

DOI: 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. СЫРКОВ<sup>1\*</sup>, И. В. ПЛЕСКУНОВ<sup>2</sup>, В. Р. КАБИРОВ<sup>1</sup>, Н. Р. ПРОКОПЧУК<sup>3</sup>, А. А. МАСЛЕННИКОВ<sup>1</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Васильевский остров, 21 линия, 2, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup>ООО «Ай Эм Си Монтан», ул. Чайнова, 22, стр. 4, 125047, г. Москва, Россия<sup>3</sup>Белорусский 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 CO<sub>2</sub>/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/м<sup>3</sup> примесей KCl, HCl, SO<sub>2</sub>, 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. SYRKOV<sup>2\*</sup>, I. V. PLESKUNOV<sup>1</sup>, V. R. KABIROV<sup>2</sup>, N. R. PROKOPCHUK<sup>1</sup>, A. A. MASLENNIKOV<sup>1</sup><sup>1</sup>Empress Catherina II Saint Petersburg Mining University, 21 line V.O., 2, 199106, St. Petersburg, Russia<sup>2</sup>LLC IMC Montan, Chayanova St., 22, building 4, 125047, Moscow, Russia<sup>3</sup>Belarusian 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 CO<sub>2</sub>/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, SO<sub>2</sub> (0.04–0.50 mg/m<sup>3</sup>), 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.

## Введение

Перспективным направлением борьбы с возрастающей угрозой изменения климата и выбросами парниковых газов, по мнению ряда ведущих ученых и специалистов, является поиск и разработка новых низкоуглеродных материалов для различных отраслей современной экономики [1–3]. Так, для химической отрасли одной из важных задач является разработка перспективных лакокрасочных составов на основе низкоуглеродных материалов с водоотталкивающими свойствами, которые обеспечивают улучшение эксплуатационных качеств покрытий и конкурентоспособность. Современные лакокрасочные материалы (ЛКМ) для антикоррозионных покрытий на металлах являются сложными многокомпонентными системами, содержащими как моно-, так и полифункциональные ингредиенты, в том числе добавки неорганической природы [4].

Для усиления защитных, антикоррозионных и антифрикционных свойств олигомерных композиций известно применение присадок различной природы [5–7]: на основе алюминия, цинка, молибдена, свинца, никеля и других дисперсных металлов и их соединений; на основе неметаллических материалов таких как технический углерод, углеродные нанотрубки (УНТ), фуллерены и др. [8, 9]. К недостаткам некоторых из перечисленных материалов относятся высокая цена УНТ и углеродная интенсивность, сопряженная с процессом производства. Так, например, на долю производства алюминия приходится почти 3% выбросов мирового промышленного производства, около 270 млн т CO<sub>2</sub>-эквивалента в 2022 г. [10] Также к недостаткам можно отнести негативное воздействие промышленных производств дисперсных неметаллических материалов на чистоту атмосферного воздуха в близлежащих населенных пунктах [11, 12]. Некоторые наночастицы способны приводить к гибели клеток, катализируя окислительные процессы и вызывая нарушения в работе ядра, митохондрий и других органелл клетки [13, 14]. Исследования, к сожалению, подтверждают

зависимость между возникновением серьезных заболеваний онко-, кардио-, и нейродегенеративной направленности и продолжительным воздействием наночастиц на организм. Вред от УНТ при их использовании в косметических препаратах уже доказан [13–15].

В силу вышесказанного особый интерес для применения в качестве высокоэффективных современных наполнителей для ЛКМ и в производстве композитов представляют дисперсные металлы с супергидрофобной и коррозионностойкой поверхностью [16, 17]. Среди инновационных подходов последних лет следует отметить усиленное внимание к разработке наноструктурированных металлических материалов [18, 19]. Здесь перспективны методы плазменных нанотехнологий [20, 21], введение в матрицу углеродных наноструктур [22, 23], наслаивание разноразмерных молекул модификаторов на металле [24–26], твердотельный гидридный синтез (ТГС) дисперсных металлов с гидрофобной поверхностью [27–29]. Последний метод, основанный на восстановлении твердых соединений металлов летучими термостойкими элементводородными соединениями (Э=N, C, Si) в открытой проточной системе, имеет высокий потенциал с точки зрения получения металлических продуктов, например Fe, с минимальным углеродным следом, в том числе для применения в качестве наполнителей лакокрасочных композиций [27].

**Цель работы** — оценить зависимость изменения водоотталкивающих и защитных свойств лакокрасочных покрытий (ЛКП) на стали, при добавлении, в качестве наполнителя, низкоуглеродного дисперсного Fe-порошка с поверхностными кремнийорганическими структурами.

## Материалы и методы исследования

Защитные однослойные покрытия наносили на пластины из стали (Ст3) со сторонами 1,5 см и 4,5 см, имеющие толщину 0,15–0,30 см. Поверхности пластин обрабатывали согласно ГОСТ 2780. По-



крытия наносили кистью; образцы сушили на воздухе в течение суток. Применяли покрытия: эмаль-грунтовка ХВ-0278 (ТУ 2313-091-05011907-200-2003) (ХВ), олифа натуральная (ГОСТ 10106) (ОН), битумный лак (ГОСТ 5631) (БЛ), краска «серебрянка» БТ-177 (ТУ 2310-0074553977-98) (БТ) в чистом виде и с добавками дисперсного наполнителя (Н) на основе железа (1 мас.%) с субмикронным размером частиц, представляющих собой агрегаты размерами менее 200 нм и поверхностью около 1 м<sup>2</sup>/г [29, 30].

Дисперсный наполнитель (Н) получали из оленегорского суперконцентрата (ОСК) (99,5% Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) (Оленегорский ГОК «Олкон», Россия) в условиях ТГС, при этом, несмотря на наличие Si–H связей в кремнийорганическом восстановителе этилгидридсилоксане (ЭГС), карбиды и силициды при температуре ТГС в объеме твердой фазы не образуются, что подтверждено исследованиями, проведенными под руководством авторов данной работы [29, 30]. В процессе синтеза на поверхности частиц порошка формируется сплошная пленка толщиной около 5 нм метил- и карбосилоксановой природы, придающая ему гидрофобные и органотфильные свойства, химическое взаимодействие компонентов которой с металлическим железом подтверждено данными РФЭ-спектроскопии [28–30].

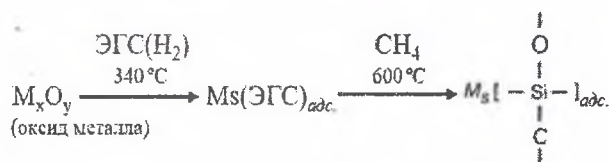
Водостойкость оценивали гравиметрическим экзикаторным методом. Увеличение массы образцов детектировали при помощи аналитических весов «HR-300i» («AND», Япония) с точностью до 0,1 мг. Химические процессы на поверхности контролировали методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) [28, 30]. Исследование проводили на приборе «Escalab 220 iXL» («Thermo Fisher Scientific», США) при комнатной температуре и атмосферном давлении в воздушной атмосфере с насыщенными парами воды либо с агрессивными примесями (0,50 мг/м<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>, 0,2 мг/м<sup>3</sup> HCl, 0,07 мг/м<sup>3</sup> KCl, влажность 70%), моделирующей атмосферу соляных рудников горнохимических производств с открытым способом добычи. Выделение CO<sub>2</sub> при получении Fe-порошка контролировали методом газовой хроматографии на приборе «Хром-42» («Лабораторные приборы», ЧССР), погрешность измерения ±0,03 т CO<sub>2</sub>/т Fe.

## Результаты и их обсуждение

В более ранних работах, проводимых в Горном университете [28–30], доказана перспективность получения дисперсных металлических продуктов (Ni, Fe, Cu) с высокими гидрофобными свойствами и термостойкостью из твердофазного оксидного или

хлоридного сырья в условиях ТГС путем восстановления в парах кремнийорганических соединений, а затем в среде метана.

Метод снижения углеродного следа в процессе ТГС заключается в том, что восстановление металлооксидного сырья на первом этапе проводят с добавлением в газовую фазу к этилгидридсилоксану (ЭГС) более сильного восстановителя — молекулярного водорода, но в безопасной концентрации 2,5 об.%, при избытке концентрации ЭГС. При восстановлении оксидов Fe в среде ЭГС на первом этапе в конечном итоге получают твердые продукты, имеющие полный набор аналитических максимумов на дифрактограмме рентгеноструктурного анализа, характерных для соответствующих металлических фаз, что показано в работах [27, 30]. Экспериментально доказанная степень восстановления оксида до металла на первой стадии составляет более 99% [27]. Заключительный этап синтеза состоит в высокотемпературной обработке в метане (600 °С) и необходим для разрушения реакционноспособной связи Si–H на поверхности образца, сформированной на первом этапе. При этом выделение CO<sub>2</sub> невозможно поскольку разрыв связей Fe–O полностью происходит на первом этапе, а связи Si–C в структуре молекулы восстановителя земосорбированного характеризуются высокой прочностью и термостабильностью. На втором этапе, помимо разрушения Si–H-связей, идет уплотнение Si–C-содержащей карбосилоксановой пленки, с присутствием которой авторы данной работы связывают гидрофобизацию поверхности образцов, наблюдаемую экспериментально [28–30]. Химический состав получаемых металлов представлен в табл. 1. Схема процесса на поверхности металла (Ms — поверхностный атом металла):



Описанный подход получения дисперсных Fe-материалов обеспечивает уменьшение в десятки раз удельной эмиссии углекислого газа до уровня 0,03–0,05 т CO<sub>2</sub>/т Fe, по сравнению с традиционными металлургическими процессами (0,5–1,9 т CO<sub>2</sub>/т Fe) [27]. По мнению авторов данной работы, доказанная низкоуглеродная характеристика получаемых Fe-материалов, в совокупности с высокими водоотталкивающими свойствами поверхности формируют основу для их экспериментальных исследований, как перспективных

Таблица 1 — Химический состав Fe-продукта ТГС, полученного восстановлением ОСК в среде газовой смеси ЭГС и H<sub>2</sub>  
Table 1 — Chemical composition of the SHS Fe-product obtained by the reduction of OSC in a gas mixture of EHS and H<sub>2</sub>

Образец, способ получения	Me, мас.%		Si, мас.%		C, мас.%
	Хим. ан.	РФЛА	Хим. ан.	РФЛА	Хим. ан.
ОСК + ЭГС(H <sub>2</sub> ) + CH <sub>4</sub>	94,4 ± 0,4	–	0,8 ± 0,4	1,2 ± 0,1	1,5 ± 0,1

Примечание: Me — металл; хим. ан. — химический анализ; РФЛА — рентгенофлуоресцентный анализ

низкоуглеродных наполнителей для лакокрасочных композиций.

В качестве промышленно-выпускаемых ЛКМ выбрали как композиции, уже содержащие твердые наполнители (БТ, ХВ), так и «чистые» пленкообразующие органические матрицы без наполнителей (БЛ, ОН). Толщина при однослойном нанесении не превышала 20 мкм. Данные рис. 1, 2 показывают, что наилучшими водоотталкивающими и коррозионностойкими качествами обладает БЛ, а наихудшими ОН.

По данным рис. 3, 4 наибольший эффект снижения влагопоглощения и усиления коррозионной стойкости ЛКП наблюдается при добавлении Fe-порошка в ОН (ОН(Н)/Ст3). Так, скорость прироста

массы снижается на 68% по сравнению с покрытием без наполнителя (ОН/Ст3). Также образец характеризуется минимальным влагопоглощением как при выдержке в насыщенных парах воды, так и при комбинированном смесевом воздействии всех агрессивных компонентов среды ( $H_2O$ ,  $SO_2$ ,  $HCl$ ,  $KCl$ ).

Зависимость защитных свойств изученных покрытий и образцов от гидрофобных (водоотталкивающих) свойств в относительных единицах показана на рис. 5. Максимальные защитные свойства, соответствующие единице, на графике соответствуют образцу с минимальным  $\Delta m/m$  при воздействии смеси агрессивных компонентов. Аналогично самая высокая гидрофобность отвечает образцу с минимальным влагопоглощением.

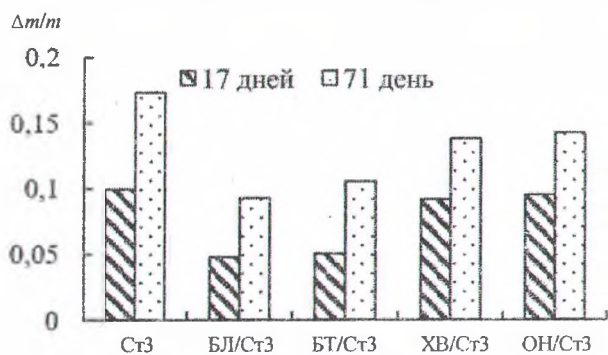


Рисунок 1 — Влагопоглощение образцов ЛКП  
Fig. 1 — Water adsorption of samples of paint coatings

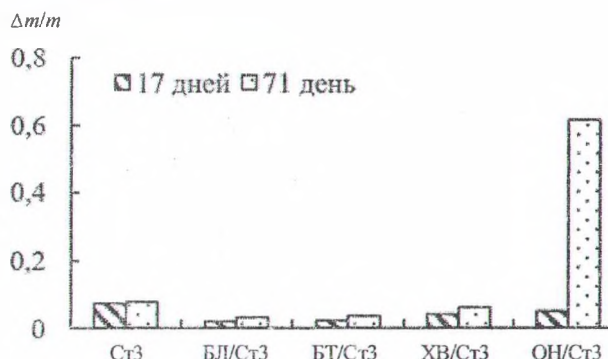


Рисунок 2 — Коррозия образцов ЛКП  
Fig. 2 — Corrosion of samples of paint coatings

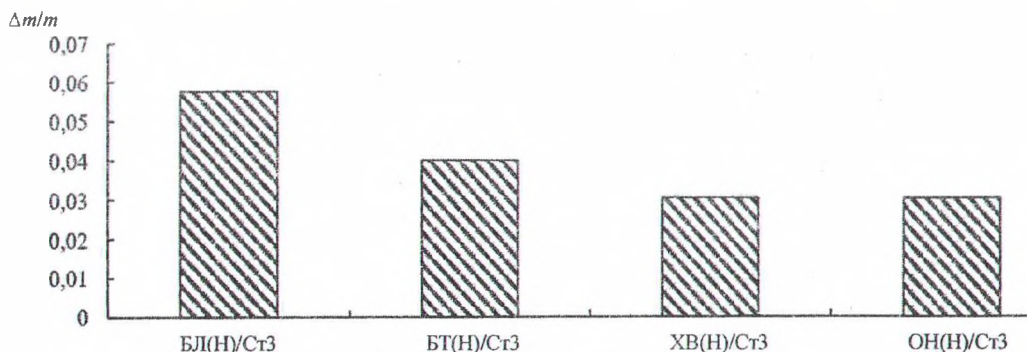


Рисунок 3 — Влагопоглощение образцов ЛКП, содержащих Fe-порошок (1 мас.%)  
Fig. 3 — Water adsorption of samples of paint coatings containing Fe powder (1 wt.%)

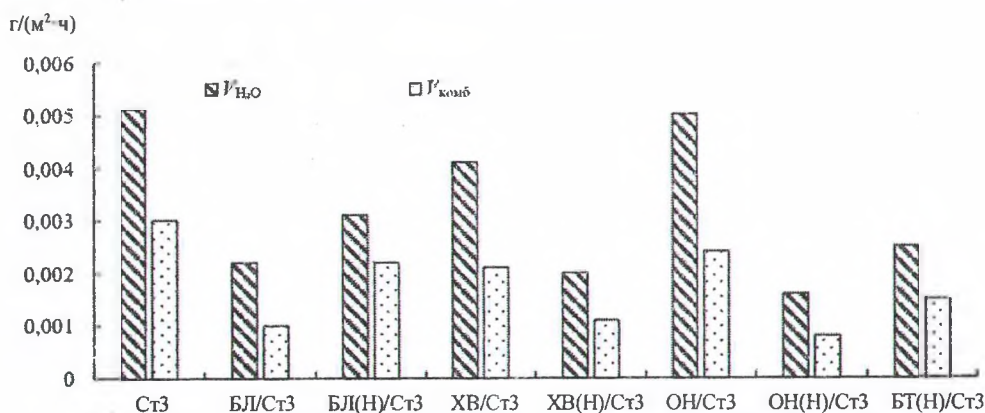


Рисунок 4 — Скорость изменения массы стальных образцов при экспозиции в насыщенных парах воды ( $V_{H_2O}$ ) и в присутствии агрессивных примесей ( $V_{comb}$ )

Fig. 4 — Rate of change in the mass of steel samples during exposure in saturated water vapor ( $V_{H_2O}$ ) and in the presence of aggressive impurities ( $V_{comb}$ )



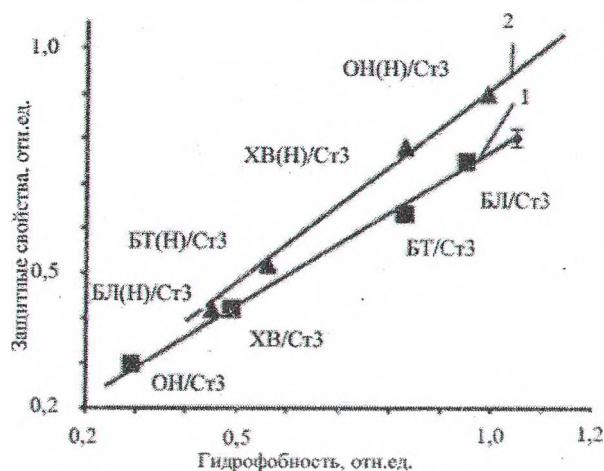


Рисунок 5 — Линейная корреляция ( $R^2 > 0,95$ ) гидрофобности и коррозионной стойкости покрытий при воздействии смесью агрессивных компонентов

Fig. 5 — Linear correlation ( $R^2 > 0,95$ ) of hydrophobicity and corrosion resistance of coatings after exposed in mixture of aggressive components

Из рис. 5 следует, что образцы, покрытые ОН (наименее гидрофобное покрытие), после введения наполнителя становятся самыми гидрофобными и коррозионностойкими. Интересно, что наибольший эффект достигается при введении Fe-добавки именно в органическую матрицу без иных наполнителей. При рассмотрении эмали-грунтовки ХВ, которая является суспензией пигментов и наполнителей в растворе перхлорвинилового, алкидного и эпоксидной смол в органических растворителях с оксидными добавками [31, 32], наблюдаются менее выраженные положительные эффекты ввиду «сглаживания» достаточно значительным содержанием пигментов и присадок, в т. ч. ингибиторов коррозии.

Наблюдаемая деградация защитных свойств при введении дисперсных наполнителей в ЛКП на основе предельных углеводородов, к которым относятся БЛ и БТ, может быть объяснена более слабым, чем в ОН межмолекулярным взаимодействием силоксановых поверхностных групп Н [33, 34] с органической матрицей БЛ и последующей деструкцией органической матрицы, следовательно, снижением гидрофобности и органophilности покрытия.

В этой связи интересным является сравнение ЛКП вида БТ/Ст3, БЛ/Ст3 и ОН(Н)/Ст3. БТ является, по сути, суспензией алюминиевого порошка ПАП-2 в БЛ, достаточно широко распространена в различных отраслях народного хозяйства и может быть, в некотором роде, промышленным образцом сравнения [35, 36]. Так в случае БТ, добавка алюминиевого порошка ПАП-2 даже большей концентрации (15–20 мас.%) не позволяет обеспечить сокращение скорости влагопоглощения и коррозии по сравнению с исходным БЛ, аналогично добавке 1 мас.% Fe-порошков в образцах на основе ОН. При этом важно отметить, что исходная пленкообразующая матрица в образцах на основе ОН существенно уступает битумному лаку по защитным свойствам. Таким образом, можно сделать вывод, что

добавка Fe-порошка не только позволяет существенно улучшить гидрофобные и защитные свойства ЛКП на основе ОН (ОН(Н)/Ст3), но, также более чем на 50% превзойти по аналогичным свойствам БТ — широко применяемый промышленный аналог.

На рис. 5 отражен линейный характер зависимости между защитными свойствами и гидрофобностью ЛКП с добавками Н и без него. Из представленных графиков можно сделать вывод, что, при неизменной гидрофобности исходного покрытия, образцы, обработанные только ЛКМ (рис. 5, график 1) имеют значительно меньшие защитные свойства, чем покрытия с добавлением кремнийорганического наполнителя (рис. 5, график 2).

Таким образом, показано, что введение гидрофобных поверхностно-модифицированных добавок в состав традиционных покрытий может являться методом повышения их защитных свойств. Важно отметить, что использованные поверхностно-модифицированные материалы характеризуются минимальным углеродным следом за счет применения новых технических решений по минимизации выбросов углекислого газа в процессе ТГС. Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования свойств лакокрасочных композиций в условиях реального промышленного производства, так и для прогнозирования свойств в условиях лабораторных тестовых испытаний [35, 36].

## Выводы

Разработаны ЛКМ, содержащие наполнитель на основе низкоуглеродного дисперсного железа — продукта последовательного восстановления твердотельным методом в различных гидридных средах (ЭГС,  $H_2$ ,  $CH_4$ ).

Защитные свойства полученных покрытий на основе изученных органополимерных композиций исследованы на стали Ст3 в насыщенных парах  $H_2O$  и в присутствии в атмосфере различных примесей ( $KCl$ ,  $HCl$  и  $SO_2$ ) ниже предельно-допустимой концентрации.

Установлена линейная корреляция между водоотталкивающими свойствами и защитными свойствами покрытий для исходных составов и для составов с низкоуглеродным Fe-наполнителем.

Покрытие из ОН с наполнителем снижает скорость коррозии стали более чем в 3 раза, покрытие эмали ХВ с наполнителем — в 2,5 раза.

## Обозначения

БЛ — битумный лак; БТ — лак БТ-177; ЛКМ — лакокрасочные материалы; ЛКП — лакокрасочные покрытия; Н — дисперсный наполнитель; ОН — олифа натуральная; ОСК — оленегорский суперконцентрат; РФЛА — рентгенофлуоресцентный анализ; РФЭС — рентгенофотоэлектронная спектроскопия; ТГС — твердотельный гидридный синтез; УНТ — углеродные нанотрубки;

ХВ — эмаль ХВ-0278 на основе поливинилхлоридной смолы; ЭГС — этилгидридсилоксан;  $R$ , % — коэффициент корреляции.

## Литература

- Декарбонизация в промышленности: международный опыт и приоритеты России / под ред. Т. Митрова, И. Гайда. Москва : Центр энергетики Московской школы управления Сколково, 2021. 158 с.
- 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.
- Литвищенко В. С., Цветков П. С., Двойников М. В., Буслав Г. В. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 428–438.
- Фрейтаг В., Стойе Д. Краски, покрытия и растворители: состав, производство, свойства и анализ. СПб. : Профессия, 2007. 528 с.
- 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/cisr.2021.02.16
- 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
- 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
- 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
- Попкова Ю. И., Волянюк 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. 37–96.
- Охрана окружающей среды в России. 2022 : статистический сборник. Москва : Росстат, 2022. 115 с.
- Меринев А. В., Шаяхметов С. Ф., Лисецкая Л. Г., Мещанова Н. М. Гигиеническая характеристика газозеролевых взвесей в современном производстве алюминия // Сибирское медицинское обозрение. 2019. № 3(117). С. 78–83. doi: 10.20333/2500136-2019-3-78-83
- 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
- Марголин В. И., Потапов А. А., Фармаковский Б. В., Кузнецов П. А. Развитие нанотехнологий на основе нанокмппозитов. СПб. : СПбГЭТУ, 2016. 190 с.
- Нанонаука и нанотехнологии : энциклопедия систем жизнеобеспечения. Москва : ЮНЕСКО [и др.], 2010. 992 с.
- 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 гидробактерии и бактерий // Российские нанотехнологии. 2012. Т. 7, № 9-10. С. 71–77.
- 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
- 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. 10.1002/chem.202100241
- Malaki M., Xu W., Kazar 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
- 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
- Полова 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
- Pristinskii 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
- 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
- Носов В. В., Возниковский 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
- 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
- New Materials. Preparation, properties and applications in the aspect of nanotechnology / eds.: A. G. Syrkov, K. L. Levine. New York : Nova, 2020. 249 p.
- Applied Aspects of Nano-Physics and Nano-Engineering / eds.: K. L. Levine, A. G. Syrkov. New York : Nova, 2019. 322 p.
- Yachmeneva 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
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Дринберг А. С., Козлова С. П., Карпов В. А. Защитные покрытия на основе фторполимеров // Химическая промышленность. 2019. Т. 96, № 4. С. 185–192.
- 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.
- Кемалов Р. А., Кемалов А.Ф. Пигментгириванные битумные изоляционные материалы на основе природных битумов // Экспозиция Нефть Газ. 2012. № 5(23). С. 95–99.
- Danchenko Y., Andronov V., Skripinets A., Kosse A., Volnyanko E. Decorative-protective epoch compositions for the restoration of natural stone // AIP Conference Proceedings, 2023, vol. 2490, no. 1. doi: 10.1063/5.0142212
- Маклаков В. В., Неустров В. С., Табакин Е. М., Кучкина И. Н., Макаров Е. И., Смирнов 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 uglevodorodov [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., Dvoynikov 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/cisr.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 L., Kiselev N., Khaydarov T., Khaydarov B., Koleznikov E., Ovchinnikov V., Volnyanko E., Stuyasova 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 gazoerozol'nykh vzvesey v sovremennom proizvodstve alyuminiya [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 sredyu 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 tekhnologii. 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. Razvitiye nanotekhnologii na osnove nanokompozitov [Development of nanotechnologies based on nanocomposites]. Saint-Petersburg : SPbGETU Publ., 2016. 190 p.
14. *Nanonauka i nanotekhnologii : entsiklopediya sistem zhiznibespecheniya* [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. *Ostroetoksicheskoe i tsitogeneticheskoe deystvie uglevodnykh 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. 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. 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., Klimentov B. D., Grabovskiy A. Yu. Nauchnaya shkola plazmennyykh nanotekhnologii 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. Pristinitskiy 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. Ietenko 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., 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. 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 sorbtionnykh 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 resursosbergayushchey

- tehnologii 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 primeneniye* [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 ftorpolimerov [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 bitumen 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 bitumnye izol'yatsionnye materialy na osnove prirodnykh bitumov [Pigmented bituminous insulating materials based on natural bitumens]. *Ekspozitsiya Nefi' 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 oblitovki bas-seynov vyderzhki tsentral'nogo khranilishcha otrabotavshogo yadernogo topliva issledovatel'skikh reaktorov AO «GNTs NIAR» [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 NIAR"]. *Sbornik trudov AO GNTs NIAR* [Collection of works of JSC RIAR], 2016, no. 1, pp. 40–51.

---

Поступила в редакцию 21.05.2024

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