

УДК 678.06:544.72

**Н. Р. Прокопчук, А. Ю. Клюев, И. О. Лаптик**

Белорусский государственный технологический университет

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ И АГРЕССИВНЫМ СРЕДАМ ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НАНОЧАСТИЦАМИ РАЗНОЙ ПРИРОДЫ**

Разработаны нетоксичные эпоксидные композиции для противокоррозионной обработки металлов на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и нового отвердителя – канифолетерпеностирольно-малеинового аддукта (КТСМА), получаемого из возобновляемого растительного сырья. Для повышения устойчивости отвержденной смолы к ударным нагрузкам в композиции смола – отвердитель вводили пластификатор ДЭГ-1 в количестве 7% от массы смолы. Отвердитель КТСМА в своем составе имеет функциональные ангидридные и карбоксильные группы, необходимые для взаимодействия с эпоксидными и гидроксильными группами эпоксидной смолы с образованием пространственной сшитой структуры покрытия.

Для повышения устойчивости к механическим воздействиям и химическим агрессивным средам покрытия по стали модифицированы наночастицами различной природы: оксидами цветных металлов  $TiO_2$ ,  $ZnO$  и ультрадисперсным алмазом УДА. Установлено, что наномодифицирование разработанных композиций наночастицами  $TiO_2$ ,  $ZnO$  и ударопрочными алмазами (УДА СП, АШ-А) в сверхмалых количествах (0,005; 0,010; 0,020 мас. %) позволяет существенно повысить эксплуатационные свойства антикоррозионных покрытий. Возрастает твердость покрытий с 0,2 до 0,71 отн. ед. при содержании 0,02 мас. % УДА; до 0,80 отн. ед. при содержании 0,005 мас. %  $TiO_2$  и 0,02 мас. %  $ZnO$ . Повышается прочность при ударе с 30 до 90 см при введении 0,01 мас. % УДА СП, 0,005 мас. %  $TiO_2$ , 0,02 мас. %  $ZnO$ . Улучшается адгезия покрытий с 4 до 1 балла при введении 0,01 мас. % УДА СП, 0,005 мас. %  $TiO_2$ , 0,01 мас. %  $ZnO$ .

По эффективности повышения стойкости покрытий к воде и 3%-ному водному раствору хлорида натрия наночастицы располагаются в ряду  $TiO_2 > ZnO > УДА$ .

Предложена гипотеза образования надмолекулярной структуры разработанных покрытий по типу взаимопроникающих сеток. Наночастицы, имея на своей поверхности функциональные полярные группы и нескомпенсированный электрический заряд, активно взаимодействуют с олигомерными молекулами эпоксидной смолы по ее функциональным эпоксидным и гидроксильным группам, образуя пространственную систему физических связей, дополнительных к химическим связям отвердителя КТСМА и молекул эпоксидной смолы.

Образование физических связей между функциональными группами эпоксидной смолы ЭД-20 и наночастицами доказано увеличением динамической вязкости на ротационном вискозиметре Брукфильда DV-II+Pro. Рост вязкости значительный: с 15 до 25–29 мПа·с.

**Ключевые слова:** эпоксидная смола, отвердитель, пластификатор, наноалмазные частицы, наночастицы  $TiO_2$  и  $ZnO$ , адгезия, твердость, прочность при ударе.

**Для цитирования:** 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 (277). С. 43–49.

DOI: 10.52065/2520-2669-2024-277-5.

**N. R. Prokopchuk, A. Yu. Klyuev, I. O. Laptik**

Belarusian State Technological University

**INCREASING THE RESISTANCE TO MECHANICAL INFLUENCES AND AGGRESSIVE ENVIRONMENTS OF EPOXY COATINGS WITH NANOPARTICLES OF DIFFERENT NATURE**

Non-toxic epoxy compositions for anti-corrosion treatment of metals based on epoxy ED-20 resin and a new hardener – rosin terpenostyrene-oleic adduct (KTSMA), obtained from renewable vegetable raw materials, have been developed. To increase the resistance of the cured resin to shock loads, we introduce DEG-1 plasticizer in the resin-hardener composition in an amount of 7% by weight of the resin. The KTSMA hardener in its composition has functional anhydride and carboxyl groups necessary for interaction with epoxy and hydroxyl groups of epoxy resin to form a spatial cross-linked coating structure.

To increase resistance to mechanical influences and chemical aggressive media, steel coatings are modified with nanoparticles of various nature: non-ferrous metal oxides  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  and ultrafine diamond UDA. It was found that nanomodification of the developed compositions with  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  nanoparticles and high-impact diamonds (UDA SP, ASH-A) in ultra-small quantities (0.005; 0.010; 0.020 wt. %), allows to significantly improve the performance properties of anticorrosive coatings. The hardness of the coatings increases from 0.2 rel. units to 0.71 rel. units at a content of 0.02 wt. % UDA; up to 0.80 rel. units. with a content of 0.005 wt. %  $\text{TiO}_2$  and 0.02 wt. %  $\text{ZnO}$ . The impact strength increases from 30 cm to 90 cm with the introduction of 0.01 wt. % UDA SP, 0.005 wt. %  $\text{TiO}_2$ , 0.02 wt. %  $\text{ZnO}$ . The adhesion of coatings improves from 4 points to 1 point with the introduction of 0.01 wt. % UDA SP, 0.005 wt. %  $\text{TiO}_2$ , 0.01 wt. %  $\text{ZnO}$ .

According to the effectiveness of increasing the resistance of coatings to water and 3% aqueous sodium chloride solution, nanoparticles are located in the  $\text{TiO}_2 > \text{ZnO} > \text{UDA}$  range.

A hypothesis of the formation of the supramolecular structure of the developed coatings according to the type of interpenetrating grids is proposed. Nanoparticles, having functional polar groups and an uncompensated electric charge on their surface, actively interact with oligomeric epoxy resin molecules along its functional epoxy and hydroxyl groups, forming a spatial system of physical bonds additional to the chemical bonds of the KTSMA hardener and epoxy resin molecules.

The formation of physical bonds between the functional groups of epoxy resin and nanoparticles is proved by an increase in dynamic viscosity on a rotary viscometer Brookfield DV-II+Pro epoxy resin-DEG-1 rotary viscometer when the studied nanoparticles are introduced into the ES. The increase in viscosity is significant: from 15 to 25–29 MPa·s.

**Keywords:** epoxy resin, hardener, plasticizer, nanodiamond particles,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{ZnO}$  nanoparticles, adhesion, hardness, impact strength.

**For citation:** 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. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2024, no. 1 (277), pp. 43–49 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2024-277-5.

**Введение.** Эпоксидные смолы (ЭС) в отвержденном состоянии имеют относительно небольшое число межцепных сшивок, находящихся на значительном расстоянии друг от друга, а поэтому участки цепей между сшивками обладают некоторой подвижностью [1]. Вследствие этого антикоррозионные покрытия менее хрупкие при ударных и изгибающих нагрузках по сравнению с покрытиями из других смол. Кроме того, процесс отверждения ЭС не связан с выделением каких-либо летучих продуктов, поэтому образуются покрытия без вздутия и пор. Наличие в ЭС двух типов функциональных групп (эпоксидных и гидроксильных) позволяет их отверждать многими отвердителями – соединениями с аминогруппами, карбоксильными, ангидридными и другими функциональными группами. Наибольшее распространение получило отверждение ЭС соединениями аминного типа (алифатические, ароматические, гетероциклические амины и их производные). Такие покрытия отличаются хорошими механическими свойствами, химической стойкостью. Однако отверждение аминами имеет недостатки: токсичность аминов, большой экзотермический эффект, приводящий к местным перегревам и образованию внутренних напряжений в покрытиях. Частично эти недостатки устраняются при отверждении ЭС аддуктами

(продуктами взаимодействия избытка амина с эпоксидными олигомерами) или высокомолекулярными полиаминами [2].

Несмотря на то, что композиты на основе ЭС давно и широко применяются на практике [3], их исследования до сих пор продолжаются. Они направлены на совершенствование процесса отверждения различными отвердителями [4]; исследования влияния наполнителей на свойства композитов [5]; модификацию ЭС органическими соединениями [6]; армирование ЭС неорганическими волокнами [7]; оптимизацию полимерной матрицы эпоксидных композитов [8]; разработку математической модели реакции отверждения смолы ЭД-20 с отвердителем [9]; изучение адгезии волокон в эпоксидной матрице [10]. Делаются обобщения в виде обзора основ и стратегии антикоррозионных покрытий на базе эпоксидных смол. Однако исследования системы ЭС – наночастицы на сегодняшний день единичные [11]. Это предопределило цель данной работы: улучшение механических и антикоррозионных свойств эпоксидных покрытий по стали наночастицами разной природы; развитие гипотезы о механизме улучшения наночастицами свойств полимерных антикоррозионных покрытий.

**Основная часть.** Для получения нетоксичных эпоксидных композиций нами использован

новый отвердитель – канифолетерпеностироль-номалеиновый аддукт (КТСМА), получаемый из возобновляемого растительного сырья (рис. 1).

Для повышения устойчивости покрытий по стали к механическим воздействиям и агрессивным средам было актуальным провести наномодифицирование эпоксидных композиций наночастицами различной природы.

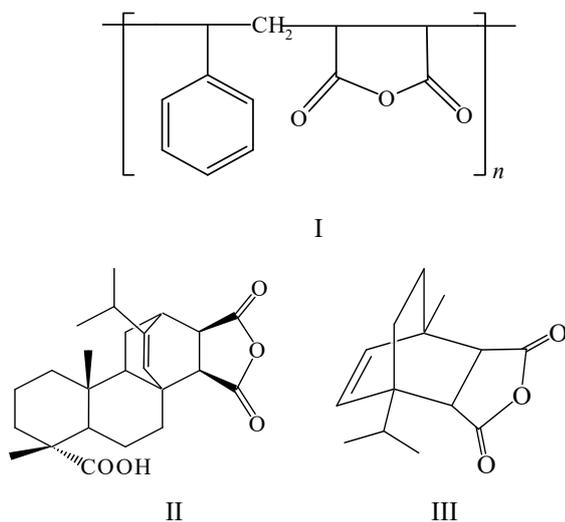


Рис. 1. Структурные формулы предполагаемых продуктов в отвердителе КТСМА:

- I – стиромаль; II – малеопимаровая кислота;  
III – аддукт  $\alpha$ -терпинена и малеинового ангидрида

Композиции готовились на основе эпоксидной смолы ЭД-20. В качестве отвердителя впервые использовали экологически безопасный продукт растительного происхождения КТСМА [12]. Состав аддукта КТСМА предположительно представляет собой многокомпонентные сплавы малеопимаровой кислоты, аддуктов терпеновых углеводов с малеиновым ангидридом, стирольно-малеинового аддукта и смоляных кислот, не реагирующих с малеиновым ангидридом. Аддукт КТСМА в своем составе имеет

функциональные ангидридные и карбоксильные группы, необходимые для взаимодействия с эпоксидными и гидроксильными группами эпоксидной смолы для образования пространственной химически сшитой структуры покрытия [13].

Модификаторы добавляли в количестве 0,005 мас. %; 0,01 мас. %; 0,02 мас. %. Композиции были модифицированы наночастицами АШ-А, УДА СП,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ .

Характеристики наноматериалов НПЗ АО «Синта» АШ-А (ТУ РБ 100056180.003-2003); УДА (ТУ РБ 28619110.001-95) приведены в источнике [14]. Характеристики нанопорошка оксида цинка и диоксида титана (ООО «Томские нанопорошки») представлены в табл. 1.

Все составы наносили на предварительно подготовленные металлические подложки с помощью аппликатора с толщиной мокрого слоя 100 мкм. В состав лакокрасочных композиций входили эпоксидная смола ЭД-20, КТСМА и пластификатор, в качестве которого выступил ДЭГ-1. Было установлено, что оптимальное количество пластификатора ДЭГ-1 в композиции составило 7% от массы смолы. Для обеспечения стехиометрического соотношения между функциональными группами смолы и отвердителя их массовое соотношение составило 3 : 2. Для получения однородной массы при смешении смолы отвердитель КТСМА (твердое стекловидное вещество) растворяли в ацетоне при тщательном перемешивании. Формирование покрытия протекало в сушильном шкафу при температуре 120°C в течение 45 мин. Так как в качестве растворителя использовался ацетон, то все покрытия подвергались предварительной сушке в естественных условиях (20 ± 2)°C.

Твердость антикоррозионных покрытий определяли с помощью маятникового прибора в соответствии со стандартами ISO 1522–73 и ГОСТ 5233–89. Прочность антикоррозионных покрытий при ударе проводили согласно ГОСТ 4765–73. Адгезию методом решетчатых надрезов антикоррозионных покрытий осуществляли согласно ГОСТ 15140–78.

Таблица 1

#### Характеристики используемых наноматериалов

Характеристика	ZnO (ТУ 24.45.30-001-80071161-2020)	$\text{TiO}_2$ (ТУ 1791-003-36280340-2008)
Химическое наименование	Порошок оксида цинка	Порошок оксида титана
Химическая формула	ZnO	$\text{TiO}_2$
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 80–111 нм. Цвет – белый
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,1–0,25	0,5–2,0
Площадь удельной поверхности, м <sup>2</sup> /г	12–20	12,5

Динамическую вязкость антикоррозионных покрытий определяли на ротационном вискозиметре Brookfield RVDV-II+Pro, принцип работы которого основан на измерении закручивания калиброванной пружины при вращении шпинделя в тестируемой жидкости с постоянной скоростью.

Изучено влияние состава композиций на физико-механические свойства с введенными наночастицами. В табл. 2 представлены физико-механические свойства антикоррозионных покрытий с наноматериалами.

Влияние наночастиц на свойства покрытий из эпоксидной смолы, отвержденной новым отвердителем КТСМА, очень сильное. Твердость покрытий возрастает с 0,1 отн. ед. до 0,28 отн. ед. при введении 0,02 мас. % АШ-А; до 0,71 отн. ед. при введении 0,02 мас. % УДА СП; до 0,80 отн. ед. при введении 0,005 мас. %  $\text{TiO}_2$  и 0,02 мас. %  $\text{ZnO}$ . Причем максимальный эффект достигается действием меньшего количества частиц  $\text{TiO}_2$  (0,005 мас. %) по сравнению с наночастицами  $\text{ZnO}$  (0,02 мас. %). Прочность при ударе возрастает с 30 см до 90 см под действием УДА СП (0,01 мас. %);  $\text{TiO}_2$  (0,005 мас. %) и  $\text{ZnO}$  (0,02 мас. %).

Упрочнение композиции на основе ЭД-20 наночастицами  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SrO}_2$  наблюдалось в работе [15].

Адгезия улучшается с 4 баллов до 3 под действием наночастиц: АШ-А и УДА СП; с 4 баллов до 1 для  $\text{TiO}_2$  и  $\text{ZnO}$ .

Таким образом, наиболее эффективными наномодификаторами являются наночастицы оксидов цветных металлов  $\text{TiO}_2$  и  $\text{ZnO}$ .

Для доказательства образования физических связей между функциональными группами ЭС и наночастицами была оценена динамическая вязкость смеси смолы с пластификатором без отвердителя. В эту смесь добавляли оптимальные количества изученных наночастиц. Установлен практически двукратный рост динамической вязкости при наномодификации этой смеси (рис. 2).

При этом наибольший рост динамической вязкости, а следовательно, и межмолекулярных взаимодействий достигается наночастицами оксидов цветных металлов  $\text{TiO}_2$  и  $\text{ZnO}$ .

Установленный рост энергии межмолекулярных взаимодействий (через рост вязкости) в ЭС, содержащей ДЭГ-1, согласуется с гипотезой.

Наночастицы размером до 100 нм, имея на своей поверхности функциональные полярные группы и некомпенсированный электрический заряд, активно взаимодействуют с олигомерными молекулами ЭС по ее функциональным эпоксидным и гидроксильным группам, образуя пространственную систему физических связей дополнительно к химическим связям отвердителя и молекул ЭС.

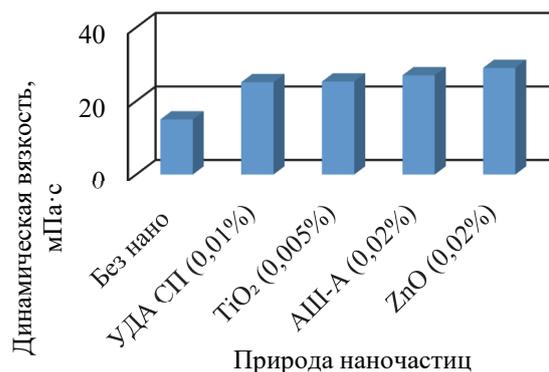


Рис. 2. Зависимость динамической вязкости от природы частиц

Можно предположить, что межмолекулярные взаимодействия усиливаются, плотность покрытия возрастает, а следовательно, растет и его твердость. Дополнительная эластичная физическая сетка выступает демпфером, принимает на себя механическую кинетическую энергию падающего бойка, и прочность покрытия при ударе сильно возрастает, что имеет важное практическое значение. Исходные металлические подложки содержали на поверхности естественный оксид железа, с которым могут взаимодействовать функциональные группы наносимой эпоксидной смолы ЭД-20 и активные поверхности наночастиц. Это важный фактор для усиления адгезии в системе металл – покрытие при обработке металла модифицированными ( $\text{TiO}_2$  и  $\text{ZnO}$ ) смолами, что подтверждается экспериментально (табл. 2).

Определение стойкости эпоксидных покрытий к статическому воздействию жидкостей проводили по ГОСТ 9.403–80 «Покрытия лакокрасочные. Методы испытаний на стойкость к статическому воздействию жидкостей». Метод 1 – погружение, при котором образцы выдерживают в жидкости в течение заданного времени. Сущность метода заключается в определении внешнего вида и защитных свойств покрытий под воздействием жидкостей в течение заданного времени.

Испытания защитного покрытия на стойкость к воздействию агрессивных сред выполнялись в следующих жидкостях: дистиллированная вода; 3%-ный водный раствор хлорида натрия.

Пластины с покрытием после испытания оставляли на воздухе при  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , через 4 ч проводили осмотр внешнего вида пленки невооруженным глазом. Покрытие должно быть без изменений. Испытания проводились при комнатной температуре. Осматривали образцы через каждые сутки.

В табл. 3 представлены результаты химической стойкости покрытий из смолы ЭД-20, модифицированной наночастицами.

Таблица 2

**Физико-механические свойства защитных покрытий, модифицированных наночастицами**

Физико-механические свойства	0%	ZnO, %			TiO <sub>2</sub> , %			АШ-А, %			УДА СП, %		
		0,005	0,01	0,02	0,005	0,01	0,02	0,005	0,01	0,02	0,005	0,01	0,02
Твердость, отн. ед.	0,1	0,50	0,30	0,80	0,80	0,61	0,57	0,27	0,24	0,28	0,30	0,66	0,71
Адгезия, балл	4	2	1	1	1	1	1	3	3	3	4	3	3
Прочность при ударе, см	30	50	70	90	90	70	30	30	35	30	35	90	50

Таблица 3

**Химическая стойкость покрытий смолы, модифицированной наночастицами**

Показатель	УДА, %				TiO <sub>2</sub> , %				ZnO, %			
	–	0,005	0,01	0,02	–	0,005	0,01	0,02	–	0,005	0,01	0,02
Стойкость к статическому воздействию при (20 ± 2)°С, сут, не менее:												
вода	5	5	8	7	5	9	8	8	5	6	7	8
3%-ный водный раствор NaCl	4	4	5	5	4	7	9	6	4	5	5	7
Адгезия, баллы	4	4	3	3	4	1	1	1	4	2	1	1

Из табл. 3 следует, что стойкость к действию воды возрастает при введении 0,005 мас. % наночастиц TiO<sub>2</sub> с 5 до 9 сут (на 80%), а в 3%-ном водном растворе хлорида натрия с 4 до 9 сут (на 125% при концентрации TiO<sub>2</sub> 0,01 мас. %). При введении 0,02 мас. % TiO<sub>2</sub> стойкость снижается из-за частичной агломерации наночастиц. Адгезия при этом возрастает с 4 до 1 балла. Наномодификация покрытий частицами ZnO менее эффективна: водостойкость возрастает с 5 до 8 сут (на 60%) при содержании ZnO 0,02 мас. %, а в 3%-ном водном растворе хлорида натрия с 4 до 7 сут (на 75%) при содержании ZnO 0,02 мас. % Адгезия улучшается с 4 до 1 балла. Большую эффективность TiO<sub>2</sub> по сравнению с ZnO можно объяснить большим поверхностным зарядом частиц TiO<sub>2</sub>.

Наночастицы УДА также повышают антикоррозионные свойства эпоксидных покрытий, но в меньшей мере, чем частицы оксидов цветных металлов. Водостойкость находится на уровне покрытий с 0,02 мас. % ZnO. Стойкость к 3%-ному водному раствору хлорида натрия возрастает всего лишь с 4 до 5 сут (на 25%), а адгезия улучшается всего лишь на 1 балл: с 4 до 3. Это можно связать с меньшей поверхностной энергией частиц УДА.

Таким образом, наночастицы TiO<sub>2</sub> и ZnO наиболее эффективно повышают антикоррозионные свойства эпоксидных покрытий по стали.

Такая надмолекулярная структура по типу взаимопроникающих сеток препятствует диффузии агрессивной среды через пленку к поверхности металла, замедляет его коррозию. Кроме того, полярные группы на поверхности наночастиц взаимодействуют с оксидными группами металлов MeO, образовавшимися механической или химической подготовкой поверхности металла перед нанесением на него защитного покрытия. Так, наночастицы притягивают молекулы ЭС к поверхности металла. Поэтому наномодификация покрытий одновременно улучшает их адгезию к металлу, препятствуя развитию подпленочной коррозии.

**Закключение.** Наночастицы различной природы, вводимые в эпоксидную смолу ЭД-20 с ДЭГ-1, отвержденную КТСМА, существенно улучшают механические свойства антикоррозионных покрытий по стали: прочность при ударе, твердость, адгезию. Наиболее эффективными наноразмерными модификаторами, вводимыми в покрытия, являются наночастицы оксидов цветных металлов TiO<sub>2</sub> и ZnO.

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

*Исследования выполнялись в рамках задания 4.2, ГБ 21-121 ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биорхимия», подпрограмма «Лесохимия- 2».*

**Список литературы**

1. Свистков А. Л., Елисеева А. Ю., Кондюрин А. В. Математическая модель реакции отверждения ЭД-20 с отвердителем ТЭАТ-1 // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 1. С. 9–16.
2. Разработка коррозионностойких материалов с использованием эпоксидной смолы ЭД-20, модифицированной винифлексом / Зо У Хлаинг [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 10. С. 38–41.

3. Подготовка и характеристика механических свойств нанокомпозитов TiO<sub>2</sub>/эпоксидная смола методами дифференциальной сканирующей калориметрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света / L. Merad [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. 2019. № 1. С. 78–83.
4. Бормотов А. Н. Оптимизация полимерной матрицы эпоксидных композитов // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 1. 115 с.
5. Сызранцев В. В. Вариация свойств отвержденной эпоксидной смолы с наночастицами различных методов синтеза // Нанофизика и наноматериалы: сб. науч. тр. Междунар. симпоз., Санкт-Петербург, 23–24 ноября 2022 г. СПб., 2022. С. 280–285.
6. Ганзуленко О. У., Маскова М. С., Иванцова Н. Ю. Опыт применения наноразмерных покрытий в различных отраслях промышленности // Нанофизика и наноматериалы: сб. науч. тр. Междунар. симпоз., Санкт-Петербург, 23–24 ноября 2022 г. СПб., 2022. С. 87–92.
7. Помогайло А. Д., Розенберг А. С., Уфлянд И. Е. Наночастицы металлов в полимерах. М.: Химия, 2000. 401 с.
8. Ли Х., Невилле К. Эпоксидные смолы // Энциклопедия полимеров. М.: Большая Советская энциклопедия, 1971. Т. 3. С. 992–1001.
9. Марголин В. И., Мироненко И. Г., Иванов А. А. Развитие нанотехнологий на основе нанокомпозитов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 190 с.
10. 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.
11. Улучшение механических свойств эпоксидных покрытий по металлу наночастицами разной природы / Н. Р. Прокопчук [и др.] // Цветные металлы. 2023. № 8. С. 25–29.
12. Радбиль А. Б., Клюев А. Ю., Прокопчук Н. Р. Разработка научно-прикладных основ глубокой и комплексной переработки живицы сосны обыкновенной *Pinus Silvestris L.* Минск: БГТУ, 2021. 312 с.
13. Клюев А. Ю., Прокопчук Н. Р. Новые направления переработки и использования сосновой живицы. Минск: БГТУ, 2020. 412 с.
14. Улучшение свойств покрытий по металлу наноалмазными частицами / Н. Р. Прокопчук [и др.] // Цветные металлы. 2021. № 6. С. 55–58.
15. Сызранцев В. В. Улучшение свойств полимерной эпоксидной матрицы добавками наноксидов алюминия и кремния // Цветные металлы. 2023. № 8. С. 34–38.

### References

1. 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).
2. Hlaing Zo U, Kostromina N. V., Kravchenko T. P., Mezhuiev Ya. O. Development of corrosion-resistant materials using epoxy resin ED-20 modified with vinylflex. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Klei. Sealants. Technologies], 2020, no. 10, pp. 38–41 (In Russian).
3. Merad L., Bouchaour M., Abbadie M. J., Benyoucef B. Preparation and characterization of mechanical properties of TiO<sub>2</sub>/epoxy resin nanocomposites by differential scanning calorimetry and Raman spectroscopy. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii* [Journal of Applied Spectroscopy], 2019, no. 1, pp. 78–83 (In Russian).
4. Bormotov A. N. Optimization of the polymer matrix of epoxy composites. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2022, no. 1. 115 p. (In Russian).
5. 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 International Symposium]. St. Petersburg, 2022, pp. 280–285 (In Russian).
6. 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 International Symposium]. St. Petersburg, 2022, pp. 87–92 (In Russian).
7. 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).
8. Lee H., Neville K. Epoxy resins. *Entsiklopediya polimerov* [Encyclopedia of polymers]. Moscow, Bol'shaya Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1971, vol. 3, pp. 992–1001 (In Russian).
9. 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).

10. Putilina P. M., Pigareva V. A., Gorbatkina Yu. A., Gorbunova I. Yu., Ivanova-Mumzhieva 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* [Klei. Sealants. Technologies], 2021, no. 11, pp. 12–19 (In Russian).

11. 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).

12. Radbil A. B., Klyuev A. Yu., Prokopchuk N. R. *Razrabotka nauchno-prikladnykh osnov glubokoy i kompleksnoy pererabotki zhivitsy sosny obyknovennoy Pinus Silvestris L* [Development of scientific and applied fundamentals of deep and complex processing of oleoresin of common pine *Pinus Silvestris L*]. Minsk, BGTU Publ., 2021. 312 p. (In Russian).

13. Klyuev A. Yu., Prokopchuk N. R. *Novyye napravleniya pererabotki i ispol'zovaniya sosnovoy zhivitsy* [New directions of processing and use of pine sap]. Minsk, BGTU Publ., 2020. 412 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. Syzrantsev V. V. Improving the properties of a polymer epoxy matrix with additives of aluminum and silicon nanoxides. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals], 2023, no. 8, pp. 34–38 (In Russian).

### Информация об авторах

**Прокопчук Николай Романович** – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nrprok@mail.com

**Ключев Андрей Юрьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии деревообрабатывающих производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: andrey\_kluev\_bstu@mail.ru

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

### Information about the authors

**Prokopchuk Nicolay Romanovich** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences 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

**Klyuev Andrey Yur'yevich** – DSc (Engineering), Professor, the Department of Woodworking Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andrey\_kluev\_bstu@mail.ru

**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

Поступила 15.11.2023