

О. А. Нестеров

Одеський національний морський університет

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ СТАЛЕЙ МОРСЬКИХ ПОРТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Запропоновано метод підвищення циклічної тріщиностійкості конструкцій підйомально-розвантажувального обладнання морських портів використанням спеціального технологічного середовища. Механізм позитивного ефекту полягає у гальмуванні стадії поширення тріщини штучним створенням ефекту її закриття. Експерименти проведено на сталі 09Г2С стінки вантажної лебідки порталного крану. Даним методом досягається повне гальмування росту тріщин в середньоамплітудній області навантаження. Оцінки закриття тріщини показали його відповідальність за отримані ефекти.

Ключові слова: лебідка крану, втомна міцність, закриття тріщини.

O. A. Nesterov

A METHOD OF INCREASING CYCLIC CRACK RESISTANCE OF STEEL OF MARINE PORT STRUCTURES

A method of increasing cyclic crack resistance of structures of lifting and handling equipment of marine ports using a special technological environment is proposed. The mechanism of the positive effect consists in retarding the stage of crack propagation by creating the artificial crack closure effects. Experiments were carried out on the steel 09Г2С of walls of the cargo winch of the gantry crane. Complete retardation of crack growth in the medium-amplitude region of the load have been achieved using the method. Evaluations of crack closure showed its responsibility for the obtained effects.

Key words: crane hoist, fatigue strength, fatigue crack closure.

Постановка проблеми. Значна частина сталених конструкцій морського портового підйомально-розвантажувального обладнання експлуатується в режимі інтенсивного циклічного навантаження, що зумовлює підвищену увагу до характеристик втомної міцності матеріалів. Вони в сукупності характеризують стадії зародження та поширення втомних тріщин, а їх довговічність визначає загальну довговічність конструкції. Необхідно враховувати, що нормативи експлуатації портового обладнання не допускають її продовження при виявленні дефектів типу тріщин, їх необхідно усунути. Однак це не означає ігнорування стадії росту тріщини з огляду обґрунтування роботоздатності таких конструкцій. Можна використовувати методи запобігання появи втомних тріщин через підвищення циклічної тріщиностійкості матеріалів і за рахунок цього підвищувати загальну довговічність металоконструкції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Понаднормова експлуатація конструкцій портового підйомально-розвантажувального обладнання найчастіше зумовлює появу втомних тріщин в найбільш навантажених його елементах [1, 2]. Практикою експлуатації встановлені ділянки з високою вірогідністю появи в них тріщин і вони знаходяться під особливою увагою при експертизі технічного стану такого обладнання. Звідси заслуговують на увагу методи підвищення циклічної тріщиностійкості конструкційних сталей. Зокрема, відомі методи гальмування втомних тріщин в конструкційних сталях штучним створенням так званого ефекту закриття тріщин [3–7]. Перспективним є метод, що полягає у використанні спеціального технологічного середовища [8], яке, попадаючи в порожнину втомної тріщини, формує тверді продукти взаємодії зі сталлю. Це зумовлює їх клиновий ефект, запобігаючи змиканню берегів тріщини в частині півциклу розвантаження. У такий спосіб зменшується циклічна пластична деформація у вершині тріщини, що зменшує швидкість її поширення. У низці праць [9, 10] показано високу ефективність даного методу гальмування втомних тріщин в конструкційних сталях. Водночас суть ідеї підвищення втомної міцності сталей морських портових конструкцій базується на гальмуванні стадії зародження втомних тріщин, як це було запропоновано стосовно насосних штанг нафтовидобувного обладнання, які також експлуатуються в умовах циклічного навантаження [11]. Позитивний ефект проявився в істотному підвищенні границі витривалості сталей штанг.

Постановка завдань. У даній праці метод підвищення втомної міцності сталей використанням спеціального технологічного середовища поширено на елементи конструкцій підйомально-розвантажувального обладнання. Об'єкт підвищення втомної міцності – вантажна лебідка порталного крану після 35 років експлуатації. Корпус лебідки з огляду її цілісності

складається з двох основних конструктивних елементів (рис. 1): торцевої стінки барабану з листової вальцьованої сталі 09Г2С та валу зі сталі 20. Обидві сталі мають феритно-перлітну мікроструктуру. У наведеному прикладі в зварному з'єднанні виникла втомна тріщина (рис. 1), траскторія якої поширилася на стінку барабану з ризиком її неконтрольованого руйнування. Таким чином, цілісність стінки лебідки практично визначає її довговічність.



Рис. 1. Ділянка стінки лебідки з утвореною в ній втомною тріщиною (вказано стрілками)

Виклад основного матеріалу.

Вплив спеціального технологічного середовища на гальмування росту втомних тріщин в сталі 09Г2С вантажної лебідки.

Експериментальна апробація методу гальмування росту втомної тріщини проведена у кілька етапів. Зразки вирізали у напрямі вальцювання листового матеріалу товщиною 25 мм та механічно доводили до розмірів 12 мм x 18 мм x 170 мм (товщина, висота та довжина, відповідно). Використовуючи методичні рекомендації [12], будували кінетичні діаграми втомного руйнування в координатах «швидкість росту тріщини da/dN – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK », де a – довжина тріщини, включаючи концентратор напружень, N – кількість циклів навантаження. Періодично оптичним методом визначали на бокових поверхнях зразка просування тріщини з чутливістю 0,02 мм.

Спочатку у повітрі вирощували втомну тріщину за частоти циклічного навантаження $f = 10$ Гц з реєстрацією кінетики її росту приблизно до швидкості $da/dN \sim 10^{-8}$ м/цикл. Це вже чітко виражена середньоамплітудна ділянка кінетичної діаграми, якій не притаманний істотний ефект закриття тріщини. Тоді крапельним методом подавали на концентратор зразка розчин спеціального технологічного середовища, який завдяки капілярному ефекту за кілька циклів заповняв порожнину втомної тріщини аж до її вершини. Зменшення швидкості росту тріщини спостерігали зразу ж на першому етапі контролю довжини тріщини після введення в тріщину технологічного середовища. Через кілька таких етапів приріст тріщини вже не реєстрували, що свідчило про її повне гальмування. Далі продовжували експеримент, підвищували рівень навантаження, зберігаючи пульсівний його цикл. Це приводило до зростання розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK за незмінної асиметрії циклу. Для певного діапазону ΔK збільшення його рівня не спричиняло росту тріщини, тобто в межах чутливості реєстрації приросту тріщини збільшення її довжини на бокових поверхнях зразка не спостерігали. Це давало нам можливість стверджувати, що для заданих умов циклічного навантаження (частота f , асиметрія R та рівень ΔK) застосування спеціального технологічного середовища повністю унеможливає просування тріщини. Рис. 2а демонструє різкий вплив описаної процедури на гальмування росту тріщини аж до її повної зупинки і слугує підтвердженням значного позитивного ефекту від застосування даного методу.

Важливо було дослідити роль чинника частоти циклічного навантаження f , беручи до уваги, що саме низькочастотне навантаження властиве корпусу лебідки, якщо враховувати час підйому та

опускання вантажу. Тому наступний експеримент полягав у зниженні частоти циклічного навантаження f від 10 Гц (рис. 2а) до 0,5 Гц (рис. 2б), що наближувало до реальних експлуатаційних умов.

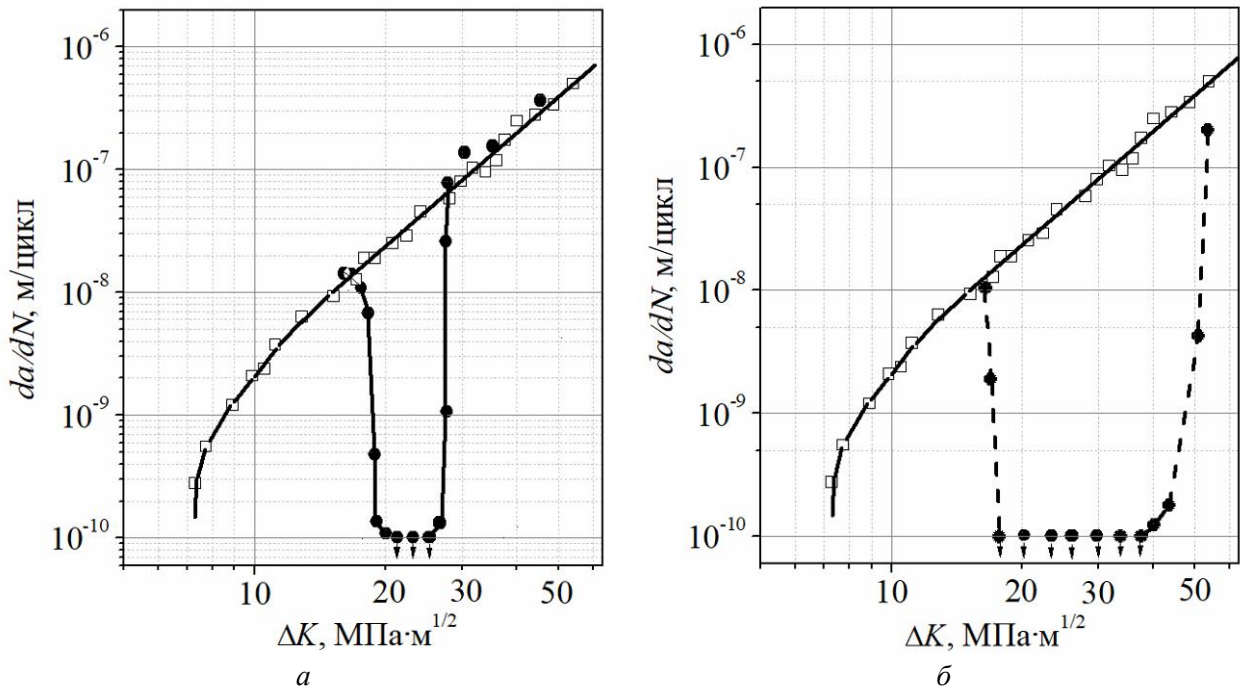


Рис. 2. Кінетика втомного росту тріщини у повітрі (світлі символи) та за дії спеціального технологічного середовища (темні символи) на зразках зі сталі 09Г2С за частоти $f = 10$ Гц (а) та $f = 0,5$ Гц (б) та коефіцієнта асиметрії циклу $R = 0,05$

Встановлено, що зниження частоти f істотно розширює діапазон ΔK , для якого спостерігали цілковите гальмування росту тріщини. Таким чином, ефект від застосування спеціального технологічного середовища зростає при зниженні частоти циклічного навантаження, тобто, при збільшенні часу дії середовища в циклі навантаження, а це практично важливо при аналізі експлуатаційних умов вантажної лебідки. З іншого боку, частотна залежність ефекту гальмування втомної тріщини вказує на змагальність процесу утворення твердих продуктів у порожнині тріщини та швидкості її росту. За нижчої частоти f сприятливіші умови для формування цих продуктів.

Для підтвердження ролі саме закриття втомної тріщини у гальмуванні її поширення аж до повної зупинки в середньоамплітудній області навантаження нами проведено експерименти з визначення ефекту закриття тріщини. Для цього періодично зупиняли експеримент і застосовували описану в праці [2] методику оцінювання закриття тріщини, використовуючи спеціальний тензометричний давач переміщень.

Приведені на рис. 3 діаграми переміщення δ поблизу вершини тріщини засвідчують відповідальність штучного створення закриття тріщини у гальмуванні її росту. Якщо до дії технологічного середовища частка ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_{eff} , яка вважається механічною рушійною силою росту втомної тріщини, складає 90...95% номінального розмаху ΔK , то за його дії – приблизно три чверті значення номінального ΔK для частоти навантаження $f = 10$ Гц та майже 10% значення номінального ΔK для $f = 0,5$ Гц.

Технологічна процедура використання методу підвищення втомної міцності сталей.

Для практичного використання методу розроблено герметичну камеру із прозорого хімічно інертного матеріалу, яка двома частинами охоплює потенційно небезпечну ділянку навколо осі барабану (рис. 4). В камеру заливають спеціальне технологічне середовище [4], яке неагресивне у корозійному відношенні з огляду зниження опору корозійно-механічному руйнуванню сталей [7]. Камера обертається разом зі стінкою лебідки, що забезпечує перемішування технологічного розчину. З іншого боку, цей розчин, як показано попередніми дослідженнями [4–6], активний у

формуванні в порожнині втомної тріщини значної кількості твердих продуктів взаємодії зі сталями феритно-перлітної мікроструктури.

Передбачається, що і в експлуатаційних умовах при зародженні втомної тріщини в ній будуть формуватися тверді продукти взаємодії технологічного середовища з металом, що запобігатиме змиканню тріщини в півциклі розвантаження. В параметрах механіки втомного росту тріщини це означає зменшення ефективного коефіцієнта інтенсивності напружень. Відповідно, знижується механічна рушійна сила втомного росту тріщини. Можна очікувати, що і у випадку вантажної лебідки, гальмування стадії зародження росту втомної тріщини буде ефективним з огляду на підвищення втомної міцності металу і довговічності лебідки загалом.

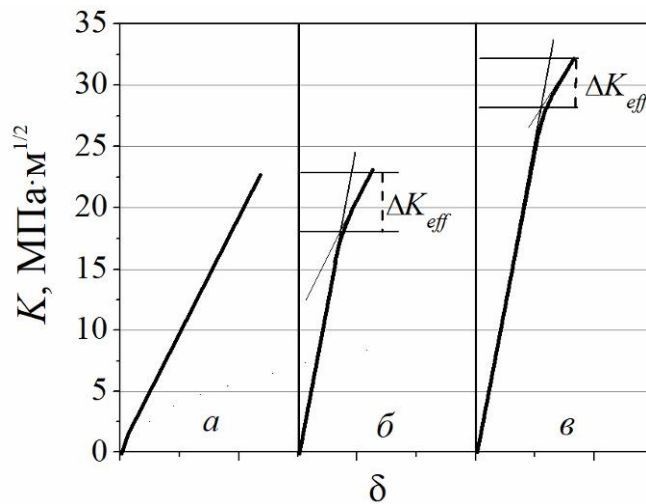


Рис. 3. Результати оцінювання ефекту закриття тріщини до застосування спеціального технологічного середовища (а) та з його використанням для частоти $f = 10$ Гц (б) і $0,5$ Гц (в)

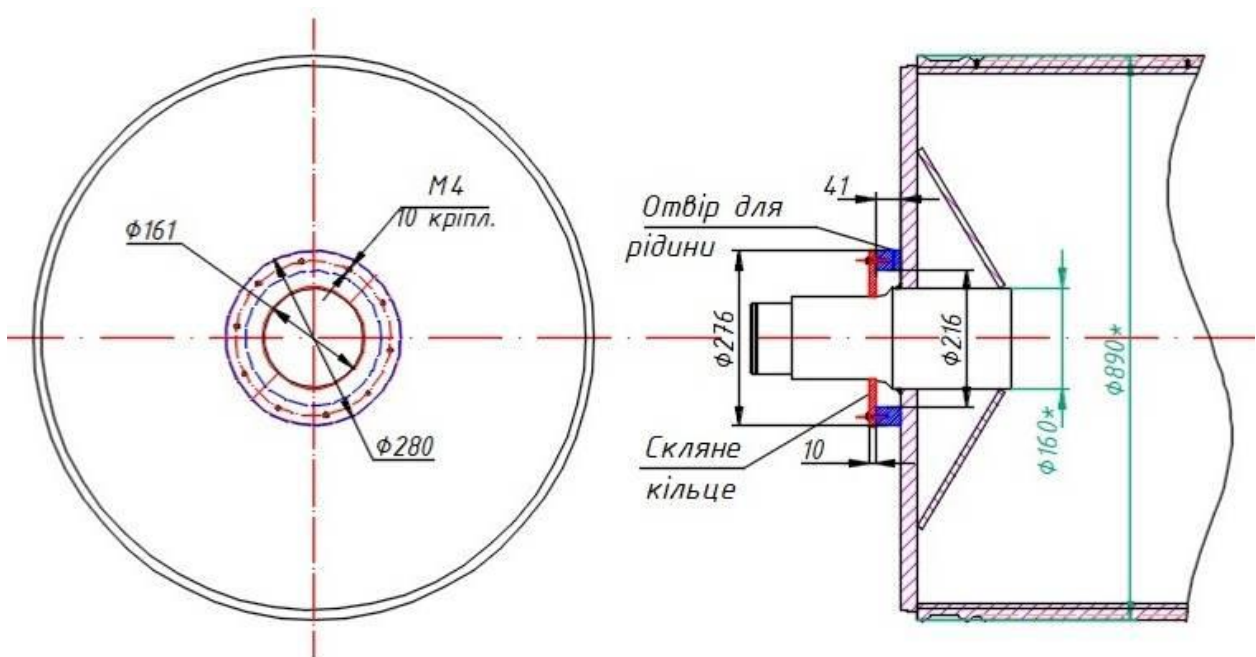


Рис. 4. Схематичне зображення камери для фіксації на вантажній лебідці та подавання в неї технологічного середовища

Висновки. Встановлено істотний гальмівний вплив спеціального технологічного середовища на втомний ріст тріщини в сталі 09Г2С стінки корпусу вантажної лебідки порталного крана в середньоамплітудній області кінетичної діаграми втомного руйнування аж до її повної зупинки в певному діапазоні розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень. Цей діапазон частотно залежний і збільшується зі зменшенням частоти циклічного навантаження. На прикладі лебідки опрацьовано технічну реалізацію методу підвищення втомної міцності відповідальних елементів конструкцій використанням спеціального технологічного середовища.

Література

1. Degradation of steels of the reloading equipment operating beyond its designed service life / V.M. Pustovy et al. *Materials Science*. 2022. Vol. 57, № 5. P. 640–648. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00590-1> (date of access: 24.07.2023).
2. Wen H., Li Y. Study on stress distribution law and stress performance characteristics of multiple data mining for harbour portal crane detection. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 631, 012039. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/631/1/012039> (date of access: 24.07.2023).
3. A new method of increasing the cyclic crack resistance of structural parts / G. N. Nikiforchin et al. *Materials Science*. 1985. Vol. 21, № 2. P. 191–193. URL: <https://doi.org/10.1007/BF01150640> (date of access: 24.07.2023).
4. Venhrynyuk T. P. Fatigue crack retardation by the application of repair coatings to gas pipelines under pressure. *Materials Science*. 2013. Vol. 48, № 6. P. 739–742. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9562-x> (date of access: 24.07.2023).
5. Pippan R., Hohenwarter A. Fatigue crack closure: a review of the physical phenomena. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*. 2017. Vol. 40, № 4. P. 471–495. URL: <https://doi.org/10.1111/ffe.12578> (date of access: 24.07.2023).
6. Fatigue crack tip corrosion processes and oxide induced closure / A. K. Vasudevan et al. *Materials Science and Engineering*. 2022. Vol. A 861, 144383. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144383> (date of access: 24.07.2023).
7. On 50 years of fatigue crack closure dispute / D. Kujawski et al. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2023. Vol. 46, № 8. P. 2816–2829. URL: <https://doi.org/10.1111/ffe.14034> (date of access: 24.07.2023).
8. Патент України № 128514. Спосіб гальмування росту втомної тріщини / Г. М. Никифорчин та ін. Бюл. № 18. 2018.
9. Effective method for fatigue crack arrest in structural steels based on artificial creation of crack closure effect / Ya. Khaburskyi et al. *International Journal of Fatigue*. 2019. Vol. 127. P. 217–221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.001> (date of access: 24.07.2023).
10. Analysis of the deceleration methods of fatigue crack growth rates under mode I loading type in pearlitic rail steel / G. Lesiuk et al. *Metals*. 2021. Vol. 11, № 4. P. 584. URL: <https://doi.org/10.3390/met11040584> (date of access: 24.07.2023).
11. Elevation of the fatigue strength of pump rods as a result of treatment with a special medium / B. V. Kopei et al. *Materials Science*. 2020. Vol. 56. P. 125–131. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00406-0> (date of access: 24.07.2023).
12. ASTM E647-15e1, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. – ASTM International: West Conshohocken, PA, 2015. – 49 p.

Рецензент: Никифорчин Г. М., пров. наук. співроб. відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, д.т.н., проф.