

УДК 678.686

**И. О. Лаптик, Н. Р. Прокопчук**  
Белорусский государственный технологический университет

## **ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ НАНОЧАСТИЦАМИ**

Полимерная композитная арматура на основе эпоксидных, ненасыщенных полиэфирных смол и различных волокнистых наполнителей все больше применяется взамен стальной, так как не подвержена коррозии во время эксплуатации. Долговечность композитной арматуры прогнозируется до 50 лет на основе кинетики снижения механических свойств. Методы повышения долговечности композитной арматуры системно не изучаются. В данной работе впервые исследовано влияние щелочной среды бетонной массы на понижение долговечности арматуры на основе эпоксидной смолы. Предложен и изучен способ возможного повышения долговечности данного вида арматуры введением в систему эпоксидного связующего наночастиц.

Наночастицы, имея на своей поверхности электрический заряд, физически взаимодействуют с оставшимися после отверждения в молекулах эпоксидной смолы полярными группами (эпоксидными, гидроксильными), усиливая тем самым межмолекулярные взаимодействия.

В результате наблюдалось замедление движений звеньев олигомерных молекул эпоксидной смолы, повышение потенциального барьера разрушения химических связей внутри макромолекул и рост долговечности в заданных условиях эксплуатации арматуры.

Оценку долговечности проводили экспресс-методом для изделий полимерных в строительстве согласно СТБ 1333.0-2002 «Метод определения долговечности по энергии активации термоокислительной деструкции полимерных материалов».

Полимерные материалы на основе эпоксидных смол широко применяются при создании различных устройств и конструкций. В частности, изоляция проводов имеет решающее значение в электромонтажных работах для обеспечения безопасности, предотвращения электрических неисправностей и повышения долговечности систем электропроводки. Среди различных методов изоляции проводов эпоксидная смола выделяется своими превосходными изоляционными свойствами и долговечностью.

Нами развивается гипотеза о решающей роли заряда поверхности наночастиц в формировании надмолекулярной структуры и свойств наномодифицированных полимерных композитов. В данной работе впервые представлены результаты влияния наночастиц различной природы на долговечность эпоксидной арматуры и электроизоляционных покрытий.

**Ключевые слова:** эпоксидная смола, отвердитель, пластификатор, наночастицы, долговечность.

**Для цитирования:** Лаптик И. О., Прокопчук Н. Р. Повышение долговечности эпоксидных композитов наночастицами // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, полимерное материаловедение. 2026. № 1 (301). С. 64–71.

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-6.

**I. O. Laptik, N. R. Prokopchuk**  
Belarusian State Technological University

## **IMPROVING THE DURABILITY OF EPOXY COMPOSITES WITH NANOPARTICLES**

Polymer composite reinforcement based on epoxy, unsaturated polyester resins and various fibrous fillers is increasingly being used instead of steel, as it is not susceptible to corrosion during operation. The durability of composite reinforcement is predicted to be up to 50 years based on the kinetics of reduced mechanical properties. Methods for increasing the durability of composite reinforcement are not systematically studied. In this paper, for the first time, the effect of the alkaline environment of the concrete mass on reducing the durability of reinforcement based on epoxy resin is investigated. A method has been proposed and studied for possibly increasing the durability of this type of reinforcement by introducing an epoxy binder of nanoparticles into the system.

Nanoparticles, having an electric charge on their surface, physically interact with polar groups (epoxy, hydroxyl) remaining after curing in epoxy resin molecules, thereby enhancing intermolecular interactions.

As a result, there was a slowdown in the movements of the links of oligomeric epoxy resin molecules, an increase in the potential barrier to the destruction of chemical bonds inside macromolecules, and an increase in durability under specified operating conditions of the reinforcement. Durability assessment was carried out using the express method for polymer products in construction according to the STB 1333.0-2002 “Method for determining durability by the activation energy of thermooxidative degradation of polymer materials”.

Polymer materials based on epoxy resins are widely used in the creation of various devices and structures. In particular, wire insulation is crucial in electrical installation work to ensure safety, prevent electrical failures, and enhance the durability of electrical wiring systems. Among the various wire insulation methods, epoxy resin stands out for its excellent insulating properties and durability. We are developing a hypothesis about the crucial role of the nanoparticle surface charge in the formation of the supramolecular structure and properties of nanomodified polymer composites. This paper presents for the first time the results of the effect of nanoparticles of various nature on the durability of epoxy reinforcement and waterproofing coatings.

**Keywords:** epoxy resin, hardener, plasticizer, nanoparticles, durability.

**For citation:** Laptik I. O., Prokopchuk N. R. Improving the durability of epoxy composites with nanoparticles. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Polymer Materials Science*, 2026, no. 1 (301), pp. 64–71 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2026-301-6.

**Введение.** Эпоксидная смола (ЭС) – это полимерный материал, который при смешивании с отвердителем затвердевает в твердое, прочное покрытие или клей [1]. Он состоит из эпоксидных групп, которые при химической реакции с отвердителем образуют сшитую полимерную сеть. Эта сеть обеспечивает исключительную механическую прочность, химическую стойкость и электроизоляционные свойства. Эпоксидная смола обычно используется в различных областях, включая электроизоляцию, покрытия и клеи.

Несмотря на то, что композиты на основе эпоксидных смол давно и широко применяются на практике [2], их исследования до сих пор продолжаются. Они направлены на совершенствование процесса отверждения различными отвердителями [3, 4]; исследования влияния наполнителей на свойства композитов [5]; модификацию ЭС органическими соединениями; армирование ЭС неорганическими волокнами; оптимизацию полимерной матрицы эпоксидных композитов [6, 7]; разработку математической модели реакции отверждения эпоксидной смолы с отвердителем; изучение адгезии волокон в эпоксидной матрице [8]. Делаются обобщения в виде обзора основ и стратегии антикоррозионных покрытий на базе эпоксидных смол. Однако исследования системы эпоксидная смола – наночастицы на сегодняшний день единичные [9]. Это предопределило цель данной работы: развитие гипотезы о механизме улучшения наночастицами свойств эпоксидных композитов.

К преимуществам эпоксидной смолы относятся:

– электрическая изоляция. Эпоксидная смола обладает высокой диэлектрической прочностью, что делает ее отличным изолятором, предотвращающим утечку электрического тока или короткое замыкание;

– химическая устойчивость. Эпоксидная смола устойчива ко многим химическим веществам, включая кислоты, основания и растворители, что гарантирует сохранение своих изоляционных свойств в суровых условиях;

– механическая сила. Эпоксидная смола образует прочное, жесткое покрытие, которое защищает провода от физических повреждений и истирания;

– влагостойкость. После затвердевания эпоксидная смола становится непроницаемой для влаги, что снижает риск коррозии и электрических неисправностей, вызванных влажными условиями.

Изоляция проводов эпоксидной смолой – эффективный способ защиты электрических систем от повреждений и обеспечения надежной работы [10].

Долговечность композитов оценивали экспресс-методом по значениям энергии активации термоокислительной деструкции  $E_d$  [11]. Главным эксплуатационным фактором, действующим на электроизоляцию, является температура ее разогрева.

**Основная часть.** Физической основой наномодифицирования являются потенциальные возможности наночастиц с высокой поверхностной энергией образовывать ионные и координационные связи, ограничивающие подвижность звеньев и сегментов макромолекул, проявлять когезионные и адгезионные взаимодействия. Применение наноматериалов для улучшения свойств различных композиций – важнейшее направление развития современного материаловедения [12].

Для доказательства усиления наночастицами межмолекулярных взаимодействий в отвержденных композициях была исследована гель-фракция [13] полимерных образцов.

В результате научного эксперимента были определены: температура отверждения эпоксидных композиций – 180°C, время отверждения – 20 мин.

Характеристики наноматериалов НП ЗАО «Синта» АШ-А (ТУ РБ 100056180.003-2003 «Шихта алмазосодержащая»); УДА СП (ТУ РБ 28619110.001-95 «Алмаз ультрадисперсный синтетический») приведены в источнике [14]. Характеристики нанопорошка оксида цинка и диоксида титана (ООО «Томские нанопорошки») представлены в табл. 1.

В эпоксидные композиции дополнительно введены наночастицы  $TiO_2$  и АШ-А в количестве 0,01 мас. %. Для равномерного распределения наночастиц в объеме полимерной матрицы и предотвращения их агрегации и последующей агломерации готовили дисперсии наноматериалов в различных растворителях.

Методика введения наночастиц в эпоксидную смолу заключалась в предварительном диспергировании их в растворителе в ячейке ультразвуковой ванны BandelineSonorex в течение 30 мин с последующим смешением на протяжении 10 мин.

Изучение термических характеристик образцов покрытий на основе эпоксидных материалов проводили с использованием термоаналитической системы TGA/DSC1 «Mettler Toledo» (Швейцария) в определенном температурном интервале при скорости линейного повышения температуры 5°C/мин.

Таблица 1. Характеристики используемых наночастиц

Характеристика	ZnO (ТУ 24.45.30-001-80071161-2020)	$TiO_2$ (ТУ 1791-003-36280340-2008)
Химическое наименование	Порошок оксида цинка	Порошок оксида титана
Химическая формула	ZnO	$TiO_2$
Фазовый состав	ZnO	Смесь фаз анатаз и рутил
Внешний вид и цвет	Однородный порошок без посторонних включений. Имеет широкое распределение частиц по размерам 40–90 нм. Цвет – белый	Индивидуальные частицы преимущественно сферической формы. Порошок имеет широкое распределение частиц по размерам 11–80 нм. Цвет – белый
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,10–0,25	0,5–2,0
Площадь удельной поверхности, м <sup>2</sup> /г	12–20	12,5

Методом Бройдо по данным динамической термогравиметрии рассчитывалась энергия активации термоокислительной деструкции  $E_d$ . Интервал деструкции макромолекул для каждого полимера устанавливался экспериментально по кривой дифференциального термогравиметрического анализа (ДТГ).

Анализ полученных результатов показал:

1) наномодифицирование композитов на основе эпоксидной смолы увеличивает содержание гель-фракции в них, замедляет водопоглощение и незначительно повышает параметр  $E_d$ ;

2) впервые произведена количественная оценка влияния щелочной среды бетона на снижение показателя  $E_d$ , что позволяет более точно рассчитать долговечность композитной арматуры в реальных условиях ее эксплуатации [15];

3) немодифицированные композиты в результате действия щелочной среды снижают потенциальный барьер разрушения с 97 до 87 кДж/моль, т. е. на 10 кДж/моль, а наномодифицированные композиты – с 99 до 93 кДж/моль, т. е. на 6 кДж/моль;

4) рассмотренное влияние щелочной среды на параметр  $E_d$  согласуется с ее влиянием на содержание гель-фракции в композитах. Немодифицированные композиты снижают гель-фракцию с 81 до 75%, т. е. на 6%, а наномодифицированные – с 98 до 91%, т. е. на 7%. Однако при этом общий уровень гель-фракции у наномодифицированных образцов остается существенно выше.

При эксплуатации стеновых конструкций на композитную арматуру действуют следующие факторы:

– механические нагрузки. Поскольку адгезия смолы к стеклонити высокая, образующийся после отверждения смолы композит имеет высокие прочностные характеристики на сжатие, изгиб, растяжение. Значение прочности стеклокомпозита на сжатие (основного вида нагружения арматуры) составляет 300 МПа. При коэффициенте запаса прочности, равном 1,5, максимально допустимая нагрузка на арматуру не превышает 200 МПа. Поскольку диаметр арматуры составляет 6 мм, то площадь его поперечного сечения равна  $(3,14 \cdot 36) / 4 = 28 \text{ мм}^2$ . На 1 мм<sup>2</sup> площади сечения действует внутреннее напряжение  $\sigma_{вн} = 200 / 28 = 7 \text{ МПа}$ . Структурно-чувствительный коэффициент  $\gamma$ , входящий в уравнение Журкова, имеет относительно низкое значение 2,5 кДж/(моль · МПа) для сшитых полимерных систем с плотной упаковкой макромолекул. Тогда понижение параметра  $E_d$  механическим напряжением  $\Delta E_{мех}$  составляет:  $\Delta E_{мех} = \sigma_{вн} \cdot \gamma = 7 \cdot 2,5 = 18 \text{ кДж/моль}$ ;

– химическая агрессивность окружающего бетона. Воздействие водной щелочной среды с достаточно высоким рН на связующее композитной арматуры составляет 10 кДж/моль, а у наномодифицированных образцов – 7 кДж/моль.

Средняя температура композита в весенне-осенний период в дневное время на солнечной стороне в стеновых панелях не будет превышать 40°C, а в ночное время – 20°C. Тогда среднесуточная температура составит 30°C. В зимний период стеклокомпозит арматуры прогревается не более чем на 15°C. Поэтому среднегодовая температура арматуры составит  $(30 + 15) / 2 = 22,5^\circ\text{C}$  в самых жестких условиях эксплуатации в Республике Беларусь. Для последующего расчета долговечности арматуры стеновых бетонных панелей принимается температура 23°C.

Расчетное значение энергии активации  $E_{расч}$ , определяющее долговечность композитной арматуры, составляет для немодифицированных образцов 69 кДж/моль (значение долговечности – 30 лет), а наномодифицированных образцов – 74 кДж/моль (значение долговечности – 59 лет).

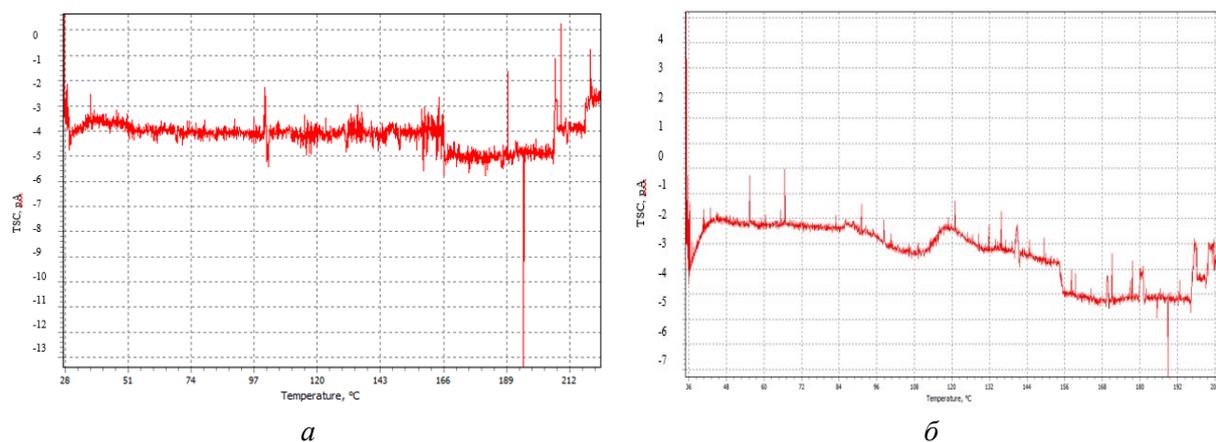
Таким образом, наномодифицированием композитной арматуры на основе эпоксидной смолы можно добиться увеличения долговечности в реальных условиях ее эксплуатации практически вдвое.

Определены значения термостимулированных токов (ТСТ) на поверхности наночастиц:  $\text{TiO}_2 = -4 \text{ пА}$ ;  $\text{ZnO} = -3,5 \text{ пА}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = -2,0 \text{ пА}$ ;  $\text{SiO}_2 = -1,0 \text{ пА}$ . ТСТ стабильны в интервале температур 20–200°C. Установлено увеличение гель-фракции (физического структурирования) антикоррозионных покрытий наночастицами в ряду:  $\text{TiO}_2 > \text{ZnO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2$ . 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:  $\text{TiO}_2 > \text{ZnO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2$  и она достигает максимума при концентрации наночастиц 0,01 мас. %.

Поскольку при проведении ТСТ-анализа использовалась одна и та же навеска наночастиц, а частицы имели одинаковый размер и одинаковую площадь удельной поверхности, то величина ТСТ напрямую связана со значением электрического заряда на поверхности наночастиц. Следовательно, разница в значениях ТСТ обусловлена разницей электрического заряда на поверхности наночастиц.

На рисунке в качестве примера приведены температурные зависимости термостимулированных токов для частиц  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ .



Температурные зависимости термостимулированных токов для наночастиц:  
а –  $\text{TiO}_2$ ; б –  $\text{ZnO}$

Значения термостимулированных токов в пикоамперах на поверхности наночастиц, энергия активации термоокислительной деструкции и долговечность композитов при постоянно действующей температуре 70°C приведены в табл. 2.

Таблица 2. Долговечность наномодифицированных электроизоляционных покрытий при постоянно действующей температуре 70°C

Номер образца	Наномодификатор, 0,01 мас. %	ТСТ, пА	$E_d$ , кДж/моль	$\tau_{70}$ , лет
1	–	–	105	12,5
2	$\text{SiO}_2$	1,0	107	14,6
3	$\text{Al}_2\text{O}_3$	2,0	109	17,2
4	$\text{ZnO}$	3,5	114	26,2
5	АШ-А	4,0	116	27,2
6	$\text{TiO}_2$	4,0	116	27,2
7	УДА СП	5,0	117	33,6

Анализ данных табл. 2 показывает, что существует четкая зависимость долговечности эпоксидного покрытия от заряда поверхности введенных в олигомер наночастиц.

Гель-фракция определяет плотность сшивки макромолекул эпоксидной смолы молекулами отвердителя. При высокой плотности сшивки (густой равномерной сетчатой структуре) композиты характеризуются повышенной устойчивостью в агрессивных средах. Наночастицы, введенные в композиции, создают дополнительные к химическим поперечным связям физические взаимодействия между полярными группами эпоксидной смолы и электрически заряженными поверхностями наночастиц. В результате гель-фракция увеличивается.

Долговечность электроизоляции при постоянно действующей температуре 70°C возрастает в ряду:  $\text{ЭП} < \text{ЭП} + \text{SiO}_2 < \text{ЭП} + \text{Al}_2\text{O}_3 < \text{ЭП} + \text{ZnO} < \text{ЭП} + \text{TiO}_2 < \text{ЭП} + \text{АШ-А} < \text{ЭП} + \text{УДА СП}$ .

Эффект наномодифицирования весьма существенный. Рост долговечности электроизоляции достигает 2,7 раза при введении в эпоксидную смолу наночастиц УДА СП в сверхмалых количествах (0,01 мас. %).

Механизм усиливающего действия наночастиц заключается в следующем. Наночастицы, имея на своей поверхности нескомпенсированный электрический заряд, взаимодействуют со свободными гидроксильными или эпоксидными группами в молекулах эпоксидной смолы с образованием сил Ван-дер-Ваальса. Суммарные межмолекулярные взаимодействия при наномодифицировании существенно возрастают. Движение звеньев в молекулах эпоксидной смолы между узлами пространственной химической сетки замедляется. Потенциальный барьер разрыва химических связей внутри молекул эпоксидной смолы увеличивается, что подтверждено экспериментально: параметр  $E_d$  возрастает с 105 до 117 кДж/моль. Это приводит к увеличению долговечности покрытий.

**Заключение.** Наночастицы различной природы, добавляемые в эпоксидную смолу, существенно улучшают механические свойства полимерных композитов. Наиболее эффективными наноразмерными модификаторами, вводимыми в покрытия, являются наночастицы оксидов цветных металлов ( $TiO_2$  и  $ZnO$ ), а также наноматериалы НП ЗАО «Синта» (АШ-А и УДА СП).

Развита гипотеза о механизме усиления наночастицами устойчивости полимерных защитных покрытий к действию температурно-силовых полей и агрессивных сред.

### Список литературы

1. Ли Х., Невилле К. Эпоксидные смолы // Энциклопедия полимеров: в 3 т. М.: Советская энциклопедия. 1971. Т. 3. С. 992–1001.
2. Марголин В. И., Мироненко И. Г., Иванов А. А. Развитие нанотехнологий на основе нанокompозитов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 190 с.
3. Свистков А. Л., Елисева А. Ю., Кондюрин А. В. Математическая модель реакции отверждения ЭД-20 с отвердителем ТЭАТ-1 // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 1. С. 9–16.
4. Сызранцев В. В. Вариация свойств отвержденной эпоксидной смолы с наночастицами различных методов синтеза // Нанofизика и наноматериалы: сб. науч. тр. Междунар. симп., Санкт-Петербург, 23–24 нояб. 2022 г. СПб., 2022. С. 280–285.
5. Помогайло А. Д., Розенберг А. С., Уфлянд И. Е. Наночастицы металлов в полимерах. М.: Химия, 2000. 401 с.
6. Улучшение механических свойств эпоксидных покрытий по металлу наночастицами разной природы / Н. Р. Прокопчук [и др.] // Цветные металлы. 2023. № 8. С. 25–29.
7. Бормотов А. Н. Оптимизация полимерной матрицы эпоксидных композитов // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 1. С. 28–34.
8. Влияние многократного отверждения на механические характеристики эпоксидной матрицы и ее адгезию к волокнам / П. М. Путилина [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 11. С. 12–19.
9. Прокопчук Н. Р., Клюев А. Ю., Лаптик И. О. Повышение устойчивости к механическим воздействиям и агрессивным средам эпоксидных покрытий наночастицами разной природы // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2024. № 1. С. 43–49.
10. Прокопчук Н. Р., Лаптик И. О. Роль энергетического состояния поверхности наночастиц в формировании структуры и свойств полимерных нанокompозитов // Полимерные материалы и технологии. 2025. № 3. С. 28–35.
11. Метод определения долговечности по энергии активации термоокислительной деструкции полимерных материалов. Изделия полимерные для строительства: СТБ 1333.0-2002. Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2002. 8 с.

12. Ганзуленко О. У., Маскова М. С., Иванцова Н. Ю. Опыт применения наноразмерных покрытий в различных отраслях промышленности // *Нанofизика и наноматериалы: сб. науч. тр. Междунар. симп., Санкт-Петербург, 23–24 нояб. 2022 г. СПб., 2022. С. 87–92.*
13. Карякина М. И. Лабораторный практикум по испытанию лакокрасочных материалов и покрытий. М.: Химия, 1977. 240 с.
14. Улучшение свойств покрытий по металлу наноалмазными частицами / Н. Р. Прокопчук [и др.] // *Цветные металлы. 2021. № 6. С. 55–58.*
15. Методы определения характеристик стойкости к агрессивным средам. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций: ГОСТ 32487–2013. М.: Межгосударственный стандарт, 2013. 7 с.

## References

1. Li H., Neville K. Epoxy resins. *Entsiklopediya polimerov* [Encyclopedia of polymers]: in 3 vol. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1971, vol. 3, pp. 992–1001 (In Russian).
2. Margolin V. I., Mironenko I. G., Ivanov A. A. *Razvitiye nanotekhnologiy na osnove nanokompozitov* [Development of nanotechnology based on nanocomposites]. St. Petersburg, Izdatel'stvo SPbGETU "LETI" Publ., 2016. 190 p. (In Russian).
3. Svistkov A. L., Eliseeva A. Yu., Kondyurin A. V. Mathematical model of the curing reaction of ED-20 with the hardener TEAT-1. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika* [Bulletin of the Perm University. Physics], 2019, no. 1, pp. 9–16 (In Russian).
4. Syzrantsev V. V. Variation of properties of cured epoxy resin with nanoparticles of different synthesis methods. *Nanofizika i nanomaterialy: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Nanophysics and nanomaterials: collection of scientific papers of the International symposium]. St. Petersburg, 2022, pp. 280–285 (In Russian).
5. Pomogailo A. D., Rosenberg A. S., Uflyand N. E. *Nanochastitsy metallov v polimerakh* [Metal nanoparticles in polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 2000. 401 p. (In Russian).
6. Prokopchuk N. R., Syrkov A. G., Klyuev A. Y., Laptik I. O. Improvement of mechanical properties of epoxy coatings on metal with nanoparticles of different nature. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals], 2023, no. 8, pp. 25–29 (In Russian).
7. Bormotov A. N. Optimization of the polymer matrix of epoxy composites. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2022, no. 1, pp. 28–34 (In Russian).
8. Putilina P. M., Pigareva V. A., Gorbatkina Yu. A., Gorbunova I. Yu., Ivanova-Mumzhiyeva V. G., Kerber M. L., Korokhin R. A., Solodilov V. I. Influence of multiple curing on the mechanical characteristics of the epoxy matrix and its adhesion to fibers. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2021, no. 11, pp. 12–19 (In Russian).
9. Prokopchuk N. R., Klyuev A. Yu., Laptik I. O. Increasing the resistance to mechanical influences and aggressive environments of epoxy coatings with nanoparticles of different nature. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geocology, 2024, no. 1, pp. 43–49 (In Russian).
10. Prokopchuk N. R., Laptik I. O. The role of the energy state of the nanoparticle surface in the formation of the structure and properties of polymer nanocomposites. *Polimernyye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2025, no. 3, pp. 28–35 (In Russian).
11. STB 1333.0-2002. A method for determining durability based on the activation energy of thermo-oxidative degradation of polymer materials. Polymer products for construction. Minsk, Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus' Publ., 2002. 8 p. (In Russian).
12. Ganzulenko O. Yu., Maskova M. S., Ivantsova N. Yu. Experience of nanosized coatings application in various industries. *Nanofizika i nanomaterialy: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Nanophysics and nanomaterials: collection of scientific papers of the International symposium]. St. Petersburg, 2022, pp. 87–92 (In Russian).

13. Karyakina M. I. *Laboratornyy praktikum po ispytaniyu lakokrasochnykh materialov i pokrytiy* [Laboratory workshop on testing paint and varnish materials and coatings]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 240 p. (In Russian).

14. Prokopchuk N. R., Globa N. I., Laptik I. O., Syrkov A. G. Improving the properties of coatings on metal with nanodiamond particles. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals], 2021, no. 6, pp. 55–58 (In Russian).

15. GOST 32487–2013. Methods for determining the characteristics of resistance to aggressive media. Composite polymer reinforcement for reinforcement of concrete structures. Moscow, Mezhdgosudarstvennyy standart Publ., 2013. 7 p. (In Russian).

### Информация об авторах

**Лаптик Инна Олеговна** – инженер кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: inna.laptik@yandex.ru.

**Прокопчук Николай Романович** – член-корреспондент НАН Беларуси, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: nrprok@mail.com. SPIN-код: 3126-7297. Scopus ID: 7005521371. ORCID: 0000-0001-7290-1199. ResearcherID: H-5302-2016.

### Information about the authors

**Laptik Inna Olegovna** – engineer, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: inna.laptik@yandex.ru.

**Prokopchuk Nikolay Romanovich** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Honored Scientist of the Republic of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nrprok@mail.com. SPIN code: 3126-7297. Scopus ID: 7005521371. ORCID: 0000-0001-7290-1199. ResearcherID: H-5302-2016.

*Поступила 08.12.2025*