

УДК 691

DOI <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2026.48.2026.15>**Розум Р. І.**

к.т.н., доцент кафедри транспорту і логістики,
Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль
ORCID: 0000-0001-7812-8248

Попович П. В.

д.т.н., завідувач кафедри транспорту і логістики,
Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль
ORCID: 0000-0001-5516-852X

Вітровий А. О.

к.т.н., доцент кафедри транспорту і логістики,
Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль
ORCID: 0000-0003-2885-3745

Буяк А. Є.

к.т.н., доцент кафедри транспорту і логістики,
Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль
ORCID: 0000-0002-3756-6687

Галиш Н. А.

к.е.н., старший викладач кафедри транспорту і логістики,
Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль
ORCID: 0000-0002-8538-823X

МЕТОДОЛОГІЯ БАГАТОПАРАМЕТРОВОГО ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЖИВУЧОСТІ НЕСУЧИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Анотація. У статті проведено розгляд проблеми методологічного забезпечення надійності та живучості несучих систем металоконструкцій об'єктів критичної інфраструктури, значна частина яких експлуатується поза межами проєктного ресурсу та піддається впливу змінних навантажень та агресивних фізико-хімічних середовищ. Відображено обмеженість традиційних методів проведення оцінки технічного стану, які базуються, як правило, на проведенні візуальних оглядів і не забезпечують своєчасного встановлення прихованих дефектів та адекватного оцінювання рівня пошкодженості досліджуваних конструкцій. Метою дослідження є розробка методологічних засад багатопараметрового оцінювання надійності та живучості несучих систем металоконструкцій критичної інфраструктури. Запропонована методологія ґрунтується на поєднанні основних положень термодинаміки, фізико-хімічної механіки руйнування, теорії пружності із врахуванням температурних полів, а також матеріалознавства і фізики твердого тіла. Пропонований підхід передбачає врахування комплексної дії як статичних так і циклічних навантажень, температурного впливу й впливу агресивних середовищ, що забезпечує формування аналітичних моделей кінетики росту тріщин і прогнозування залишкового ресурсу конструкцій. У роботі запропоновано використання сучасних методів неруйнівного контролю та цифрової ідентифікації пошкодженості, зокрема підходів математичної морфології для проведення аналізу структури тріщин. Розроблені підходи щодо адаптації наближених методів розрахунку (метод еквівалентних площ, еквівалентних станів, граничної інтерполяції) для проведення оцінки напружено-деформованого стану та довговічності елементів зі складною геометрією. Отримані результати дозволяють підвищити точність виконаного оцінювання щодо технічного

стану конструкцій, прогнозування їх залишкової довговічності та формування рекомендацій по підвищенню надійності та безпеки експлуатації досліджуваних об'єктів критичної інфраструктури.

Ключові слова: критична інфраструктура, металоконструкції, надійність, живучість, багатопараметрове оцінювання, залишковий ресурс, довговічність.

Постановка проблеми. Об'єкти критичної інфраструктури це основа транспортних, енергетичних і промислових систем як нашої держави так і світу загалом. Від їх надійності залежить багато чинників таких як безпека населення, стабільність економіки, безперервність логістичних процесів тощо. Наслідками пошкодження або відмови елементів таких споруд є виникнення значних економічних втрат, порушення транспортних зв'язків, а також виникнення аварійних ситуацій. Одночасно з тим, значна частина об'єктів критичної інфраструктури в Україні має вік від кількох десятиліть до століття і нині експлуатується на межі або поза межами проектного ресурсу. Тривалий час експлуатації в умовах змінних навантажень, впливу атмосферних факторів та агресивних середовищ зумовило поступове накопичення втомних пошкоджень, появи мікротріщин і корозійної деградації металів. Результатом чого стало зниження міцнісних характеристик конструкцій, а отже і їх надійності, що, в свою чергу, зумовлює підвищення ризиків їх передчасного руйнування.

Необхідно відмітити, що значною проблемою сьогодення є також обмеженість можливостей традиційних методів проведення оцінки технічного стану інженерних споруд, які як правило, базуються на виконанні періодичних візуальних оглядів. Такого роду підходи не завжди забезпечують своєчасне виявлення прихованих дефектів чи оцінку реального рівня пошкодження конструкцій. У зв'язку з цим, актуальним постає завдання розробки та впровадження сучасних методів діагностики та моніторингу надійності та живучості несучих систем критичної інфраструктури, які дозволять забезпечити більшу точність контролю технічного стану, а також дозволять здійснювати прогноз їхнього залишкового ресурсу.

Аналіз останніх досліджень. У теоріях надійності та довговічності конструкцій критичної інфраструктури недостатньо уваги приділено дослідженню проблеми оцінки міцнісних характеристик при сумісному впливу багатфакторних навантажень

і агресивних середовищ, що в свою чергу, знижує значення експлуатаційної надійності та підвищує складність діагностики і прогнозування ресурсу металоконструкцій. Так, у працях Мілош Б. Джукіч, Амара М., Буледруа О. [1–3] в процесі дослідження опору конструкційних матеріалів поширенню втомних тріщин виконано дослідження механізмів руйнування, проте не проводилося дослідження впливів на величину деградації та руйнування матеріалів від наводнення як наслідку дії агресивних фізико-хімічних середовищ.

На основі праць вчених Хадж Меліані М., Дацишин О., Капелле Дж., Плувінадж Г., Мілош Б. Джукіч, Панасюка В., Никифорчина Г., Похмурського В., Дзядикевица Ю. та інших [1, 4–7] було встановлено, що кінетика наводнення металів у зонах передруйнування напряму залежить від параметрів напружено-деформованого стану в околі тріщини, а також величини нестационарного потоку водню з поверхні розділу.

В роботах Андрейків О. Є., Панасюк В. В., Дмитрах І. М. та інших [5, 8, 9] в процесі оцінки втомної міцності, не приймається до уваги вплив множини типових експлуатаційних середовищ.

Відомі методики прогнозування довговічності, В. Анілович, П. Ясній та інші [10], здійснюють розгляд ресурсу з позицій лінійної гіпотези накопичення втомних пошкоджень, не враховуючи процеси утворення і кінетику розвитку макродефектів в фізико-хімічних середовищах як початкових, так і набутих в процесі експлуатації.

Як бачимо, при виконанні оцінки експлуатаційної навантаженості, в існуючих дослідженнях, у теоретичних залежностях не враховано можливість проведення оцінки міцності та несучої здатності із урахуванням температурних впливів, а також не має аналітичних залежностей для формування рівномірного розподілення внутрішніх силових факторів в відповідальних елементах конструкцій.

Мета роботи. Метою дослідження є розробка методологічних засад багатопараме-

тровою оцінювання надійності та живучості несучих систем металоконструкцій критичної інфраструктури, які направлені на формування науково обґрунтованих підходів діагностики, моніторингу та прогнозування технічного стану даних систем, що дозволить підвищити точність оцінки надійності конструкцій, своєчасного виявлення небезпечних дефектів, прогнозування залишкового ресурсу, а також підвищення загального рівня безпеки експлуатації об'єктів критичної інфраструктури.

Результати досліджень. Методологія виконання багатопараметрового оцінювання надійності та живучості несучих систем металоконструкцій критичної інфраструктури при дії довготривалих як статичних так і циклічних навантажень з одночасним врахуванням експлуатаційних фізико-хімічних середовищ (кислотні дощі, розчини ґрунту тощо) ґрунтується на законах термодинаміки, положеннях фізико-хімічної механіки руйнування, теорії пружності із врахуванням температурних полів, а також матеріалознавства і фізики твердого тіла. Такого роду підхід можна використовувати для елементарного акту сповільненого руйнування – одиничного стрибка тріщини. На вище вказаній основі необхідно формувати аналітичні моделі кінетики розвитку тріщин при заданих початкових і кінцевих умовах поширення, а також діючих зовнішніх факторах для вузлів і елементів різної геометрії із врахуванням теплових потоків в досліджуваних матеріалах. Що, в свою чергу, є основою математичних моделей для встановлення періоду докритичного росту тріщин, а отже і залишкового ресурсу досліджуваних інфраструктурних конструкцій.

Вище наведений підхід становить базу методів для визначення міцності та прогнозування надійності, а також залишкової довговічності відповідальних елементів об'єктів критичної інфраструктури при дії силових і фізико-хімічних факторів, які відповідають експлуатаційним характеристикам. Методику проведення діагностування технічного стану нами пропонується формувати спираючись на підходи неруйнівних цифрових методів контролю, до яких належить удосконалена цифрова ідентифікація пошкодженості несучих систем металоконструкцій критичної інфраструктури.

Теоретичні і експериментальні дослідження необхідно виконувати згідно із

основними засадами термодинаміки, теорії пружності, теорій втомного поширення тріщин і механіки фізико-хімічного руйнування, матеріалознавства, а також сучасних уявлень про механізми руйнування несучих систем металоконструкцій критичної інфраструктури.

Для проведення математичного моделювання необхідно використовувати відому методологію теорії пружності, математичної фізики, а в складних випадках, для яких практичне застосування пов'язане із значними математичними труднощами, виконати обґрунтування застосування наближених методів, які раніше були розроблені науковцями, зокрема, методу еквівалентних площ для наближеного визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій з плоскими тріщинами складної конфігурації, методу еквівалентних станів для наближеного визначення розкриття вершин тріщин складних конфігурацій і метод граничної інтерполяції для наближеного визначення для складних випадків коефіцієнтів інтенсивності напружень, дельта-розкриття тріщин. Провести адаптацію відмічених наближених методів до нових задач оцінки надійності і довговічності несучих систем металоконструкцій критичної інфраструктури враховуючи інтегральну дію множини вище вказаних експлуатаційних факторів.

Наступним кроком провести формування аналітичного алгоритма для виконання оцінювання стану поверхонь металоконструкцій критичної інфраструктури за характеристиками сітки поширення тріщин із вдосконаленням методу кількісного аналізу зображення на основі підходів математичної морфології, метою якого є розробка методологічних підходів та рекомендацій оцінювання міцності та залишкового ресурсу, методи реагування та ліквідації наслідків пошкодженості, управління надійністю та безпекою експлуатації, а також формування рекомендацій стосовно підвищення стійкості до пошкоджень вказаних відповідальних металоконструкцій критичної інфраструктури.

З причин того, що основним механізмом руйнування елементів несучих систем металоконструкцій критичної інфраструктури є механізм зародження і подальшого поширення тріщин, то, на відміну від раніше використовуваних методологічних підходів до досліджень, основну увагу необхідно приділяти саме дослідженням впливу на зарод-

дження і поширення корозійно-механічних і корозійно-втомних тріщин від експлуатаційних навантажень і дії фізико-хімічного впливу середовищ. Разом з тим, необхідно проводити аналіз і синтез літературних даних написаних за результатами виконаних експериментальних досліджень впливів на швидкість росту тріщин в металевих матеріалах досліджуваних об'єктів, температурних полів і термомеханічних напружень в матеріалах, фізико-хімічних середовищ, що притаманні умовам експлуатації. Провести металографічні та фактографічні дослідження механізмів руйнувань металоконструкцій несучих систем критичної інфраструктури, а також експериментальні дослідження з побудови кінетичних діаграм поширення тріщин, на основі чого здійснити виведення математичних залежностей для аналітичного опису кінетичних діаграм, які ґрунтуються на підходах математичної морфології вдосконаленого методу кількісного аналізу зображень.

У подальшому отримані результати застосовувати під час формулювання відповідних аналітичних моделей оцінки та прогнозування міцності й залишкової довговічності, а також розробки рекомендацій щодо підвищення стійкості несучих систем металоконструкцій критичної інфраструктури.

Висновки. Розроблена методологія багатопараметрового оцінювання надійності та живучості несучих систем об'єктів критичної інфраструктури дозволяє здійснювати прогноз залишкової довговічності конструкцій від інтегральної дії циклічних навантажень, температурних полів та агресивних середовищ. Проведене дослідження не вичерпує всіх аспектів порушеної проблеми, у зв'язку з чим, в подальших наукових дослідженнях необхідно виконати узагальнення теорії і практики інтегрального використання методів виконання оцінювання надійності та живучості несучих систем критичної інфраструктури.

Література

1. Amara M., Bouledroua O., Hadj Meliani M., Pluvineau G. et al. Effect of corrosion damage on a pipeline burst pressure and repairing methods. *Arch Appl Mech.* 2019. № 89, pp. 939–951. <https://doi.org/10.1007/s00419-019-01518-z>
2. Milos B. Djukic, Gordana M. Bakic, Vera Sijacki Zeravcic, Aleksandar Sedmak, Bratislav Rajcic. The synergistic action and interplay of hydrogen embrittlement mechanisms in steels and iron: Localized plasticity and decohesion. *Engineering Fracture Mechanics.* 2019. № 216 <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106528>
3. Hadj Meliani, M., Bouledroua, O., Ould-M'beirick, M., El-miloudi, K., Neggaz, Dj., Nateche, T., El-azzizi, A., Bokort, H., Houari, F., Pluvineau, G. The Two-Parameter Approach for Fracture Mechanics: Some Industrial Applications. *Fracture at all Scales.* 2017. pp. 105–134 https://doi.org/10.1007/978-3-319-32634-4_6
4. Capelle, J., Dmytrakh, I., Schwab, F. et al. Specific Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel in Mineral Water. *Materials Science.* 2019. 54, pp. 728–738. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00239-6>
5. Datsyshyn O., Panasyuk V. Fretting Fatigue Fracture. In: *Structural Integrity Assessment of Engineering Components Under Cyclic Contact. Structural Integrity.* 2020 vol 9. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23069-2>
6. Розум, Р. І., Вітровий, А. О., Шпінталь, М. Я., Буяк, А. Є., Попович П. В. Вплив зовнішнього середовища та міцність і довговічність будівельних металоконструкцій та несучих елементів будівельної техніки. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві.* 2025. № 23, С. 358-366 [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-30](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-30)
7. Дзядикевич Ю. В., Попович П. В., Вітровий А. О., Розум Р. І., Чорна О. В., Захарчук О. П., Галиш Н. А., Цідило З. М., Шок К. П. Сумісність компонентів матеріалів у цивільній інженерії. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2023. Вип. 8(2). С. 91-97. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.91-97](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.91-97)
8. Dmytrakh I. M., Leshchak R. L., Syrotyuk A. M. Experimental Study of Low Concentration Diffusible Hydrogen Effect on Mechanical Behaviour of Carbon Steel. In: *Gdoutos E., Konsta-Gdoutos M. (eds) Proceedings of the Third International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics. ICTAEM 2020. Structural Integrity.* 2020. vol 16. pp. 32–37 https://doi.org/10.1007/978-3-030-47883-4_6
9. Datsyshyn O., Panasyuk V. Singular Integral Equations for Some Contact Problems of Elasticity Theory for Bodies with Cracks. In: *Structural Integrity Assessment of Engineering Components Under Cyclic Contact. Structural Integrity.* 2020. vol. 9. pp. 65–138 https://doi.org/10.1007/978-3-030-23069-2_3
10. Andreikiv, O. E., Babii, A. V., Dolinska, I. Y. et al. Determination of the Residual Life of the Spraying Boom of a Field Sprinkler in the Maneuvering Loading Mode. *Materials Science.* 2020. № 56, 112–118. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00404-2>

References

1. Amara, M., Bouledroua, O., Hadj Meliani, M., Pluvina, G. et al. (2019) Effect of corrosion damage on a pipeline burst pressure and repairing methods. *Arch Appl Mech*, 89, 939–951. <https://doi.org/10.1007/s00419-019-01518-z>
2. Milos B. Djukic, Gordana M. Bakic, Vera Sijacki Zeravcic, Aleksandar Sedmak, Bratislav Rajicic. (2019) The synergistic action and interplay of hydrogen embrittlement mechanisms in steels and iron: Localized plasticity and decohesion *Engineering Fracture Mechanics*, June 2019, 216. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106528>
3. Hadj Meliani, M., Bouledroua, O., Ould-M'beirick, M., El-miloudi, K., Neggaz, Dj., Nateche, T., El-azzizi, A., Bokort, H., Houari, F., Pluvina, G. (2017) The Two-Parameter Approach for Fracture Mechanics: Some Industrial Applications. *Fracture at all Scales*. 105–134. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32634-4_6
4. Capelle, J., Dmytrakh, I., Schwab, F. et al. (2019) Specific Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel in Mineral Water. *Materials Science*. 54, 728–738. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00239-6>
5. Datsyshyn O., Panasyuk V. (2020) Fretting Fatigue Fracture. In: Structural Integrity Assessment of Engineering Components Under Cyclic Contact. *Structural Integrity*, 9. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23069-2>
6. Rozum, R. I., Vitrovi, A. O., Shpintal, M. Ya., Buiak, A. Ye., Popovych P. V. (2025). Vplyv zovnishnoho seredovyscha ta mitsnist i dohovichnist budivelnikh metalokonstruktsii ta nesuchykh elementiv budivelnoi tekhniki. *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*, 23, 358-366. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14\(24\)-30](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-14(24)-30) [in Ukrainian].
7. Dziadykevych, Yu. V., Popovych, P. V., Vitrovi, A. O., Rozum, R. I., Chorna, O. V., Zakharchuk, O. P., Halysh, N. A., Tsidylo, Z. M., Shok, K. P. Compatibility of material components in civil engineering. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 2023, 8(2), 91–97. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.91-97](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.91-97) [in Ukrainian].
8. Dmytrakh, I. M., Leshchak, R. L., Syrotyuk, A. M. (2020) Experimental Study of Low Concentration Diffusible Hydrogen Effect on Mechanical Behaviour of Carbon Steel. In: Gdoutos E., Konsta-Gdoutos M. (eds) *Proceedings of the Third International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics. ICTAEM 2020. Structural Integrity*, 16, 32–37. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47883-4_6
9. Datsyshyn, O., Panasyuk, V. (2020) Singular Integral Equations for Some Contact Problems of Elasticity Theory for Bodies with Cracks. In: *Structural Integrity Assessment of Engineering Components Under Cyclic Contact. Structural Integrity*, 9, 65–138. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23069-2_3
10. Andreikiv, O. E., Babii, A. V., Dolinska, I. Y. et al. (2020) Determination of the Residual Life of the Spraying Boom of a Field Sprinkler in the Maneuvering Loading Mode. *Materials Science*, 56, 112–118. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00404-2>

METHODOLOGY FOR MULTI-PARAMETER ASSESSMENT OF RELIABILITY AND SURVIVABILITY OF LOAD-BEARING SYSTEMS FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE

Abstract. The article examines the problem of methodological support of reliability and survivability of load-bearing systems of metal structures of critical infrastructure facilities, a significant part of which is operated beyond the design resource and is exposed to variable loads and aggressive physicochemical environments. The limitations of traditional methods for assessing the technical condition are reflected, which are based, as a rule, on visual inspections and do not provide timely detection of hidden defects and adequate assessment of the level of damage to the structures under study. The purpose of the study is to develop methodological principles for multi-parameter assessment of reliability and survivability of load-bearing systems of metal structures of critical infrastructure. The proposed methodology is based on a combination of the basic principles of thermodynamics, physico-chemical fracture mechanics, the theory of elasticity taking into account temperature fields, as well as materials science and solid state physics. The proposed approach assumes taking into account the complex action of both static and cyclic loads, temperature effects and the influence of aggressive environments, which ensures the formation of analytical models of crack growth kinetics and prediction of the residual service life of structures. The work proposes the use of modern methods of non-destructive testing and digital identification of damage, in particular mathematical morphology approaches for analyzing the crack structure. Approaches have been developed to adapt approximate calculation methods (equivalent area method, equivalent states, limit interpolation) to assess the stress-strain state and durability of elements with complex geometry. The results obtained allow to increase the accuracy of the performed assessment of the technical condition of structures,

predict their residual durability and formulate recommendations to increase the reliability and safety of operation of the studied critical infrastructure objects.

Key words: critical infrastructure, metal structures, reliability, survivability, multi-parameter assessment, residual resource, durability.

R. I. Rozum

Ph.D., Associate Professor at the Department Transport and Logistics,
West Ukrainian National University, Ternopil

P. V. Popovich

D.Sc., Head of the Department of Transport and Logistics,
West Ukrainian National University, Ternopil

A. O. Vitrovyi

Ph.D., Associate Professor at the Department Transport and Logistics,
West Ukrainian National University, Ternopil

A. Ye. Buyak

Ph.D., Associate Professor at the Department Transport and Logistics,
West Ukrainian National University, Ternopil

N. A. Halysh

Ph.D., Senior Lecturer at the Department Transport and Logistics,
West Ukrainian National University, Ternopil



Дата першого надходження статті до видання: 18.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.03.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.07.2026

**Стаття поширюється на умовах ліцензії
відкритого доступу (CC BY 4.0)**