<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-3-55-64>

УДК 539.23; 538.953-405

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ КАРБИДА КРЕМНИЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

Л. Е. ЕВСЕЕВА, К. В. НИКОЛАЕВА⁺, С. М. ДАНИЛОВА-ТРЕТЬЯК, В. Г. ЛЕЩЕНКО

Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, ул. П. Бровки, 15, 220072, г. Минск, Беларусь

Изучено влияние размера частиц карбида кремния на тепловое поведение и теплофизические свойства высоконаполненных полимерных композитов на основе полиэтилена высокого давления. В качестве наполнителя использовали коммерчески доступные частицы карбида кремния в широком размерном диапазоне от 0,9 мкм до 63 мкм и смесь частиц SiC различной дисперсности, полученную в Институте тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси методом карботермического восстановления кремнезёма в электротермическом кипящем слое, состоящую из смеси частиц карбида кремния различного размера от 0,2 мкм до 50 мкм. Методом смешения в растворе под воздействием ультразвукового поля с последующим горячим прессованием получали высоконаполненные полимерные композиты с концентрацией карбида кремния 60 мас.%.

Теплофизические характеристики композитов исследовали методом лазерной вспышки. Показано, что тепло- и температуропроводность увеличивается с ростом размера частиц наполнителя. Значение коэффициента теплопроводности достигает наибольшего значения 1,43 Вт/(м·К) при использовании в качестве наполнителя частиц карбида кремния размером 40–50 мкм, увеличиваясь в 5 раз по сравнению с ненаполненным полиэтиленом высокого давления. Установлено, что размер частиц наполнителя не оказывает существенного влияния на температуру плавления и температуру кристаллизации композитов. Выдвинуто предположение, что при наполнении полимерной матрицы смесью частиц разного размера упаковка наполнителя становится более равномерной, плотной, обеспечивая более эффективный теплоперенос.

Ключевые слова: полимерные композиты, полиэтилен высокого давления, карбид кремния, теплопроводность, температуропроводность, удельная теплоемкость.

THE INFLUENCE OF THE SIZE OF SILICON CARBIDE PARTICLES ON THE THERMAL PROPERTIES OF HIGHLY FILLED THERMOPLASTS

L. E. EVSEEVA, K. V. NIKOLAEVA⁺, S. M. DANILOVA-TRETIK, V. G. LESHCHENKO

A. V. Lykov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Sciences of Belarus, P. Brovki St., 15, 220072, Minsk, Belarus

The effect of the size of silicon carbide particles on the thermal behavior and thermophysical properties of highly filled polymer composites based on low-density polyethylene (LDPE) has been studied. As a filler, we used commercially available silicon carbide with a wide variation in particle size (from 0.9 to 63 μm) and a material obtained at the A. V. Luikov Institute of Heat&Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus by the method of carbothermal reduction of silica in an electrothermal fluidized bed. The material consists of different-sized SiC particles (0.2–50 μm). Highly filled polymer composites with a silicon carbide concentration of 60 wt.% were obtained by mixing in a

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: nikolajewa@hmti.ac.by

solution under the action of an ultrasonic field followed by hot pressing.

The thermophysical characteristics of the composites were studied by the laser flash method. It is shown that the thermal conductivity and thermal diffusivity are increased with an increase in the size of the filler particles. The value of the thermal conductivity coefficient reaches the highest value of 1.43 W/(m · K) when silicon carbide particles with a size of 40–50 μm are used as a filler, increasing by a factor of 5 in comparison with unfilled high-pressure polyethylene. It was found that the size of the filler particles does not significantly affect the melting and crystallization temperatures of the composites. It has been suggested that when the polymer matrix is filled with a mixture of particles of different sizes, the packing of the filler becomes more uniform and dense, providing more efficient heat transfer.

Keywords: polymer composites, low-density polyethylene, silicon carbide, thermal conductivity, thermal diffusivity, specific heat.

Поступила в редакцию 24.06.2021

© Л. Е. Евсеева, К. В. Николаева, С. М. Данилова-Третьяк, В. Г. Лещенко, 2021

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:

Евсеева Л. Е., Николаева К. В., Данилова-Третьяк С. М., Лещенко В. Г. Влияние размера частиц карбида кремния на теплофизические свойства высоконаполненных термопластов // Полимерные материалы и технологии. 2021. Т. 7, № 3. С. 55–64. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-3-55-64>

Citation sample:

Evseeva L. E., Nikolaeva K. V., Danilova-Tret'yak S. M., Leshchenko V. G. Vliyanie razmera chastits karbida kremniya na teplofizicheskie svoystva vysokonapolnennykh termoplastov [The influence of the size of silicon carbide particles on the thermal properties of highly filled thermoplasts]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2021, vol. 7, no. 3, pp. 55–64. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-3-55-64>

Литература

1. Липатов Ю. С. Физическая химия наполненных полимеров. М.: Химия, 1977. 304 с.
2. Indra Vir Singh, Masataka Tanaka, Morinobu Endo. Effect of interface on the thermal conductivity of carbon nanotube composites // International Journal of Thermal Sciences, 2007, vol. 46, is. 9, pp. 842–847. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.11.003
3. Congliang Huang, Xin Qian, Ronggui Yang. Thermal conductivity of polymers and polymer nanocomposites // Materials Science and Engineering: R: Reports, 2018, vol. 132, pp. 1–22. doi: 10.1016/j.mser.2018.06.002
4. Burger N., Laachachi A., Ferriol M., Lutz M., Toniazio V., Ruch D. Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory // Progress in Polymer Science, 2016, vol. 61, pp. 1–28. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2016.05.001
5. Песецкий С. С., Богданович С. П., Мышкин Н. К. Наноккомпозиты, получаемые диспергированием слоистых силикатов в расплавах полимеров (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2015. Т. 1, №1. С. 7–37. doi: 10.32864/polymmattech-2015-1-1-7-37.
6. Ishida H., Rimdusit S. Very high thermal conductivity obtained by boron nitride-filled polybenzoxazine // Thermochimica Acta, 1998, vol. 320, is. 1–2, pp. 177–186. doi: 10.1016/S0040-6031(98)00463-8
7. Moradi S., Calventus Y., Román F., Hutchinson J. M. Achieving High Thermal Conductivity in Epoxy Composites: Effect of Boron Nitride Particle Size and Matrix-Filler Interface // Polymers, 2019, vol. 11. doi: 10.3390/polym11071156
8. Burgemeister E. A., Muench W. von, Pettenpaul E. Thermal conductivity and electrical properties of 6H silicon carbide // J. Appl. Phys., 1979, vol. 50, is. 9, pp. 5790–5794. doi: 10.1063/1.326720
9. Harris G. L. Thermal conductivity of SiC // Properties of silicon carbide / ed. G. L. Harris. London: INSPEC, 1995, pp. 5–6.

10. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М. : Атомиздат, 1968. 474 с.
11. Tianle Zhou, Xin Wang, Xiaoheng Liu, Dangsheng Xiong. Improved thermal conductivity of epoxy composites using a hybrid multi-walled carbon nanotube/micro-SiC filler // *Carbon*, 2010, vol. 48, is. 4, pp. 1171–1176. doi: 10.1016/j.carbon.2009.11.040
12. Dianyu Shen, Zhaolin Zhan, Zhiduo Liu, Yong Cao, Li Zhou, Yuanli Liu, Wen Dai, Kazuhito Nishimura, Chaoyang Li, Cheng-Te Lin, Nan Jiang, Jinhong Yu. Enhanced thermal conductivity of epoxy composites filled with silicon carbide nanowires // *Scientific Reports*, 2017, vol. 7. doi: 10.1038/s41598-017-02929-0
13. Wenying Zhou, Demei Yu, Chao Min, Yinping Fu, Xiusheng Guo. Thermal, dielectric, and mechanical properties of SiC particles filled linear low-density polyethylene composites // *J. of Applied Polymer Science*, 2009, vol. 112, is. 3, pp. 1695–1703. doi: 10.1002/app.29602
14. Дубкова В. И., Бородуля В. А., Виноградов Л. М., Данилова-Третьяк С. М., Евсеева Л. Е., Пинчук Т. И. Наночастицы мелкодисперсного карбида кремния, полученного в электротермическом кипящем слое, как структурный модификатор термопластичных полимеров // *Инженерно-физический журнал*. 2019. Т. 92, № 5. С. 2291–2305.
15. Бородуля В. А., Виноградов Л. М., Гребеньков А. Ж., Михайлов А. А. Разработка и исследование метода получения мелкодисперсного карбида кремния в электротермическом кипящем слое // *Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии : материалы X Международной научно-технической конференции (Гродно, 15–16 октября 2013 г.)* / ред. А. И. Свириденко [и др.]. Минск : Белорусская наука, 2014. С. 133–140.
16. Бородуля В. А., Виноградов Л. М., Гребеньков А. Ж., Михайлов А. А. Синтез карбида кремния в электротермическом реакторе с кипящим слоем углеродных частиц // *Горение и плазموхимия*. 2015. Т. 13, № 2. С. 92–102.
17. Кравцевич А. В., Ровба И. А., Шашура Л. И., Свириденко А. И., Данилова-Третьяк С. М., Евсеева Л. Е., Николаева К. В. Влияние гибридного микро- и нанонаполнителя на механические, электро- и теплофизические свойства композита на основе полиэтилена // *Тепло- и массоперенос-2015 : сборник научных трудов*. Минск, 2016. С. 261–268.
18. Blaine R. L. Thermal application note. Polymer heats of fusion. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tainstruments.com/pdf/literature/TN048.pdf> (дата обращения: 15.06.2021).
19. Evseeva L. E., Tanaeva S. A. Thermal conductivity of micro- and nanostructural epoxy composites at low temperatures // *Mechanics of Composite Materials*, 2008, vol. 44, is. 1, pp. 87–92. doi: 10.1007/s11029-008-0010-1
20. Cheewawuttipong W., Fuoka D., Tanoue S., Uematsu H., Iemoto Y. Thermal and mechanical properties of polypropylene/boron nitride composites // *Energy Procedia*, 2013, vol. 34, pp. 808–817. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.817
21. Muratov D. S., Stepashkin A. A., Anshin S. M., Kuznetsov D. V. Controlling thermal conductivity of high density polyethylene filled with modified hexagonal boron nitride (hBN) // *J. Alloys Compd*, 2018, vol. 735, pp. 1200–1205. doi: 10.1016/j.jallcom.2017.11.234
22. Дубкова В. И., Виноградов Л. М., Бородуля В. А., Евсеева Л. Е., Маевская О. И., Кривулец А. И. Исследование влияния мелкодисперсного карбида кремния на структуру и свойства эпоксидной композиции // *Тепло- и массоперенос-2014 : сборник научных трудов*. Минск, 2015. С. 195–203.
23. Петрусенко Е. В. Разработка полимерной адгезионной композиции для антикоррозионной изоляции труб : автореф. дис.... канд. хим. наук : 05.17.14. Москва, 1995. 23 с.

References

1. Lipatov Yu. S. *Fizicheskaja himija napolnennyh polimerov* [Physical chemistry of filled polymers]. Moscow : Khimia Publ., 1977. 304 p.
2. Indra Vir Singh, Masataka Tanaka, Morinobu Endo. Effect of interface on the thermal conductivity of carbon nanotube composites. *International Journal of Thermal Sciences*, 2007, vol. 46, is. 9, pp. 842–847. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.11.003
3. Congliang Huang, Xin Qian, Ronggui Yang. Thermal conductivity of polymers and polymer nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2018, vol. 132, pp. 1–22. doi: 10.1016/j.mser.2018.06.002
4. Burger N., Laachachi A., Ferriol M., Lutz M., Toniazzo V., Ruch D. Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory. *Progress in Polymer Science*, 2016, vol. 61, pp. 1–28. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2016.05.001
5. Pesetskii S. S., Bogdanovich S. P., Myshkin N. K. Nanokompozity, poluchaemye dispergированием sloistyxh silikatov v rasplavakh polimerov (obzor) [Nanocomposites prepared by dispersing layered silicates in polymer melt (review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2015, vol. 1, no. 1, pp. 7–37. doi: 10.32864/polymmattech-2015-1-1-7-37
6. Ishida H., Rimdusit S. Very high thermal conductivity obtained by boron nitride-filled polybenzoxazine. *Thermochimica Acta*, 1998, vol. 320, is. 1–2, pp. 177–186. doi: 10.1016/S0040-6031(98)00463-8
7. Moradi S., Calventus Y., Román F., Hutchinson J. M. Achieving High Thermal Conductivity in Epoxy Composites: Effect of Boron Nitride Particle Size and Matrix-Filler Interface. *Polymers*, 2019, vol. 11. doi: 10.3390/polym11071156
8. Burgemeister E. A., Muench W. von, Pettenpaul E. Thermal conductivity and electrical properties of 6H silicon carbide. *J. Appl. Phys.*, 1979, vol. 50, is. 9, pp. 5790–5794. doi: 10.1063/1.326720
9. Harris G. L. Thermal conductivity of SiC. *Properties of silicon carbide*. Ed. G. L. Harris. London : INSPEC, 1995, pp. 5–6.
10. Chirkin V. S. *Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoy tekhniki* [Thermophysical properties of materials for nuclear technology]. Moscow : Atomizdat Publ., 1968. 474 p.
11. Tianle Zhou, Xin Wang, Xiaoheng Liu, Dangsheng Xiong. Improved thermal conductivity of epoxy composites using a hybrid multi-walled carbon nanotube/micro-SiC filler. *Carbon*, 2010, vol. 48, is. 4, pp. 1171–1176. doi: 10.1016/j.carbon.2009.11.040
12. Dianyu Shen, Zhaolin Zhan, Zhiduo Liu, Yong Cao, Li Zhou, Yuanli Liu, Wen Dai, Kazuhito Nishimura, Chaoyang Li, Cheng-Te Lin, Nan Jiang, Jinhong Yu. Enhanced thermal conductivity of epoxy composites filled with silicon carbide nanowires. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7. doi: 10.1038/s41598-017-02929-0
13. Wenying Zhou, Demei Yu, Chao Min, Yinping Fu, Xiusheng Guo. Thermal, dielectric, and mechanical properties of SiC particles filled linear low-density polyethylene composites. *J. of Applied Polymer Science*, 2009, vol. 112, is. 3, pp. 1695–1703. doi: 10.1002/app.29602
14. Dubkova V. I., Borodulya V. A., Vinogradov L. M., Danilova-Tret'yak S. M., Evseeva L. E., Pinchuk T. I. Nanochasticy melkodispersnogo karbida kremniya, poluchennogo v jelektrotermicheskom kipjashchem sloe, kak strukturnyj modifikator termoplastichnyh polimerov [Nanoparticles of finely dispersed silicon carbide obtained in an electrothermal fluidized bed as a structural modifier of thermoplastic polymers]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 2019, vol. 92, no. 5, pp. 2291–2305.
15. Borodulya V. A., Vinogradov L. M., Greben'kov A. Zh., Mikhaylov A. A. Razrabotka i issledovanie metoda polucheniya melkodispersnogo karbida kremniya v elektrotermicheskom kipjashchem sloe [Development and research of a method for producing finely dispersed silicon carbide in an electrothermal fluidized bed]. *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Energo- i materialosberegayushchie ekologicheski chistye tekhnologii»* [Materials of the X International Scientific and Technical Conference Materials "Energy- and material-saving environmentally friendly technologies"]. Minsk : Belaruskaya navuka Publ., 2014, pp. 133–140.
16. Borodulya V. A., Vinogradov L. M., Greben'kov A. Zh., Mikhaylov A. A. Sintez karbida kremniya v elektrotermicheskom reaktore s kipjashchim sloem uglerodnykh chastits [Synthesis of silicon carbide in an electrothermal reactor with a fluidized bed of carbon particles]. *Gorenie i plazmokhimiya* [Combustion and Plasma Chemistry], 2015, vol. 13, no. 2, pp. 92–102.

17. Kravtsevich A. V., Rovba I. A., Shashura L. I., Sviridenok A. I., Danilova-Tret'yak S. M., Evseeva L. E., Nikolaeva K. V. Vliyanie gibridnogo mikro- i nanonapolnitelya na mekhanicheskie, elektro- i teplofizicheskie svoystva kompozita na osnove polietilena [Influence of a hybrid micro- and nanofiller on the mechanical, electrical and thermophysical properties of a composite based on polyethylene]. *Teplo- i massoperenos-2015* [Heat and mass transfer-2015]. Minsk, 2016, pp. 261–268.
 18. Blaine R. L. Thermal application note. Polymer heats of fusion. Available at: <http://www.tainstruments.com/pdf/literature/TN048.pdf> (accessed 15.06.2021)
 19. Evseeva L. E., Tanaeva S. A. Thermal conductivity of micro- and nanostructural epoxy composites at low temperatures. *Mechanics of Composite Materials*, 2008, vol. 44, is. 1, pp. 87–92. doi: 10.1007/s11029-008-0010-1
 20. Cheewawuttipong W., Fuoka D., Tanoue S., Uematsu H., Iemoto Y. Thermal and mechanical properties of polypropylene/boron nitride composites. *Energy Procedia*, 2013, vol. 34, pp. 808–817. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.817
 21. Muratov D. S., Stepashkin A. A., Anshin S. M., Kuznetsov D. V. Controlling thermal conductivity of high density polyethylene filled with modified hexagonal boron nitride (hBN). *J. Alloys Compd*, 2018, vol. 735, pp. 1200–1205. doi: 10.1016/j.jallcom.2017.11.234
 22. Dubkova V. I., Vinogradov L. M., Borodulya V. A., Evseeva L. E., Maevskaya O. I., Krivulets A. I. Issledovanie vliyaniya melkodispersnogo karbida kremniya na strukturu i svoystva epoksidnoy kompozitsii [Investigation of the influence of finely dispersed silicon carbide on the structure and properties of the epoxy composition]. *Teplo- i massoperenos-2014* [Heat and mass transfer-2014]. Minsk, 2015, pp. 195–203.
 23. Petrusenko E. V. Razrabotka polimernoy adgezionnoy kompozitsii dlya antikorrozionnoy izolyatsii trub. Avtoref. diss. kand. khim. nauk [Development of a polymer adhesive composition for anticorrosive insulation of pipes. PhD chem. sci. abstract diss.]. Moscow, 1995. 23 p.
-