

Возможности повышения коррозионной стойкости строительных конструкций, работающих в условиях агрессивных производственных сред

УДК 69.07

Колобанов А.С.

Доцент, кафедра строительного производства, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (г. Липецк)

Тарасова Н.В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры нанотехнологий, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (г. Липецк)

Сабитов Л.С.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры биомедицинской инженерии и управления инновациями, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (г. Казань)

Статья получена: 15.07.2020. Рассмотрена: 17.07.2020. Одобрена: 12.08.2020. Опубликовано онлайн: 30.09.2020. ©РИОР

Аннотация. В работе представлены результаты исследования коррозионной стойкости строительных конструкций ЦХПП и ЦДС ПАО «НЛМК». Установлено, что среднестатистический процент повреждаемости составляет 8,69%, а наибольший коррозионный износ элементов имеют участки с повышенной влажностью и газовыделениями. С использованием математической модели коррозии для цинка и стали рассчитаны их ожидаемые коррозионные потери. Показано, что наибольшая потеря массы наблюдается на участках с концентрацией хлороводорода выше фонового значения. Результаты ускоренных коррозионных испытаний цинкового покрытия с размером кристаллита от 0,6 до 3,5 мкм показали, что уменьшение размера

кристаллита до 0,6 мкм способствует уменьшению скорости коррозии в 2 раза, что должно увеличить срок службы конструкции в 1,5–2 раза по сравнению с традиционными материалами.

Ключевые слова: коррозионная стойкость, оценка технического состояния, строительные конструкции, Zn-покрытие.

Введение. Одной из составляющих долговечности строительных конструкций металлургических производств является их коррозионная стойкость. Поскольку указанные конструкции эксплуатируются в агрессивных производственных газозолевых средах, необходимо учитывать состав производственной атмосферы,

POSSIBILITIES OF INCREASING THE CORROSION RESISTANCE OF BUILDING STRUCTURES OPERATING IN AGGRESSIVE INDUSTRIAL ENVIRONMENTS

Kolobanov A.S.

Associate Professor, Department of Construction Production, Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Tarasova N.V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Nanotechnologies, Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Sabitov L.S.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Biomedical Engineering and Innovation Management, Kazan State Power Engineering University, Kazan

Manuscript received: 15.07.2020. **Revised:** 17.07.2020. **Accepted:** 12.08.2020. **Published online:** 30.09.2020. ©RIOR

Abstract. The paper presents the results of a study of the corrosion resistance of building structures of the Central Chemical Production Plant and the Central Displacement Service Center of NLMK. It was found that the average percentage of damage is 8.69%, and the areas with high humidity and gas emissions have the greatest corrosive wear of elements. Using a mathematical model of corrosion for zinc and steel, their expected corrosion losses are calculated. It is shown that the greatest weight loss is observed in areas with a concentration of hydrogen chloride above the background value. The results of accelerated corrosion tests of zinc coating with a crystallite size from 0.6 to 3.5 μm showed that a decrease in the crystallite size to 0.6 μm helps to reduce the corrosion rate by 2 times, which should increase the service life of the structure by 1.5–2 times compared to traditional materials.

Keywords: corrosion resistance, assessment of the technical condition of building structures, Zn-coating.

способствующей развитию процесса электрохимической коррозии. Исследователями установлены наиболее коррозионно-агрессивные компоненты атмосферы [1] и описаны различные математические модели развития коррозии в атмосферных условиях [2; 3], однако характеристики атмосферы этих цехов могут изменяться в силу их технологического процесса, сезонных факторов, недостаточной естественной вентиляции цеха, приводящих к перепадам содержания агрессивных примесей на различных участках в разные климатические периоды.

Данная проблема наиболее актуальна для металлургических прокатных производств [4–8], в состав которых входят как цеха горячего, так и холодного проката, являющиеся основными цехами цепи современного металлургического производства, от которых зависит рентабельность всего предприятия в целом. Защита металлических конструкций покрытия от коррозионного воздействия важна именно в цехах холодного проката, так как технология травления предусматривает применение агрессивных компонентов, негативно влияющих на состояние эксплуатируемых конструкций.

Как известно, наиболее повреждаемыми элементами являются тонколистовые металлические конструкции. В настоящее время для их защиты применяют цинковое [9; 10] или полимерное покрытие. Однако выбор оптимального покрытия должен базироваться на результатах систематических измерений скорости коррозии в конкретных условиях на различных участках производств.

1. Результаты обследования конструкций ЦХПП и ЦДС на величину коррозионного износа. Объектами исследования являлись цеха холодного проката ЦХПП (цех холодного проката и покрытий) и ЦДС (цех динамной стали) металлургического комбината ПАО «НЛМК». В цехе ЦХПП обследовано 2450 участков профнастила в девяти пролетах (рис. 1), из которых 536 участков эксплуатировались с дефектами и повреждениями, среднестатистический процент повреждаемости — 21,8%. В цехе ЦДС обследовано 896 участков профнастила в трех пролетах, из которых 78 участков эксплуатировались с дефектами и повреждениями. Среднестатистический процент повреждаемости, определяемый из соотношения количества участков профна-

стила с дефектами и повреждениями к общему числу обследованных участков, — 8,69%. Наиболее распространенные дефекты и повреждения профнастила: замачивание атмосферным осадками — 18,5%, местное смятие элементов — 8,1%, локальная коррозия легкой (К1) и средней (К2) тяжести — 50,3%, сквозная коррозия — 23,1% от общего количества дефектов и повреждений.

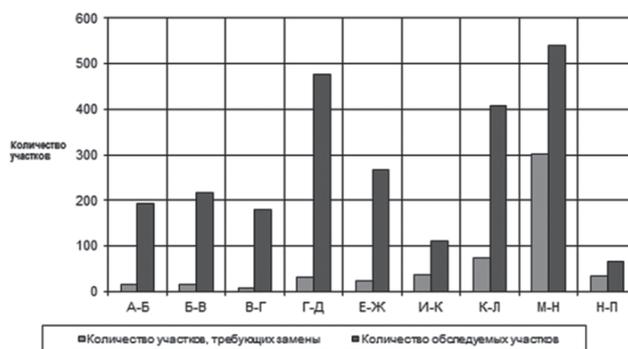
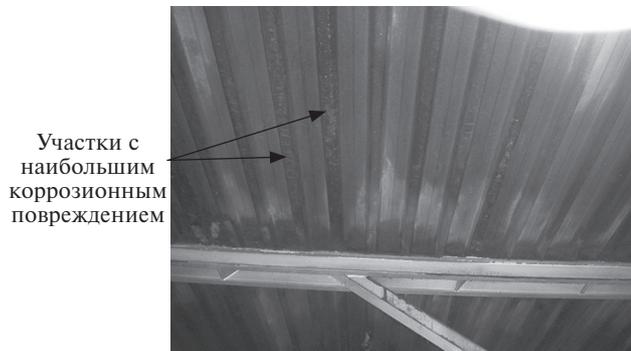


Рис. 1. Сводная гистограмма сравнения обследуемых участков профилированного листа по всему зданию цеха ЦХПП и участков листа, требующих замены

Обследование состояния конструкций, эксплуатируемых в условиях нормального режима (электромашинные отделения, отделения листоотделки) при сроке эксплуатации конструкций около 40 лет в газовой среде, не содержащей хлороводорода, выявило наличие незначительного коррозионного износа элементов. Состояние конструкций, эксплуатируемых в условиях наличия паров хлороводорода с периодическим замачиванием кровли вследствие протечек гидроизоляционного ковра характеризуется наличием значительных коррозионных повреждений (рис. 2). Так, при концентрации хлороводорода до 11 мг/м³ (травильное отделение цеха ЦХПП) наблюдается разрушение лакокрасочного покрытия от 90 до 100% на поверхности конструкций.

На основании результатов исследований коррозионного износа элементов конструкций покрытия цехов ЦХПП и ЦДС листопркатного производства ПАО «НЛМК» установлено, что наибольший коррозионный износ элементов имеют участки с повышенной влажностью и газовой средой. Проведено исследование влияния коррозионного воздействия среды на техническое состояние оцинкованных кон-

струкций производственных зданий, работающих в хлороводородсодержащих средах. На основании проведенных стендовых испытаний (рис. 3) получена начальная скорость коррозии металла K_0 для цеха ЦХПП и ЦДС.



Участки с наибольшим коррозионным повреждением

Рис. 2. Состояние оцинкованного профилированного настила покрытия, эксплуатируемого в условиях агрессивных газозвушных сред

Анализируя характер распределения коррозионных повреждений на образцах металла, экспонированных на различных участках цеха, необходимо отметить, что наибольшая скорость

коррозии наблюдается на входе и выходе из непрерывно-травильного агрегата, а наименьшая — на участке листоотделки. Результаты стендовых испытаний приведены в табл. 1 и 2.



Рис. 3. Расположение стенда относительно исследуемой конструкции

Таблица 1

Результаты испытаний, полученные в цехе ЦХПП

| № п/п | Территория цеха ЦХПП | Результаты стендовых испытаний цинкового слоя без царапины | | | Результаты стендовых испытаний цинкового слоя с царапиной | | |
|----------|---|--|---------------------------------|---------------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|
| | | $K_{\text{прак}}, \text{г/м}^2$ | $K_{\text{теор}}, \text{г/м}^2$ | $K_0, \text{г/м}^2 \text{ год}$ | $K_{\text{прак}}, \text{г/м}^2$ | $K_{\text{теор}}, \text{г/м}^2$ | $K_0, \text{г/м}^2 \text{ год}$ |
| 1 | Травильное отделение (вход в НТА) | 22,64 | 22,65 | 29,500 | 46,67 | 46,67 | 62,000 |
| 2 | Травильное отделение (выход из НТА) | 21,14 | 21,14 | 30,000 | 52,85 | 52,86 | 69,000 |
| 3 | Отделение листоотделки № 1 | 5,27 | 5,28 | 7,000 | 7,55 | 7,55 | 13,000 |
| 4 | Термическое отделение (агрегат АНО и АГЦ) | 11,34 | 11,33 | 15,000 | 15,11 | 15,13 | 22,000 |
| 5 | Травильное отделение (склад травленных рулонов) | 19,65 | 19,64 | 26,000 | 26,45 | 26,43 | 35,000 |
| 6 | Прокатное отделение | 16,43 | 16,42 | 22,500 | 17,39 | 17,37 | 24,800 |
| 7 | Травильное отделение (склад травленных рулонов) | 15,11 | 15,10 | 20,000 | 22,67 | 22,65 | 31,000 |
| 8 | Территория машинных отделений | 9,95 | 9,90 | 13,000 | 11,79 | 11,71 | 15,500 |
| 9 | Прокатное отделение (пяतिकлетевой стан «2030») | 15,89 | 15,86 | 21,000 | 26,06 | 26,05 | 34,600 |
| 10 | Отделение листоотделки № 2 | 6,26 | 6,26 | 8,300 | 7,86 | 7,85 | 10,400 |

Результаты испытаний, полученные в цехе ЦДС

| № п/п | Территория цеха ЦДС | Результаты стендовых испытаний цинкового слоя без царапины | | | Результаты стендовых испытаний цинкового слоя с царапиной | | |
|----------|--|---|---------------------------------|---|--|---------------------------------|---|
| | | $K_{\text{прак}}, \text{г/м}^2$ | $K_{\text{теор}}, \text{г/м}^2$ | $K_{\text{ор}}, \text{г/м}^2 \text{ год}$ | $K_{\text{прак}}, \text{г/м}^2$ | $K_{\text{теор}}, \text{г/м}^2$ | $K_{\text{ор}}, \text{г/м}^2 \text{ год}$ |
| 1 | Травильное отделение (вход в НТА) | 13,57 | 13,59 | 18,000 | 43,07 | 43,05 | 57,000 |
| 2 | Травильное отделение (участок НТА) | 10,58 | 10,57 | 14,000 | 37,00 | 37,02 | 49,000 |
| 3 | Отделение листоотделки | 3,73 | 3,77 | 5,000 | 9,08 | 9,06 | 12,000 |
| 4 | Четырехклетевой стан (прокатное отделение) | 9,81 | 9,81 | 13,000 | 22,89 | 22,80 | 30,200 |
| 5 | Термическое отделение (агрегат АНО и АГЦ) | 5,77 | 5,74 | 7,600 | 16,14 | 16,15 | 21,200 |
| 6 | Термическое отделение (агрегат АНО и АГЦ) | 4,39 | 4,38 | 5,800 | 5,44 | 5,43 | 7,200 |
| 7 | Травильное отделение (выход из НТА) | 11,84 | 11,85 | 15,700 | 15,22 | 15,25 | 20,200 |
| 8 | Травильное отделение (агрегат нормализации) | 7,94 | 7,93 | 10,500 | 13,16 | 13,14 | 17,400 |
| 9 | Термическое отделение (агрегат АНО и АГЦ) | 6,88 | 6,87 | 9,100 | 17,31 | 17,37 | 23,000 |
| 10 | Термическое отделение (агрегат АНО и АГЦ) | 8,10 | 8,08 | 10,700 | 20,46 | 20,39 | 27,100 |

Таким образом, наибольшая потеря массы наблюдается на тех участках, где концентрация хлороводорода превышает фоновое значение: участок непрерывно-травильного агрегата и участок пятиклетевого стана. Результаты статистических исследований свидетельствуют о том, что среднестатистический процент повреждаемости совпадает с участками, где коррозионная агрессивность цеховой атмосферы превышает фоновые значения.

2. Результаты лабораторных испытаний коррозионной стойкости цинковых покрытий. Возможным направлением повышения коррозионной стойкости защитных цинковых покрытий следует рассматривать применение субмикро- и нанокристаллических покрытий или композитных покрытий системы «цинк — углеродные нанотрубки» [11; 12].

Исследование коррозионно-электрохимического поведения гальванических цинковых покрытий с размером кристаллита от 0,6 до 3,5 мкм проводили в модельном растворе 3% NaCl на электрохимической рабочей станции *Zive SP2 (WonaTech, Южная Корея)* со скоростью развертки 1 мВ/с. Определение тока и потен-

циала коррозии определяли по точке пересечения катодной и анодной поляризационных кривых экспериментальных образцов.

По результатам вольтамперных зависимостей, представленных на рис. 4, видно, что уменьшение размера кристаллита от 3,5 до 0,6 мкм не приводит к существенному изменению потенциала коррозии материала, значение которого сохраняется в диапазоне $-1,03...-1,02$ В. Детальное рассмотрение области потенциалов $-1,0...-0,9$ В, в которой преобладает линейный характер зависимости $i = f(E)$, показало, что уменьшение размера кристаллита до 0,6 мкм характеризуется уменьшением величины анодного тока при постоянном потенциале, что свидетельствует о более высокой коррозионной стойкости материала с меньшим размером кристаллита.

Анализ тафелевых участков вольтамперных зависимостей (рис. 5) в области потенциалов $E_{\text{ст}} \pm 150$ мВ показал, что уменьшение размера кристаллита от 3,5 до 0,6 мкм сопровождается уменьшением тока коррозии от 1,2 до 0,6 мА/см², что соответствует повышению коррозионной стойкости материала в 1,5–2,0 раза.

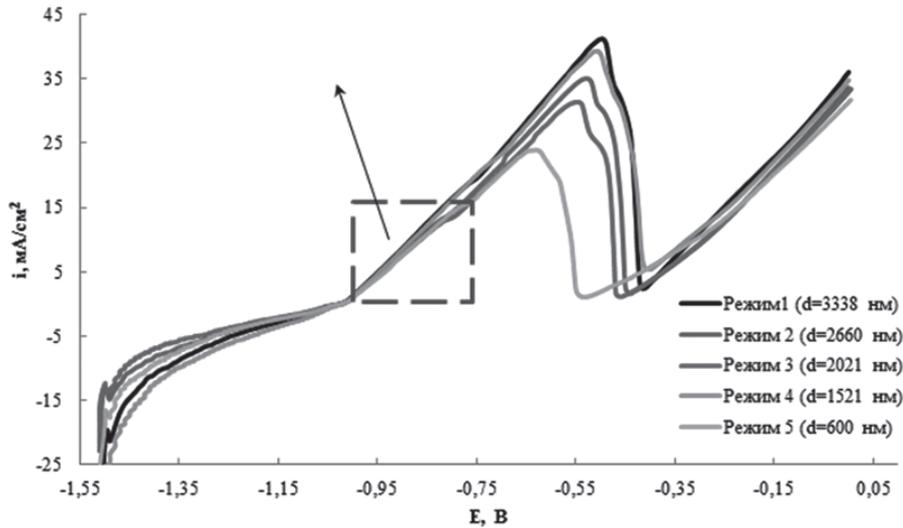


Рис. 4. Вольтамперные зависимости цинковых покрытий с различным размером кристаллита в 3% NaCl

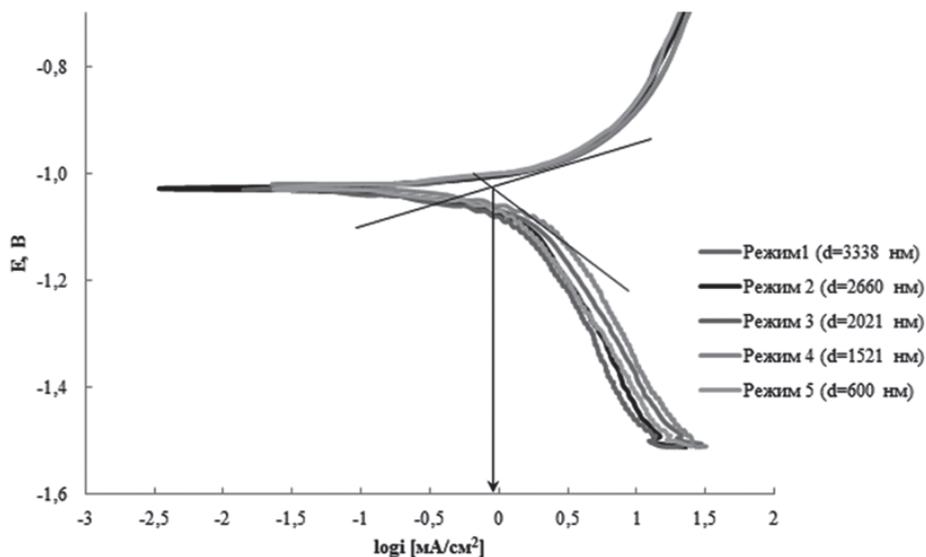


Рис. 5. Вольтамперные зависимости в полулогарифмических координатах цинковых покрытий в 3% NaCl

Таким образом, использование в качестве защитных покрытий строительных конструкций, работающих в условиях агрессивных производственных сред, цинковых покрытий с размером кристаллита до 1 мкм позволит повысить срок службы конструкции в 1,5–2 раза по сравнению с традиционными материалами.

Выводы

1. В ходе технического освидетельствования обследовано 3345 участков профилирован-

ного настила покрытия и установлено, что наиболее распространенным дефектом является равномерный коррозионный износ, провоцируемый влиянием агрессивной технологической среды.

2. Для оценки степени влияния агрессивной среды на состояние оцинкованных конструкций покрытия выбраны методы оценки коррозионного разрушения, представленные стендовыми испытаниями с последующей гравиметрией образцов. По результатам испытаний определена скорость коррозии,

установлены ее максимальные и минимальные значения. Экспериментально выявлена роль вентиляционных потоков и показано их влияние на коррозионное разрушение, а также выявлено распределение агрессивных компонентов с учетом особенностей технологического процесса.

- По результатам лабораторных коррозионно-электрохимических испытаний цинковых

покрытий установлено, что уменьшение размера кристаллита покрытия от 3,5 до 0,6 мкм способствует повышению коррозионной стойкости материала в 1,5–2,0 раза. Это позволяет рассматривать цинковые покрытия в субмикро- и нанокристаллическом состоянии в качестве перспективного защитного материала стальных конструкций, работающих в условиях агрессивных промышленных сред.

Литература

1. Михайловский Ю.Н. Новые представления о механизме стимулирующего действия сернистого газа на атмосферную коррозию металлов [Текст] / Ю.Н. Михайловский, Н.А. Соколов // Защита металлов. — 1985. — Т. 21. — № 2. — С. 214–220.
2. Стрекалов П.В. Моделирование атмосферной коррозии углеродистой стали во влажных тропиках по результатам трехмесячных и годовых испытаний [Текст] / П.В. Стрекалов, Б. До Тхань // Защита металлов. — 2005. — Т. 41. — № 3. — С. 302–315.
3. Карпов В.А. Моделирование атмосферной коррозии в тропическом климате Вьетнама [Текст] / В.А. Карпов [и др.] // Коррозия: материалы, защита. — 2016. — № 8. — С. 1–10.
4. Гатауллин И.Н. Экспериментальные исследования коррозионного износа металлических конструкций в агрессивных средах [Текст] / И.Н. Гатауллин // Известия КГАСА. — 2003. — № 1. — С. 42–47.
5. Михайлов В.В. Исследование коррозионной стойкости конструкций покрытия цехов холодного проката стали [Текст] / В.В. Михайлов, А.С. Колобанов, О.И. Лифинцев, А.И. Лифинцев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия «Строительство и архитектура». — 2007. — № 7. — С. 28–32.
6. Колобанов А.С. Обследование зданий и сооружений, работающих в условиях агрессивных газозвуковых сред [Текст] / А.С. Колобанов, С.В. Третьякова, Л.С. Сабитов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2010. — № 1. — С. 106–110.
7. Улыбин А.В. Техническое обследование строительных конструкций комплекса производственных зданий [Текст] / А.В. Улыбин [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2014. — № 7. — С. 194–217.
8. Федотов С.Д. О методике определения коррозионного износа стальных конструкций [Текст] / С.Д. Федотов, А.В. Улыбин, Н.Н. Шаповалов // Инженерно-строительный журнал. — 2013. — № 1. — С. 12–20.
9. Проскуркин Е.В. Цинковые покрытия — основные современные системы защиты труб от коррозии [Текст] / Е.В. Проскуркин [и др.] // Сталь. — 2018. — № 6. — С. 32–37.
10. Каблов Е.Н. Перспективные покрытия для защиты от коррозии углеродистых сталей [Текст] / Е.Н. Каблов [и др.] // Сталь. — 2016. — № 6. — С. 70–81.
11. Целуйкин В.Н. О коррозионных свойствах композиционных покрытий цинк-углеродные нанотрубки [Текст] / В.Н. Целуйкин, А.А. Корешкова // Коррозия: материалы, защита. — 2014. — № 3. — С. 31–34.
12. Лахоткин Ю.В. Наноструктурированные твердые покрытия — ключ к безопасности эксплуатации оборудования в экстремальных условиях [Текст] / Ю.В. Лахоткин, В.В. Душик, В.П. Кузьмин, Н.В. Рожанский // Коррозия: материалы, защита. — 2014. — № 3. — С. 21–26.

References

1. Mihajlovskij Yu.N., Sokolov N.A. Novye predstavleniya o mekhanizme stimuliruyushchego dejstviya sernistogo gaza na atmosfernyuyu korroziju metallov [New ideas about the mechanism of the stimulating effect of sulfur dioxide on atmospheric corrosion of metals]. *Zashchita metallov* [Protection of metals]. 1985, V. 21, I. 2, pp. 214–220.
2. Strekalov P.V., Do Than' B. Modelirovanie atmosferno korrozii uglerodistoj stali vo vlazhnykh tropikah po rezul'tatam trekhmesyachnykh i godovykh ispytaniy [Modeling of atmospheric corrosion of carbon steel in humid tropics according to the results of three-month and annual tests]. *Zashchita metallov* [Protection of metals]. 2005, V. 41, I. 3, pp. 302–315.
3. Karpov V.A., Lapiga A.G., Kalinina E.V., Mihajlova O.L., Koval'chuk Yu.L. Modelirovanie atmosferno korrozii v tropicheskom klimate V'etnama [Modeling of atmospheric corrosion in the tropical climate of Vietnam]. *Korroziya: materialy, zashchita* [Corrosion: materials, protection]. 2016, I. 8, pp. 1–10.
4. Gataullin I.N. Eksperimental'nye issledovaniya korrozionnogo iznosa metallicheskih konstrukcij v agressivnykh sredah [Experimental studies of corrosive wear of metal structures in corrosive environments]. *Izvestiya KGASA* [Izvestiya KGASA]. 2003, I. 1, pp. 42–47.
5. Mihajlov V.V., Kolobanov A.S., Lifincev O.I., Lifincev A.I. Issledovanie korrozionnoj stojkosti konstrukcij pokrytiya cekhov holodnogo prokata stali [Investigation of the corrosion resistance of the coating structures for cold rolled steel shops]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of the Volgograd State Architectural and Construction University. Series: Building and architecture]. 2007, I. 7, pp. 28–32.

6. Kolobanov A.S., Tret'yakova S.V., Sabitov L.S. Obsledovanie zdaniy i sooruzhenij, rabotayushchih v usloviyah agressivnyh gazovozdushnyh sred [Inspection of buildings and structures operating in aggressive gas-air environments]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Izvestiya Kazan State Architectural and Construction University]. 2010, I. 1, pp. 106–110.
7. Ulybin A.V., Zubkov S.V., Fedotov S.D., Kukushkina G.A., Chernenko E.V. Tekhnicheskoe obsledovanie stroitel'nyh konstrukcij kompleksa proizvodstvennyh zdaniy [Technical inspection of building structures of a complex of industrial buildings]. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij* [Construction of unique buildings and structures]. 2014, I. 7, pp. 194–217.
8. Fedotov S.D., Ulybin A.V., Shabrov N.N. O metodike opredeleniya korrozionnogo iznosa stal'nyh konstrukcij [On the method of determining the corrosive wear of steel structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal* [Engineering and construction journal]. 2013, I. 1, pp. 12–20.
9. Proskurkin E.V., Gelovani V.A., Sonk A.N., Petrov I.V., Yarema I.P., Suhomlin D.A. Cinkovye pokrytiya — osnovnye sovremnyye sistemy zashchity trub ot korrozii [Zinc coatings — the main modern systems for protecting pipes from corrosion]. *Stal'* [Steel]. 2018, I. 6, pp. 32–37.
10. Kablov E.N., Nikiforov A.A., Demin S.A., Chesnokov D.V., Vinogradov S.S. Perspektivnye pokrytiya dlya zashchity ot korrozii uglerodistykh stalej [Promising coatings for corrosion protection of carbon steels]. *Stal'* [Steel]. 2016, I. 6, pp. 70–81.
11. Celujkin V.N., Koreshkova A.A. O korrozionnyh svojstvah kompozicionnyh pokrytij cink-uglerodnye nanotrubki [On the corrosion properties of composite coatings zinc-carbon nanotubes]. *Korroziya: materialy, zashchita* [Corrosion: materials, protection]. 2014, I. 3, pp. 31–34.
12. Lahotkin Yu.V., Dushik V.V., Kuz'min V.P., Rozhanskij N.V. Nanostrukturirovannye tverdye pokrytiya — klyuch k bezopasnosti ekspluatatsii oborudovaniya v ekstremal'nyh usloviyah [Nanostructured hard coatings — the key to the safety of equipment operation in extreme conditions]. *Korroziya: materialy, zashchita* [Corrosion: materials, protection]. 2014, I. 3, pp. 21–26.