технической химии УрО РАН (филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН) (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3; e-mail: itch.elena@mail.ru).

Астафьева Светлана Асылхановна (Пермь, Российская Федерация) – кандидат технических наук, заведующий лаборатории структурно-химической модификации полимеров, Институт технической химии УрО РАН (филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН) (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3; e-mail: svetlana-astafeva@yandex.ru).

Трухинов Денис Константинович (Пермь, Российская Федерация) – младший научный сотрудник, лаборатория структурно-химической модификации полимеров, Институт технической химии УрО РАН (филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН) (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3; e-mail: dtruhinov@gmail.com).

Иванова Елена Витальевна (Пермь, Российская Федерация) – младший научный сотрудник лаборатории структурно-химической модификации полимеров, Институт технической химии УрО РАН (филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН) (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3; e-mail: dtruhinov@gmail.com).

Минина Дарья Сергеевна (Пермь, Российская Федерация) – студент кафедры «Технология полимерных материалов и порохов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: mdasha326@mail.ru).

Старцева Мария Игоревна (Пермь, Российская Федерация) – студент кафедры «Технология полимерных материалов и порохов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: mari.star842@gmail.com).

About the authors

Elena A. Lebedeva (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Senior research assistant, Laboratory of structural and chemical modification of polymers, Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (a branch of the Perm Federal Researcher Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences) (ul. Akademika Koroleva, 3, Perm, 614013, Russian Federation; e-mail: itch.elena@mail.ru).

Svatlana A. Astaf'eva (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Head of Laboratory of structural and chemical modification of polymers, Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (a branch of the Perm Federal Researcher Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences) (ul. Akademika Koroleva, 3, Perm, 614013, Russian Federation; e-mail: svetlana-astafeva@yandex.ru).

Denis K. Trukhinov (Perm, Russian Federation) – Junior research assistant, Laboratory of structural and chemical modification of polymers, Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (a branch of the Perm Federal Researcher Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences) (ul. Akademika Koroleva, 3, Perm, 614013, Russian Federation; e-mail: dtruhinov@gmail.com).

Elena V. Ivanova (Perm, Russian Federation) – Junior research assistant, Laboratory of structural and chemical modification of polymers, Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (a branch of the Perm Federal Researcher Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences) (ul. Akademika Koroleva, 3, Perm, 614013, Russian Federation; e-mail: kornilicina.lena@mail.ru).

Daria S. Minina (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Chemical engineering of polymer composition, powder and solid rocket fuel, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: mdasha326@mail.ru).

Maria I. Starceva (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Chemical engineering of polymer composition, powder and solid rocket fuel, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: mari.star842@gmail.com).

Поступила: 04.08.2024

Одобрена: 15.08.2024

Принята к публикации: 16.09.2024

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания; номер государственной регистрации 124022100088-6. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Исследование свойств полимерного композита, наполненного модифицированным углеродным волокном / Е.А. Лебедева, С.А. Астафьева, Д.К. Трухинов, Е.В. Иванова, Д.С. Минина, М.И. Старцева // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2024. – № 3. – С. 130–141.

Please cite this article in English as:

Lebedeva E.A., Astaf'eva C.A., Trukhinov D.K., Ivanova E.V., Minina D.S., Starceva M.I. Study of the characteristics of a polymer composite reinforced by modified carbon fiber. *Bulletin of PNRPU. Chemical Technology and Biotechnology*, 2024, no. 3, pp. 130-141 (In Russ).