

23. Antonov D. N., Burtsev A. A., Butkovskiy O. Ya. Metal surface coloration under the impact of pulsed laser radiation. *Technical Physics*. 2014. Vol. 84, No. 10. pp. 83–86.
24. Amiaga John V., Ramos-Velazquez A. R., Gorny S. G., Vologzhanina S. A., Michtchenko A. Groove formation on metal substrates by nanosecond laser removal of melted material. *Metals (MDPI)*. 2021. No. 11. pp. 1–14. DOI: 10.3390/met11122026.
25. Veiko V. P., Odintsova G. V., Gazizova M. Y., Karlagina Y. Y., Manokhin S. S. et al. The influence of laser micro- and nanostructuring on the wear resistance of Grade-2 titanium surface. *Laser Physics*. 2018. Vol. 28, No. 8. p. 086002.
26. Konchus D. A., Sivenkov A. V. A surface structure formation of stainless steel using a laser. *Materials Science Forum*. 2021. No. 1022. pp. 112–118. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.112.
27. Chang C.-L., Cheng C.-W., Chen J.-K. Femtosecond laser-induced periodic surface structures of copper: Experimental and modeling comparison. *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 469. pp. 904–910. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.11.059.
28. Alekseev V. I., Barakhtin B. K., Zhukov A. S. Chemical inhomogeneity as a factor of raising the strength of selective laser melted steels. *Journal of Mining Institute*. 2020. No. 242. pp. 191–196. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.191.
29. Salpagarov E. M., Belyakov A. A., Sivenkov A. V. Improvement of mechanical properties of the tool using nanocomposite coatings. *Materials Science Forum*. 2021. No. 1040. pp. 68–74. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.68.
30. Tomaev V. V., Polischuk V. A., Vartanyan T. A., Mjakin S. V., Leonov N. B. et al. Studies of zinc and zinc oxide nanofilms of different thickness prepared by magnetron sputtering and thermal oxidation. *Optics and Spectroscopy*. 2021. No. 129. pp. 1033–1037. DOI: 10.1134/S0030400X21070201.
31. Amiaga J. V., Gorny S. G., Vologzhanina S. A. Development of a fast method for forming Braille on the surface of steels with IR nanosecond pulsed 50W fiber laser. *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2285. p. 040003.
32. Amiaga J. V., Gorny S. G., Vologzhanina S. A. Method of convex marking of the surfaces of steel products using a pulsed 50-W infrared fiber laser. *Metally*. 2020. No. 13. pp. 1513–1517.
33. Stepanov S. N., Larionova T. A., Stepanov S. S. Understanding the effect of aluminium on the adhesion of stainless steel during flame spraying. *Journal of Mining Institute*. 2020. No. 245. pp. 591–598. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.11.
34. Morozova I. G., Naumova M. G., Zарapin A. Y., Borisov P. V. Copper alloy marking by altering its surface topology using laser heat treatment. *Metallurgist*. 2018. No. 62. pp. 464–469.
35. Olt Yu., Maksarov V. V., Krasnyi V. A. Understanding the wear resistance of mine dump truck engine bearings subjected to fretting corrosion. *Journal of Mining Institute*. 2019. No. 235. pp. 70–77. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.70.
36. Gorbatuk S. M., Naumova M. G., Morozova I. G. Color mark formation on a metal surface by a highly concentrated energy source. *Metallurgist*. 2016. Vol. 60, No. 5. pp. 646–650.
37. CMYK and RGB for printing: What is the difference? Devis printing system. Available at: <https://npt.ru/blog/cmyk-i-rgb-dlja-pechati-v-chem-rznicza> (Accessed: 05.07.2023).

Улучшение механических свойств эпоксидных покрытий по металлу наночастицами разной природы

УДК 669:678.06:544.72



Н. Р. Прокопчук, профессор кафедры полимерных композиционных материалов¹, докт. хим. наук, член-корр. Национальной академии наук Беларуси, эл. почта: nprok@gmail.com



А. Г. Сырков, профессор кафедры общей и технической физики², докт. техн. наук, эл. почта: syrkovandrey@mail.ru



А. Ю. Ключев, профессор кафедры технологии деревообрабатывающих производств¹, докт. техн. наук, эл. почта: tnsippm@belstu.by



И. О. Лаптик, инженер кафедры полимерных композиционных материалов¹, эл. почта: inna.laptyk@yandex.ru

¹ Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь.

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

Разработаны нетоксичные эпоксидные композиции для противокоррозийной обработки металлов на основе смолы ЭД-20 и нового отвердителя — канифолетерпеностирольномалеинового 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. В составе КТСМА имеются функциональные ангидридные и карбоксильные группы, необходимые для взаимодействия с эпоксидными и гидроксильными группами эпоксидной смолы (ЭС) с образованием пространственной сшитой структуры покрытия.

Покрытия по стали на основе ЭД-20, отверждаемые токсичным тетраэтиленпентамином (ТЭПА), обладают несколько лучшими физико-механическими свойствами по сравнению с отвержденными КТСМА: большей твердостью — 0,30 отн. ед. против 0,20 отн. ед. и лучшей адгезией — 3 балла против 4. Это может быть связано с гораздо большим объемом молекул отвердителя КТСМА по сравнению с молекулами ТЭПА, что снижает плотность сшитой пространственной структуры покрытий.

Для повышения устойчивости к механическим воздействиям и химическим агрессивным средам покрытия модифицированы наночастицами разной природы, включая оксиды цветных металлов TiO₂ и ZnO. Установлено, что наномодифицирование разработанных композиций наночастицами TiO₂, ZnO и ударопрочными алмазами (УДА СП, ША-А) в сверхмалых количествах (0,005; 0,010; 0,020 % (мас.)) позволяет существенно повысить эксплуатационные свойства антикоррозионных покрытий.

Предложена гипотеза образования надмолекулярной структуры разработанных покрытий по типу взаимопроникающих сеток. На поверхности наночастиц имеются функциональные полярные группы и их нескомпенсированный электрический заряд.

Они 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 ЭС и наночастицами доказано увеличением динамической вязкости на ротационном вискозиметре Брукфильда DV-II+Pro ЭС-ДЭГ-1 при введении в ЭС исследованных наночастиц. Рост вязкости значительный: с 15 до 25–29 мПа·с.

Ключевые слова: поверхность металла, эпоксидные покрытия, отвердитель, пластификатор, наночастицы ZnO и TiO₂, адгезия, прочность при ударе, защита металла.

DOI: 10.17580/tsm.2023.08.04

Применение нанотехнологий и использование наноматериалов, включая наноксиды цветных металлов, для улучшения свойств различных композиций — важнейшие направления развития современной металлургии [1–4], материаловедения [5–9], производства полимеров [9–12] и металлополимерных композитов [13–17]. Особый интерес для науки и практики представляют возможности нанотехнологических подходов для решения задач эффективной защиты конструкционных металлов от коррозии [18–24], в том числе полимерными материалами. Для длительного функционирования защитных покрытий значимыми являются не только их химическая инертность и сплошность, но и высокие механические свойства, включая адгезию к защищаемому металлу. Среди защитных весьма перспективными показывают себя нанесенные на основе эпоксидных смол (ЭС) [9, 25–27].

Эпоксидные смолы в отвержденном состоянии имеют относительно небольшое число межцепных сшивок, находящихся на значительном расстоянии друг от друга, поэтому участки цепей между сшивками обладают некоторой подвижностью [27]. Вследствие этого такие антикоррозионные покрытия менее хрупкие при ударных и изгибающих нагрузках по сравнению с другими смолами, например резольными. Кроме того, процесс отверждения ЭС не связан с выделением каких-либо летучих продуктов, поэтому покрытия получаются 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 аминного типа (алифатические, ароматические, гетероциклические амины и их производные). Такие покрытия

отличаются хорошими механическими свойствами, химической стойкостью. Однако отверждение аминами имеет недостатки: токсичность, большой экзотермический эффект, приводящий к местным перегревам и образованию внутренних напряжений в покрытиях. Частично они устраняются при отверждении ЭС аддуктами (продуктами взаимодействия избытка амина с эпоксидными олигомерами) или высокомолекулярными полиаминами [27].

Несмотря на то, что композиты на основе ЭС давно и широко применяют на практике [27], их исследования до сих пор продолжают. Они направлены на совершенствование процесса отверждения разными отвердителями [28]; на изучение влияния наполнителей на свойства композитов [29]; модификацию ЭС органическими соединениями [30, 31]; армирование ЭС неорганическими волокнами [32]; оптимизацию полимерной матрицы эпоксидных композитов [33]; рассмотрение адгезии волокон в эпоксидной матрице [34]; разработку математической модели реакции отверждения смолы ЭД-20 с отвердителем [35]. Делают обобщения в виде обзора основ и совершенствования антикоррозионных покрытий на основе эпоксидных смол [36]. Однако исследования системы ЭС – наночастицы пока единичные [37]. Это предопределило цель представленной работы: улучшение механических свойств эпоксидных покрытий по стали наночастицами разной природы, включая оксиды цветных металлов; развитие гипотезы о механизме улучшения наночастицами свойств полимерных антикоррозионных покрытий.

Для получения нетоксичных эпоксидных композиций нами использован новый отвердитель — канифолетерпеностирольномалеиновый аддукт (КТСМА), получаемый из возобновляемого растительного сырья (рис. 1).

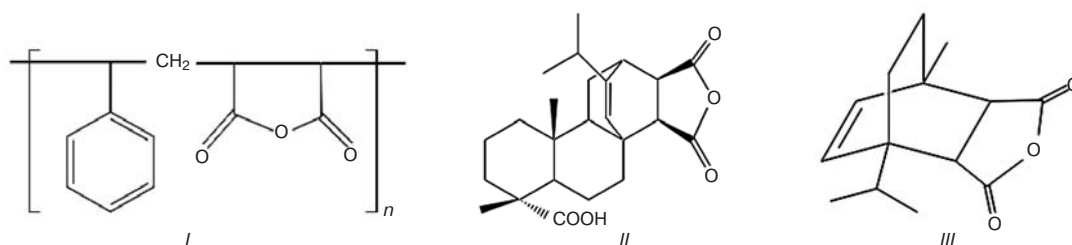


Рис. 1. Структурные формулы предполагаемых продуктов в отвердителе КТСМА:

I — стиромаль; *II* — малеопимаровая кислота; *III* — аддукт α -терпинена и малеинового ангидрида

Таблица 1

Характеристика TiO_2 и ZnO

Характеристика	ZnO	TiO_2
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 80–11 нм. Цвет белый
Насыпная плотность, $г/см^3$	0,1–0,25	0,5–2,0
Площадь удельной поверхности, $м^2/г$	12–20	12,5

Для повышения устойчивости покрытий по стали к механическим воздействиям было актуальным провести наномодифицирование эпоксидных композиций наночастицами разной природы [38].

Композицию готовили на основе эпоксидной смолы ЭД-20. В качестве отвердителя впервые использовали экологически безопасный продукт растительного происхождения КТСМА.

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. В этом соединении имеются функциональные ангидридные и карбоксильные группы, необходимые для взаимодействия с эпоксидными и гидроксильными группами ЭС для образования пространственной химически сшитой структуры покрытия.

В лакокрасочные композиции добавляли модификаторы (наночастицы ША-А, УДА СП, TiO_2 , ZnO) в количестве, % (мас.): 0,005; 0,01; 0,02.

Характеристики наноматериалов НПЗ АО «Синта» ША-А (ТУ РБ 100056180.003–2003 [39]); УДА (ТУ РБ 28619110.001–95 [40]) приведены в работе [41].

Основные характеристики нанопорошка оксида цинка и нанопорошка TiO_2 представлены в **табл. 1** (ООО «Томские нанопорошки»).

Все составы наносили на предварительно подготовленные металлические подложки с помощью аппликатора при толщине мокрого слоя 100 мкм. Подготовку пластин для нанесения покрытий проводили по ГОСТ 8832–76 [42]. В состав лакокрасочных композиций входили ЭС ЭД 20 и КТСМА в качестве отвердителя. При этом соотношение смола : отвердитель составляло 3:2. Для получения однородной массы при смешивании смолы (твердое стекловидное вещество) и отвердителя КТСМА растворяли в ацетоне при тщательном перемешивании. Формирование покрытия протекало в сушильном шкафу при температуре 120 °С в течение 45 мин. Так как в качестве растворителя использовали ацетон, то все покрытия подвергали предварительной сушке в естественных условиях (20 ± 2) °С.

Таблица 2

Физико-механические свойства защитных покрытий, модифицированных наночастицами ША-А, УДА СП, TiO_2 , ZnO

Добавляемые наночастицы	Содержание наночастиц, %	Твердость, отн. ед.	Адгезия, балл	Прочность при ударе, см
Нулевой образец	0	0,1	4	30
ША-А	0,005	0,27	3	30
	0,01	0,24	3	35
	0,02	0,28	3	30
УДА СП	0,005	0,30	4	35
	0,01	0,66	1	90
	0,02	0,71	3	50
TiO_2 , %	0,005	0,80	1	90
	0,01	0,61	1	70
	0,02	0,57	1	30
ZnO	0,005	0,50	2	50
	0,01	0,30	1	70
	0,02	0,80	1	90

Твердость антикоррозионных покрытий определяли с помощью маятникового прибора в соответствии со стандартами ISO 1522–73 [43] и ГОСТ 5233–89 [44].

Прочность антикоррозионных покрытий при ударе устанавливали согласно ГОСТ 4765–73 [45].

Адгезию определяли методом решетчатых надрезов антикоррозионных покрытий согласно ГОСТ 15140–78 [46].

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

С использованием КТСМА, ЭС ЭД-20 и пластификатора разработаны рецептуры эпоксидных термоотверждаемых лаковых композиций. В качестве пластификатора был выбран стандартный ДЭГ-1, было установлено, что оптимальное его количество в композиции — 7 % от массы смолы.

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



Рис. 2. Зависимость динамической вязкости от добавляемых наночастиц

Влияние наночастиц на свойства покрытий из эпоксидной смолы, отвержденной новым отвердителем КТСМА при соотношении смола:отвердитель 3:2 очень сильное. Твердость нанесений возрастает с 0,1 до 0,28 отн. ед. при введении 0,02 % (мас.) ША-А; до 0,71 отн. ед. при введении 0,02 % (мас.) УДА СП; до 0,80 отн. ед. при введении 0,005 % (мас.) TiO₂ и 0,02 % (мас.) ZnO. Причем максимальный эффект достигается действием меньшего количества частиц TiO₂ (0,005 % (мас.)) по сравнению с ZnO (0,02 % (мас.)). Прочность при ударе была увеличена с 30 до 90 см под действием УДА СП (0,01 % (мас.)); TiO₂ (0,005 % (мас.)) и ZnO (0,02 % (мас.)).

Адгезия улучшилась с 4 баллов под действием наночастиц ША-А до 3 баллов; при УДА СП — до 3...1 (~2) баллов; при TiO₂ и ZnO — до 1 балла.

Таким образом, наиболее эффективными наномодификаторами являются наночастицы оксидов цветных металлов.

Для доказательства образования физических связей между функциональными группами ЭС и наночастицами была оценена динамическая вязкость смеси смолы с пластификатором без отвердителя с добавлением оптимальных количеств наночастиц. Установлен практически двукратный рост динамической вязкости при наномодификации этой смеси (рис. 2). При этом наибольшее ее увеличение, а следовательно, и межмолекулярных взаимодействий достигается при введении наночастиц оксидов цветных металлов TiO₂ и ZnO.

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

Наночастицы размером до 100 нм, имея на своей поверхности функциональные полярные группы и нескомпенсированный 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. Можно предположить, что межмолекулярные взаимодействия усиливаются, плотность покрытия возрастает, а следовательно, растет и его твердость. Дополнительная эластичная физическая сетка выступает демпфером, воспринимает на себя механическую кинетическую энергию падающего бойка, и прочность покрытия при ударе сильно возрастает, что имеет важное практическое значение. Поскольку исходные металлические подложки содержали на поверхности естественный оксид железа, которому присущи гидроксидные группы [8, 23], то с ними могут взаимодействовать аналогичные группы наносимой ЭС и оксидов. Таким образом, обработка металла модифицированными (TiO₂ и ZnO) смолами способствует усилению адгезии в системе металл – покрытие, что подтверждено экспериментально (см. табл. 2).

Выводы

Наночастицы разной природы, вводимые в ЭС с ДЭГ-1, отвержденную новым нетоксичным отвердителем КТСМА, существенно улучшают механические свойства антикоррозионных покрытий по стали: прочность при ударе, твердость, адгезию. Наиболее эффективно введение в покрытия наночастиц TiO₂ и ZnO в сверхмалых количествах (0,005–0,020 % (мас.)).

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок



Tsvetnye Metally. 2023. No. 8. pp. 25–29
DOI: 10.17580/tsm.2023.08.04

MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COATINGS ON METAL ENHANCED WITH NANOPARTICLES OF DIFFERENT NATURE

Information about authors

N. R. Prokopchuk, Professor at the Department of Polymer Composite Materials¹, Doctor of Chemical Sciences, Associate Member of the National Academy of Science Belarus, e-mail: nrprok@gmail.com
A. G. Syrkov, Professor at the Department of General and Technical Physics², Doctor of Technical Sciences, e-mail: syrkovandrey@mail.ru
A. Yu. Klyuev, Professor at the Department of Woodworking Production¹, Doctor of Technical Sciences, e-mail: tnsippm@belstu.by
I. O. Laptik, Engineer at the Department of Polymer Composite Materials¹, e-mail: inna.laptik@yandex.ru

¹ Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus.

² Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

Non-toxic epoxides have been developed for metal protection on the basis of ED-20 resin and a new hardener – rosin-terpene-styrene-maleic adduct (KTSMA), obtained from renewable plant materials. DEG-1 plasticizer in the amount of 7% of the resin weight was introduced into the resin-hardener composition to raise the resistance of cured resin to impact loads. The KTSMA hardener contains functional anhydride and carboxyl groups, which should interact with epoxide and hydroxyl groups of the epoxy resin to form a spatial cross-linked coating structure. ED-20-based steel coatings cured with toxic tetraethylenepentamine (TEPA) have slightly better physical and mechanical properties compared with coatings cured with KTSMA. Thus, the former have higher hardness – 0.30 rel. units vs. 0.20 rel. units, and better adhesion – 3 points versus 4 points.

This may be due to a much larger volume of KTSMA molecules compared with TEPA molecules, which reduces the density of the cross-linked spatial structure of the coatings.

To raise the resistance to mechanical impacts and chemically aggressive environments, the coatings were modified with nanoparticles of various nature, including oxides of non-ferrous metals (TiO_2 and ZnO). It was established that through nanomodification of the developed compositions with TiO_2 and ZnO nanoparticles and impact-resistant diamonds (UDA SP, ShA-A) in ultra-small amounts (0.005; 0.010; 0.020 % wt.), one can achieve a significant improvement in the performance of anti-corrosion coatings.

The authors hypothesize that a supramolecular structure is created in the developed coatings, which looks like interpenetrating networks. Functional polar groups and their uncompensated electric charge are present on the surface of nanoparticles, which actively interact with oligomeric molecules of the epoxy resin through its functional epoxide and hydroxyl groups forming a spatial system of physical bonds, additional to the chemical bonds of the KTSMA hardener with epoxy resin molecules.

The physical bonding between the functional groups of epoxy resins and nanoparticles was proved by a rising dynamic viscosity on a Brookfield DV-II + Pro ES-DEG-1 rotary viscometer resulting from the introduction of the studied nanoparticles into the epoxy resin. The increase in viscosity is significant: from 15 to 25–29 mPa·s.

Key words: metal surface, epoxy coatings, hardener, plasticizer, ZnO , TiO_2 nanoparticles, adhesion, impact strength, metal protection.

References

- Sizyakov V. M., Polyakov P. V., Bazhin V. Yu. Production of aluminium and its alloys: Current trends and strategic tasks. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 7. pp. 16–23.
- Kovalskaya K. V., Gorlanov E. S. Al – Ti – B master alloys: structure formation in modified alloys. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 7. pp. 57–64.
- Zhilina E. M., Krasikov S. A., Kuznetsov I. V., Kalenova M. Yu. Separation of ultrafine uranium oxide particles from zirconium alloys in remelting process with fluoride and oxide slags: thermodynamic analysis. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 7. pp. 73–76.
- Glaziev M. V., Bazhin V. Yu. Refractory materials combined with industrial waste for metallurgical machinery. *Novyye ognepopy*. 2020. No. 11. pp. 21–26.
- Litvinova T. E., Kashurin R., Lutskiy D. Complex formation of rare-earth elements in carbonate–alkaline media. *Materials*. 2023. Vol. 16. P. 3140. DOI:10.3390/ma16083140.
- Baake E., Shpenst V. A. Recent scientific studies on electrothermal metallurgical processes. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 240. pp. 660–668.
- Bazhin V. Y., Aryshenskii E., Hirsch J., Kawalla R. et al. Impact of Zener-Hollomon parameter on substructure and texture evolution during thermo-mechanical treatment of iron-containing wrought aluminium alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019. Vol. 29, Iss.5. P. 893–906. DOI: 10.1016/S1003-6326(19)64999-X.
- Cheremisina E., Cheremisina O., Ponomareva M., Bolotov V., Fedorov A. Kinetic Features of the hydrogen sulfide sorption on the ferro-manganese material. *Metals*. 2021. Vol. 11. P. 90. DOI: 10.3390/met11010090.
- Lutskiy D. S., Ignatovich A. S. Understanding the hydrometallurgical recovery of copper and rhenium when processing off-grade copper concentrates. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 251. P. 723–729. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.11.
- Grebner S., Prenner S., Kurz A., Resch S., Pavisek A. et al. Polymer nanocomposites – additives, properties, applications, environmental aspects. *NanoTrust dossier*. 2020. No. 58. pp. 1–6.
- Pruna A. Nanotechnology in eco-efficient construction materials. Processes and applications. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. 2019. pp. 337–359.
- Ganzulenko O. U., Maskova M. S., Ivantsova N. Yu. The practice of using nanocoatings in various industries. *Proceedings of the Nanophysics & Nanomaterials International Conference*. 23–24 November 2022, Saint Petersburg. 2022. pp. 87–92.
- Yachmenova L. A., Silivanov M. O., Kushchenko A. N. V. B. Aleskovskiy's ideas elaborated by the Mining University's science schools in the field of nanotechnology. *Proceedings of the Nanophysics & Nanomaterials International Conference*. 23–24 November 2022, Saint Petersburg. 2022. pp. 361–366.
- New materials: preparation, properties and applications in the aspect of nanotechnology. New York : Nova Science Publishers, Inc., 2020. 249 p.
- Applied aspects of nanophysics and nanoengineering. New York : Nova Science Publishers, Inc., 2019. 308 p.
- Pomogaylo A. D., Rozenberg A. S., Uflyand N. E. Nanoparticles of metals in polymers. Moscow : Khimiya, 2000. 401 p.
- Margolin V. I., Potapov A. A., Farmakovskiy B. F., Kuznetsov P. A. Developing nanocomposite-based nanotechnologies. St Petersburg : Izdatelstvo SPbGETU "LETI", 2016. 190 p.
- Liopo V., Avdejchik S., Struk V. et al. Nanocomposite materials based on thermoplastic blends for the technological equipment with a long service life. *Machines. Technologies. Materials*. 2018. Vol. 12, No. 12. pp. 341–343.

- Kantyukov R. R., Zapevalov D. N., Vaganov R. K. Analyzing the use and effect of carbon dioxide environments on the corrosion condition at oil and gas sites. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 250. pp. 578–586.
- Alkhimova V. A., Sharapova D. M. Corrosion and protection of production tubing in oil and gas industry. *Proceedings of the Nanophysics & Nanomaterials International Conference*. 23–24 November 2022, Saint Petersburg. 2022. pp. 20–26.
- 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.
- Pozhidayeva S. D., Ageeva L. S., Ivanov A. M. Zinc oxidized with the help of acids at room temperatures: A comparative analysis. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. pp. 38–46.
- Zhao Y., Xu J. B., Hu J. M. et al. Electrodeposited superhydrophobic silica films coembedded with template and corrosion inhibitor for active corrosion protection. *Applied Surface Science*. 2020. Vol. 508. 145242.
- Cueli Corugedo A., Latypov O. R., Latypova D. R., Montero Adames Y. Proteccion de la tuber principal contra la corrosion en reas complejas. *Ingenieria y Mecanica*. 2019. Vol. 22, No. 1. pp. 74–78.
- Syzrantsev V. V. Analysis of variation in the properties of the surface of SiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles obtained by different methods. *Condensed Matter and Interphases*. 2022. Vol. 24, No. 3. pp. 369–378.
- Syzrantsev V. V. Variation of properties of cured epoxy resin with nanoparticles synthesized by various techniques. *Proceedings of the Nanophysics & Nanomaterials International Conference*. 23–24 November 2022, Saint Petersburg. 2022. pp. 280–285.
- Lee H., Neville K. Epoxy resins. Encyclopedia of polymers. Vol. 3. Moscow : Izdatelstvo "Sovetskaya entsiklopediya", 1971. pp. 992–1001.
- Long He, Liu Lei, Cao Chang, Jiang Feng, Xu Jun. 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.
- Kitichatpayak D., Makcharoen W., Vittayakorn N., Vittayakorn W. Influence of various nanofillers on mechanical and electrical properties of epoxy resin composites. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2022. Vol. 61. pp. 1826–1832.
- Osipchik V. S., Khlaing Zo U, Kostromina N. V., Kravchenko T. P. et al. Developing corrosion-resistant materials using ED-20 epoxy resin modified with viniflex. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2020. No. 10. pp. 38–41.
- Musa A., Alamry K., Hussein M. Polybenzoxazine-modified epoxy resin: thermal properties and coating performance. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 2021. Vol. 26. pp. 189–203.
- Firas Jameel Jabbar. Study the thermal properties of epoxy resin reinforced with calcium oxide fibers. *Smart Science*. 2021. Vol. 9. pp. 61–69.
- Bormotova A. N. Optimization of the polymer matrix of epoxy composites. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2022. No. 1. pp. 28–33.
- Putilina P. M., Pigareva V. A., Gorbatkina Yu. A., Gorbunova I. Yu. et al. Effect of repeated curing cycles on the mechanical characteristics of epoxy matrix and its adhesion to fibers. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2021. No. 11. pp. 12–19.
- Svistkov A. L., Eliseeva A. Yu., Kondyurin A. V. Mathematical model of the curing reaction of ED-20 resin with TEAT-1 curing compound. *Bulletin of Perm University. Physics*. 2019. Vol. 1. pp. 9–16.
- Ou Baoli, Wang Yuwei, Lu Yi. A review on fundamentals and strategy of epoxy-resin-based anticorrosive coating materials. *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2021. Vol. 60. pp. 601–625.
- Merad L., Bouchaour M., Abbadi M.J., Benyoucef B. Preparation and mechanical characterization of TiO_2 /epoxy resin nanocomposites through differential scanning calorimetry and Raman spectroscopy. *Zhurnal Prikladnoy Spektroskopii*. 2019. Vol. 86, No. 1. pp. 78–83.
- Radbil A. B., Klyuev A. Yu., Prokopchuk N. R. Elaborating the theoretical and practical basis for deep and comprehensive processing of Pinus silvestris L. Minsk : Konfido, 2021. 77 p.
- TU RB 100056180.003–2003. Diamond blend ShA-A. Introduced: 03.02.2004.
- TU RB 28619110.001–95. Ultra-dispersed detonation diamonds. Introduced: 23.10.1995.
- Prokopchuk N. R., Globa A. I., Laptik I. O., Syrkov A. G. The properties of metal coatings enhanced with diamond nanoparticles. *Tsvetnye Metally*. 2021. No. 6. pp. 55–58.
- GOST 8832–76. Paintwork materials. Methods for formation of paint coating for testing. Introduced: 01.01.1977.
- ISO 1522–73. Paints and varnishes – Pendulum damping test. Published: 1.12.1973.
- GOST 5233–89. Paint materials. Method for determination of coating hardness with pendulum instrument. Introduced: 01.01.1990.
- GOST 4765–73. Paint and lacquer materials. Method for determination of impact resistance. Introduced: 01.07.1974.
- GOST 15140–78. Paintwork materials. Methods for determination of adhesion. Introduced: 01.01.1979.