

DOI: 10.32864/polymmattech-2025-11-3-28-35

УДК 669:678.06:544.72

РОЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАНОЧАСТИЦ В ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

Н. Р. ПРОКОПЧУК, И. О. ЛАПТИК⁺

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

Цель работы — определить величину тока на поверхности частиц TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 , SiO_2 ; установить корреляцию между величиной тока, строением надмолекулярной структуры и свойствами полимерных композитов; выявить влияние заряда поверхности наночастиц на формирование структуры и на свойства полимерных композитов.

Объектами исследования являлись: модифицированные защитные антикоррозионные покрытия по стали на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-20, отвержденной новым отвердителем канифолетерпеностирольномалеиновым аддуктом; модельный состав для точного литья по выплавляемым моделям ЗГВ-101; наночастицы TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 , SiO_2 . Определены значения термостимулированных токов (ТСТ, нА) на поверхности наночастиц: $TiO_2 = -4$; $ZnO = -3,5$; $Al_2O_3 = -2,0$; $SiO_2 = -1,0$. ТСТ стабильны в интервале температур 20–200 °С. Установлено увеличение гель-фракции (физического структурирования) антикоррозионных покрытий наночастицами в ряду $TiO_2 > ZnO > Al_2O_3 > SiO_2$. Максимальные физические взаимодействия ван-дер-ваальсового типа образуются наночастицами при сверхмалых количествах (0,005–0,010) мас.%. С увеличением концентрации до 0,02 мас.% всех наночастиц гель-фракция, твердость, адгезия, прочность при ударе покрытий убывают, по-видимому, из-за уменьшения межмолекулярных взаимодействий за счет агрегации избыточных наночастиц. Наблюдается корреляция величин ТСТ на поверхности наночастиц, показателей гель-фракции и физико-механических свойств покрытий. Химическая стойкость покрытий располагается в том же ряду: $TiO_2 > ZnO > Al_2O_3 > SiO_2$ и она достигает максимума при концентрации наночастиц 0,01 мас.%. При наномодифицировании модельного состава ЗГВ-101 наблюдается улучшение важнейших эксплуатационных свойств: снижается линейная усадка и повышается теплостойкость модельного состава ЗГВ-101 в том же ряду $TiO_2 > ZnO > Al_2O_3 > SiO_2$ с максимальным эффектом при концентрации всех наночастиц 0,01 мас.%.

Ключевые слова: наночастицы, энергетическое состояние поверхности, антикоррозионные покрытия, модельный состав ЗГВ-101, гель-фракция, линейная усадка, теплостойкость.

⁺Автор для переписки. E-mail: Inna.laptik@yandex.ru

Для цитирования:

Прокочук Н. Р., Лаптик И. О. Роль энергетического состояния поверхности наночастиц в формировании структуры и свойств полимерных нанокompозитов // Полимерные материалы и технологии. 2025. Т. 11, № 3. С. 28–35. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-3-28-35>

⁺Author for correspondence. E-mail: Inna.laptik@yandex.ru

For citation:

Prokopchuk N. R., Laptik I. O. Rol' energeticheskogo sostoyaniya poverkhnosti nanochastits v formirovaniy struktury i svoystv polimernykh nanokompозитov [The role of the energy state of the nanoparticle surface in the formation of the structure and properties of polymer nanocomposites]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2025, vol. 11, no. 3, pp. 28–35. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-2-28-35>

THE ROLE OF THE ENERGY STATE OF THE NANOPARTICLE SURFACE IN THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF POLYMER NANOCOMPOSITES

N. R. PROKOPCHUK, I. O. LAPTIK⁺

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

The aim of the work is to determine the magnitude of the current on the surface of TiO₂, ZnO, Al₂O₃, SiO₂ particles; to establish a correlation between the magnitude of the current on the surface of nanoparticles, the structure of the supramolecular structure and the properties of composites; to identify the effect of the charge on the surface of nanoparticles on the formation of the structure and on the properties of polymer composites.

The objects of the study were: modified ones protective anticorrosive coatings on steel based on epoxy-diane resin ED-20, cured with a new hardener rosin-styrene-oleic adduct; the model composition for precision casting on moldable ZGV-101 models, TiO₂, ZnO, Al₂O₃, SiO₂ nanoparticles. The values of thermally stimulated currents (TST) in pA on the surface of nanoparticles are determined: TiO₂ = - 4.0; ZnO = - 3.5; Al₂O₃ = - 2.0; SiO₂ = - 1.0. TST are stable in the temperature range of 20–200 °C. An increase in the gel fraction (physical structuring) of anticorrosive coatings with nanoparticles in the range TiO₂ > ZnO > Al₂O₃ > SiO₂ has been established. The maximum physical interactions of the Van der Waals type are formed by nanoparticles at extremely small amounts (0.005–0.010) wt.%. With an increase in concentration to 0.02 wt.% of all nanoparticles in the gel fraction, hardness, adhesion, and impact strength of coatings decrease, apparently due to a decrease in intermolecular interactions due to agglomeration of excess nanoparticles. There is a correlation between the values of TST on the surface of nanoparticles, the gel fraction and physico-mechanical properties of coatings. The chemical resistance of the coatings is in the same range: TiO₂ > ZnO > Al₂O₃ > SiO₂ and it reaches its maximum at a concentration of 0.01 wt.% nanoparticles. With the nanomodification of the model composition of ZGV-101, an improvement in the most important operational properties is observed: linear shrinkage decreases and the heat resistance of the model composition of ZGV-101 increases in the same range TiO₂ > ZnO > Al₂O₃ > SiO₂ with a maximum effect at a concentration of all nanoparticles of 0.01 wt.%.

Keywords: nanoparticles, energy state of the surface, anticorrosive coatings, model composition of ZGV-101, gel fraction, linear shrinkage, heat resistance.

Поступила в редакцию 15.05.2025

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/>

Литература

1. Прокопчук Н. Р., Глоба А. И., Лаптик И. О., Сырков А. Г. Улучшение свойств покрытий по металлу наноалмазными частицами // Цветные металлы. 2021. № 6. С. 50–54. doi: 10.17580/tsm.2021.06.07
2. Jeevanandam J., Barhoum A., Chan Y. S., Dufresne A., Danquah M. K. Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations // Beilstein J. Nanotechnol. 2018, no. 9, pp. 1050–1074. doi: 10.3762/bjnano.9.98
3. Polymer nanocomposites – additives, properties, applications, environmental aspects / NanoTrust, Austrian Academy of Sciences // Nanowerk. Mar 10, 2021 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=57487.php> (дата обращения: 07.07.2025).
4. Bailey E. J., Winey K. I. Dynamics of polymer segments, polymer chains, and nanoparticles in polymer nanocomposite melts: A review // Progress in Polymer Science, 2020, vol. 105. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2020.101242

5. Konchus D. A., Sivenkov A. V. A surface structure formation of stainless steel using a laser // *Materials Science Forum*, 2021, vol. 1022, pp. 112–118. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.112
6. Syzrantsev V. V. Analysis of the variations in the surface properties of SiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles obtained by different synthesis methods // *Condensed Matter and Interphases*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 369–378. doi: 10.17308/kcmf.2022.24/9860
7. Сызранцев В. В. Вариация свойств отвержденной эпоксидной смолы с наночастицами различных методов синтеза // *Нанофизика и наноматериалы* : сборник научных трудов международного симпозиума, Санкт-Петербург, Россия, 23–24 ноября 2022. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский горный университет, 2022. С. 280–285.
8. Сызранцев В. В. Улучшение свойств полимерной эпоксидной матрицы добавками наноксидов алюминия и кремния // *Цветные металлы*. 2023. № 8. С. 34–38.
9. Long He, Lei Liu, Chang Cao, Feng Jiang, Jun Xu. Improved curing performances of epoxy resin by a structure-controllable self-emulsifying curing agent // *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2022, vol. 36, pp. 490–506. doi: 10.1080/01694243.2021.1929003
10. Клюев А. Ю., Прокопчук Н. Р. Новые направления переработки и использования сосновой живицы. Минск : БГТУ, 2020. 412 с.
11. Алхимова В. А., Шарапова Д. М. Коррозия и способы защиты насосно-компрессорных труб в нефтегазовой области // *Нанофизика и наноматериалы* : сборник научных трудов международного симпозиума, Санкт-Петербург, Россия, 23–24 ноября 2022. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский горный университет, 2022. С. 21–26.
12. Пожидаева С. Д., Агеева Л. С., Иванов А. М. Сравнительная характеристика окисления цинка и олова с участием кислот при комнатных температурах // *Записки Горного института*. 2019. Т. 235. С. 38–46. doi: 10.31897/PMI.2019.1.38
13. Репях С. И. Требования к модельным составам отливок особо ответственного назначения // *Металл и литье Украины*. 2010. № 11. С. 10–17.
14. Болобов В. И., Кувшинкин С. Ю. *Материаловедение. Стали с особыми свойствами. Цветные металлы. Неметаллические материалы* : учебное пособие. Санкт-Петербург : Нац. минерально-сырьевой ун-т “Горный”, 2014. 94 с.
15. Zhao Y., Xu J.-B., Zhanc J., Chen Y.-Q., Hu J.-M. Electrodeposited superhydrophobic mesoporous silica films coembedded with template and corrosion inhibitor for active corrosion protection // *Applied Surface Science*, 2020, vol. 508. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.145242
16. Рассохина Л. И., Парфенович П. И., Нарский А. Р. Проблемы создания модельных композиций нового поколения на базе отечественных материалов для изготовления лопаток ГТД // *Новости материаловедения. Наука и техника* : электронный научный журнал. 2015. № 3 (15). С. 38–42 [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23697372_40750405.pdf (дата обращения: 10.05.2025).
17. Petrov G. V., Shneerson Ya. M., Andreev Yu. V. Extraction of platinum metals during processing of chromium ores from dunnite deposits // *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 231, pp. 281–286. doi: 10.25515/PMI.2018.3.281
18. Syzyakov V. M., Brichtkin V. N. About the Role of Hydrated Calcium Carboaluminates in Improving The Technology of Complex Processing of Nephelines // *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 231, pp. 292–298. doi: 10.25515/PMI.2018.3.292
19. Aleksandrova T. N., Heide G., Afanasova A. V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data // *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 235. pp. 30–37. doi: 10.31897/PMI.2019.1.30

References

1. Prokopchuk N. R., Globa A. I., Laptik I. O., Syrkov A. G. Uluchshenie svoystv pokrytiy po metallu nanoalmaznymi chastitsami [The properties of metal coatings enhanced with diamond nanoparticles]. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2021, no. 6, pp. 50–54. doi: 10.17580/tsm.2021.06.07
2. Jeevanandam J., Barhoum A., Chan Y. S., Dufresne A., Danquah M. K. Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. *Beilstein J. Nanotechnol*, 2018, no. 9, pp. 1050–1074. doi: 10.3762/bjnano.9.98
3. Polymer nanocomposites – additives, properties, applications, environmental aspects (2021). Available at: <https://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=57487.php> (accessed 07.07.2025).
4. Bailey E. J., Winey K. I. Dynamics of polymer segments, polymer chains, and nanoparticles in polymer nanocomposite melts: A review. *Progress in Polymer Science*, 2020, vol. 105. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2020.101242
5. Konchus D. A., Sivenkov A. V. A surface structure formation of stainless steel using a laser. *Materials Science Forum*, 2021, vol. 1022, pp. 112–118. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.112
6. Syzrantsev V. V. Analysis of the variations in the surface properties of SiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles obtained by different synthesis methods. *Condensed Matter and Interphases*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 369–378. doi: 10.17308/kcmf.2022.24/9860
7. Syzrantsev V. V. Variatsiya svoystv otverzhdennoy epoksidnoy smoly s nanochastitsami razlichnykh metodov sinteza [Variation of properties of cured epoxy resin with nanoparticles of different synthesis methods]. *Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnogo simpoziuma «Nanofizika i nanomaterialy»* [Proceedings of the International Symposium “Nanophysics and Nanomaterials”]. Saint-Petersburg : Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet Publ., 2022, pp. 280–285.
8. Syzrantsev V. V. Uluchshenie svoystv polimernoy epoksidnoy matritsy dobavkami nanooksidov alyuminiya i kremniya [Improving the properties of a polymer epoxy matrix with additives of aluminum and silicon nanoxides]. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2023, no. 8, pp. 34–38
9. Long He, Lei Liu, Chang Cao, Feng Jiang, Jun Xu. Improved curing performances of epoxy resin by a structure-controllable self-emulsifying curing agent. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2022, vol. 36, pp. 490–506. doi: 10.1080/01694243.2021.1929003
10. Klyuev A. Yu., Prokopchuk N. R. *Novyye napravleniya pererabotki i ispol'zovaniya sosnovoy zhivitsy* [New directions of processing and use of pine resin]. Minsk : BGTU Publ., 2020. 412 p.
11. Alkhimova V. A., Sharapova D. M. Korroziya i sposoby zashchity nasosno-kompressornykh trub v neftegazovoy oblasti [Corrosion and methods of protection of pumping and compressor pipes in the oil and gas industry]. *Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnogo simpoziuma «Nanofizika i nanomaterialy»* [Proceedings of the International Symposium “Nanophysics and Nanomaterials”]. Saint-Petersburg : Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet Publ., 2022, pp. 21–26.
12. Pozhidaeva S. D., Ageeva L. S., Ivanov A. M. Sravnitel'naya kharakteristika okisleniya tsinka i olova s uchastiem kislot pri komnatnykh temperaturakh [Comparative analysis of zinc and tin oxidation with acids at room temperatures]. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2019, vol. 235, pp. 38–46. doi: 10.31897/PMI.2019.1.38
13. Repyakh S. I. Trebovaniya k model'nym sostavam otlivok osobo otvetstvennogo naznacheniya [Requirements for model compositions of castings for especially critical purposes]. *Metall i lit'e Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine], 2010, no. 11, pp. 10–17.
14. Bolobov V. I., Kuvshinkin S. Yu. *Materialovedenie. Stali s osobymi svoystvami. Tsvetnye metally. Nemetallicheskie materialy* [Materials science. Steels with special properties. Non-ferrous metals. Non-metallic materials]. Saint-Petersburg : Natsional'nyy mineral'no-syr'evoy universitet “Gomyi” Publ., 2014. 94 p.
15. Zhao Y., Xu J.-B., Zhanc J., Chen Y.-Q., Hu J.-M. Electrodeposited superhydrophobic mesoporous silica films coembedded with template and corrosion inhibitor for active corrosion protection. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 508.

doi: 10.1016/j.apsusc.2019.145242

16. Rassokhina L. I., Parfenovich P. I., Narskiy A. R. Problemy sozdaniya model'nykh kompozitsiy novogo pokoleniya na baze otechestvennykh materialov dlya izgotovleniya lopatok GTD [The issues of developing model compositions of new generation on the basis of domestic materials for the manufacture of gas turbine engine blades]. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika : elektronnyy nauchnyy zhurnal* [News of materials science. Science and technology], 2015, no. 3 (15), pp. 38–42. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23697372_40750405.pdf (accessed 10.05.2025).
 17. Petrov G. V., Shneerson Ya. M., Andreev Yu. V. Extraction of platinum metals during processing of chromium ores from dunnite deposits. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 231, pp. 281–286. doi: 10.25515/PMI.2018.3.281
 18. Syzyakov V. M., Brichkin V. N. About the Role of Hydrated Calcium Carboaluminates in Improving The Technology of Complex Processing of Nephelines. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 231, pp. 292–298. doi: 10.25515/PMI.2018.3.292
 19. Aleksandrova T. N., Heide G., Afanasova A. V. Assessment of refractory gold-bearing ores based of interpretation of thermal analysis data. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 235. pp. 30–37. doi: 10.31897/PMI.2019.1.30
-