

УДК 621.875.5:620.19:620.17

КОРОЗІЙНО-ВТОМНА МІЦНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНО ДЕГРАДОВАНОЇ СТАЛІ ЕЛЕМЕНТІВ МОРСЬКОГО ПОРТАЛЬНОГО КРАНА

О. А. НЕСТЕРОВ¹, О. О. ОЛІЙНИК¹, Д. О. ДЕМЯНЧУК²

¹ Одеський національний морський університет;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Подано результати випробувань на втомну витривалість низьковуглецевої сталі експлуатованого 33 роки крана. Для експериментів вибрано верхню полицю коромисла і праву стінку колони, метал яких відрізнявся за ударною в'язкістю поздовжніх до напрямку вальцювання зразків вдвічі. Побудовано криві втомної та корозійно-втомної витривалості поперечних зразків та визначено границі втомної та корозійно-втомної міцності. Корозивним середовищем слугував 3%-ий водний розчин NaCl, який моделював конденсовану на поверхні сталевих деталей вологу (розпилена морська вода поблизу узбережжя). Встановлено, що для сталі з різних ділянок крана відмінність границь втомної витривалості становить 15%. Корозивне середовище за частоти циклічного навантаження 3 Hz дещо знизило умовну границю корозійно-втомної витривалості порівняно з втомною, однак принципово не змінило низьку чутливість цієї характеристики для оцінювання експлуатаційної деградації металу. Зроблено висновок про переваги ударної в'язкості порівняно з границею втомної витривалості для оцінювання технічного стану експлуатованого прокату.

Ключові слова: *сталь, експлуатаційна деградація, ударна в'язкість, втомна витривалість, корозійна втома.*

The results of tests on the fatigue life of low-carbon steel for 33 years of operation of the gantry crane are presented. For the experiments the upper shelf of the rocker arm and the right wall of the column were chosen, the metal of which differed twice in the level of impact toughness of the longitudinal specimens to the rolling direction. Fatigue and corrosion-fatigue strength curves of transversal specimens were constructed with determination of the fatigue and corrosion-fatigue ultimate strength. The corrosive medium was a 3% NaCl aqueous solution, which simulated moisture condensed on the surface of steel parts caused by seawater spray near the coast. It was established that for two states of steel the difference in the fatigue ultimate strength is 15%. The corrosive environment at loading frequencies of 3 Hz slightly reduced the corrosion-fatigue ultimate strength compared to fatigue ultimate strength, but fundamentally did not change the low sensitivity of this characteristic for evaluating the operational degradation of metal. A conclusion was made about the advantages of impact toughness compared to the fatigue ultimate strength for evaluating the technical state of the operated rolled products.

Keywords: *steel, operational degradation, impact toughness, fatigue strength, corrosion fatigue.*

Вступ. Механічні конструкції підіймально-транспортувальних механізмів, зокрема, портальних кранів, експлуатують у режимі багатоциклового навантаження, яке є головним чинником деградації механічних властивостей вальцюваних сталей [1–8]. Ця проблема особливо гостра для кранів з наднормативним терміном експлуатації, оскільки саме у них найчастіше виявляють дефекти втомної

природи, які передують катастрофічному руйнуванню [5, 9]. Очевидно, що морська атмосфера посилює розвиток тріщиноподібних дефектів.

Враховуючи, що саме циклічне навантаження спричиняє експлуатаційну деградацію конструкційних сталей порталних кранів, для оцінювання та прогнозування їх механічної поведінки використовують підходи, які базуються на визначенні втомних властивостей металу [10]. Вони стосуються як стадії зародження тріщини, так і її поширення. Водночас ефективним є використання ударної в'язкості як характеристики опору крихкому руйнуванню [5, 11, 12]. Експертизами встановлено, що випадки аварійних руйнувань або значних втомних пошкоджень характерні для металу з особливо низькими значеннями ударної в'язкості ($14...30 \text{ J/cm}^2$) [9]. Це достатньо регламентована в нормативних документах механічна характеристика, яку легко визначити експериментально.

Аналізуючи експлуатаційні умови сталевих металоконструкцій у морських портах за атмосферної корозії, необхідно враховувати як інтенсивну корозію, так і наводнювання металу [13, 14]. Оскільки порталні крани не всюди захищені ізоляційним покриттям, яке додатково впродовж тривалої експлуатації втрачає свої захисні властивості, слід брати до уваги можливе наводнювання сталей як чинника прискорення їх деградації за механізмом розвитку мікропошкодженості [12, 15–17]. Зазначимо також, що дослідження експлуатаційної деградації вальцюваних сталей портового обладнання має певні особливості, пов'язані з їх схильністю до мікророзшарування уздовж напрямку вальцювання [18], що посилює відмінності у механічних властивостях зразків, вирізаних уздовж і поперек вальцювання [18, 19]. З іншого боку, наводнювання сталей посилює анізотропію цих властивостей [20]. Нижче проаналізовано чутливість характеристик втомної та корозійно-втомної міцності для оцінювання експлуатаційної деградації вальцюваних сталей порталних кранів.

Методики досліджень. Вивчали стан порталного крана марки “Сокіл” після 33 років експлуатації, матеріал конструкції – вальцювана листова низьковуглецева феритно-перлітного класу сталь марки St-38b-2, вітчизняний аналог сталь Ст.Зсп. Раніше [5] з цього крана вибрали 10 локальних ділянок на різних його вузлах. Для них визначили за певних модельних умов амплітуду циклічних напружень $\Delta\sigma_e$ (різниця в напруженні для максимально навантаженого та розвантаженого крана), яка змінювалася у діапазоні 45...145 МПа для різних ділянок, та отримали задовільну кореляцію між значенням $\Delta\sigma_e$ та ударною в'язкістю KCV, визначеною з використанням зразків Шарпі: для поздовжніх до напрямку вальцювання зразків вона знижується від 363 до 150 J/cm^2 зі збільшенням амплітуди циклічних напружень $\Delta\sigma_e$.

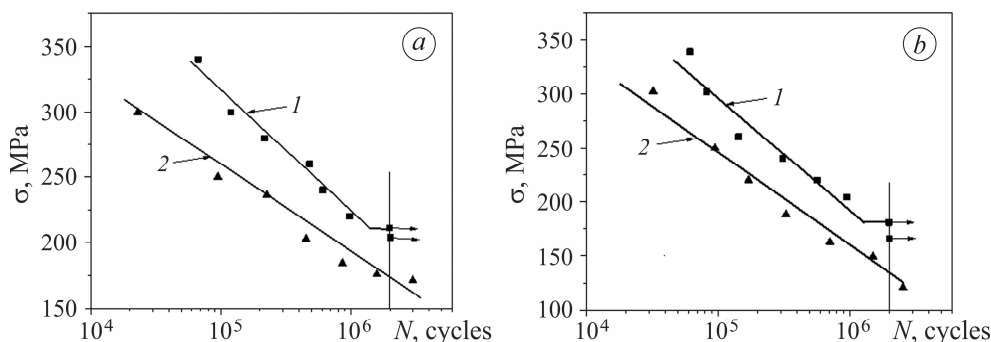
Випробовували зразки, вирізані із двох ділянок листового прокату завтовшки 10 mm, № 6 (верхня полиця коромисла, $\Delta\sigma_e = 50 \text{ МПа}$) та № 7 (права стінка колони, $\Delta\sigma_e = 120 \text{ МПа}$). Перевагу віддали поперечним до напрямку вальцювання зразкам, які вважають придатнішими для оцінювання деградації сталей через вищу чутливість показників [11, 21] – ударна в'язкість KCV експлуатованого металу для поперечних зразків вдвічі-втричі нижча, ніж для поздовжніх. Попередньо визначена KCV для поперечних зразків становила 177 і 45 J/cm^2 для металу ділянок № 6 і № 7, відповідно.

Втомну міцність сталей визначали на призматичних балкових зразках спеціальної геометрії, запропонованих раніше для дослідження сумісної дії на гладку поверхню кавітації та циклічного навантаження консольним згином [22]. Зразки перерізом $5 \times 18 \text{ mm}$ і довжиною 170 mm мали в центральній частині круговий пів виріз радіусом 10 mm. Ця частина зразка робоча з огляду на його втомне руйнування, її переріз $5 \times 8 \text{ mm}$. Зразки навантажували за пульсуючого циклу, при цьому напруження розтягу були на гладкій поверхні, тоді як стиску – на вирізі. Така

схема навантаження давала можливість досліджувати втомну міцність гладкої поверхні з локалізацією місця зародження та поширення втомної тріщини. Частота циклічного навантаження була різною: 10 Hz за випробувань у повітрі та 3 Hz – у корозивному середовищі. Таким чином, знаходили компроміс між інтенсивнішим корозійним впливом зі зниженням частоти навантаження та тривалістю експериментів. Крім того, частота 3 Hz краще відповідала умовам експлуатації порталних кранів.

Корозивним середовищем слугував 3%-ий водний розчин NaCl. Вважали, що він моделює конденсацію на поверхні сталевих деталей вологу (розпилена морська вода поблизу узбережжя) [23]. Висока корозивна активність такого середовища зумовлена наявністю в ньому солей (тут натрію хлориду) за практично вільного доступу атмосферного кисню [24]. Результати циклічних випробувань подали у вигляді кривих обмеженої довговічності “амплітуда напружень σ –кількість циклів навантаження N ” на базі $2 \cdot 10^6$ cycles. Особливу увагу надавали границі втомної витривалості, враховуючи багатоцикловий характер навантаження елементів конструкцій порталних кранів. Зазначимо, що прийнята база циклічного навантаження виявилася достатньою для визначення у повітрі фізичної границі втомної витривалості σ_0 (індекс вказує на асиметрію циклу навантаження $R = 0$). Водночас за дії корозивного середовища діаграма σ – N дає можливість оцінювати тільки умовну границю корозійно-втомної витривалості σ_0^C , прив’язаної до прийнятої бази випробувань.

Результати експериментів та їх аналіз. Для обох станів сталі (ділянок № 6 і № 7) отримано подібні залежності σ – N (див. рисунок), однак різні кількісні показники втомної міцності. Крихішому за оцінками ударної в’язкості металу ділянки № 7 властива менша втомна міцність як за обмеженою довговічністю, так і границею втомної витривалості σ_0 . Тому немає суперечностей у використанні показників KCV і σ_0 для оцінювання експлуатаційної деградації сталей.



Криві втомної витривалості σ – N зразків, вирізаних з ділянок № 6 (a) і № 7 (b) порталного крана, за випроб у повітрі (1) та 3%-ому водному розчині NaCl (2).

Fatigue strength curves σ – N for specimens, cut from the № 6 (a) and № 7 (b) portal crane sections, for the tests in air (1) and 3% NaCl aqueous solution (2).

Аналіз дії корозивного середовища на втомну міцність ґрунтується на припущенні, що частота циклічного навантаження в діапазоні 3...10 Hz не вплинула на довговічність зразків у повітрі, що відповідає загальним закономірностям втомного руйнування гладкої поверхні [25]. Середовище відчутніше знижує втомну міцність крихішої сталі за границею втомної витривалості на 18 і 25% для ділянок порталного крану № 6 і № 7, відповідно, що узгоджується з висновками праць [2, 26] про негативний вплив окрихчення на втомну міцність сталей.

Визначили чутливість окремих показників стану металу до відмінностей між різними ділянками крана (див. таблицю). Для цього використали індекс λ , який враховує відносну зміну відповідного показника (KCV , σ_0 , σ_0^c), властивого ділянкам № 6 і № 7 порталного крана:

$$\lambda_{KCV} = (1 - KCV_7 / KCV_6) \cdot 100\%; \lambda_{\sigma_0} = (1 - \sigma_{07} / \sigma_{06}) \cdot 100\%;$$

$$\lambda_{\sigma_0^c} = (1 - \sigma_{07}^c / \sigma_{06}^c) \cdot 100\%.$$

Вказаний індекс λ може змінюватися від 0 (відсутність відмінностей) до 100% (максимально можлива відмінність). За такого аналізу випробу на ударну в'язкість максимально чутливі, рівень λ_{KCV} сягає 75%. Зазначимо різну чутливість опору крихкому руйнуванню за використання поздовжніх і поперечних зразків до оцінювання стану сталі: індекс λ_{KCV} для поздовжніх зразків 59% проти 75% для поперечних. Це вказує на посилення чутливості показника KCV до експлуатаційної деградації сталі за крихкої поведінки металу, властивій поперечним зразкам, що може бути основою для формування відповідних методичних рекомендацій щодо удосконалення експертизи технічного стану кранів.

Суттєво поступаються за чутливістю до деградації показники втомної міцності, відповідні індекси λ_{σ_0} і $\lambda_{\sigma_0^c}$ становлять 15 і 22% за випробу в повітрі і корозивному середовищі. Це означає, що попри вказану загальну закономірність їх погіршення для експлуатованого металу, негативний ефект агресивного середовища проявляється сильніше у крихкішій сталі. Причина може бути в її інтенсивнішій мікропошкодженості, що відповідає уявленням про зниження опору корозійній втомі вуглецевих та низьколегованих сталей через розвиток у них дефектів [15, 16].

**Фізико-механічні показники поперечних зразків різних ділянок крана
та їх чутливість до експлуатаційної деградації**

Ділянка	KCV , J/cm ²	λ_{KCV} , %	σ_0 , МПа	λ_{σ_0} , %	σ_0^c , МПа	$\lambda_{\sigma_0^c}$, %
№ 6	177	75	211	15	174	22
№ 7	45		180		135	

Важливо проаналізувати причини порівняно низької чутливості показників втомної міцності для оцінювання різних станів сталі, які так істотно відрізняються за ударною в'язкістю. Особливість у тому, що саме експлуатаційне циклічне навантаження спричиняє деградацію сталі. Її слід шукати у протиборності двох процесів, які по-різному впливають на втомну міцність гладких зразків (концентратор з протилежного боку до циклічно розтягнутої поверхні не заперечує того, що використана методика стосується випробувань гладких зразків). Згадана протиборність описана раніше [15]. Загальновідомо, що втомна міцність матеріалів зазвичай зростає зі збільшенням їх границь плинності та міцності. Тому експлуатаційне збільшення міцності, спричинене деформаційним зміцненням впродовж циклічного навантаження, повинно підвищувати границю витривалості, тобто негативного ефекту тривалої експлуатації не повинні спостерігати. З іншого боку, тривала експлуатація спричиняє розвиток у сталі множинної мікропошкодженості, яка, знижуючи опір крихкому руйнуванню, вже негативно впливає на її втомну міцність, оскільки виконує роль концентраторів напружень. Тут можна вважати, що баланс описаних протиборних чинників обумовив незначне зниження границі витривалості крихкішого металу. Щодо ударної в'язкості, то вона знижується як внаслідок деформаційного зміцнення (деформаційного старіння), так і через розвиток мікропошкодженості, що надає їй перевагу порівняно з показни-

ками втомної міцності для оцінювання експлуатаційної деградації вальцьованих сталей, схильних до мікророзшарування.

Таким чином, попри різучі відмінності в ударній в'язкості, обидвом станам сталі не властива суттєва різниця в опорі втомному руйнуванню за випроб зразків у повітрі. Випроби в корозивному середовищі дещо посилили чутливість показників втомної міцності до стану металу, кількісний аналіз виконано за оцінками умовної границі витривалості σ_0^C . Це загалом вказує на переваги характеристик опору крихкому руйнуванню порівняно з показниками втомної міцності для оцінювання експлуатаційної деградації сталі в умовах тривалого циклічного навантаження. Вищу чутливість ударної в'язкості для оцінювання деградації вальцьованої вуглецевої сталі порівняно з характеристиками міцності та пластичності відзначено у праці [11].

ВИСНОВКИ

Дослідили механічні та корозійно-механічні властивості низьковуглецевої сталі феритно-перлітного класу листового прокату порталного крана, експлуатованого 33 роки в режимі багатоциклової втоми. Порівняли два стани сталі, вирізаної з окремих ділянок крана, які відрізнялися, згідно з модельним експериментом, інтенсивністю циклічного навантаження під час експлуатації. Аналіз чутливості ударної в'язкості KCV поперечних зразків для оцінювання стану металу показав високу ефективність опору крихкому руйнуванню. Водночас виявлено істотно нижчу чутливість кривих втомної витривалості для оцінювання ступеня експлуатаційної деградації сталі внаслідок циклічного навантаження. Вказана особливість обґрунтована з позиції протидії двох експлуатаційних чинників з різними тенденціями впливу на втомну міцність сталей: зміцнення металу та розвиток у ньому розсіяної мікропошкодженості. Однак ці чинники однаково впливають на ударну в'язкість, тому вона істотно знижується і їй слід надати перевагу під час оцінювання стану сталей наднормативно експлуатованих порталних кранів.

1. *Failure analysis of the tower crane counterjib* / N. D. Zrnica, S. M. Bosnjak, V. M. Gasic, M. A. Arsic, and Z. D. Petkovic // *Procedia Eng.* – 2011. – **10**. – P. 2238–2243. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.370
2. *Polishchuk L. K., Kharchenko H. V., and Zvirko O. I. Corrosion-fatigue crack-growth resistance of steel of the boom of a clamp-forming machine* // *Materials Science.* – 2015. – **51**, № 2. – P. 229–234. DOI: 10.1007/s11003-015-9834-8
3. *Analysis of crane track degradation due to operation* / J. Kulka, M. Mantic, G. Fedorko, and V. Molnar // *Eng. Fail. Anal.* – 2016. – **59**. – P. 384–395. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.009
4. *Integrated approach to determine operational integrity of crane metal structure* / S. Gubskiy, V. Yepifanov, V. Chukhlib, Y. Basova, A. Okun, M. Ivanova, and O. Panamariova // *Period. Polytech. Mech. Eng.* – 2019. – **63**, № 4. – P. 319–325. DOI: 10.3311/PPme.14064
5. *Nemchuk O. O. and Nesterov O. A. In-service brittle fracture resistance degradation of steel in a ship-to-shore portal crane* // *Strength Mater.* – 2020. – **52**, № 2. – P. 275–280. DOI: 10.1007/s11223-020-00175-w
6. *Dong Q., He B., and Xu G. Fatigue life evaluation method for foundry crane metal structure considering load dynamic response and crack closure effect* // *Comput. Model. Eng. Sci.* – 2020. – **122**, № 2. – P. 525–553. DOI: 10.32604/cmes.2020.08498
7. *Wen H. and Li Y. Study on stress distribution law and stress performance characteristics of multiple data mining for harbour portal crane detection* // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science.* – 2021. – **631**. – Article number 012039. DOI: 10.1088/1755-1315/631/1/012039
8. *A review on fatigue monitoring of structures* / N. García-Fernández, M. Aenlle, A. Álvarez-Vázquez, M. Muniz-Calvente, and P. Fernández // *Int. J. Struct. Integr.* – 2023. – **14**, № 2. – P. 133–165. DOI: 10.1108/IJSI-09-2022-0117
9. *Degradation of steels of the reloading equipment operating beyond its designed service life* / V. M. Pustovy, P. O. Semenov, O. O. Nemchuk, M. I. Hredil, O. A. Nesterov, and

- V. V. Strelbitskyi // *Materials Science*. – 2022. – **57**, № 5. – P. 640–648.
DOI: 10.1007/s11003-022-00590-1
10. *A review of fatigue life prediction method for portal crane* / L. Ren, J. Ma, Y. Tong, and Z. Huang // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. – 2021. – **657**. – Article number 012094. DOI: 10.1088/1755-1315/657/1/012094
 11. *Specimen size effect on the tensile properties of rolled steel of long-term-operated portal crane* / O. Zvirko, I. Dzioba, M. Hredil, R. Pała, O. Oliynyk, and P. Furmańczyk // *Materials*. – 2023. – **16**, № 8. – Article number 3017. – P. 1–16. DOI: 10.3390/ma16083017
 12. *In-service degradation of rolled carbon steels: the role of damaging* / H. Nykyforchyn, O. Zvirko, O. Oliynyk, O. Venhryniuk, O. Nesterov, and O. Tsyrlunyk // *Procedia Struct. Integr.* – 2023. – **47**. – P. 190–194. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.011
 13. *Hydrogen entry into steel during atmospheric corrosion process* / T. Tsuru, Ya. Huang, Md. R. Ali, and A. Nishikata // *Corr. Sci.* – 2005. – **47**, № 10. – P. 2431–2440. DOI: 10.1016/j.corsci.2004.10.006
 14. *Omura T., Kudo T., and Fujimoto S. Environmental factors affecting hydrogen entry into high strength steel due to atmospheric corrosion* // *Mat. Trans.* – 2006. – **47**, № 12. – P. 2956–2962. DOI: 10.2320/matertrans.47.2956
 15. *In-service degradation of structural steels under cyclic loading* / O. I. Zvirko, H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyrlunyk, V. A. Voloshyn, and O. I. Venhrynyuk // *Materials Science*. – 2022. – **58**, № 2. – P. 222–228. DOI: 10.1007/s11003-022-00653-3
 16. *Zvirko O., Venhryniuk O., and Nykyforchyn H. The effect of long-term operation on fatigue and corrosion fatigue crack growth in structural steels* // *Procedia Struct. Integr.* – 2023. – **51**. – P. 24–29. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.10.062
 17. *Development of a method for computer processing of fractographic images to assess the cohesion of inclusions to the matrix in the weld metal after its operational degradation and hydrogenation* / R. Vorobel, O. Student, I. Ivasenko, P. Maruschak, H. Krechkovska, O. Zvirko, O. Berehulyak, T. Mandziy, I. Tsybailo, and P. Solovei // *Materialia*. – 2024. – Article number 102074. DOI: 10.1016/j.mtla.2024.102074
 18. *Nemchuk O. O. and Krechkovska H. V. Fractographic substantiation of the loss of resistance to brittle fracture of steel after operation in the marine gantry crane elements* // *Metallofiz. i Noveishie Tekhnol.* – 2019. – **41**. – P. 825–836. DOI: 10.15407/mfint.41.06.0825
 19. *Відмінності структури та властивостей металу балки мостової конструкції* / Г. В. Кречковська, А. А. Войтович, А. Р. Дзюбик, Б. І. Кіндрацький, О. С. Лампіцький, Л. І. Богун // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2023. – **59**, № 6. – С. 72–77.
 20. *Zvirko O. Anisotropy of hydrogen embrittlement in ferrite-pearlitic steel considering operational degradation* // *Procedia Struct. Integr.* – 2022. – **42**. – P. 522–528. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.12.066
 21. *Evaluating hydrogen embrittlement susceptibility of operated natural gas pipeline steel intended for hydrogen service* / O. Zvirko, H. Nykyforchyn, H. Krechkovska, O. Tsyrlunyk, M. Hredil, O. Venhryniuk, and I. Tsybailo // *Eng. Fail. Anal.* – 2024. – **163**, part A. – Article number 108472. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108472
 22. *Tsyrlunyk O. T., Zvirko O. I., and Voloshyn V. A. Corrosion-fatigue life of 35 steel in tap water under additional cavitation loading* // *Materials Science*. – 2022. – **57**, № 4. – P. 527–532. DOI: 10.1007/s11003-022-00574-1
 23. *Lewis E. R. and Schwartz S. E. Sea salt aerosol production: mechanisms, methods, measurements and models* // *Geophysical Monograph Series*. – Washington, D. C., AGU, 2004. – **152**. – 413 p. DOI: 10.1029/GM152
 24. *Schindelholtz E., Risteen B. E., and Kelly R. G. Effect of relative humidity on corrosion of steel under sea salt aerosol proxies. I. NaCl* // *J. Electrochem. Soc.* – 2014. – **161**, № 10. – P. C450–C459. DOI: 10.1149/2.0221410jes
 25. *Loading frequency effect on the fatigue endurance of structural carbon steels: Estimation based on dislocation motion theory and experimental verification of the model* / B. Guennec, T. Kinoshita, N. Horikawa, N. Oguma, T. Sakai // *Int. J. Fatigue*. – 2023. – **172**. – Article number 107634. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107634
 26. *Kossakowski P. Fatigue strength of an over one hundred year old railway bridge* // *Balt. J. Road Bridge Eng.* – 2013. – **8**, № 3. – P. 166–173. DOI: 10.3846/bjrbe.2013.21

Одержано 15.04.2024