

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАПРАЦЮВАННЯ ТА АСИМЕТРІЇ ЦИКЛУ НА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛЕЙ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ

Об'єктом дослідження є металоконструкції порталних кранів, термін експлуатації яких перевищує нормативний і які продовжують експлуатуватися в річкових портах. Проблема зниження працездатності металоконструкції загострюється понаднормовою та тривалою їх експлуатацією в режимі інтенсивного циклічного навантаження в сукупності зі зміною фізико-механічних властивостей внаслідок корозійної деградації металу. Враховуючи те, що на сьогодні за відсутності достатнього фінансування встановлення ресурсу кранів є актуальною задачею, оскільки останній визначається опірністю втомного руйнування порталних кранів. Метою роботи є встановлення впливу напрацювання та асиметрії циклу навантаження в умовах агресивного середовища на характеристики тріщиностійкості зразків металоконструкцій порталних кранів. Для досліджень були використані плоскі зразки, виготовлені з сталі St38b2, які вирізані з нижньої та задньої полиць хобота, а також стріли порталних кранів типу «Альбатрос», що напрацювали 45 років в Херсонському порту. Експериментальні зразки навантажували плоским згином на випробувальній машині з жорстким типом навантаження, частотою 3 Гц та асиметрією циклу  $R$  0,1, 0,4, 0,6 і 0,8. З отриманих експериментальних кінетичних діаграм втомного руйнування матеріалу встановлено, що збільшення асиметрії циклу навантаження призводить до інтенсифікації росту тріщини, зокрема в діапазоні значень  $K=7\text{...}18$  МПа·м<sup>1/2</sup> швидкість збільшується у 1,3-2 рази. За  $R=0,8$  вже спостерігається відсутність ефекту закриття тріщини, зниження порогу втоми, інтенсифікація росту тріщини у всьому діапазоні  $K$ , що узгоджується з даними, наведеними в [4].

Ключові слова: порталний кран, сталь St38b2, асиметрія циклу, швидкість росту втомної тріщини.

V.V. STRELBITSKIY, O.O. NEMCHUK

Odessa National Maritime University

## AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE IMPACT OF AGE AND LOADING CYCLE ASYMMETRIES ON THE CRACK RESISTANCE OF THE PORTAL CRANES

Gantry cranes are the most common reloading machines of river ports, which perform the bulk of transshipment work. It should be noted that port performance depends on their reliable and continuous operation. Excessive and long-term operation of metal structures under intensive cyclic loading and in combination with a change in physical and mechanical properties as a result of corrosion degradation of the metal leads to a decrease in their performance. An increase in the duration of operation leads to the accumulation of defects and damage to metal structures, to the intensification of the latest results of operational hydrogen pickling of steels. They can serve as concentrators of fatigue cracks; their development is random. Design of metal structures. However, the latent and educated defects that are available during manufacturing and operation lead to a reduction in their useful life. In the absence of sufficient funding, the urgent task is to establish the resource of the cranes, which is determined by the resistance to fatigue failure of the portal cranes. An analysis of the studies showed that the influence of cycle asymmetry on the kinetics of critical growth of fatigue cracks in the metal structures of gantry cranes that have been in operation for more than 40 years is currently insufficiently reviewed in the scientific literature. The aim of the work is to establish the influence of work and asymmetry of the load cycle in an aggressive environment on the fracture toughness characteristics of gantry crane metal structures. For studies, flat beam specimens with one-side notch were used. They are made of low-carbon sheet ferrite-pearlite class St38b2 steel, and cut from the lower and rear shelves of the crane boom, as well as the right boom of Albatros-type gantry cranes, which have been used for 45 years in the river port of Kherson. 10 samples were cut from each element. Samples are loaded by cantilever bending on a testing machine with a rigid type of load, frequency 3 Hz, according to the asymmetry of the cycle  $R$  0.1, 0.3, 0.6 and 0.8 at an outdoor temperature of 20 °C. The obtained values were averaged. From the obtained experimental kinetic diagrams of the fatigue fracture of the material, it was found that an increase in the asymmetry of the cycle leads to an intensification of crack growth, in particular, in the range of values  $K = 7 \dots 18$  MPa · m<sup>1/2</sup>, the speed increases by 1.3-2 times. At  $R = 0.6$  and 0.8, there is no crack closure effect, a decrease in the fatigue threshold, and crack growth is intensified over the entire  $\Delta K$  range. Which is consistent with the kinetics of tedious crack growth in the Paris section [4].

Keywords: gantry crane, corrosion, St38b2 steel, fatigue crack growth rate.

### Постановка проблеми

Портальні крани є найбільш розповсюдженими перевантажувальними машинами річкових портів, які виконують основний об'єм перевантажувальних робіт. Слід відзначити, що продуктивність порту залежить від їх надійної та безперервної роботи.

Понаднормова та тривала експлуатація металоконструкцій в режимі інтенсивного циклічного навантаження та в сукупності зі зміною фізико-механічних властивостей внаслідок корозійної деградації металу призводить до зниження їх працездатності [1–4]. Збільшення тривалості експлуатації призводить до накопичення дефектів і пошкодження металоконструкцій, інтенсифікації останніх та експлуатаційного наводнення сталей [5–7]. Небезпека корозійних пошкоджень полягає в тому, що вони можуть слугувати концентраторами втомних тріщин, їх розвиток носить випадковий характер.

Як відомо, під час проектування металоконструкцій конструктори встановлюють запаси міцності з урахуванням дії можливих експлуатаційних навантажень [3, 4]. Проте наявні скриті та утворені в процесі виготовлення та експлуатації дефекти призводять до зниження терміну їх експлуатації.

Терміни експлуатації кранів з понаднормовим терміном експлуатації залежать від періоду напрацювання, стану на момент спостереження, можливості часткового відновлення ресурсу шляхом ремонту, розкиду технічного стану елементів, якості та технології їх виготовлення, якості матеріалу,

особливостей технічного обслуговування, фактичних умов експлуатації, режимів навантаження, наявності агресивних середовищ, якості та стану захисних покриттів [4].

На повітрі частота навантаження здебільшого не впливає на кінетику руйнування сталей, проте корозійні середовища суттєво її змінюють.

За умов відсутності достатнього фінансування актуальною задачею є встановлення ресурсу кранів, що визначається опірністю втомного руйнування порталних кранів.

#### Аналіз публікацій

Аналіз проведених досліджень показав наступне:

1) міцність та пластичність сталі конструкції кранів, котрі напрацювали більше 30 років, істотно не змінилися, проте погіршилася ударна в'язкість металу, тобто його опірність крихкому руйнуванню [1–7]; тому можна припустити, що погіршиться й опір втомному руйнуванню;

2) корозійні ушкодження металевих конструкцій порталних кранів носять випадковий характер, спостерігаються у вигляді язв чи поверхневих ушкоджень, та істотно впливають на залишкову довговічність [4, 5];

3) збільшення терміну служби (напрацювання) призводить до зниження механічних характеристики матеріалів [2];

4) напрацювання впливають неоднозначно на механічні характеристики матеріалів [1, 3].

Слід відзначити, що руйнування металокопункцій в процесі експлуатації пов'язано з циклічними навантаженнями металу, котрі чутливі до концентраторів напружень і сприяють утворенню мікротріщин біля корозійних виразок. Останні переростають в подальшому в макротріщину, що поширюється в тіло металокопункції. Однак, вплив асиметрії циклу навантажень на кінетику до критичного росту втомних тріщин металокопункцій порталних кранів, які пропрацювали більше 40 років, на теперішній час в науковій літературі розглянуто ще недостатньо

Метою роботи є встановлення впливу напрацювання та асиметрії циклу навантаження в умовах агресивного середовища на характеристики тріщиностійкості зразків металокопункцій порталних кранів.

#### Викладення основного матеріалу

Для досліджень були використані плоскі балочні зразки з одностороннім надрізом (рис. 1). Зразки були виготовлені з листової низьковуглецевого ферито-перлітного класу сталі St38b2, та вирізані з нижньої та задньої полиць хобота, а також правої стріли порталних кранів типу «Альбатрос», що експлуатувалися протягом 45 років в річковому порту Херсон. З кожного елемента вирізали по 10 зразків.

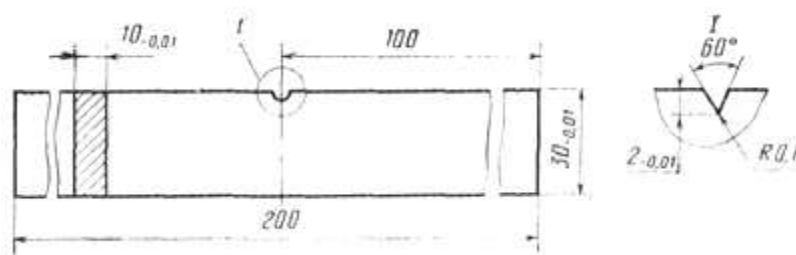


Рис. 1. Експериментальні зразки

Місця вирізання зразків обирались з врахуванням схеми діючих напружень в конструкціях елементів крана. Для забезпечення необхідних розмірів після вирізання зразки остаточно шліфували (відхилення розмірів не перевищували  $\pm 0,02$  мм).

Для покращення спостереження за рухом тріщини бокові поверхні робочої частини полірували, що дозволило за допомогою мікроскопа з точністю до 0,01 мм візуально реєструвати довжину тріщини.

У процесі досліджень на заданих режимах випробувань за обома полірованими бічними поверхнями зразків періодично вимірювали довжину тріщини. При цьому фіксувалося відповідне число циклів.

Зразки (рис. 1) навантажували консольним згином на випробувальній машині з жорстким типом навантаження, частотою 3 Гц, за асиметрії циклу  $R$  0,1, 0,4, 0,6 і 0,8 за температури зовнішнього повітря 20°C.

Отримані значення усереднювали для кожної групи зразків.

За отриманим експериментальними даними будували кінетичні діаграми втомного руйнування «розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН)  $\Delta K$  – швидкість росту тріщини  $da/dN$ » (рис. 2) за методикою [5].

Оскільки товщини зразків для випробувань і металевих конструкцій однакові, то можна припустити з певною ймовірністю, що і швидкості росту тріщини для значень  $\Delta K$  мають бути наближені. Це дозволяє використовувати отримані кінетичні діаграми втомного руйнування для проведення інженерних розрахунків на стадії проектування.

За отриманими експериментальними даними розраховували коефіцієнти  $C$  і  $n$ , характеристики циклічної тріщиностійкості матеріалу на ділянці Періса, за залежністю (1), результати наведені в табл. 1:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n. \quad (1)$$

Слід відзначити, що в ході досліджень три зразки передчасно вийшли з ладу внаслідок прихованих дефектів в металі, крім того на восьми зразках спостерігалось сповільнення швидкості розповсюдження тріщини за  $R=0,1$ .

Аналіз обстежених металевих зразків показав, що більшість їх поверхонь уражені корозійними ушкодженнями у вигляді язв та поверхневих дефектів, які є неглибокими. Металографічний аналіз зламів проводили на оптичному мікроскопі Neophot-21, а мікрофрактографічний – на сканувальному електронному мікроскопі Carl Zeiss EVO-40XVP (рис. 3).

Візуальний огляд зламів зразків показав відсутність відкладення оксидів на ділянках припорогових швидкостях розповсюдження тріщини, що цілком узгоджується з дослідженнями [4].

Асиметрія циклу суттєво впливає на швидкість росту втомної тріщини.

За малих значень асиметрії циклу навантажень експлуатація не суттєво впливає на швидкість росту втомної тріщини, що узгоджується з дослідженнями [2–6], і це можна пояснити ефектом закриття втомної тріщини, спричиненим зростанням шорсткості поверхні, що нівелює її потенціальне прискорення і результати зниження опірності деградованого металу втомному руйнуванню.

Таблиця 1

**Характеристики циклічної тріщиностійкості зразків з сталі St38b2**

Елемент крана	Асиметрія циклу навантаження $R$	Характеристики циклічної тріщиностійкості		Коефіцієнт кореляції	$K_{max}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
		$C$	$n$		
Хобот	0,1	$2,642 \cdot 10^{-14}$	4,771	0,972	25
	0,4	$2,191 \cdot 10^{-12}$	2,74	0,96	22
	0,6	$2,265 \cdot 10^{-11}$	2,67	0,98	19
	0,8	$4,247 \cdot 10^{-11}$	2,705	0,97	16
Стріла	0,1	$3,254 \cdot 10^{-13}$	3,884	0,98	26
	0,4	$3,057 \cdot 10^{-12}$	3,287	0,99	23
	0,6	$1,981 \cdot 10^{-11}$	2,793	0,98	19,5
	0,8	$4,247 \cdot 10^{-11}$	2,705	0,99	16,6

Експлуатація в умовах корозійного (водневого) середовища призвела до утворення корозійних дефектів на поверхнях металу і зумовила негативний вплив.

Збільшення значень асиметрії циклу навантажень призводить до інтенсифікації росту тріщини, що відповідає загальним закономірностям [4] і пояснюється відсутністю механізму закриття тріщини, певним зниженням порогу втоми і збільшенням розмаху деформацій в околиці вершини втомної тріщини.

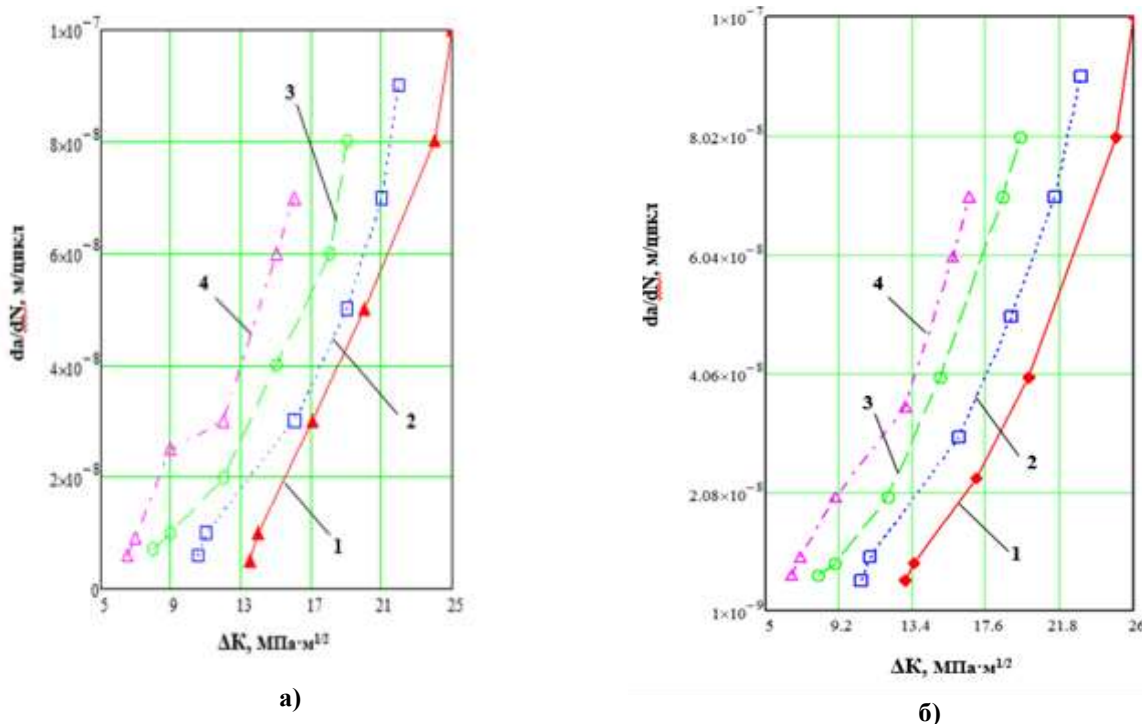


Рис. 2. Кінетичні діаграми втомного руйнування зразків зі сталі St38b2, вирізаних з хоботу (а) та стріли (б) для  $R=0,1$  (1),  $0,4$  (2),  $0,6$ (3) та  $0,8$ (4)

З отриманих експериментальних кінетичних діаграм втомного руйнування матеріалу встановлено, що збільшення асиметрії циклу навантаження призводить до інтенсифікації росту тріщини, зокрема в діапазоні

значень  $K=7...18$  МПа·м<sup>1/2</sup> швидкість збільшується у 1,3–2 рази. За  $R=0,6$  і  $0,8$  вже спостерігається відсутність ефекту закриття тріщини, зниження порогу втоми, інтенсифікація росту тріщини у всьому діапазоні  $\Delta K$ . Це узгоджується з даними кінетики втомного росту тріщини на ділянці Періса [4].

### Висновки

За отриманими результатами експериментальних досліджень встановлено наступне:

1) на характеристики тріщиностійкості зразків металокопункцій зі сталі St38b2 впливає напрацювання і асиметрія циклу навантаження металу порталних кранів;

2) збільшення асиметрії циклу навантаження призводить до інтенсифікації росту тріщини, зокрема в діапазоні значень  $K=7...18$  МПа·м<sup>1/2</sup>

швидкість збільшується у 1,3–2 рази. За  $R=0,8$  вже спостерігається відсутність ефекту закриття тріщини, зниження порогу втоми, інтенсифікація росту тріщини у всьому діапазоні  $\Delta K$ ;

3) металографічний аналіз зразків показав відсутність міжкристалічної корозії.

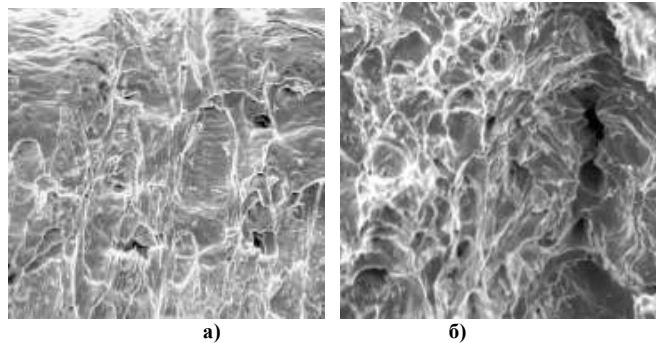


Рис. 3. Мікрофрактограми зразків із сталі St38b2 на ділянках припорогових швидкостей у хоботі (а) та стрілі (б) при  $R=0,8$

### Література

1. Немчук О. О. Особливості діагностування технічного стану сталей порттового перевантажувального обладнання / О. О. Немчук // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – 53, № 6. – С. 116–118.
2. Немчук О.О. Експериментальне дослідження впливу напрацювання на тріщиностійкість сталей порталних кранів / О.О. Немчук, В.В. Стрельбицький // Вісник Хмельницького національного університету, серія: Технічні науки. – 2019. – № 1. – С. 17–20.
3. Ботвина Л.Р. Высокоцикловое усталостное разрушение малоуглеродистой стали после её длительного старения / Л.Р. Ботвина, И.М. Петрова, И.В. Гадолина, В.П. Левин, Ю.А. Демина, А.П. Солдатенков, М.Р. Тютин // Заводская лаборатория «Диагностика материалов». – 2009. – № 6. Том 75. – С. 44–51.
4. Пустовой В.Н. Металлоконструкции грузоподъемных машин. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса / В. Н. Пустовой. – М. : Транспорт, 1992. – 256 с.
5. Omura T., Kudo T., and Fujimoto S. Environmental factors affecting hydrogen entry into high strength steel due to atmospheric corrosion. Mat. Transactions. 2006. 47, № 12. P. 2956–2962.
6. Харченко Л. Є. Діагностика водневого макророзшарування в стінці гину труби системи магістральних газопроводів / Л. Є. Харченко, О. Є. Кунта, О. І. Звірко, Р. С. Савула, З. А. Дурягіна // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – № 4. – С. 84–90.
7. Никифорчин Г. М. Деградація властивостей сталей магістральних газопроводів упродовж їх сорокарічної експлуатації / Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, Д. Ю. Петрина, М. І. Греділь // Проблемы прочности. – 2009. – 41, № 5 (401). – С. 66–72.

### References

1. Nemchuk O. O. Osoblyvosti diahnostuvannia tekhnichnoho stanu stalei portovoho perevantazhuvalnoho obladdnannia / O. O. Nemchuk // Fiz.-khim. mekhanika materialiv. – 2017. – 53, № 6. – S. 116–118.
2. Nemchuk O.O. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuвання na trishchynostiikist stalei portalnykh kraniv / O.O. Nemchuk, V.V. Strelbitskyi // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 1. – S. 17–20.
3. Botvina L.R. Vysokociklovoe ustalostnoe razrushenie malouglerodistoy stali posle eyo dlitel'nogo starenia / L.R. Botvina, I.M. Petrova, I.V. Gadolina, V.P. Levin, Yu.A. Demina, A.P. Soldatenkov, M.R. Tyutin // Zavodskaya laboratoriya «Diagnostika materialov». – 2009. – № 6. Tom 75. – S. 44–51.
4. Pustovoj V.N. Metallokonstrukcii gruzopodemnykh mashin. Razrushenie i prognozirovanie ostatochnoho resursa / V. N. Pustovoj. – M. : Transport, 1992. – 256 s.
5. Omura T., Kudo T., and Fujimoto S. Environmental factors affecting hydrogen entry into high strength steel due to atmospheric corrosion. Mat. Transactions. 2006. 47, № 12. R. 2956–2962.
6. Kharchenko L. Ye. Diahnostyka vodnevoho makrorozsharuvannia v stintsii hynu truby systemy mahistralnykh hazoprovodiv / L. Ye. Kharchenko, O. Ye. Kunta, O. I. Zvirko, R. S. Savula, Z. A. Duriagina // Fiz.-khim. mekhanika materialiv. – 2015. – № 4. – S. 84–90.
7. Nykyforchyn H. M. Dehradatsia vlastyvoetei stalei mahistralnykh hazoprovodiv uprodovzh yikh sorokarichnoi ekspluatatsii / H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyryl'nyk, D. Yu. Petryna, M. I. Hredil // Problemy prochnosti. – 2009. – 41, № 5 (401). – S. 66–72.

Рецензія/Peer review : 10.1.2020 р.

Надрукована/Printed : 14.2.2020 р.

Стаття рецензована редакційною колегією