

Техническая информация

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2023-9-3-90-98>

УДК 678.71:678.046

СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ, НАПОЛНЕННЫХ КВАЗИКРИСТАЛЛАМИ

Т. В. МИРОЛЮБОВА⁺, Л. В. РЕДИНА

Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), ул. Малая Калужская, 1, 119071, г. Москва, Россия

Цель работы — анализ научно-технической информации о состоянии разработок и исследований полимерных композиционных материалов (ПКМ), наполненных квазикристаллами на основе алюминия.

Рассмотрены физико-механические, триботехнические и некоторые другие свойства таких композитов на основе полимерных матриц — сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), политетрафторэтилена (ПТФЭ), сополимера этилена и тетрафторэтилена (ЭТФЭ), полисульфона (ПСУ), полифениленсульфида (ПФС), линейного полиэтилена низкой плотности (ЛПЭНП). Существенное влияние на различие характеристик ПКМ оказывают размер и содержание квазикристаллических порошков. Отмечено повышение прочностных характеристик на 10–50% по сравнению с ненаполненным полимером. Способ переработки оказывает значительное влияние на механические свойства композитов. Так, предел прочности при растяжении ПКМ, полученного методом полимеризационного наполнения, в 1,5 раза выше по сравнению с композитом, полученным методом механического смешения. Установлено, что при наполнении квазикристаллами менее 10 об.% наблюдается улучшение антифрикционных характеристик ПКМ — коэффициент трения снижается в 2 раза. Охарактеризованы основные аспекты, на которые следует обратить внимание при создании таких композитов: улучшение адгезии между наполнителем и полимером, равномерное диспергирование квазикристаллов внутри полимерной матрицы. Приведены сферы применения таких ПКМ и намечены перспективы их развития. Подчеркнуто, что целесообразно расширять ассортимент композитов, наполненных квазикристаллами, за счет более дешевых крупнотоннажных полимеров, таких как полимеры полиолефинового ряда, и вторично переработанных полимерных материалов.

Ключевые слова: квазикристаллические комплексы, Al–Cu–Fe, Al–Cu–Fe–Cr, металлополимеры, адгезия, механические свойства, триботехнические характеристики.

PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON THERMOPLASTIC POLYMER MATRIXES FILLED WITH QUASICRYSTALS

T. V. MIROLYUBOVA⁺, L. V. REDINA

A. N. Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art), Malaya Kaluzhskaya St., 1, 119071, Moscow, Russia

The purpose of the work is to analyze scientific and technical information on the state of development and research of polymer composite materials (PCM) filled with aluminum-based quasicrystals.

The physicomechanical, tribological and some other properties of such composites based on polymer matrices — ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE), polytetrafluoroethylene (PTFE), ethylene-tetrafluoroethylene copolymer (ETFE), polysulfone (PSU), polyphenylene sulfide (PPS), linear low density polyethylene (LLDPE) are considered. The size and content of quasicrystalline powders have a significant influence on the difference in the characteristics of PCM. An increase in strength characteristics by 10–50% compared to the unfilled polymer was noted. The processing method has a significant impact on the mechan-

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: tatmir@yandex.ru

ical properties of composites. Thus, the ultimate tensile strength of the PCM obtained by the method of polymerization filling is 1.5 times higher compared to the composite obtained by mechanical mixing. It was found that when filled with quasicrystals less than 10 vol.% there is an improvement in the antifriction characteristics of the PCM — the friction coefficient decreases by 2 times. The main aspects that should be paid attention to when creating such composites are characterized: improved adhesion between filler and polymer, uniform dispersion of quasicrystals inside the polymer matrix. The areas of application of such PCMs are given and the prospects for their development are outlined. It is emphasized that it is expedient to expand the range of composites filled with quasicrystals at the expense of cheaper large-tonnage polymers, such as polyolefin polymers, and recycled polymer materials.

Keywords: quasicrystalline complexes, Al–Cu–Fe, Al–Cu–Fe–Cr, metal-polymers, adhesion, mechanical properties, tribological characteristics.

Поступила в редакцию 26.06.2023

© Т. В. Миролубова, Л. В. Редина, 2023

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в [редакцию журнала](#)
Full text of articles can be purchased from the editorial office

Адрес редакции: ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь
Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Address: Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus
Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: polmattex@gmail.com
Web: <http://mpri.org.by/izdaniya/pmt/>

Образец цитирования:

Миролубова Т. В., Редина Л. В. Свойства композитов на основе термопластичных полимерных матриц, наполненных квазикристаллами // Полимерные материалы и технологии. 2023. Т. 9, № 3. С. 90–98. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2023-9-3-90-98>

Citation sample:

Mirolubova T. V., Redina L. V. Svoystva kompozitov na osnove termoplastichnykh polimernykh matrits, napolnennykh kvazikristallami [Properties of composites based on thermoplastic polymer matrixes filled with quasicrystals]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2023, vol. 9, no. 3, pp. 90–98. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2023-9-3-90-98>

Литература

1. Aqib Zahoor, Taha Aziz, Soumble Zulfqar, Aisha Sadiq, Rashid Ali, Rub Nawaz Shahid, Naeem ul Haq Tariq, Attaullah Shah, Khurram Shehzad, Fahad Ali, Hasan Bin Awais. Antimicrobial behavior of leached Al–Cu–Fe-based quasicrystals // *Applied Physics A.*, 2020, vol. 126, no. 6. doi: 10.1007/s00339-020-03611-5
2. Миролубова Т. В., Бенеманская Е. А., Редина Л. В., Неяглов О. С. Антимикробные свойства мастербатчей на основе полиолефинов и квазикристаллов // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2023) : сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием (17–20 апреля 2023 г.). Москва : ФГБОУ ВО РГУ им. А. Н. Косыгина, 2023. Ч. 3. С. 53–58.
3. Gonzaga M. A. M., dos Passos T. A., Gomes R. M. Caracterização de compósitos de alumínio reforçado com partículas quasicristalinas produzidos por stir casting/laminação // *Revista Materia*, 2020, vol. 25, no. 2, pp. 1–9. doi: 10.1590/S1517-707620200002.1031
4. Kamaeva L. V., Ryltsev R. E., Suslov A. A., Chitchelev N. M. Effect of copper concentration on the structure and properties of Al–Cu–Fe and Al–Cu–Ni melts // *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2020, vol. 32, no. 22. doi: 10.1088/1361-648X/ab73a6
5. Люпо В. А., Овчинников Е. В., Ситкевич А. Л. Влияние кластеризации частиц модификатора на физико-механические характеристики полимерных материалов // Вестник Гродненского государственного университета им. Янки Купалы. Сер. 6. Техника. 2015. № 1(198). С. 51–59.
6. Калашкин С. Д., Чердынцев В. В., Данилов В. Д. Механоактивационное получение квазикристаллических порошковых сплавов системы Al–Cu–Fe и материалов на их основе // *Кристаллография*. 2007. Т. 52, № 6. С. 989–1001.
7. Патент 2304155 РФ, МПК C09C 1/62, C08J 5/16, C09C 3/10. Композитный наполнитель в виде порошка и способ его получения /

- Пятков И. С., Калашкин С. Д., Салимон А. И., Чердынцев В. В.; заявитель и патентообладатель Государственное общеобразовательное учреждение высшего профессионального образования Московский Государственный Институт Стали и Сплавов (Технологический Университет), ООО РЕАМ-ПТИ. N 2006107489/04; заявл. 13.03.2006; опубл. 10.08.2007, Бюл. N 22.
8. Camacho N., González Carmona J. M., Espinosa Arbeláez D., Mondragón G. C., Stafford S. UHMWPE in total knee arthroplasty: successes and failures // *Revista Colombiana de Materiales*, 2020, no. 16, pp. 3–28. doi: 10.17533/udea.rcm.n16a01
 9. Anderson B. S., Boom P. D., Baikerikar K. G., Sheares Valerie V., Mallapragada Surya K. Al–Cu–Fe quasicrystal/ultra-high molecular weight polyethylene composites as biomaterials for acetabular cup prosthetics // *Biomaterials*, 2002, vol. 23, no. 8, pp. 1761–1768. doi: 10.1016/s0142-9612(01)00301-5
 10. Цетлин М. Б., Теплов А. А., Белоусов С. И., Чвалун С. Н., Головкова Е. А., Крашенинников С. В., Голубев Е. К., Пресняков М. Ю., Орехов А. С., Васильев А. Л. Влияние квазикристаллического наполнителя на трибологические свойства композита на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2015. № 10. С. 77–84. doi: 10.7868/S0207352815100200
 11. Родникова И. С., Теплов А. А., Белоусов С. И., Новокшенова Л. А., Заболотнов А. С. Композитный материал на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и квазикристаллического наполнителя (Al–Cu–Fe) // *Успехи в химии и химической технологии*. 2020. № 7. С. 129–131.
 12. Olifirov L. K., Stepashkin A. A., Sherif G., Tcherdyntsev V. V. Tribological, Mechanical and Thermal Properties of Fluorinated Ethylene Propylene Filled with Al–Cu–Cr Quasicrystals, Polytetrafluoroethylene, Synthetic Graphite and Carbon Black // *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 5. doi:10.3390/polym13050781
 13. Цетлин М. Б., Теплов А. А., Белоусов С. И., Чвалун С. Н., Головкова Е. А., Крашенинников С. В., Голубев Е. К., Пичкур Е. Б., Дмитриев П. В., Бузин А. И. Композитный материал на основе политетрафторэтилена и квазикристаллического наполнителя Al–Cu–Fe с ультранизким износом: морфология, трибологические и механические свойства // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2018. № 3. С. 83–92. doi: 10.7868/S0207352818030137
 14. DuPont Tefzel Fluoropolymer Resin : Properties Handbook [Электронный ресурс]. URL: <https://americandurafilm.com/wp-content/uploads/2022/02/Tefzel-Properties.pdf> (дата обращения: 21.06.2023).
 15. Цетлин М. Б., Теплов А. А., Белоусов С. И., Чвалун С. Н., Головкова Е. А., Крашенинников С. В., Голубев Е. К., Васильев А. Л., Пресняков М. Ю., Дмитриев П. В. Трибологические и механические свойства композитов на основе этилен-тетрафторэтилена и квазикристаллического наполнителя Al–Cu–Fe // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2017. № 3. С. 39–46. doi: 10.7868/S0207352817030179
 16. Патент 2665429 C1 РФ, МПК C08L 27/18, C08K 3/04, C08K 3/10, C08K 13/02, C08J 5/16. Антифрикционная полимерная композиция на основе фторопласта / Олифинов Л. К., Чердынцев В. В., Калашкин С. Д., Шитов Г. М., Данилов В. Д.; заявитель и патентообладатель НИТУ МИСиС. N 2017146334; заявл. 27.12.2017; опубл. 29.08.2018, Бюл. N 25.
 17. Stepashkin A. A., Chukov D. I., Olifirov L. K., Salimon A. I., Tcherdyntsev V. V. Quasicrystalline Powders as the Fillers for Polymer Based Composites: Production, Introduction to Polymer Matrix, Properties // *Research and Development – 2016 : Proceedings of the Scientific Practical Conference, Moscow, 14–15 December 2016 г.* / eds.: Anisimov K. V. [et al.]. Switzerland : Springer Open, 2018, pp. 429–437. doi: 10.1007/978-3-319-62870-7
 18. Bloom P. D., Baikerikar K. G., Anderegg J. W., Sheares V. Development of Al–Cu–Fe Quasicrystal–Poly(*p*-phenylene sulfide) Composites // *MRS Online Proceedings Library*, 2000, vol. 643. doi: 10.1557/PROC-643-K16.3
 19. Патент 2630796C1 РФ, МПК C09D 5/08, C09D 5/10, C09D 5/03, C09D 181/06, C09C 3/10. Полимер-квазикристаллическая порошковая композиция для получения антикоррозионных защитных покрытий / Чуков Д. И., Степашкин А. А., Чердынцев В. В., Калашкин С. Д., Максимкин А. В., Нязя К. В., Мостовая К. С.; заявитель и патентообладатель НИТУ МИСиС. N 2016149748; заявл. 19.12.2016; опубл. 13.09.2017, Бюл. N 26.
 20. Uflyand I. E., Drogan E. G., Burlakova V. E., Kydraliev K., Shersheva I. N., Dzhardimalieva G. I. Testing the mechanical and tribological properties of new metal–polymer nanocomposite materials based on linear low-density polyethylene and Al₆₅Cu₂₂Fe₁₃ quasicrystals // *Polymer Testing*, 2019, vol. 74, pp. 178–186. doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.01.004
 21. Миролюбова Т. В., Редина Л. В., Чмутин И. А., Курносова А. А. Получение полимерного композиционного материала, наполненного наночастицами серебра, и исследование его антимикробных свойств // *Химические волокна*. 2022. № 5. С. 22–25.
 22. Coiai S., Passaglia E., Pucci A., Ruggeri G. Nanocomposites based on thermoplastic polymers and functional nanofiller for sensor applications // *Materials*, 2015, vol. 8, no. 6, pp. 3377–3427. doi: 10.3390/ma8063377
 23. Sun J., Shen J., Chen S., Cooper M. A., Fu H., Wu D., Yang Z. Nanofiller reinforced biodegradable PLA/PHA composites: current status and future trends // *Polymers*, 2018, vol. 10, no. 5. doi: 10.3390/polym10050505

References

1. Aqib Zahoar, Taha Aziz, Soumble Zulfqar, Aisha Sadiq, Rashid Ali, Rub Nawaz Shahid, Naeem ul Haq Tariq, Attaullah Shah, Khurram Shehzad, Fahad Ali, Hasan Bin Awais. Antimicrobial behavior of leached Al–Cu–Fe-based quasicrystals. *Applied Physics A*, 2020, vol. 126, no. 6. doi: 10.1007/s00339-020-03611-5
2. Mirolyubova T. V., Benemanskaya E. A., Redina L. V., Neyaglov O. S. Antimikrobynye svoystva masterbatchey na osnove poliolefinov i kvazikristallov [Antimicrobial properties of masterbatches based on polyolefins and quasicrystals]. *Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh issledovateley s mezhdunarodnym uchastiem «Innovatsionnoe razvitie tekhniki i tekhnologii v promyshlennosti (INTEKS-2023)»* [Collection of materials All-Russian Scientific Conference of Young Researchers with international participation “Innovative development of equipment and technologies in industry (INTEX-2023)”. Moscow : FGBOU VO RGU im. A. N. Kosygina Publ., 2023, ch. 3, pp. 53–58.
3. Gonzaga M. A. M., dos Passos T. A., Gomes R. M. Caracterização de compósitos de alumínio reforçado com partículas quasicristalinas produzidos por stir casting/laminação [Characterization of reinforced aluminum composites with quasicrystalline particles produced by stir casting/rolling]. *Revista Materia*, 2020, vol. 25, no. 2, pp. 1–9. doi: 10.1590/S1517-707620200002.1031
4. Kamaeva L. V., Ryltsev R. E., Suslov A. A., Chchelkatchev N. M. Effect of copper concentration on the structure and properties of Al–Cu–Fe and Al–Cu–Ni melts. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2020, vol. 32, no. 22. doi: 10.1088/1361-648X/ab73a6
5. Liopo V. A., Ovchinnikov E. V., Sitkevich A. L. Vliyanie klasterizatsii chastits modifikatora na fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki polimernykh materialov [The impact of clustering of particles of modifier on physical and mechanical properties of polymeric materials]. *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta im. Yanki Kupaly. Ser. 6. Tekhnika* [Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science], 2015, no. 1(198), pp. 51–59.
6. Kaloshkin S. D., Cherdynstev V. V., Danilov V. D. Mekhanoaktivatsionnoe poluchenie kvazikristallicheskiykh poroshkovykh splavov sistemy Al–Cu–Fe i materialov na ikh osnove [Preparation of Al–Cu–Fe quasicrystalline powdered alloys and related materials by mechanical activation]. *Kristallografiya* [Crystallography], 2007, vol. 52, no. 6, pp. 989–1001.
7. Pyatov I. S., Kaloshkin S. D., Salimon A. I., Cherdynstev V. V. Kompozitnyy napolnitel' v vide poroshka i sposob ego polucheniya [Com-

- posite filler in the form of a powder and a process for preparation]. Patent RF, no. 2304155, 2007.
8. Camacho N., González Carmona J. M., Espinosa Arbeláez D., Mondragón G. C., Stafford S. UHMWPE in total knee arthroplasty: successes and failures. *Revista Colombiana de Materiales*, 2020, no. 16, pp. 3–28. doi: 10.17533/udea.rcm.n16a01
 9. Anderson B. S., Boom P. D., Baikerikar K. G., Sheares Valerie V., Mallapragada Surya K. Al-Cu-Fe quasicrystal/ultra-high molecular weight polyethylene composites as biomaterials for acetabular cup prosthetics. *Biomaterials*, 2002, vol. 23, no. 8, pp. 1761–1768. doi: 10.1016/S0142-9612(01)00301-5
 10. Tsetlin M. B., Teplov A. A., Belousov S. I., Chvalun S. N., Golovkova E. A., Krashenninnikov S. V., Golubev E. K., Presnyakov M. Yu., Orekhov A. S., Vasil'ev A. L. Vliyanie kvazikristallicheskogo napolnitelya na tribologicheskie svoystva kompozita na osnove sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena [Influence of a quasicrystalline filler on the tribological properties of a composite based on ultra-high molecular weight polyethylene]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya* [Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies], 2015, no. 10, pp. 77–84. doi: 10.7868/S0207352815100200
 11. Rodnikova I. S., Teplov A. A., Belousov S. I., Novokshonova L. A., Zabolotnov A. S. Kompozitnyy material na osnove sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena i kvazikristallicheskogo napolnitelya (Al–Cu–Fe) [Composite material based on ultrahigh molecular weight polyethylene and quasicrystalline filler (Al–Cu–Fe)]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Journal Advances in Chemistry and Chemical Technology], 2020, no. 7, pp. 129–131.
 12. Olifirov L. K., Stepashkin A. A., Sherif G., Tcherdyntsev V. V. Tribological, Mechanical and Thermal Properties of Fluorinated Ethylene Propylene Filled with Al-Cu-Cr Quasicrystals, Polytetrafluoroethylene, Synthetic Graphite and Carbon Black. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 5. doi:10.3390/polym13050781
 13. Tsetlin M. B., Teplov A. A., Belousov S. I., Chvalun S. N., Golovkova E. A., Krashenninnikov S. V., Golubev E. K., Pichkur E. B., Presnyakov M. Yu., Dmitriyakov P. V., Buzin A. I. Kompozitnyy material na osnove politetrafluoretilena i kvazikristallicheskogo napolnitelya Al–Cu–Fe s ul'tranizkim iznosom: morfologiya, tribologicheskie i mekhanicheskie svoystva [Ultralow wear composite material based on polytetrafluoroethylene and Al–Cu–Fe quasicrystalline filler: morphology, tribological, and mechanical properties]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya* [Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies], 2018, no. 3, pp. 83–92. doi: 10.7868/S0207352818030137
 14. DuPont Tefzel Fluoropolymer Resin : Properties Handbook. Available at: <https://americandurafilm.com/wp-content/uploads/2022/02/Tefzel-Properties.pdf> (accessed 21.06.2023).
 15. Tsetlin M. B., Teplov A. A., Belousov S. I., Chvalun S. N., Golovkova E. A., Krashenninnikov S. V., Golubev E. K., Vasil'ev A. L., Presnyakov M. Yu., Dmitriyakov P. V. Tribologicheskie i mekhanicheskie svoystva kompozitov na osnove etilen-tetrafluoretilena i kvazikristallicheskogo napolnitelya Al–Cu–Fe [Tribological and mechanical properties of composites based on ethylene-tetrafluoroethylene and Al–Cu–Fe quasicrystalline filler]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya* [Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies], 2017, no. 3, pp. 39–46. doi: 10.7868/S0207352817030179
 16. Olifirov L. K., Cherdyntsev V. V., Kaloshkin S. D., Shitov G. M., Danilov V. D. Antifriktsionnaya polimernaya kompozitsiya na osnove ftoroplasta [Antifricition polymer composition based on fluoroplastic]. Patent RF, no. 2665429, 2018.
 17. Stepashkin A. A., Chukov D. I., Olifirov L. K., Salimon A. I., Tcherdyntsev V. V. Quasicrystalline Powders as the Fillers for Polymer Based Composites: Production, Introduction to Polymer Matrix, Properties. *Proceedings of the Scientific Practical Conference "Research and Development – 2016"*. Eds.: Anisimov K. V. [et al.]. Switzerland : Springer Open, 2018, pp. 429–437. doi: 10.1007/978-3-319-62870-7
 18. Bloom P. D., Baikerikar K. G., Anderegg J. W., Sheares V. Development of Al–Cu–Fe Quasicrystal-Poly(p-phenylene sulfide) Composites. *MRS Online Proceedings Library*, 2000, vol. 643. doi: 10.1557/PROC-643-K16.3
 19. Chukov D. I., Stepashkin A. A., Cherdyntsev V. V., Kaloshkin S. D., Maksimkin A. V., Nyaza K. V., Mostovaya K. S. Polimer-kvazikristallicheskaya poroshkovaya kompozitsiya dlya polucheniya antikorroziynykh zashchitnykh pokrytiy [Polymer-quasicrystalline powder composition for obtaining anti-corrosion protective coatings]. Patent RF, no. 2630796C1, 2017.
 20. Uflyand I. E., Drogan E. G., Burlakova V. E., Kydralieva K., Shershneva I. N., Dzhardimalieva G. I. Testing the mechanical and tribological properties of new metal-polymer nanocomposite materials based on linear low-density polyethylene and Al₆₅Cu₂₂Fe₁₃ quasicrystals. *Polymer Testing*, 2019, vol. 74, pp. 178–186. doi: 10.1016/j.polymertesting.2019.01.004
 21. Mirolyubova T. V., Redina L. V., Chmutin I. A., Kurnosova A. A. Poluchenie polimernogo kompozitsionnogo materiala, napolnennogo nanochastitsami srebra, i issledovanie ego antimikrobnnykh svoystv [Preparation of a polymer composite material filled with silver nanoparticles and study of its antimicrobial properties]. *Khimicheskie volokna* [Fibre Chemistry], 2022, no. 5, pp. 22–25.
 22. Coiai S., Passaglia E., Pucci A., Ruggeri G. Nanocomposites based on thermoplastic polymers and functional nanofiller for sensor applications. *Materials*, 2015, vol. 8, no. 6, pp. 3377–3427. doi: 10.3390/ma8063377
 23. Sun J., Shen J., Chen S., Cooper M. A., Fu H., Wu D., Yang Z. Nanofiller reinforced biodegradable PLA/PHA composites: current status and future trends. *Polymers*, 2018, vol. 10, no. 5. doi: 10.3390/polym10050505