

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-4-48-55>

УДК 678.046

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ГИБРИДНЫХ КОМПОЗИТОВ ПОЛИАМИДА 6 С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ СТЕКЛОВОЛОКНА И ДОБАВКАМИ МОНТМОРИЛЛОНИТА

В. Н. АДЕРИХА⁺, В. В. ДУБРОВСКИЙ, В. Н. КОВАЛЬ

Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

Исследовано влияние малых добавок монтмориллонита на структуру и механические свойства композита полиамида 6 (ПА6), наполненного 65 мас.% стекловолокна. Цель работы — изучить возможность получения композитов из ПА6 с повышенными показателями модулей упругости и прочности при растяжении и изгибе.

Механические свойства композитов характеризовали модулем упругости и прочностью при растяжении, структуру и морфологию композитов исследовали методами дифференциальной сканирующей калориметрии и электронной микроскопии.

Установлено, что наполнение ПА6 2,5–5,0 мас.% монтмориллонита и ≥ 65 мас.% стекловолокна повышает модуль упругости при растяжении композитов гибридного наполнения на 2–4 ГПа по сравнению с экстраполируемыми значениями для стеклопластика с равным весовым содержанием наполнителя до значений 24–27 ГПа и до 22–24 ГПа при изгибе. Напротив, показатели прочности композитов гибридного наполнения при растяжении и изгибе в этой области степеней наполнения составляют соответственно 210 МПа и 360 МПа и заметно уступают стеклопластикам с близким или меньшим (55–60%) содержанием стекловолокна.

Снижение показателей прочности композитов гибридного наполнения отнесено на счет интенсификации процессов фрагментации волокон, термомеханической и гидролитической деструкции ПА6 с ростом степени наполнения выше предельных степеней наполнения промышленных стеклопластиков. Достижение повышенных значений модуля упругости предположительно обусловлено выраженным ростом степени кристалличности ПА6 и образованием транскристаллических структур на поверхности частиц монтмориллонита.

Ключевые слова: полиамид 6, стекловолокно, монтмориллонит, механические свойства, степень кристалличности, транскристалличность.

MECHANICAL PROPERTIES OF POLYAMIDE 6 HYBRID COMPOSITES WITH HIGH CONTENT OF GLASS FIBER AND MONTMORILLONITE ADDITIONS

V. N. ADERIKHA⁺, V. V. DUBROVSKII, V. N. KOVAL

V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus

The effect of small additions of montmorillonite (MMT) on the structure and mechanical properties of a polyamide 6 (PA6) composite filled with ≥ 65 wt.% of glass fiber (GF) is studied. The purpose of the work is to study the possibility of producing PA6 composites with increased values of tensile and bending elastic moduli and strength.

The mechanical properties of the composites were characterized by modulus of elasticity and tensile

⁺Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: vnad@tut.by

strength, the structure and morphology of the composites were studied differential scanning calorimetry and electron microscopy method.

It is found that the filling of PA6 with 2.5–5.0 wt.% of MMT and ≥ 65 wt.% of GF increases the tensile modulus of hybrid composites (HC) by 2–4 GPa compared with the extrapolated value for the GF-filled PA6 (GFPA) with an equal weight content of fillers reaching the values of 24–27 GPa and those of the bending modulus to 22–24 GPa. On the contrary, the tensile and bending strength indicators of in this filler content range amount to 210 MPa and 360 MPa respectively, being noticeably inferior to GFPA with a similar or lower (55–60%) GF content, which is attributed to increased fiber fragmentation, thermomechanical and hydrolytic degradation of PA6 at high filler content.

The decrease in the strength of hybrid filled composites is attributed to the intensification of the processes of fiber fragmentation, thermomechanical and hydrolytic degradation of PA6 with an increase in the degree of filling above the maximum degrees of filling of industrial GFPA. The achievement of increased elastic modulus values is presumably due to a pronounced increase in the degree of crystallinity of PA6 and the formation of transcrystalline structures on the surface of MMT particles.

Keywords: polyamide, glass fiber, montmorillonite, mechanical properties, degree of crystallinity, transcrystallinity.

Поступила в редакцию 14.11.2024

© В. Н. Адериха, В. В. Дубровский, В. Н. Коваль, 2024

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:

Адериха В. Н., Дубровский В. В., Коваль В. Н. Механические свойства и структура гибридных композитов полиамида 6 с высоким содержанием стекловолокна и добавками монтмориллонита // Полимерные материалы и технологии. 2024. Т. 10, № 4. С. 48–55. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-4-48-55>

Citation sample:

Aderikha V. N., Dubrovskiy V. V., Koval' V. N. Mekhanicheskie svoystva i struktura gibridnykh kompozitov poliamida 6 s vysokim soderzhaniem steklovolokna i dobavkami montmorillonita [Mechanical properties of polyamide 6 hybrid composites with high content of glass fiber and montmorillonite additions]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2024, vol. 10, no. 4, pp. 48–55. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-4-48-55>

Литература

1. Полимерные композиционные материалы на основе ПА-6 // Филиал «Завод Химволокно» ОАО «Гродно Азот». 2024 [Электронный ресурс]. URL: <https://grodno-khim.by/produktsiya-i-uslugi/proizvodstvo/polimernye-kompozitsionnye-materialy-polimernye-kompozitsionnye-materialy-na-osnove-pa-6> (дата обращения: 10.06.2024).
2. Karger-Kocsis J., Mahmood H., Pegoretti A. Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites // *Progr. Mater. Sci.*, 2015, vol. 73, pp. 1–43. doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.02.003
3. Ning N., Fu S., Zhang W., Chen F., Wang K., Deng H., Zhang Q., Fu Q. Realizing the enhancement of interfacial interaction in semicrystalline polymer/filler composites via interfacial crystallization // *Prog. Polym. Sci.*, 2012, vol. 37, pp. 1425–1455. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2011.12.005
4. Wu S., Wang F., Ma C. M., Chang W., Kuo C., Kuan H., Chen W. Mechanical, thermal and morphological properties of glass fiber and carbon fiber reinforced polyamide-6 and polyamide-6 / clay nanocomposites // *Mater. Lett.*, 2001, vol. 49, pp. 327–333. doi: 10.1016/s0167-577x(00)00394-3
5. Песецкий С. С., Богданович С. П., Дубровский В. В., Содылева Т. М., Адериха В. Н., Усова В. Н. Морфология и свойства гибридных композитов ПА6 с короткими углеродными волокнами и органоглиной // *Полимерные материалы и технологии*. 2016. Т. 2, № 3. С. 47–57.

6. Nanoth R., Jayanarayanan K., Sarath Kumar P., Balachandran M., Pegoretti A. Static and dynamic mechanical properties of hybrid polymer composites: A comprehensive review of experimental, micromechanical and simulation approaches // *Composites: Part A*, 2023, vol. 174. doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107741
7. Nanoth R., Jayanarayanan K. Polypropylene/short glass fiber/nanosilica hybrid composites: evaluation of morphology, mechanical, thermal, and transport properties. // *Polym. Bull.*, 2018, vol. 75, pp. 2587–2605. doi: 10.1007/s00289-017-2173-1
8. Dubrovsky V. V., Shapovalov V. A., Aderikha V. N., Pesetskii S. S. Effect of hybrid filling with short glass fibers and expanded graphite on structure, rheological and mechanical properties of poly(ethylene terephthalate) // *Mater. Today Commun.*, 2018, vol. 17, pp. 15–23. doi: 10.1016/j.mtcomm.2018.08.002
9. Дубровский В. В., Адериха В. Н., Песецкий С. С., Шаповалов В. А. Гибридное наполнение полиэтилентерефталата многостенными углеродными нанотрубками и коротким стекловолокном // *Журнал прикладной химии*. 2021. Т. 94, № 6. С. 758–766. doi: 10.31857/S0044461821060104
10. Hua Y., Li F., Liu Y., Huang G., Xiao H., Li Y., Hu N., Fu S. Positive synergistic effect of graphene oxide/carbon nanotube hybrid coating on glass fiber/epoxy interfacial normal bond strength // *Compos. Sci. Techn.*, 2017, vol. 149, pp. 294–304. doi: 10.1016/j.compscitech.2017.06.024
11. Sharma S., Rawal J., Dhakate S. R., Singh B. P. Synergistic bridging effects of graphene oxide and carbon nanotube on mechanical properties of aramid fiber reinforced polycarbonate composite tape // *Compos. Sci. Techn.*, 2020, vol. 199. doi: 10.1016/j.compscitech.2020.108370
12. Fornes T. D., Paul D. R. Crystallization behavior of nylon 6 nanocomposites // *Polymer*, 2003, vol. 44, pp. 3945–3961. doi: 10.1016/S0032-3861(03)00344-6
13. Thomason J. L. The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene: 5. Injection moulded long and short fibre PP // *Composites Part A*, 2002, vol. 33, no. 12, pp. 1641–1652. doi: 10.1016/S1359-835X(02)00179-3
14. Homminga D. S., Goderis B., Mathot V. B. F., Groeninckx G. Crystallization behavior of polymer/montmorillonite nanocomposites. Part III. Polyamide-6/montmorillonite nanocomposites, influence of matrix molecular weight, and of montmorillonite type and concentration // *Polymer*, 2006, vol. 47, pp. 1630–1639. doi: 10.1016/j.polymer.2005.10.141
15. Lincoln D. M., Vaia R. A., Wang Z., Hsiao B. S., Krishnamoorti R. Temperature dependence of polymer crystalline morphology in nylon 6/montmorillonite nanocomposites // *Polymer*, 2001, vol. 42, is. 25, pp. 09975–09985. doi: 10.1016/S0032-3861(01)00542-0
16. Maiti P., Okamoto M. Crystallization controlled by silicate surfaces in nylon 6-clay nanocomposites // *Macromol. Mater. Eng.*, 2003, vol. 288, pp. 440–445. doi: 10.1002/mame.200390040

References

1. Polimernye kompozitsionnye materialy na osnove PA-6 [Polymer composites based on PA6]. Available at: <https://grodnokhim.by/produksiya-i-uslugi/proizvodstvo/polimernye-kompozitsionnye-materialy-/polimernye-kompozitsionnye-materialy-na-osnove-pa-6> (accessed 10.06.2024).
2. Karger-Kocsis J., Mahmood H., Pegoretti A. Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites. *Progr. Mater. Sci.*, 2015, vol. 73, pp. 1–43. doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.02.003
3. Ning N., Fu S., Zhang W., Chen F., Wang K., Deng H., Zhang Q., Fu Q. Realizing the enhancement of interfacial interaction in semicrystalline polymer/filler composites via interfacial crystallization. *Prog. Polym. Sci.*, 2012, vol. 37, pp. 1425–1455. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2011.12.005
4. Wu S., Wang F., Ma C. M., Chang W., Kuo C., Kuan H., Chen W. Mechanical, thermal and morphological properties of glass fiber and carbon fiber reinforced polyamide-6 and polyamide-6 / clay nanocomposites. *Mater. Lett.*, 2001, vol. 49, pp. 327–333. doi: 10.1016/s0167-577x(00)00394-3
5. Pesetskii S. S., Bogdanovich S. P., Dubrovskiy V. V., Sodyleva T. M., Aderikha V. N., Usova V. N. Morfologiya i svoystva gibridnykh kompozitov PA6 s korotkimi uglerodnymi voloknami i organoglinoy [Morphology and properties of PA6 hybrid composites filled with short carbon fibers and organoclay]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2016, vol. 2, no. 3, pp. 47–57.
6. Nanoth R., Jayanarayanan K., Sarath Kumar P., Balachandran M., Pegoretti A. Static and dynamic mechanical properties of hybrid polymer composites: A comprehensive review of experimental, micromechanical and simulation approaches. *Composites: Part A*, 2023, vol. 174. doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107741
7. Nanoth R., Jayanarayanan K. Polypropylene/short glass fiber/nanosilica hybrid composites: evaluation of morphology, mechanical, thermal, and transport properties. *Polym. Bull.*, 2018, vol. 75, pp. 2587–2605. doi: 10.1007/s00289-017-2173-1
8. Dubrovsky V. V., Shapovalov V. A., Aderikha V. N., Pesetskii S. S. Effect of hybrid filling with short glass fibers and expanded graphite on structure, rheological and mechanical properties of poly(ethylene terephthalate). *Mater. Today Commun.*, 2018, vol. 17, pp. 15–23. doi: 10.1016/j.mtcomm.2018.08.002
9. Dubrovskiy V. V., Aderikha V. N., Pesetskii S. S., Shapovalov V. A. Gibridnoe napolnenie polietilentereftalata mnogostennymi uglerodnymi nanotrubkami i korotkim steklovoloknom [Hybrid filling of polyethylene terephthalate with multi-walled carbon nanotubes and short glass fibers]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2021, vol. 94, no. 6, pp. 758–766. doi: 10.31857/S0044461821060104
10. Hua Y., Li F., Liu Y., Huang G., Xiao H., Li Y., Hu N., Fu S. Positive synergistic effect of graphene oxide/carbon nanotube hybrid coating on glass fiber/epoxy interfacial normal bond strength. *Compos. Sci. Techn.*, 2017, vol. 149, pp. 294–304. doi: 10.1016/j.compscitech.2017.06.024
11. Sharma S., Rawal J., Dhakate S. R., Singh B. P. Synergistic bridging effects of graphene oxide and carbon nanotube on mechanical properties of aramid fiber reinforced polycarbonate composite tape. *Compos. Sci. Techn.*, 2020, vol. 199. doi: 10.1016/j.compscitech.2020.108370
12. Fornes T. D., Paul D. R. Crystallization behavior of nylon 6 nanocomposites. *Polymer*, 2003, vol. 44, pp. 3945–3961. doi: 10.1016/S0032-3861(03)00344-6
13. Thomason J. L. The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene: 5. Injection moulded long and short fibre PP. *Composites Part A*, 2002, vol. 33, no. 12, pp. 1641–1652. doi: 10.1016/S1359-835X(02)00179-3
14. Homminga D. S., Goderis B., Mathot V. B. F., Groeninckx G. Crystallization behavior of polymer/montmorillonite nanocomposites. Part III. Polyamide-6/montmorillonite nanocomposites, influence of matrix molecular weight, and of montmorillonite type and concentration. *Polymer*, 2006, vol. 47, pp. 1630–1639. doi: 10.1016/j.polymer.2005.10.141
15. Lincoln D. M., Vaia R. A., Wang Z., Hsiao B. S., Krishnamoorti R. Temperature dependence of polymer crystalline morphology in nylon 6/montmorillonite nanocomposites. *Polymer*, 2001, vol. 42, is. 25, pp. 09975–09985. doi: 10.1016/S0032-3861(01)00542-0
16. Maiti P., Okamoto M. Crystallization controlled by silicate surfaces in nylon 6-clay nanocomposites. *Macromol. Mater. Eng.*, 2003, vol. 288, pp.

