

УДК 624.076.2

doi:10.31650/2707-3068-2022-26-128-134

**ОЦІНКА КОРОЗІЙНОЇ ЗАХИЩЕНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ТА СПОРУД ЗА
ФАКТИЧНИМ СТАНОМ****Онищенко А.М.**, д.т.н., професор,
onyshchenko.a.m.ntu@gmail.comORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1040-4530>**Гібаленко О.М.**, д.т.н., професор,
grin196102@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2979-5225

Національний транспортний університет, м. Київ

Гібаленко В. А., к.т.н., доцент,
vita.ktn@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5590-6641

ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М.Шимановського». м. Київ

Анотація. Робота включає результати досліджень стану вторинного захисту від корозії для забезпечення довговічності будівельних металоконструкцій. Вирішується завдання збереження якісних та кількісних показників за умов впливу агресивної атмосфери промислових підприємств. Викладено методику вдосконалення ефективності технології засобів та методів виконання вторинного захисту металоконструкцій від корозії при моніторингу технічного стану. Розроблено процедуру обслуговування конструкцій за фактичним станом. Визначено порядок складання специфікацій заходів захисту від корозії за критерієм корозійної небезпеки. Встановлено функціональні залежності між працездатністю основних та допоміжних конструкцій. Визначено взаємозв'язок між значеннями показників корозійної стійкості та довговічності металоконструкцій.

Ключові слова: металоконструкції, моніторинг, корозійна небезпека, пошкодження, фактичний стан.

Вступ. Запроектовані на основі прийнятих норм будівельні металеві конструкції можуть відрізнятися одна від одної ймовірністю появи та розвитку аварійних ситуацій у разі відмови будь-якого конструктивного елемента [1].

Такі випадки можливі через помилки, що виникають під час створення або експлуатації конструкцій, що призводить до виникнення аварійних ситуацій [2–3]. Важливим показником механічної міцності, стійкості та екологічної безпеки є рівень корозійної небезпеки будівельного об'єкту. Це визначає критичні інтервали коефіцієнта готовності протикорозійного захисту металоконструкцій проектного режиму корозійного впливу [4]. В даний час оцінка корозійного стану сталевих конструкцій виконується відповідно до вимог норм [5–6]. Однак обмежений склад визначальних параметрів не дозволяє проводити технічне діагностування ознак корозійної небезпеки при оцінці експлуатаційного стану конструкцій. Проблема забезпечення безпеки металоконструкцій у корозійних середовищах має комплексний багатоплановий та багатофакторний характер [7]. Особливим аспектом проблеми корозійно-механічної руйнування є управління експлуатаційним терміном служби конструкцій та їх захисних покриттів на основі методів технічного діагностування ресурсу будівель та споруд.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження спрямовані на забезпечення якості та надійності заходів вторинного захисту металоконструкцій при обґрунтуванні технічних та технологічних ризиків корозійної захищеності конструкцій промислових об'єктів, що піддаються корозії [8]. Визначено необхідність розробки конструктивних рішень, що перешкоджають розвитку місцевої, щільної, контактної корозії та корозійного розтріскування. Разом з цим збільшення товщини металопрокату передбачає оцінку довговічності мір первинного захисту при розрахунковому підтвердженні відповідності вимогам норм. Також визначено проектну вимогу не враховувати зміни несучої здатності

внаслідок збільшення товщини конструктивних елементів під час використання заходів первинного захисту. Таким чином, відсутність критеріїв корозійної захищеності створює труднощі для моніторингу та діагностики працездатності конструкцій, що піддаються корозійному зносу. Під ідентифікацією рівня корозійної небезпеки розуміється процес виявлення та встановлення кількісних, конструкційних характеристик та характеристик часу експлуатації. Дані характеристики необхідні та достатні для моніторингу інтервальних значень дефектів та пошкоджень, які є допустимими при нормальному функціонуванні будівельних об'єктів. У процесі ідентифікації технічного стану систем протикорозійного захисту конструкцій виявляються перелік небезпек, ймовірність їхнього прояву, просторова локалізація, можлива шкода та інші параметри, необхідні для формалізації завдань діагностики конструкцій. Дотримання умов надійності та конструктивної безпеки досягається рахунок забезпечення технологічної безпеки з урахуванням методології загального управління якістю [9]. Значний рівень зносу та збільшені терміни знаходження у несприятливих умовах є загрозами зниження якості конструкцій, що тягне за собою підвищення вимог до поліпшення експлуатаційних властивостей конструкцій, що втрачають якість [10].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Методичним підходом є обґрунтування складу і структури параметрів корозійної стійкості конструкцій для управління технологічною безпекою шляхом зниження ризиків. Це зменшує ймовірність корозійного руйнування та обмежує можливі збитки при виникненні. Вплив зовнішніх факторів (агресивне середовище) та внутрішніх параметрів (конструктивна форма) на показники надійності будівельних металоконструкцій розглядається для зон розташування груп однорідних конструктивних елементів (партії поставок).

Виконується облік виду та інтенсивності корозійних впливів у процесі експертного діагностування корозійного стану конструкцій. Визначаються значні чинники, що впливають розвиток деградаційних процесів у матеріалі конструкцій.

Процедура дозволяє оцінити характер їхнього впливу на якість експлуатації об'єкта, визначає необхідність створення єдиної методики аудиту та менеджменту якості експлуатації металоконструкцій [11].

При розробці процедури аудиту технічного стану прийнято методичну основу міжнародних стандартів ISO 9001 та МЕК 300-1, що регламентують процедуру управління якістю на всіх стадіях життєвого циклу споруди [12].

Постановка завдання. Для визначення значущості факторів корозійного руйнування, що впливають зниження експлуатаційної несучої здатності конструкцій, використовується оцінка втрати якості на основі методу Парето.

Відповідно до процедури контроль корозійного стану проводиться за наведеною характеристикою втрати якості $\bar{F}_e$ в агресивних середовищах, встановленою за методом Г. Тагуті [13]. Показник якості $\bar{F}_e$ є відносною характеристикою ефективності заходів первинного та вторинного захисту. Визначаються рівні ризику технологічної безпеки (R_i) з урахуванням фактичного впливу факторів корозійної агресивності режиму експлуатації [14]. Показник якості $\bar{F}_e$ є функцією значень контрольованого показника $\gamma_{zk}(\gamma_{zn})$:

$$\bar{F}_e = \left[\frac{2}{\gamma_{zk}^{max}(n) - \gamma_{zk}^{min}(n)} \left(\gamma_{zf} - \frac{\gamma_{zk}^{max}(n) + \gamma_{zk}^{min}(n)}{2} \right) \right]^2, \quad (1)$$

де: Γ – відношення резерву надійності; γ_{zk} - коефіцієнт надійності протикорозійного захисту, що встановлюється при обґрунтуванні методів первинного захисту; γ_{zf} – коефіцієнт надійності протикорозійного захисту, за даними контролю корозійного стану в період експлуатації.

Основний матеріал і результати.

Корозійне руйнування сталевих конструкцій визначається зовнішніми впливами режиму експлуатації та залежить насамперед від ступеня агресивності середовища. Облік електрохімічної природи корозійного руйнування зміні міцності виробляється з урахуванням фізичних моделей. Вони характеризують зміни геометричних параметрів та властивостей матеріалу у часі при агресивних впливах середовищ [15].

Процедура включає виконання комплексу заходів щодо виявлення причин виникнення критичних корозійних пошкоджень конструктивних елементів, що перебувають у процесі експлуатації будівельних об'єктів. Вивчаються характеристики умов експлуатації металоконструкцій та досліджується технічний стан основних елементів, вузлів, умов їх кріплення відповідно до нормативних вимог [16, 17]. Завдання критеріїв граничних станів за результатами оцінки фактичного стану виконується за допомогою коефіцієнта зворотного зв'язку режиму експлуатації конструкцій (ψ) на підставі залежностей:

$$N = \Phi / (\Gamma - \psi), \quad (2)$$

$$\gamma_{sr} = \Gamma - \psi, \quad (3)$$

де N – найбільше розрахункове зусилля у конструктивному елементі, кН; Φ – граничне зусилля, кН, яке може сприйняти елемент з характеристикою ушкодження Θ ; Γ – відношення резерву надійності; γ_{sr} – коефіцієнт технологічної безпеки.

Використання коефіцієнта зворотний зв'язок режиму експлуатації (ψ) забезпечує реалізацію аналітичного підходу до управління технологічною безпекою. Формується програм забезпечення надійності на основі аналізу можливих причин та наслідків відмов та оцінки критичності відмов (FMECA). При цьому критерій технологічної безпеки конструкцій γ_{sr} можна розглядати як пропускну здатність регулювання ресурсу (η):

$$\eta = 1/\gamma_{sr}. \quad (4)$$

При накопиченні дефектів та пошкоджень Θ коефіцієнт зворотного зв'язку (ψ) характеризує зниження експлуатаційних показників сталевих конструкцій за встановленого проектного значення відношення резерву надійності (Γ). Впливи негативних навантажень та впливів викликають появу ознак граничних станів конструкцій. Пропускна здатність регулювання ресурсу характеризує припустимі зміни проектного значення відношення резерву надійності (Γ) для забезпечення працездатного стану. Дана операція визначає конструктивні та технологічні обмеження для відновлення несучої здатності після ремонту.

Проблемою забезпечення технологічної безпеки є «людський фактор», що пов'язано із прийняттям рішень за результатами моніторингу та діагностики корозійного стану сталевих конструкцій. Існуючі рекомендації щодо контролю та відновлення протикорозійного захисту не регламентують умови корозійної небезпеки та корозійної захищеності будівельних об'єктів. Управління безпекою має здійснюватися на основі оцінювання ризику як комплексного показника захищеності корозійних конструкцій.

Для усунення невизначеності прийняття рішень при відновленні працездатного стану об'єктів розроблено методику оцінки ступеня критичності дефектів та пошкоджень конструкцій. Методика забезпечення надійності засобів і методів захисту з урахуванням резервування несучої здатності включає чотири послідовні етапи: завдання показників надійності; вибір умов резервування первинного та вторинного захисту; обґрунтування критерію одиничної відмови за категорією відповідальності; розробку специфікації заходів для відновлення якості.

Категорії відповідальності конструкцій за корозійною захищеністю встановлюються з урахуванням часткового зниження рівня працездатності первинного захисту (коефіцієнт

надійності γ_{zk}) та вторинного захисту (коефіцієнт надійності γ_{zk}), узагальненого показника захисних властивостей A_z залежно від класу ризику.

Визначення технологічної безпеки (R_i , бал) пропонується проводити за даними моніторингу залежно від класу ризику, рівня загроз та вразливості корозійних конструкцій (табл. 4). При цьому одним із визначальних факторів забезпечення ефективності заходів первинного та вторинного захисту від корозії є врахування агресивності впливів експлуатаційного середовища. Встановлюються рівні загроз: Н – низький, О – обмежений, С – середній, В – високий, Гр – граничний

Таблиця 1. – Рівні ризиків з технологічної безпеки (R_i)

Група відповідальності. Функції об'єкту	Рівень загрози (категорія стану):														
	Н(I)			О(II)			С(III)			В(IV)			Гр (V)		
	Пошкоджуваність (категорія відповідальності)														
	В	Б	А	В	Б	А	В	Б	А	В	Б	А	В	Б	А
Обслуговування. Невиробничий (R5)	1	2	3	2	3	4	3	4	5	4	5	6	5	6	6
Обслуговування. Виробничі (R4)	2	3	3	3	4	5	4	5	6	5	6	7	6	7	7
Допоміжні (R3)	3	3	4	4	5	6	5	6	7	6	7	8	7	8	8
Основні. Припустимі зупинки при обслуговуванні (R2)	4	4	5	5	5	7	6	7	8	7	8	9	8	9	9
Основні. Не допускають зупинку (R1)	5	5	6	5	6	7	7	8	8	8	9	10	9	10	10

Практична реалізація запропонованого методичного підходу дозволила зробити низку висновків:

- працездатний стан споруди загалом характеризується узагальнюючими показниками дійсного корозійного стану конструкцій;
- встановлюється функціональна залежність між працездатністю основних та допоміжних конструкцій, значеннями узагальнюючих показників корозійної стійкості та довговічності;
- контроль дійсного технічного стану виконується перевіркою знаходження в допустимих межах значень цих показників.

Висновки. Обґрунтовано структуру показників технологічної безпеки для аналізу даних експертної діагностики стану конструкцій. Це дозволило сформувати процесний підхід до прийняття рішень оперативно-тактичного (загрози 0 – IV) та стратегічного (загроза X) значення, спрямованих на зниження ризиків експлуатації споруд.

Тактичні рішення, за результатами діагностики технічного стану конструкцій (коефіцієнт технологічної безпеки $\gamma_{sr} > 0$), спрямовані на реалізацію запобіжних заходів для забезпечення працездатності конструкцій. Стратегічні рішення приймаються при розслідуванні причин аварійних ситуацій та катастроф (коефіцієнт $\gamma_{sr} \leq 0$), викликаних створенням або не створенням умов реалізації запобіжних заходів.

Найбільш імовірною причиною виявлених відмов металоконструкцій відмови є наявність багатьох дефектів корозійного характеру. За відсутності гарантій механічних властивостей та хімічного складу. Технічний стан конструкцій підтверджує необхідність вживання додаткових конструктивних та технологічних заходів для зниження ризиків під час експлуатації.

Література

1. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / Цільова комплексна програма НАН України. Зб. наук. ст. за результатами, отриманими в 2013 – 2015 рр. Наук. керівник – академік Б.С. Патон. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, - 2015. – 816 с.
2. Шимановський О.В. Концептуальні основи системи технічного регулювання надійності й безпечності будівельних конструкцій / Шимановський О.В., Корольов В.П. // Промислове будівництво та інженерні споруди, №1, -2008, с. 4-9.
3. Cai, Y., Zhao, Y., Ma, X., Zhou, K., Chen, Y. (2018). Influence of environmental factors on atmospheric corrosion in dynamic environment. *Corrosion Science*, 137, 163–175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.03.042>.
4. Gibalenko, A. N. Design requirements to structural steel durability based on level of industrial facility corrosion hazard / A. N. Gibalenko, V. Korolov, J. Filatov // Aktualne problemy konstrukcji metalowych : Abstr. II Polish-Ukrainian International Conference APMK (27.11-28.11.2014). – Gdansk : University of Technology. – 2014. – P. 98–102.
5. Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres — Classification, determination and estimation. 15. ISO 9223:2012.
6. Ministry of Regional Development of Ukraine. (2014). Corrosion protection of metal structures. Design requirements. 74. B.2.6-193:2013.
7. Korolev V.P., Filatov U.V., Selutin U.V. (2014). Development of corporate management system: technological safety of production facilities. Coll. Sciences. works of Ukrinstalkon them. V.M. Shimanovsky. Publishing house Stal. 14. 136 – 149.
8. Thoft-Christensen, P. (2011). Risk Analysis in Civil Engineering. Aalborg: Dept. of Building Technology and Structural Engineering. Structural Reliability Theory, No. 224, Vol.. R0163.
9. Estimation of steel structure corrosion risk level / V. P. Korolov, Y. Vysotsky, O. M. Gibalenko, P. V. Korolov // Eurocorr-2010. The European Corrosion Congress (13.09-17.09.2010) / From the Earth's Depths to Space Heights. – Moscow, 2010. – Book of Abstracts. – 534 p.
10. Bingen, Y. Stress, strain, and structural dynamics / Y. Bingen. – USA : Elsevier Academic Press, 2005. – 961 p.
11. Gibalenko A. Design requirements to structural steel durability based on level of industrial facility corrosion hazard / A Gibalenko, V Korolov, J Filatov // AKTUALNE PROBLEMY KONSTRUKCJI METALOWYCH. 2014, Gdańsk Poland. - P. 98-102.
12. ISO 9001:2015. Quality management systems – Requirements. Available at: <https://www.iso.org/standard/62085.html>

13. Ealey, L. A. (1994). Quality by Design: Taguchi Methods and U.S. Industry. ASI Press and Irwin Professional Publishing.
14. Korolov V. Design criteria of reliability and safety in the design of corrosion protection of structural steel / V. Korolov, Y. Vysotsky, Y. Filatov / EUROCORR-2014. The European Corrosion Congress «Improving materials durability: from cultural heritage to industrial applications». – Pisa, Book of Abstracts. - 2014. – 88 p.
15. Zienkiewicz O.C. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics Sixth edition / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor // Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 30 Corporate Drive, Burlington, MA 01803. – 2005. – 648 p
16. Guedes Soares, C., Garbatov, Y., Zayed, A. and Wang, G. (2009). Influence of Environmental Factors on Corrosion of Ship Structures in Marine Atmosphere. Corrosion Science. 51, 2014-2026.
17. American Rust Standard Guide. New York: American Institute for Steel Classification. American rust standard guide. New York: American Institute for Steel Classification, c. 1968 (OCOLC)746104088, Media Type: Book. Publisher: American Institute for Steel Classification. Publish Date: 31/12/2002. Code ID: 24016. Pages: 12

КОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИЩЁННОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПО ФАКТИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

Онищенко А.Н. д.т.н., профессор,
onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Гібаленко А.Н., д.т.н., профессор,
grin196102@gmail.com, ORCID:0000-0003-2979-5225

Национальный транспортный университет, г. Киев

Гибаленко В. А., к.т.н., доцент,
vita.ktn@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5590-6641
ТОВ «Укринсталькон им. В.М.Шимановского». г. Киев

Аннотация. Работа включает результаты исследований состояния вторичной защиты от коррозии для обеспечения долговечности строительных металлоконструкций. Решается задача сохранения качественных и количественных показателей в условиях воздействия агрессивной атмосферы промышленных предприятий. **Методика.** Изложена методика совершенствования эффективности технологии средств и методов вторичной защиты металлоконструкций от коррозии при мониторинге технического состояния. **Результаты.** Разработанные процедуры диагностики включают статистический учёт и контроль коррозионного состояния металлоконструкций, выявление причин возникновения и развития дефектов и повреждений. Основой прогнозирования расчетного срока службы, достижения предельных состояний является определение уровня уязвимости и угроз с учётом фактического состояния. **Научная новизна.** Разработана процедура обслуживания конструкций по фактическому состоянию. Определен порядок составления спецификаций мер защиты от коррозии по критерию коррозионной опасности. Это позволяет обеспечивать требования надёжности строительных металлоконструкций, назначать мероприятия управления технологической безопасностью в течение установленного срока службы строительных объектов. **Практическая значимость.** Предложенные обобщающие показатели действительного коррозионного состояния конструкций определяют работоспособность сооружения в целом. Установлены функциональные зависимости между работоспособностью основных и вспомогательных конструкций. Определена взаимосвязь между значениями показателей коррозионной стойкости и долговечности

металлоконструкцій. Контроль дійсного технічного стану заключається в перевірці знаходження значень цих показателів в допустимих межах. Урахування ступеня агресивності впливів середовища експлуатації є одним із визначальних факторів забезпечення ефективності заходів вторинної захисту від корозії. Данна процедура є основою призначення раціональних специфікацій систем протикорозійного захисту з наступним відображенням в конструкторсько-технологічній документації.

Ключевые слова: металлоконструкции, мониторинг, коррозионная опасность, повреждения, фактическое состояние.

EVALUATION THE CORROSION PROTECTION OF STRUCTURES BY ACTUAL CONDITION

Onyshchenko A.M., D.Sc., Professor,
onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Gibalenko O. M., D.Sc., Professor,
grin196102@gmail.com, ORCID:0000-0003-2979-5225
National transport university, Kyiv,

Gibalenko V.A., Ph.D., Associate Professor,
vita.ktn@gmail.com, ORCID:0000-0001-5590-6641
OJSC "V. Shimanovsky UkrRDSteelconstruction", Kyiv,

Abstract. This work includes the results of studies about the state of the secondary protection against corrosion to ensure the building metal structures' durability. The task of preserving the qualitative and quantitative indicators under the influence of the aggressive atmosphere in industrial enterprises is being solved. **Methodology.** The technique of improving the efficiency of the means technology and methods of metal structures secondary protection from corrosion during the technical condition monitoring is stated. **Results.** The developed diagnostic procedures include statistical accounting and the corrosion state monitoring of metal structures, identifying the causes of the occurred defects and damage. The basis of prediction for service life and reaching the limit states are determined by the level of vulnerability and threats, taking into account the actual state. **Scientific novelty.** A procedure for servicing structures based on the actual state has been developed. The procedure for drawing up specifications of corrosion protection measures according to the criterion of corrosion hazard has been determined. It makes possible to meet the requirements for the reliability of building metal structures, to prescribe technological safety management measures during the established service life of construction objects. **Practical significance.** The proposed generalized indicators of the actual structures' corrosion state determine the structure's operability as a whole. The functional dependencies between the operability of the main and auxiliary structures are established. The relationship between the values of corrosion resistance indicators and metal structures durability are determined. Actual technical condition control consists of checking that the values of these indicators are within acceptable limits. Taking into account the degree of operating environment aggressiveness is one of the determining factors in order to ensure the secondary protection effectiveness against corrosion. This procedure is the basis for the rational specifications appointment for anti-corrosion protection systems with subsequent display in the design and technological documentation.

Keywords: steel structures, monitoring, corrosion hazard, damage, actual condition.