

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-2-31-38>

УДК 677.494.6:678.82

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИАМИДА 6

Т. А. ВИШНЕВСКАЯ[†], Н. Р. ПРОКОПЧУК

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь

Цель работы — изучить влияние наноразмерных частиц оксидов таких металлов как алюминий, цинк и титан, а также оксида кремния, на механические свойства полиамида 6 (ПА6): предел текучести (вынужденной высокоэластичности), модуль упругости при растяжении, модуль упругости при изгибе, ударную вязкость по Шарпи и по Изоду. В работе рассмотрен возможный механизм взаимодействия между наночастицами и полимерной матрицей.

Проведено системное исследование влияния наночастиц разной природы на механические свойства ПА6. Изучен концентрационный интервал вводимых наночастиц 0,005–0,020 мас.%. Показано, что оптимальной концентрацией для всех видов наночастиц, оказывающей максимальный упрочняющий эффект на образцы ПА6, является 0,015 мас.%. В таких сверхмалых количествах наночастицы существенно повышают показатели механических свойств ПА6: предел текучести (вынужденной высокоэластичности) на 27–26%; модуль упругости при растяжении на 26–27%; модуль упругости при изгибе на 26–25%; максимальную прогибающую силу на 29–25%; ударную вязкость (с надрезом при 22 °С) по Шарпи на 40–22%, по Изоду на 30–28%.

Установлен ряд эффективности наночастиц в улучшении комплекса механических свойств ПА6: $TiO_2 \approx ZnO > Al_2O_3 > SiO_2$.

Предполагается, что улучшение механических свойств образованием дополнительных межмолекулярных взаимодействий Ван-дер-Ваальсового типа между наночастицами и макромолекулами ПА6. Предположение подтверждается замедлением релаксационных процессов. Максимальный эффект замедления релаксационных процессов происходит при концентрации наночастиц 0,015 мас.% и убывает в ряду $TiO_2 \approx ZnO > Al_2O_3 > SiO_2$. Закономерно наблюдается корреляция между скоростью замедления процесса релаксации и увеличением показателей механических свойств ПА6. Усиление межмолекулярных взаимодействий наночастицами в предложенном ряду можно объяснить изменением величины некомпенсированного заряда на их поверхности, т. к. размер и площадь их поверхностей были одинаковы.

Ключевые слова: полиамид 6, модифицирование, наночастицы, оксиды металлов, релаксация напряжения, прочностные свойства.

INFLUENCE OF METAL OXIDE NANOPARTICLES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF POLYAMIDE 6

T. A. VISHNEVSKAYA[†], N. R. PROKOPCHUK

Belarusian State Technological University, Sverdlov St., 13a, 220006, Minsk, Belarus

The aim of the work is to study the effect of nanoscale particles of oxides of metals such as aluminum, zinc and titanium, as well as silicon oxide, on the mechanical properties of polyamide 6 (PA6): yield strength (forced high elasticity), tensile modulus, flexural modulus, Sharpie and Isode toughness. The paper considers a possible mechanism of interaction between nanoparticles and a polymer matrix.

[†]Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: tatyana.vish.2020@mail.ru

A systematic study of the effect of nanoparticles of different nature on the mechanical properties of PA6 has been carried out. The concentration range of injected nanoparticles was 0.005–0.020 wt.%. It was shown that the optimal concentration for all types of nanoparticles, which has the maximum strengthening effect on PA6 samples, is 0.015 wt.%. In such ultra-small quantities, nanoparticles significantly increase the mechanical properties of PA6: yield strength (forced high elasticity) by 27–26%; modulus of elasticity when stretched by 26–27%; flexural modulus by 26–25%; maximum bending force by 29–25%; impact strength (incised at 22 °C) by Sharpie by 40–22%, by Isode by 30–28%.

A series of efficiency of nanoparticles in improving the complex of mechanical properties of PA6 has been established: $TiO_2 \approx ZnO > Al_2O_3 > SiO_2$.

It is assumed that the improvement of mechanical properties is due to the formation of additional intermolecular interactions of the Van der Waals type between nanoparticles and macromolecules of PA6. The assumption is confirmed by the slowing down of relaxation processes. The maximum effect of slowing down relaxation processes occurs at a nanoparticle concentration of 0.015 wt.% and decreases in the range $TiO_2 \approx ZnO > Al_2O_3 > SiO_2$. A correlation is naturally observed between the rate of deceleration of the relaxation process and an increase in the mechanical properties of PA6. The increase in intermolecular interactions between nanoparticles in the proposed series can be explained by the amount of the uncompensated charge on their surface, since their size and surface area were the same.

Keywords: polyamide 6, modification, nanoparticles, metal oxides, stress relaxation, strength properties.

Поступила в редакцию 08.05.2025

© Т. А. Вишневецкая, Н. Р. Прокопчук, 2025

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:

Вишневецкая Т. А., Прокопчук Н. Р. Влияние наночастиц оксидов металлов на механические свойства полиамида 6 // Полимерные материалы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 31–38. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-2-31-38>

Citation sample:

Vishnevskaya T. A., Prokopchuk N. R. Vliyanie nanochastits oksidov metallov na mekhanicheskie svoystva poliamida 6 [Influence of metal oxide nanoparticles on the mechanical properties of polyamide 6]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2025, vol. 11, no. 2, pp. 31–38. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-2-31-38>

Литература

- Nichugovskiy A., Tron G. C., Maslov M. Recent Advances in the Synthesis of Polyamine Derivatives and Their Applications // *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 21. doi: 10.3390/molecules26216579
- Zadehnazari A. Metal oxide/polymer nanocomposites: A review on recent advances in fabrication and applications // *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2022, vol. 62, is. 5, pp. 655–700. doi: 10.1080/25740881.2022.2129387
- Kango S., Kalia S., Celli A., Njuguna J., Habibi Y., Kumar R. Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic–inorganic nanocomposites—A review // *Progress in Polymer Science*, 2013, vol. 38, no. 8, pp. 1232–1261. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2013.02.003
- Do Van Cong, Nguyen Vu Giang, Tran Huu Trung, Pham Quoc Tuan, Pham Quoc Tuan, Nguyen Thi Thai, Do Quang Tham, Mai Van Tien, Dang Viet Quang. Novel biocomposite from polyamide 11 and jute fibres: the significance of fibre modification with SiO₂ nanoparticles // *Polymer International*, 2021, vol. 71, is. 3. doi: 10.1002/pi.6316
- Chelil O., Lakhdari D., Houas N., Remichi A., Sellai L. Creation and advancement of composites based on Polyamide 12 (PA12) reinforced with

- zinc oxide (ZnO) nanoparticles. Posted 09 Dec. 2024. (Preprint ; license CC BY 4.0). doi: 10.21203/rs.3.rs-5594819/v1
- Luiz G. M., Oliveira G. H. M., Canto L. B. Development of polyamide 6 – graphene oxide nanocomposite and direct-joining with aluminum alloy for lightweight engineering applications // *Polymer Engineering and Science*, 2023, vol. 64, is. 2, pp. 663–674. doi: 10.1002/pen.26575
 - Zhou S., Wu L., Sun J., Shen W. The change of the properties of acrylic-based polyurethane via addition of nano-silica // *Progress in Organic Coatings*, 2002, vol. 45, no. 1, pp. 33–42. doi: 10.1016/S0300-9440(02)00084-5
 - Wu C. L., Zhang M. Q., Rong M. Z., Friedrich K. Silica nanoparticles filled polypropylene: Effects of particle surface treatment, matrix ductility and particle species on mechanical performance of the composites // *Composites Science and Technology*, 2005, vol. 65, is. 3-4, pp. 635–645. doi: 10.1016/j.compscitech.2004.09.004
 - Mallakpour S., Naghdi M. Polymer/SiO₂ nanocomposites: Production and applications // *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 97, pp. 409–447. doi: 10.1016/j.pmatsci.2018.04.002
 - Asif M., Fakhar-e-Alam M., Tahir M., Jamil F., Sardar H., Rehman J., Dahlous K. Synthesis, Characterization, and Evaluation of the Antimicrobial and Anticancer Activities of Zinc Oxide and Aluminum-Doped Zinc Oxide Nanocomposites // *Pharmaceuticals*, 2024, vol. 17, is. 9. doi: 10.3390/ph17091216
 - Kirschner M., Rippel T., Ternus R., Duarte G., Riella H., Dal Magro J., Mello J. M., Silva L., Fiori M. Antibacterial polyamide obtained by the incorporation of glass microparticles doped with ionic zinc and by zinc oxide nanoparticle: Evaluation with *Salmonella typhimurium* and *Staphylococcus aureus* // *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, vol. 134. doi:10.1002/app.45005
 - Gayed H., El Fadl F., Maziad N., El-Aassar A. H., Abdel-Mottaleb M. S. A. . Surface modification of composite polyamide reverse osmosis membrane by irradiated chitosan and TiO₂ nanoparticles // *Desalination and water treatment*, 2019, vol. 160, pp. 32–40. doi: 10.5004/dwt.2019.24231
 - Кузьменко А. П., Кочура А. В., Родионов В. В., Заводинский В. Г., Игнатенко Н. М., Зо Хтет Аунг, Колпаков А. И., Орлов Е. Ю., Озерова Т. Л., М'о Мин Тан, Горкуша О. А. Особенности структурирования ультрадисперсных частиц hBN на поверхностях полиамидных филаментов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 13, № 3. С. 161–181. doi: 10.21869/2223-1528-2023-13-3-161-181
 - Базаров Ю. М., Казаков Д. А., Усачёва Т. С. Микронеоднородность полиамида ПА6 как результат особенностей технологии синтеза // *Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология*. 2013. Т. 56, вып. 8. С. 101–104.
 - Энциклопедия полимеров : в 3 т. Т. 2. / редкол.: В. А. Кабанов (глав. ред.) [и др.]. Москва : Советская энциклопедия, 1974. Кол. 737–738.
 - Энциклопедия полимеров : в 3 т. Т. 3 / редкол.: В. А. Кабанов (глав. ред.) [и др.]. Москва : Советская энциклопедия, 1977. Кол. 329–330.

References

- Nichugovskiy A., Tron G. C., Maslov M. Recent Advances in the Synthesis of Polyamine Derivatives and Their Applications. *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 21. doi: 10.3390/molecules26216579
- Zadehnazari A. Metal oxide/polymer nanocomposites: A review on recent advances in fabrication and applications. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2022, vol. 62, is. 5, pp. 655–700. doi: 10.1080/25740881.2022.2129387
- Kango S., Kalia S., Celli A., Njuguna J., Habibi Y., Kumar R. Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic–inorganic nanocomposites—A review. *Progress in Polymer Science*, 2013, vol. 38, no. 8, pp. 1232–1261. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2013.02.003
- Do Van Cong, Nguyen Vu Giang, Tran Huu Trung, Pham Quoc Tuan, Pham Quoc Tuan, Nguyen Thi Thai, Do Quang Tham, Mai Van Tien, Dang Viet Quang. Novel biocomposite from polyamide 11 and jute fibres: the significance of fibre modification with SiO₂ nanoparticles. *Polymer International*, 2021, vol. 71, is. 3. doi: 10.1002/pi.6316
- Chelil O., Lakhdari D., Houas N., Remichi A., Sellai L. Creation and advancement of composites based on Polyamide 12 (PA12) reinforced with zinc oxide (ZnO) nanoparticles. Posted 09 Dec. 2024. (Preprint ; license CC BY 4.0). doi: 10.21203/rs.3.rs-5594819/v1
- Luiz G. M., Oliveira G. H. M., Canto L. B. Development of polyamide 6 – graphene oxide nanocomposite and direct-joining with aluminum alloy for lightweight engineering applications. *Polymer Engineering and Science*, 2023, vol. 64, is. 2, pp. 663–674. doi: 10.1002/pen.26575
- Zhou S., Wu L., Sun J., Shen W. The change of the properties of acrylic-based polyurethane via addition of nano-silica. *Progress in Organic Coatings*, 2002, vol. 45, no. 1, pp. 33–42. doi: 10.1016/S0300-9440(02)00084-5
- Wu C. L., Zhang M. Q., Rong M. Z., Friedrich K. Silica nanoparticles filled polypropylene: Effects of particle surface treatment, matrix ductility and particle species on mechanical performance of the composites. *Composites Science and Technology*, 2005, vol. 65, is. 3-4, pp. 635–645. doi: 10.1016/j.compscitech.2004.09.004
- Mallakpour S., Naghdi M. Polymer/SiO₂ nanocomposites: Production and applications. *Progress in Materials Science*, 2018, vol. 97, pp. 409–447. doi: 10.1016/j.pmatsci.2018.04.002
- Asif M., Fakhar-e-Alam M., Tahir M., Jamil F., Sardar H., Rehman J., Dahlous K. Synthesis, Characterization, and Evaluation of the Antimicrobial and Anticancer Activities of Zinc Oxide and Aluminum-Doped Zinc Oxide Nanocomposites. *Pharmaceuticals*, 2024, vol. 17, is. 9. doi: 10.3390/ph17091216
- Kirschner M., Rippel T., Ternus R., Duarte G., Riella H., Dal Magro J., Mello J. M., Silva L., Fiori M. Antibacterial polyamide obtained by the incorporation of glass microparticles doped with ionic zinc and by zinc oxide nanoparticle: Evaluation with *Salmonella typhimurium* and *Staphylococcus aureus*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, vol. 134. doi: 10.1002/app.45005
- Gayed H., El Fadl F., Maziad N., El-Aassar A. H., Abdel-Mottaleb M. S. A. . Surface modification of composite polyamide reverse osmosis membrane by irradiated chitosan and TiO₂ nanoparticles. *Desalination and water treatment*, 2019, vol. 160, pp. 32–40. doi: 10.5004/dwt.2019.24231
- Kuz'menko A. P., Kochura A. V., Rodionov V. V., Zavadinskiy V. G., Ignatenko N. M., Zo Khtet Aung, Kolpakov A. I., Orlov E. Yu., Ozerova T. L., M'о Min Tan, Gorkusha O. A. Osobennosti strukturirovaniya ul'tradispersnykh chastits hBN na poverkhnostyakh poliamidnykh filamentov [Features of the structuring of ultrafine hBN particles on the surfaces of polyamide filaments]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies], 2023, vol. 13, no. 3, pp. 161–181. doi: 10.21869/2223-1528-2023-13-3-161-181
- Bazarov Yu. M., Kazakov D. A., Usacheva T. S. Mikroneodnorodnost' poliamida PA-6 kak rezul'tat osobennostey tekhnologii sinteza [The microuniformity of polyamide PA-6 as a result of the synthesis technology features]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of Universities. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2013, vol. 56, is. 8, pp. 101–104.
- Entsiklopediya polimerov* [Encyclopedia of Polymers]. Eds. V. A. Kabanov [et al.]. Moscow : Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1974. Vol. 2, col. 737–738.
- Entsiklopediya polimerov* [Encyclopedia of Polymers]. Eds. V. A. Kabanov [et al.]. Moscow : Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1977. Vol.

