

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-2-26-33>

УДК 620.197.6:667.62

РАЗРАБОТКА ПОВЕРХНОСТНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДОБАВОК С МИНИМАЛЬНЫМ УГЛЕРОДНЫМ СЛЕДОМ ДЛЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

А. Г. СЫРКОВ¹⁺, И. В. ПЛЕСКУНОВ², В. Р. КАБИРОВ¹, Н. Р. ПРОКОПЧУК³, А. А. МАСЛЕННИКОВ¹

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Васильевский остров, 21 линия, 2, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Ай Эм Си Монтан», ул. Чайнова, 22, стр. 4, 125047, г. Москва, Россия

³Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь

Исследование посвящено изучению возможности применения низкоуглеродных поверхностно-модифицированных металлических добавок на основе железа, полученных методом твердотельного гидридного синтеза (ТГС) в составе традиционных лакокрасочных материалов (ЛКМ), таких как битумный лак, краска БТ-177, грунтовка-эмаль ХВ-0278 и олифа натуральная. Получение дисперсных добавок методом твердотельного гидридного синтеза за счет восстановления в открытой проточной системе при нагревании твердых соединений металлов кремнийгидридными реагентами и водородом позволяет в разы сократить эмиссию углекислого газа до 0,03–0,05 т CO₂/т Fe.

Цель работы — оценить зависимость изменения водоотталкивающих и защитных свойств ЛКМ на стали, содержащих дисперсный низкоуглеродный Fe-порошок с поверхностными кремнийорганическими структурами.

Проанализированы данные о коррозии стали с нанесенными покрытиями в воздушной атмосфере, содержащей 0,04–0,50 мг/м³ примесей KCl, HCl, SO₂, и при относительной влажности 70–100%. Установлена линейная зависимость между гидрофобностью и защитными свойствами нанесенных покрытий как для стандартных составов покрытий, так и для составов с наноструктурированным наполнителем, полученным методом ТГС металлов с модифицированной поверхностью. Покрытие из олифы натуральной с наполнителем снижает скорость коррозии стали более, чем в 3 раза, покрытие из эмали ХВ с наполнителем — в 2,5 раза. Показана целесообразность получения низкоуглеродных Fe-содержащих дисперсных добавок из дешевого и доступного оксидного сырья для улучшения экологии их производств и регулирования эксплуатационных характеристик распространенных на практике органополимерных покрытий.

Ключевые слова: защита стали, олигомеры, композиты, лакокрасочные покрытия, контроль поверхности, углеродный след.

DEVELOPMENT OF SURFACE-MODIFIED METAL ADDITIVES WITH A MINIMUM CARBON FOOTPRINT FOR PAINT COATINGS

A. G. SYRKOV²⁺, I. V. PLESKUNOV¹, V. R. KABIROV¹, N. R. PROKOPCHUK¹, A. A. MASLENNIKOV¹

¹Empress Catherina II Saint Petersburg Mining University, 21 line V.O., 2, 199106, St. Petersburg, Russia

²LLC IMC Montan, Chayanova St., 22, building 4, 125047, Moscow, Russia

³Belarusian State Technological University, Sverdlova St., 13a, 220006, Minsk, Belarus

The research is devoted to the studying of possibilities of using low-carbon surface-modified metal additives based on iron, obtained by solid-state hydride synthesis in the composition of traditional paints and varnishes (LCM), such as bitumen varnish, BT-177 paint, HV-0278 enamel primer and natural varnish. The

⁺Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: syrkovandrey@mail.ru

production of dispersed additives by the method of solid-state hydride synthesis and reduction in an open flow system under heating solid metal compounds with mixture of silicon hydride reagents and hydrogen made it possible to significantly reduce carbon dioxide emissions to 0.03–0.05 t CO₂/t Fe.

The purpose of the work is to evaluate the dependence of changes in the water-repellent and protective properties of coatings on steel when dispersed low-carbon Fe powder with surface organosilicon structures is added as a filler.

Data on the corrosion of coated steel in an air atmosphere containing impurities KCl, HCl, SO₂ (0.04–0.50 mg/m³), and at a relative humidity of 70–100% was analyzed. A linear relationship has been established between hydrophobicity and the protective properties of applied coatings both for standard coating compositions and for compositions with a nanostructured filler obtained with solid-state hydride synthesis with the modified surface. A coating of natural varnish with filler reduces the corrosion rate of steel by more than 3 times and coating of HV enamel with filler reduces the corrosion rate of steel by 2.5 times. It is shown the feasibility of obtaining low-carbon footprint Fe-containing dispersed additives from cheap and accessible oxide raw materials in order to improve the ecology of the production and regulate the performance characteristics of organopolymer coatings common in practice.

Keywords: steel protection, oligomers, composites, paint coatings, surface control, carbon footprint.

Поступила в редакцию 21.05.2024

© А. Г. Сырков, И. В. Плескунов, В. Р. Кабилов, Н. Р. Прокопчук, А. А. Масленников, 2024

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в [редакцию журнала](#)
Full text of articles can be purchased from the editorial office

Адрес редакции: ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь
Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Address: Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus
Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: polmattex@gmail.com
Web: <http://mpri.org.by/izdaniya/pmt/>

Образец цитирования:

Сырков А. Г., Плескунов И. В., Кабилов В. Р., Прокопчук Н. Р., Масленников А. А. Разработка поверхностно-модифицированных металлических добавок с минимальным углеродным следом для лакокрасочных покрытий // Полимерные материалы и технологии. 2023. Т. 10, № 2. С. 26–33. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-2-26-33>

Citation sample:

Syrkov A. G., Pleskunov I. V., Kabirov V. R., Prokopchuk N. R., Maslennikov A. A. Razrabotka poverkhnostno-modifitsirovannykh metallicheskih dobavok s minimal'nym uglerodnym sledom dlya lakokrasochnykh pokrytiy [Development of surface-modified metal additives with a minimum carbon footprint for paint coatings]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2023, vol. 10, no. 2, pp. 26–33. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-2-26-33>

Литература

1. Декарбонизация в промышленности: международный опыт и приоритеты России / под ред. Т. Митрова, И. Гайда. Москва : Центр энергетик Московской школы управления Сколково, 2021. 158 с.
2. Максимов А. Л., Ишков А. Г., Пименов А. А., Романов К. В., Михайлов А. М., Колошкин Е. А. Физико-химические аспекты и углеродный след получения водорода из воды и углеводородов // Записки Горного института. 2024. Т. 265. С. 87–94.
3. Литвиненко В. С., Цветков П. С., Двойников М. В., Буслев Г. В. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 428–438.
4. Фрейтаг В., Стойе Д. Краски, покрытия и растворители: состав, производство, свойства и анализ. СПб. : Профессия, 2007. 528 с.
5. Ageev E. V., Ageeva E. V., Khardikov S. V. Structure and Properties of Sintered Corrosion-Resistant Steel Manufactured from Electroerosive Powders // CIS Iron and Steel Review, 2021, vol. 22, pp. 88–91. doi: 10.17580/cisirs.2021.02.16
6. Ageev E. V., Ageeva E. V. Composition, Structure and Properties of Hard Allow Products from Electroerosive Powders obtained from TSK10 Hard Alloy Waste in Kerosene // Non-ferrous Metals, 2022, no. 2, pp. 48–52. doi: 10.17580/nfm.2022.02.10

7. Zhao Y., Xu J.-B., Zhan J., Chen Y.-Q., Hu J.-M. Electrodeposited superhydrophobic mesoporous silica films co-embedded with template and corrosion inhibitor for active corrosion protection // *Applied Surface Science*, 2020, vol. 508. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.145242
8. Burmistrov I., Kiselev N., Khaydarov T., Khaydarov B., Kolesnikov E., Ovchinnikov V., Volnyanko E., Suyasova M., Vikulova M., Gorshkov N., Kuznetsov D., Offor P. Composite High-k Films Based on Polyethylene Filled with Electric Arc Furnace Dust and MWCNT with Permittivity Synergetic Effect // *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 4. doi: 10.3390/coatings13040672
9. Попкова Ю. И., Волнянко Е. Н., Григорьев А. Я. Исследование антикоррозионной стойкости насосно-компрессорных труб с полимерным покрытием в условиях нефтяных месторождений Припятского прогиба Беларуси // *Полимерные материалы и технологии*, 2023. Т. 9, № 4. С. 87–96.
10. Охрана окружающей среды в России. 2022 : статистический сборник. Москва : Росстат, 2022. 115 с.
11. Меринов А. В., Шаяхметов С. Ф., Лисецкая Л. Г., Мешакова Н. М. Гигиеническая характеристика газоаэрозольных взвесей в современном производстве алюминия // *Сибирское медицинское обозрение*. 2019. № 3(117). С. 78–83. doi: 10.20333/2500136-2019-3-78-83
12. Шевелева Т. Е. Оценка и минимизация неканцерогенного риска для здоровья работников производства резинотехнических изделий при воздействии химических веществ, загрязняющих воздушную среду рабочих мест // *Вестник новых медицинских технологий : электронное издание*. 2016. № 4. С. 241–247. doi: 10.12737/22054
13. Марголин В. И., Потапов А. А., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Развитие нанотехнологий на основе нанокompозитов. СПб. : СПбГЭТУ, 2016. 190 с.
14. Нанонаука и нанотехнологии : энциклопедия систем жизнеобеспечения. Москва : ЮНЕСКО [и др.], 2010. 992 с.
15. Гусев А. А., Федорова И. А., Ткачев А. Г., Годымчук А. Ю., Кузнецов Д. В., Полякова И. А. Острое токсическое и цитогенетическое действие углеродных нанотрубок на гидробийонтов и бактерий // *Российские нанотехнологии*. 2012. Т. 7, № 9–10. С. 71–77.
16. Anjum M. J., Ali H., Khan W. Q., Zhao J., Yasin G. Metal/metal oxide nanoparticles as corrosion inhibitors // *Corrosion Protection at the Nanoscale : Ch. 11*. Amsterdam : Elsevier, 2020. pp. 181–201. doi:10.1016/B978-0-12-819359-4.00011-8
17. Tranasekaran P., Su S. H., Liu Y. H., Lu K. L. Hydrophobic metal-organic frameworks and derived composites for microelectronic applications // *Chemistry – A European Journal*, 2021, vol. 27, is. 67, pp. 16543–16563. doi:10.1002/chem.202100241
18. Malaki M., Xu W., Kasar A. K., Menezes P. L., Dieringa H., Varma R. S., Gupta M. Advanced metal matrix nanocomposites // *Metals*, 2019, vol. 9, is. 3. doi: 10.3390/met9030330
19. Бричкин В. Н., Воробьев А. Г., Бажин В. Ю. *Металлургия Горного института: традиции на службе отечеству, науке и производству* // *Цветные металлы*. 2020. № 10. С. 4–13. doi: 10.17580/tsm.2020.10.01
20. Попова А. Н., Клименков Б. Д., Грабовский А. Ю. Научная школа плазменных нанотехнологий и энергетики Горного университета // *Известия вузов. ПНД*. 2021. Т. 29, вып. 2. С. 317–336. doi: 10.18500/0869-6632-2021-29-2-317-336
21. Pristinikii Y. O., Peretyagin N. Yu., Kuznetsova E. V., Peretyagin P. Yu. Mechanical Properties of Hard WC–Co Alloys Produced Traditionally and by Spark Plasma Sintering // *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39, no. 12, pp. 1029–1033. doi: 10.3103/S1068798X19120177
22. Летенко Д. Г., Иванов А. С., Фицак В. В. Предварительная подготовка и методы введения в объем медьсодержащих сплавов фуллеренов и их производных // *Цветные металлы*. 2023. № 8. С. 46–50. doi: 10.17580/tsm.2023.08.09
23. Носов В. В., Возняковский А. П., Королев И. А., Кульбеда Д. А. Влияние графеновых 2D-наноструктур на прочностные характеристики композиционного материала // *Цветные металлы*. 2023. № 8. С. 14–18. doi: 10.17580/tsm.2023.08.02
24. Silivanov M. O., Vinogradova A. A. Research of the parameters of the boundary friction of tribosystems in the introduction of surface-modified Al-samples // *Journal of Physics: Conference series*, 2019, vol. 1384, no. 1. doi: 10.1088/1742-6596/1384/1/012067
25. *New Materials. Preparation, properties and applications in the aspect of nanotechnology / eds.: A. G. Syrkov, K. L. Levine*. New York : Nova, 2020. 249 p.
26. *Applied Aspects of Nano-Physics and Nano-Engineering / eds.: K. L. Levine, A. G. Syrkov*. New York : Nova, 2019. 322 p.
27. Yachmenova L. A., Syrkov A. G., Kabirov V. R. Features of obtaining surface-modified metals with minimal carbon footprint // *Non-ferrous Metals*, 2023, no. 2, pp. 33–40. doi: 10.17580/nfm.2023.02.06
28. Назарова Е. В. Влияние адсорбции аммониевых и кремнийорганических соединений на трибохимические свойства металлов (Al, Cu, Ni) : дис. канд. хим. наук : 02.00.04. СПб., 2016. 139 с.
29. Кущенко А. Н. Особенности формирования сорбционных свойств и гидрофобности металлов, содержащих в поверхностном слое аммониевые и кремнийорганические соединения : дис. канд. техн. наук : 02.00.04. СПб., 2020. 126 с.
30. Ячменова Л. А. Разработка энерго- и ресурсосберегающей технологии получения металлических продуктов с применением гидридных восстановителей-модификаторов : дис. канд. тех. наук : 05.16.02. СПб., 2021. 126 с.
31. Павлов А. В., Зеленская А. Д., Федякова Н. В., Захаров П. Д., Хакимова А. И. Отечественный бутадиен-нитрильный каучук как добавка в рецептурах лакокрасочных материалов // *Лакокрасочные материалы и их применение*, 2023. № 7-8 (556). С. 19–23.
32. Дринберг А. С., Козлова С. П., Карпов В. А. Защитные покрытия на основе фторполимеров // *Химическая промышленность*. 2019. Т. 96, № 4. С. 185–192.
33. Сырманова К. К., Кыдырбаев Н., Калдыбекова Ж. Б., Агабекова А. Б. Исследование физико-механических характеристик лакокрасочных материалов на основе битума БНД 70/100 // *Вестник науки Южного Казахстана*. 2018. № 1(1). С. 137–140.
34. Кемалов Р. А., Кемалов А.Ф. Пигментированные битумные изоляционные материалы на основе природных битумов // *Экспозиция Нефть Газ*. 2012. № 5(23). С. 95–99.
35. Danchenko Y., Andronov V., Skripinets A., Kosse A., Volnyanko E. Decorative-protective epoxy compositions for the restoration of natural stone // *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2490, no. 1. doi: 10.1063/5.0142212
36. Маклаков В. В., Неустров В. С., Табакин Е. М., Кучкина И. Н., Макаров Е. И., Смирнова И. М., Филякин Г. В., Дураков С. В. Оценка состояния защитного покрытия и облицовки бассейнов выдержки центрального хранилища отработавшего ядерного топлива исследовательских реакторов АО «ГНЦ НИИАР» // *Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР*. 2016. № 1. С. 40–51.

References

1. *Dekarbonizatsiya v promyshlennosti: mezhdunarodnyy opyt i priority Rossii* [Decarbonization in industry: international experience and priorities of Russia]. Eds. T. Mitrov, I. Gayda. Moscow : Tsentr energetiki Moskovskoy shkoly upravleniya Skolkovo Publ., 2021. 158 p.
2. Maksimov A. L., Ishkov A. G., Pimenov A. A., Romanov K. V., Mikhaylov A. M., Koloshkin E. A. Fiziko-khimicheskie aspekty i uglevodnyy sled polucheniya vodoroda iz vody i uglevodородов [Physico-chemical aspects and carbon footprint of hydrogen production from water and hydrocarbons]. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2024, vol. 265, pp. 87–94.
3. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Dvornikov M. V., Buslaev G. V. Bar'ery realizatsii vodorodnykh initsiativ v kontekste ustoychivogo razvitiya global'noy energetiki [Barriers to the implementation of hydrogen initiatives in the context of sustainable development of global energy]. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2020, vol. 244, pp. 428–438.
4. Freytag V., Stoye D. *Kraski, pokrytiya i rastvoriteli: sostav, proizvodstvo, svoystva i analiz* [Paints, coatings and solvents: composition, production, properties and analysis]. Saint-Petersburg : Professiya Publ, 2007. 528 p.

5. Ageev E. V., Ageeva E. V., Khardikov S. V. Structure and Properties of Sintered Corrosion-Resistant Steel Manufactured from Electroerosive Powders. *CIS Iron and Steel Review*, 2021, vol. 22, pp. 88–91. doi: 10.17580/cisirs.2021.02.16
6. Ageev E. V., Ageeva E. V. Composition, Structure and Properties of Hard Allow Products from Electroerosive Powders obtained from TSK10 Hard Alloy Waste in Kerosene. *Non-ferrous Metals*, 2022, no. 2, pp. 48–52. doi: 10.17580/nfm.2022.02.10
7. Zhao Y., Xu J.-B., Zhan J., Chen Y.-Q., Hu J.-M. Electrodeposited superhydrophobic mesoporous silica films co-embedded with template and corrosion inhibitor for active corrosion protection. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 508. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.145242
8. Burmistrov I., Kiselev N., Khaydarov T., Khaydarov B., Kolesnikov E., Ovchinnikov V., Volnyanko E., Suyasova M., Vikulova M., Gorshkov N., Kuznetsov D., Offor P. Composite High-k Films Based on Polyethylene Filled with Electric Arc Furnace Dust and MWCNT with Permittivity Synergetic Effect. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 4. doi: 10.3390/coatings13040672
9. Popkova Yu. I., Volnyanko E. N., Grigor'ev A. Ya. Issledovanie antikorroziionnoy stoykosti nasosno-kompressornykh trub s polimernym pokrytiem v usloviyakh neftyanykh mestorozhdeniy Pripyatskogo progiba Belarusi [Research of anti-corrosion resistance pumping and compressor pipes with polymer coating in the conditions of oil fields of the Pripyat tag in Belarus]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2023, vol. 9, no. 4, pp. 87–96.
10. *Okhrana okruzhayushchey sredy v Rossii 2022 : statisticheskiy sbornik* [Environmental protection in Russia 2022 : statistical collection]. Moscow : Rosstat Publ., 2022. 115 p.
11. Merinov A. V., Shayakhmetov S. F., Lisetskaya L. G., Meshchakova N. M. Gigienicheskaya kharakteristika gazoerozolnykh vzvesey v sovremenom proizvodstve aluminia [Hygienic characteristics of gas-aerosol suspensions in modern aluminum production]. *Sibirskoe meditsinskoe obozrenie* [Siberian Medical Review], 2019, no. 3 (117), pp. 78–83. doi: 10.20333/2500136-2019-3-78-83
12. Sheveleva T. E. Otsenka i minimizatsiya nekantserogennogo riska dlya zdorov'ya rabotnikov proizvodstva rezinotekhnicheskikh izdeliy pri vozdeystvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh vozdushnyuyu sredu rabochikh mest [Assessment and minimization of non-carcinogenic health risks for workers in the production of rubber products when exposed to chemicals polluting the air environment of the workplace]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy. Elektronnoe izdanie* [Bulletin of new medical technologies. Electronic publication], 2016, no. 4, pp. 241–247. doi: 10.12737/22054
13. Margolin V. I., Potapov A. A., Farmakovskiy B. V., Kuznetsov P. A. *Razvitie nanotekhnologiy na osnove nanokompozitov* [Development of nanotechnologies based on nanocomposites]. Saint-Petersburg : SPbGETU Publ., 2016. 190 p.
14. *Nanonauka i nanotekhnologii : entsiklopediya sistem zhizneobespecheniya* [Nanoscience and nanotechnology : encyclopedia of life support systems]. Moscow : UNESCO Publ. [et al.], 2010. 992 p.
15. Gusev A. A., Fedorova I. A., Tkachev A. G., Godymchuk A. Yu., Kuznetsov D. V., Polyakova I. A. *Ostroe toksicheskoe i tsitogenicheskoe deystvie uglerodnykh nanotrubok na gidrobiontov i bakteriy* [Acute toxic and cytogenetic effects of carbon nanotubes on hydrobionts and bacteria]. *Rossiyskie nanotekhnologii* [Nanotechnologies in Russia], 2012, vol. 7, no. 9–10, pp. 71–77.
16. Anjum M. J., Ali H., Khan W. Q., Zhao J., Yasin G. Metal/metal oxide nanoparticles as corrosion inhibitors. *Corrosion Protection at the Nanoscale*. Amsterdam : Elsevier, 2020, ch. 11, pp. 181–201. doi:10.1016/B978-0-12-819359-4.00011-8
17. Transekaran P., Su S. H., Liu Y. H., Lu K. L. Hydrophobic metal-organic frameworks and derived composites for microelectronic applications. *Chemistry – A European Journal*, 2021, vol. 27, is. 67, pp. 16543–16563. doi:10.1002/chem.202100241
18. Malaki M., Xu W., Kasar A. K., Menezes P. L., Dieringa H., Varma R. S., Gupta M. Advanced metal matrix nanocomposites. *Metals*, 2019, vol. 9, is. 3. doi: 10.3390/met9030330
19. Brichkin V. N., Vorob'ev A. G., Bazhin V. Yu. Metallurgi Gornogo instituta: traditsii na sluzhbe otechestvu, nauke i proizvodstvu [Mining Institute's metallurgists: a tradition serving the Country, science and production industry]. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2020, no. 10, pp. 4–13. doi: 10.17580/tsm.2020.10.01
20. Popova A. N., Klimenkov B. D., Grabovskiy A. Yu. Nauchnaya shkola plazmennyykh nanotekhnologiy i energetiki Gornogo universiteta [Scientific School of plasma nanotechnology and energy at the Mining University]. *Izvestiya vuzov. PND* [Applied Nonlinear Dynamics], 2021, vol. 29, is. 2, pp. 317–336. doi: 10.18500/0869-6632-2021-29-2-317-336
21. Pristinskiy Y. O., Peretyagin N. Yu., Kuznetsova E. V., Peretyagin P. Yu. Mechanical Properties of Hard WC–Co Alloys Produced Traditionally and by Spark Plasma Sintering. *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39, no. 12, pp. 1029–1033. doi: 10.3103/S1068798X19120177
22. Letenko D. G., Ivanov A. S., Fitsak V. V. Predvaritel'naya podgotovka i metody vvedeniya v ob'em med'soderzhashchikh splavov fullerenov i ikh proizvodnykh [Preparation of fullerenes and their derivatives and their introduction on copper alloys]. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals], 2023, no. 8, pp. 46–50. doi: 10.17580/tsm.2023.08.09
23. Nosov V. V., Voznyakovskiy A. P., Korolev I. A., Kul'beda D. A. Vliyaniye grafenovykh 2D-nanostruktur na prochnostnye kharakteristiki kompozitsionnogo materiala [Influence of 2D graphene nanostructures on the strength characteristics of a composite material]. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals], 2023, no. 8, pp. 14–18. doi: 10.17580/tsm.2023.08.02
24. Silivanov M. O., Vinogradova A. A. Research of the parameters of the boundary friction of tribosystems in the introduction of surface-modified Al-samples. *Journal of Physics: Conference series*, 2019, vol. 1384, no. 1. doi: 10.1088/1742-6596/1384/1/012067
25. *New Materials. Preparation, properties and applications in the aspect of nanotechnology*. Eds.: A. G. Syrkov, K. L. Levine. New York : Nova Publ., 2020. 249 p.
26. *Applied Aspects of Nano-Physics and Nano-Engineering*. Eds.: K. L. Levine, A. G. Syrkov. New York : Nova Publ., 2019. 308 p.
27. Yachmenova L. A., Syrkov A. G., Kabiroy V. R. Features of obtaining surface-modified metals with minimal carbon footprint. *Non-ferrous Metals*, 2023, no. 2, pp. 33–40. doi: 10.17580/nfm.2023.02.06
28. Nazarova E. V. Vliyaniye adsorbtsii ammonievyykh i kremniyorganicheskikh soedineniy na tribokhimicheskie svoystva metallov (Al, Cu, Ni). Diss. kand. khim. nauk [The effect of adsorption of ammonium and organosilicon compounds on the tribochemical properties of metals (Al, Cu, Ni)]. PhD. chem. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2016. 139 p.
29. Kushchenko A. N. Osobennosti formirovaniya sorbtsionnykh svoystv i gidrofobnosti metallov, soderzhashchikh v poverkhnostnom sloe ammonievye i kremniyorganicheskie soedineniya. Diss. kand. tekhn. nauk [Features of the formation of sorption properties and hydrophobicity of metals containing ammonium and organosilicon compounds in the surface layer. CPhD. eng. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2020. 126 p.
30. Yachmenova L. A. Razrabotka energo- i resursoberegayushchey tekhnologii polucheniya metallicheskih produktov s primeneniem gidridnykh vosstanoviteley-modifikatorov. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of energy- and resource-saving technology for producing metal products using hydride reducing modifiers. PhD. eng. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2021. 126 p.
31. Pavlov A. V., Zelenskaya A. D., Fedyakova N. V., Zakharov P. D., Khakimova A. I. Otechestvennyy butadien-nitril'nyy kauchuk kak dobavka v retsepturakh lakokrasochnykh materialov [Domestic butadiene-nitrile rubber as an additive in the formulations of paints and varnishes]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primenenie* [Russian Coatings Journal], 2023, no. 7-8 (556), pp. 19–23.
32. Drinberg A. S., Kozlova S. P., Karpov V. A. *Zashchitnye pokrytiya na osnove ftoropolimerov* [Protective coatings based on fluoropolymers]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2019, vol. 96, no. 4, pp. 185–192.
33. Syrmanova K. K., Kydyrbaev N., Kaldybekova Zh. B., Agabekova A. B. *Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik lakokrasochnykh materialov na osnove bituma BND 70/100* [Study of the physical and mechanical characteristics of paints and varnishes based on bi-

- tumen BND 70/100]. *Vestnik nauki Yuzhnogo Kazakhstana* [Bulletin of Science of Southern Kazakhstan], 2018, no. 1 (1), pp. 137–140.
34. Kemalov R. A., Kemalov A.F. Pigmentirovannye bitumnyye izolyatsionnyye materialy na osnove prirodnnykh bitumov [Pigmented bituminous insulating materials based on natural bitumens]. *Ekspozitsiya Neft' Gaz*, 2012, no. 5 (23), pp. 95–99.
35. Danchenko Y., Andronov V., Skripinets A., Kosse A., Volnyanko E. Decorative-protective epoxy compositions for the restoration of natural stone. *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2490, no. 1. doi: 10.1063/5.0142212
36. Maklakov V. V., Neustroev V. S., Tabakin E. M., Kuchkina I. N., Makarov E. I., Smirnova I. M., Filyakin G. V., Durakov S. V. Otsenka sostoyaniya zashchitnogo pokrytiya i oblitsovki basseynov vyderzhki tsentral'nogo khranilishcha otrabotavshego yadernogo topliva issledovatel'skikh reaktorov AO «GNTs NIIAR» [Assessment of the condition of the protective coating and lining of the cooling pools of the central storage facility for spent nuclear fuel of research reactors of AO “GNTs NIIAR”]. *Sbornik trudov AO GNTs NIIAR* [Collection of works of JSC RIAR], 2016, no. 1, pp. 40–51.
-