

DOI: 10.32864/polymmattech-2025-11-3-50-58

УДК 620.197

СПОСОБ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОГО ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ МИКРОКАПСУЛИРОВАННЫМИ ИНГИБИТОРАМИ НА ОСНОВЕ Al_2O_3 И ОКСИЭТИЛИДЕНДИФОСФОНОВОЙ КИСЛОТЫ

С. А. СИДОРОВА¹⁺, С. А. ТЮРИНА¹, Н. А. РАШУТИН¹, В. Л. ДЕМИН^{1,2}, В. А. ЩЕЛКОВ²

¹МИРЭА – Российский Технологический Университет, ул. Стромынка, 20, 107996, г. Москва, Россия

²Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина, ул. Обручева, 40, стр. А, 117342, г. Москва, Россия

Отложения солей жесткости на внутренней поверхности труб теплообменных аппаратов, последующее их коррозионное разрушение являются серьезными проблемами теплоэнергетического комплекса, являясь основными причинами ухудшения эксплуатационных характеристик и преждевременного выхода из строя оборудования.

Цель работы — качественная и количественная оценка эффективности модифицирования лакокрасочных покрытий (ЛКП) микрокапсулами на основе оксиэтилидендифосфоновая кислоты (ОЭДФК) и Al_2O_3 в различных формах для повышения защиты труб от коррозии и накипеобразования.

Предложенный подход основывается на использовании микрокапсул, которые представляют собой микроскопические контейнеры, содержащие внутри ингибитор коррозии. В качестве ингибитора использовали ОЭДФК, которая является эффективным комплексообразователем и ингибитором коррозии. В качестве носителя — Al_2O_3 в различных формах. Качественную и количественную оценку коррозионной стойкости покрытий проводили, применяя ускоренные испытания на стойкость ЛКП к воздействию климатических факторов и метод электрохимической импедансной спектроскопии.

Установлено, что введение микрокапсулированных ингибиторов в полимерное покрытие существенно повышает его противокоррозионные свойства, а также снижает интенсивность процесса солеотложения. Введение микрокапсул позволило улучшить импеданс (Z) грунтовых покрытий во всем диапазоне частот. При введении в ЛКП частиц активированного Al_2O_3 + ОЭДФК Z увеличивается с 1,1 кОм до 12 кОм в низкочастотной области, коррозионные процессы замедляются практически полностью. Образование накипи снижается на 14,7%, по сравнению с промышленным ЛКП. Полученные данные подтверждают эффективность предложенных рецептур. Составы Al_2O_3 + ОЭДФК и активированный Al_2O_3 + ОЭДФК целесообразно применять в ЛКП для повышения долговечности и надежности оборудования теплотехнического комплекса.

Ключевые слова: микрокапсулирование, ингибиторы коррозии, накипеобразование, коррозионная стойкость, полимерное защитное покрытие, ускоренные испытания.

⁺Автор для переписки. E-mail: sidorova_s@mirea.ru

Для цитирования:

Сидорова С. А., Тюрина С. А., Рашутин Н. А., Демин В. Л., Щелков В. А. Способ модифицирования противокоррозионного полимерного покрытия микрокапсулированными ингибиторами на основе Al_2O_3 и оксиэтилидендифосфоновой кислоты // Полимерные материалы и технологии. 2025. Т. 11, № 3. С. 50–58. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-3-50-58>

⁺Author for correspondence. E-mail: sidorova_s@mirea.ru

For citation:

Sidorova S. A., Tyurina S. A., Rashutin N. A., Demin V. L., Shchelkov V. A. Sposob modifitsirovaniya protivokorroziionnogo polimernogo pokrytiya mikrokapulirovannymi ingibitorami na osnove Al_2O_3 i oksietilidendifosfonovoy kisloty [The modification method of anticorrosive polymer coating with microcapsulated inhibitors based on Al_2O_3 and hydroxyethylidenediphosphonic acid]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2025, vol. 11, no. 3, pp. 50–58. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-3-50-58>

THE MODIFICATION METHOD OF ANTICORROSIVE POLYMER COATING WITH MICROCAPSULATED INHIBITORS BASED ON Al_2O_3 AND HYDROXYETHYLIDENEDIPHOSPHONIC ACID

S. A. SIDOROVA¹⁺, S. A. TYURINA¹, N. A. RASHUTIN¹, V. L. DEMIN^{1,3}, V. A. SHCHELKOV²

¹MIREA – Russian Technological University, Stromynka St., 20, 107996, Moscow, Russia

²Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Obrucheva St., 40, building A, 117342, Moscow, Russia

Scale deposition and subsequent corrosion of heat exchanger tubes are significant challenges in the thermal power industry, leading to reduced operational efficiency and premature equipment failure.

This work aims to qualitatively and quantitatively assess the effectiveness of modifying paint coatings (PC) with microcapsules based on oxyethylidenediphosphonic acid (HEDP) and Al_2O_3 in various forms to enhance corrosion and scaling resistance in tubes.

The proposed approach utilizes microcapsules, microscopic containers encapsulating a corrosion inhibitor. HEDP, an effective complexing agent and corrosion inhibitor, was employed. Al_2O_3 in different forms served as the carrier material. Corrosion resistance was evaluated qualitatively and quantitatively using accelerated weathering tests and electrochemical impedance spectroscopy (EIS).

Results demonstrate that incorporating microencapsulated inhibitors significantly enhances the anticorrosion properties of the polymer coating and reduces scaling. The introduction of microcapsules improved the impedance (Z) of primer coatings across the entire frequency range. With the addition of activated Al_2O_3 + HEDP to the PC, Z increased from 1.1 k Ω to 12 k Ω in the low-frequency region, virtually eliminating corrosion processes. Scale formation was reduced by 14.7% compared to a commercial PC. These findings confirm the effectiveness of the proposed formulations. Al_2O_3 + HEDP and activated Al_2O_3 + HEDP compositions are recommended for inclusion in PCs to improve the longevity and reliability of thermal power equipment.

Keywords: microcapsulation, corrosion inhibitors, scale formation, corrosion resistance, polymer protective coating, accelerated testing.

Поступила в редакцию 28.02.2025

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/>

Литература

1. Zhao X., Chen X. D. Critical Review of Basic Crystallography to Salt Crystallization Fouling in Heat Exchangers // Heat Transfer Engineering, 2013, vol. 34, is. 8-9, pp. 719–732. doi: 10.1080/01457632.2012.739482
2. Yuan H., Zeng D., Li J., Liu Z., Wang Xi, Yu C., Yi Y., Dong B. The Effects of Cl^- and Ca^{2+} on Corrosion and Scale Formation of 3Cr Steel in CO_2 Flooding Produced Fluid // Chinese Journal of Chemical Engineering, 2025. doi: 10.1016/j.cjche.2025.02.036
3. Галковский В. А., Чупова М. В. Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности // Интернет-журнал Науковедение. 2017. № 2 (9) [Электронный ресурс]. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN217.pdf> (дата обращения: 20.02.2025).
4. Гнеденков С. В., Синябрюхов С. Л., Коврянов А. Н., Минаев А. Н., Машталяр Д. В., Гордиенко П. С. Влияние покрытий на интенсивность процессов солеотложения // Исследовано в России: электронный журнал. 2003. № 146. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyaniye-pokrytiy-na-intensivnost-protseessov-soleotlozheniya/viewer> (дата обращения: 20.02.2025).
5. Рудковская Е. В., Омельчук Ю. А., Гомеля Н. Д. Оценка эффективности нового ингибитора для защиты водооборотных систем охлаждения от накипеобразования и коррозии // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. Т. 2, № 8 (62). С. 45–48.
6. Барабаш Д. Е., Забелин Д. А. Полимерные покрытия с комплексом ингибиторов коррозии для регулируемой защиты изделий различного назначения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. № 2. С. 140–146.
7. Головин В. А., Тюрин С. А. Микрокапсулирование ингибиторов коррозии и активных добавок для противокоррозионных защитных поли-

- мерных покрытий // Коррозия: материалы, защита. 2019. № 7. С. 1–11. doi: 10.31044/1813-7016-2019-0-7-1-11
8. Habib S., Qureshi A., Shakoор R. A., Kahraman R., Al-Qahtani N. H., Ahmed E. M. Corrosion inhibition performance of polyolefin smart self-healing composite coatings modified with ZnO@ β -Cyclodextrin hybrid particles // *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 21, pp. 3371–3385. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.10.148
 9. Sun Y., Li C., Fu D., Hu H., Bai Z., Geng H., Gao Y., Zhu Y., Wang H. A novel high anti-corrosion performance polymer based composite coating with new functional fillers // *Progress in Organic Coatings*, 2022, vol. 162. doi: 10.1016/j.porgcoat.2021.106603
 10. Adsul S. H., Soma Raju K. R. C., Sarada B. V., Sonawane S. H., Subasri R. Evaluation of self-healing properties of inhibitor loaded nanoclay-based anticorrosive coatings on magnesium alloy AZ91D // *Journal of Magnesium and Alloys*, 2018, vol. 6, is. 3, pp. 299–308. doi: 10.1016/j.jma.2018.05.003
 11. Chen T., Fu J. J. pH-responsive nanovalves based on hollow mesoporous silica spheres for controlled release of corrosion inhibitor // *Nanotechnology*, 2012, no. 23. doi: 10.1088/0957-4484/23/23/235605
 12. Kumarage G. W. C., Hakkoum H., Comini E. Recent Advancements in TiO₂ Nanostructures: Sustainable Synthesis and Gas Sensing // *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, is. 8. doi: 10.3390/nano13081424
 13. Pulikkalparambil H., Siengchin S., Parameswaranpillai J. Corrosion protective self-healing epoxy resin coatings based on inhibitor and polymeric healing agents encapsulated in organic and inorganic micro and nanocontainers // *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2018, vol. 16, pp. 381–395. doi: 10.1016/j.nanoso.2018.09.010
 14. Priyanka D., Nalini D. Designing a corrosion resistance system using modified graphene oxide-epoxy microcapsules for enhancing the adhesion strength of the epoxy coatings // *Applied Surface Science Advances*, 2022, vol. 10, doi: 10.1016/j.apsadv.2022.100269
 15. Головин В. А., Щелков В. А., Ращутин Н. А., Тюрина С. А., Демин В. Л. Микрокапсулированные и активные добавки для повышения антинакипных свойств полимерных противокоррозионных покрытий // *Коррозия: защита материалов и методы исследований*. 2023. № 4. С. 131–141. doi: 10.61852/2949-3412-2023-1-4-131-141
 16. Семенов В. В., Золотарева Н. В., Новикова О. В., Разов Е. Н., Круглов А. В., Котомина В. Е. Нитевидные кристаллы (1-гидроксиэтилен)дифосфоната железа (II) и его комплекса с морфолином // *Кристаллография*. 2019. Т. 64, № 6. С. 895–901. doi: 10.1134/S0023476119060171

References

1. Zhao X., Chen X. D. Critical Review of Basic Crystallography to Salt Crystallization Fouling in Heat Exchangers. *Heat Transfer Engineering*, 2013, vol. 34, is. 8-9, pp. 719–732. doi: 10.1080/01457632.2012.739482
2. Yuan H., Zeng D., Li J., Liu Z., Wang Xi, Yu C., Yi Y., Dong B. The Effects of Cl⁻ and Ca²⁺ on Corrosion and Scale Formation of 3Cr Steel in CO₂ Flooding Produced Fluid. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2025. doi: 10.1016/j.cjche.2025.02.036
3. Galkovskiy V. A., Chupova M. V. Analiz snizheniya koefitsienta teploperedachi teploobmennyykh apparatov vsledstvie zagryazneniya poverkhnosti [Analysis of the reduction in the heat transfer coefficient of heat exchangers due to surface contamination]. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN217.pdf> (accessed 20.02.2025).
4. Gnedenkov S. V., Sinebryukhov S. L., Kovryanov A. N., Minaev A. N., Mashtalyar D. V., Gordienko P. S. Vliyanie pokrytiy na intensivnost' protsessov soletozheniya [Influence of coatings on the intensity of scaling processes]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-pokrytiy-na-intensivnost-protsessov-soletozheniya/viewer> (accessed 20.02.2025).
5. Rudkovskaya E. V., Omel'chuk Yu. A., Gomelya N. D. Otsenka effektivnosti novogo ingibitora dlya zashchity vodooborotnykh sistem okhlazhdeniya ot nakipeobrazovaniya i korrozii [Evaluation of the effectiveness of a new inhibitor for the protection of water circulation cooling systems from scale formation and corrosion]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [East European Journal of Advanced Technologies], 2013, vol. 2, no.8 (62), pp. 45–48.
6. Barabash D. E., Zabelin D. A. Polimernye pokrytiya s kompleksom ingibitorov korrozii dlya reguliruemoy zashchity izdeliy razlichnogo naznacheniya [Polymer Coatings with a Complex of Corrosion Inhibitors for Adjustable Protection of Various Products]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University], 2017, no. 2, pp. 140–146.
7. Golovin V. A., Tyurina S. A. Mikrokapulirovaniye ingibitorov korrozii i aktivnykh dobavok dlya protivokorroziyonykh zashchitnykh polimernykh pokrytiy [Microencapsulation of Corrosion Inhibitors and Active Additives for Anti-Corrosion Protective Polymer Coatings]. *Korrozija: materialy, zashchita* [Corrosion: Materials, Protection], 2019, no. 7, pp. 1–11. doi: 10.31044/1813-7016-2019-0-7-1-11
8. Habib S., Qureshi A., Shakoор R. A., Kahraman R., Al-Qahtani N. H., Ahmed E. M. Corrosion inhibition performance of polyolefin smart self-healing composite coatings modified with ZnO@ β -Cyclodextrin hybrid particles. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 21, pp. 3371–3385. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.10.148
9. Sun Y., Li C., Fu D., Hu H., Bai Z., Geng H., Gao Y., Zhu Y., Wang H. A novel high anti-corrosion performance polymer based composite coating with new functional fillers. *Progress in Organic Coatings*, 2022, vol. 162. doi: 10.1016/j.porgcoat.2021.106603
10. Adsul S. H., Soma Raju K. R. C., Sarada B. V., Sonawane S. H., Subasri R. Evaluation of self-healing properties of inhibitor loaded nanoclay-based anticorrosive coatings on magnesium alloy AZ91D. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2018, vol. 6, is. 3, pp. 299–308. doi: 10.1016/j.jma.2018.05.003
11. Chen T., Fu J. J. pH-responsive nanovalves based on hollow mesoporous silica spheres for controlled release of corrosion inhibitor. *Nanotechnology*, 2012, no. 23. doi: 10.1088/0957-4484/23/23/235605
12. Kumarage G. W. C., Hakkoum H., Comini E. Recent Advancements in TiO₂ Nanostructures: Sustainable Synthesis and Gas Sensing. *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, is. 8. doi: 10.3390/nano13081424
13. Pulikkalparambil H., Siengchin S., Parameswaranpillai J. Corrosion protective self-healing epoxy resin coatings based on inhibitor and polymeric healing agents encapsulated in organic and inorganic micro and nanocontainers. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2018, vol. 16, pp. 381–395. doi: 10.1016/j.nanoso.2018.09.010
14. Priyanka D., Nalini D. Designing a corrosion resistance system using modified graphene oxide-epoxy microcapsules for enhancing the adhesion strength of the epoxy coatings. *Applied Surface Science Advances*, 2022, vol. 10, doi: 10.1016/j.apsadv.2022.100269
15. Golovin V. A., Shchelkov V. A., Rashutin N. A., Tyurina S. A., Demin V. L. Mikrokapulirovannyye i aktivnyye dobavki dlya povysheniya antinakupnykh svoystv polimernykh protivokorroziyonykh pokrytiy [Microencapsulated and active additives for improving the antiscaling properties of polymer anticorrosive coatings]. *Korrozija: zashchita materialov i metody issledovaniy* [Corrosion: protection of materials and research methods], 2023, no. 4, pp. 131–141. doi: 10.61852/2949-3412-2023-1-4-131-141
16. Semenov V. V., Zolotareva N. V., Novikova O. V., Razov E. N., Kруглов А. V., Kotoмина V. E. Nitevidnye kristally (1-gidroksietiliden)difosfonata zheleza (II) i ego kompleksa s morfolinom [Whiskers of iron (II) (1-hydroxyethylidene) diphosphate and its complex with morpholine]. *Kristallografiya* [Crystallography], 2019, vol. 64, no. 6, pp. 895–901. doi: 10.1134/S0023476119060171

