

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАПРАЦЮВАННЯ НА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛЕЙ МОСТОВИХ КРАНІВ

Об'єктом дослідження є металоконструкції мостових кранів з терміном експлуатації, що перевищив нормативний, однак вони далі експлуатуються у порту. Понаднормова та тривала експлуатація у режимі інтенсивного циклічного навантаження в сукупності зі зміною фізико-механічних властивостей внаслідок корозійної деградації металу призводить до зниження працездатності кранів. Окрім того, відсутність достатнього фінансування для підтримки ресурсу на належному рівні є актуальною задачею, оскільки останній визначається опірністю втомного руйнування мостових кранів. Слід зазначити, що на термін експлуатації кранів з понаднормовим навантаженнями впливають термін напрацювання, фактичні умови експлуатації та режими навантаження, стан на момент спостереження, наявність та склад агресивних середовищ, можливість часткового відновлення ресурсу шляхом ремонту, якість та технологія їх виготовлення, якість матеріалу, особливості технічного обслуговування, якість та стан захисних покриттів. Метою роботи є встановлення впливу напрацювання в умовах агресивного середовища на характеристики тріщиностійкості зразків металоконструкцій мостових кранів. Для досліджень були використані плоскі балочні зразки з одностороннім надрізом, які виготовлені з листової низьковуглецевої сталі Ст3, та вирізані в двох різних ділянках з металоконструкцій кінцевих балок мостових кранів, що експлуатувалися протягом 20, 27 і 38 років в порту. З кожної ділянки вирізали по 3 зразки. Місця вирізання зразків вибирались з врахуванням схеми діючих напружень в конструкціях елементів крана. У процесі досліджень на заданих режимах випробувань за обома полірованими бічними поверхнями зразків періодично вимірювали довжину тріщини. При цьому фіксувалося відповідне число циклів. Експериментальні кінетичні діаграми втомного руйнування матеріалу свідчать про те, що збільшення терміну призводить до інтенсифікації росту тріщини.

Ключові слова: мостовий кран, сталь Ст3, напрацювання, швидкість росту втомної тріщини.

V.V. STRELBITSKIY
Odessa National Maritime University

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE IMPACT OF AGE ON THE CRACK RESISTANCE OF THE OVERHEAD TRAVELLING CRANES

The object of research is the metal structures of overhead cranes, the service life of which has exceeded the standard, but they are further operated in the port. Over-standard and long-term operation in the mode of intensive cyclic loading in combination with a change in physical and mechanical properties as a result of corrosion degradation of the metal leads to a decrease in the efficiency of the cranes. It should be noted that each case of crack propagation requires a separate study, since the endurance of the structure significantly depends on both the geometric and physical and mechanical parameters of the system. It should be noted that when designing them, the designers established large safety margins. In addition, the lack of sufficient funding to maintain the resource at the proper level is an urgent task, since the latter is determined by the fatigue failure resistance of bridge cranes. For the research, flat beam specimens with a one-sided notch were used, made of low-carbon steel sheet St3, and cut in two different sections from the metal structures of the end beams of overhead cranes, were operated for 20, 27 and 38 years in the port. 3 samples were cut from each site. The locations for cutting out the samples were selected taking into account the scheme of acting stresses in the structures of the crane elements. In the process of investigations at the specified test modes, the crack length was periodically measured on both polished lateral surfaces of the samples. In this case, the corresponding number of cycles was recorded. Experimental kinetic diagrams of fatigue fracture of the material indicate that an increase in the period leads to an intensification of crack growth, in particular, in the range of $K = 7 \dots 18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, the rate increases by 1.3-2.

Keywords: overhead travelling crane, age on the crane, St3 steel, fatigue crack growth rate.

Постановка проблеми

Мостові крани отримали широке розповсюдження в різних галузях промисловості, оскільки вони не тільки виконують більшу частину підйомно-транспортних робіт, а також включені безпосередньо в технологічний процес. Слід відзначити, що від їх надійної та безперервної роботи залежить продуктивність портових ліній.

Необхідно відмітити той факт, що на сьогодні в Україні з усіх працюючих кранів більше 85% відпрацювали нормативний термін служби. Оновлення фондів здійснюється вкрай повільно: при нормі 8–10% щорічно оновлюється не більше 1% кранового парку.

Слід також врахувати, що понаднормова та тривала експлуатація металоконструкцій в режимі інтенсивного циклічного навантаження у сукупності з дією агресивного середовища на металеві конструкції призводить до зниження їх працездатності, накопичення дефектів і пошкоджуваності, розвитку втомних тріщин внаслідок утворення додаткових концентраторів (рис. 1) та передчасного виходу крана з ладу [1–4]. У зв'язку з цим виникла необхідність виявлення вузлів конструкції машини, які найбільш часто призводять до поломок, а отже, і простоїв обладнання. При оцінці стану металоконструкцій необхідно звернути увагу на наявність дефектів, що представляють явну небезпеку і можуть призвести до крихкого руйнування. До таких дефектів відносяться тріщини в основному металі, в зварних швах і біля шовної зони.

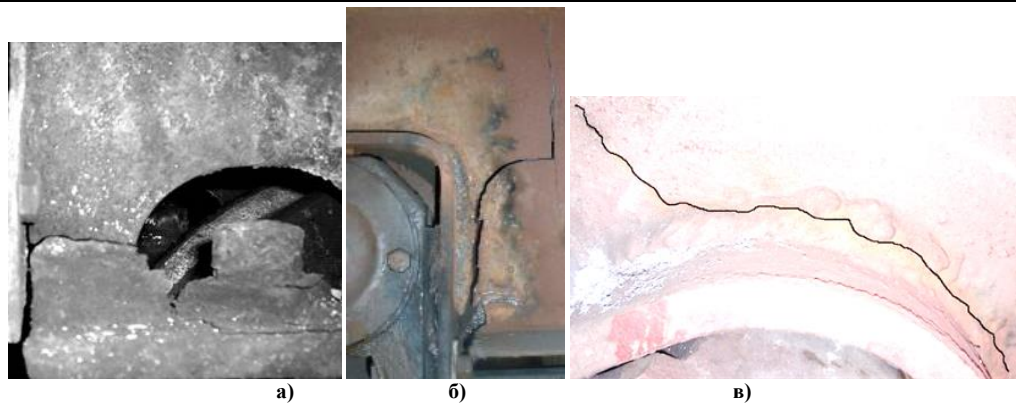


Рис. 1. Тріщини у вузлах спряження головної (а) та кінцевих (б,в) балках мостових кранів

Незважаючи на те, що під час проектування металоконструкцій конструктори встановлюють запаси міцності з урахуванням дії можливих експлуатаційних навантажень [3, 4], приховані та утворені в процесі виготовлення та експлуатації дефекти призводять до передчасного зниження терміну їх експлуатації.

Слід зазначити, що на термін експлуатації кранів з понаднормовим навантаженнями впливають термін напрацювання, фактичні умови експлуатації та режими навантаження, стан на момент спостереження, наявність та склад агресивних середовищ, можливість часткового відновлення ресурсу шляхом ремонту, якість та технологія їх виготовлення, якість матеріалу, особливості технічного обслуговування, якість та стан захисних покриттів [1, 4]. Так, наявність корозійного середовища змінює кінетику руйнування сталі.

Аналіз публікацій

Аналіз проведених досліджень металевих конструкцій мостових кранів, які попрацювали значний термін, показав наступне:

1) збільшення терміну служби (напрацювання) призводить до погіршення ударної в'язкості металу, тобто його опірність крихкому руйнуванню при суттєвій зміні міцності та пластичності сталі [1, 4–7]; тому можна припустити, що погіршиться й опір втомному руйнуванню;

2) термін напрацювання неоднозначно впливає на механічні характеристики матеріалів [1, 4, 5];

3) виявлені корозійні пошкодження конструкцій, у вигляді язв чи поверхневих ушкоджень, носять випадковий характер та впливають істотно на залишкову довговічність [4];

4) найбільші напруження виникають у вузлі кріплення куткових букс ходових коліс на кінцевих балках, який сприймає вертикальні навантаження і поперечні горизонтальні та перекосу зусилля, що виникають під час руху крана;

5) руйнування металоконструкцій в процесі експлуатації передусім пов'язано з циклічними навантаженнями в процесі експлуатації, які чутливі до концентраторів напружень і сприяють утворенню мікротріщин біля корозійних виразок. Причому останні переростають в подальшому в макротріщину, що поширюється в тіло металоконструкції [1, 4].

Тому можна припустити, що безпека експлуатації мостових кранів, котрі відпрацювали нормативний термін працездатності, напряму залежить від характеристик тріщиноустійкості металу кінцевих балок.

Однак, вплив тривалості навантажень на кінетику росту втомних тріщин металоконструкцій мостових кранів, які пропрацювали більше 30 років в умовах порту, на сьогодні в науковій літературі розглянуто недостатньо.

Слід відзначити, що кожен випадок поширення тріщини потребує окремого дослідження, оскільки витривалість конструкції істотно залежить як від геометричних, так і від фізико-механічних параметрів системи [1, 4–7].

Метою роботи є встановлення впливу напрацювання в умовах агресивного середовища на характеристики тріщиноустійкості зразків металоконструкцій мостових кранів.

Викладення основного матеріалу

Методи експериментального визначення швидкості розвитку втомної тріщини (РВТ) регламентуються відповідними нормативними документами [1, 5, 7].

Для досліджень були використані плоскі балочні зразки з одностороннім надрізом, які виготовлені з листової низьковуглецевої сталі Ст3, та вирізані в двох різних ділянках з металоконструкцій кінцевих балок мостових кранів, що експлуатувалися протягом 20, 27 і 38 років в порту (рис. 2). З кожної ділянки вирізали по 3 зразки. Місця вирізання зразків обирались з врахуванням схеми діючих напружень в конструкціях елементів крана.

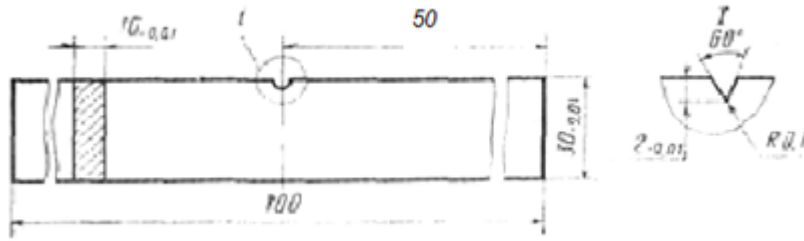


Рис. 2. Експериментальні зразки

З метою забезпечення необхідних розмірів після вирізання, зразки остаточно шліфували (відхилення розмірів не перевищували $\pm 0,02$ мм).

Для забезпечення відповідної точності візуальної реєстрації довжини тріщини, а також її руху бічні поверхні робочої частини зразків полірували.

Випробування полягали в послідовному вимірюванні довжини тріщини l , що росте, за заданих параметрів циклу навантаження, в міру збільшення числа циклів N навантаження. Причому, довжину тріщини вимірювали періодично за обома полірованими бічними поверхнями зразків, фіксуючи відповідне число циклів.

Далі, обчислювали швидкість росту тріщини у вигляді відношення dl/dN як середній приріст довжини тріщини за один цикл та будували кінетичну діаграму втомного руйнування (КДВР).

Зразки навантажували консольним згином на випробувальній машині з жорстким типом навантаження, частотою 10 Гц, за асиметрії циклу $R 0,05$ (яка наближена до синусоїдальної форми циклу) та температури зовнішнього повітря 20°C .

Отримані значення усереднювали для кожної групи зразків.

За отриманим експериментальними даними будували кінетичні діаграми втомного руйнування «максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_{max} – швидкість росту тріщини da/dN » (рис. 3), а також розраховували коефіцієнти C і n , характеристики циклічної тріщиностійкості матеріалу на ділянці Періса, за залежністю (1) за методикою [5].

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \tag{1}$$

Результати розрахунків наведені на рис. 3 і у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики циклічної тріщиностійкості зразків зі сталі Ст3

№ ділянки зразка	Напрацювання, р.	Характеристики циклічної тріщиностійкості		Коефіцієнт кореляції
		C	n	
1	20	$6,435 \cdot 10^{-12}$	3,619	0,96
	27	$6,9 \cdot 10^{-12}$	3,641	0,96
	38	$7,7 \cdot 10^{-12}$	3,621	0,97
2	20	$6,435 \cdot 10^{-12}$	3,619	0,96
	27	$6,828 \cdot 10^{-12}$	3,629	0,97
	38	$7,637 \cdot 10^{-12}$	3,613	0,97

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

За заданої асиметрії циклу $R 0,05$ термін напрацювання не суттєво вплинув на швидкість росту втомної тріщини. Це відповідає загальновідомим закономірностям і можна пояснити істотним збільшенням ефекту закриття тріщини, спричиненого зростанням шорсткості поверхні, котра нівелює її потенційне прискорення в результаті зниження опірності деградованого металу втомному руйнуванню. Однак за високих R , коли чинник закриття тріщин вже не визначає кінетику руйнування [1, 4, 5].

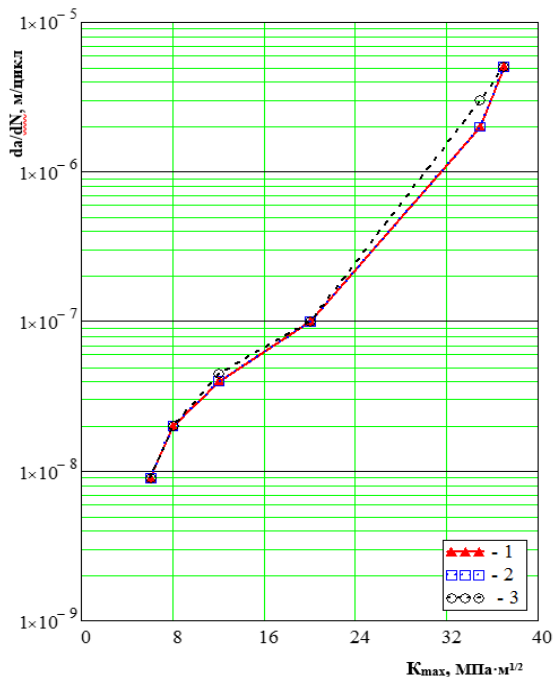
За результатами отриманих КДВР встановлено, що збільшення напрацювання призводить до інтенсифікації росту тріщини лише на низько- та середньоамплітудних ділянках, зокрема в діапазоні значень $K_{\text{max}}=12 \dots 40$ МПа \cdot м $^{1/2}$ швидкість збільшується у 1,7-2,5 рази. Проте, на низько- та високоамплітудних ділянках розбіжності між швидкостями незначні, що узгоджується з даними, наведеними в літературних джерелах [1, 4, 5].

Аналіз обстежених металевих зразків показав, що більшість поверхонь зразків уражені не глибокими корозійними ушкодження у вигляді язв та поверхневих дефектів. Металографічний аналіз зламів проводили на оптичному мікроскопі Neophot-21, а мікрофрактографічний – на сканувальному електронному

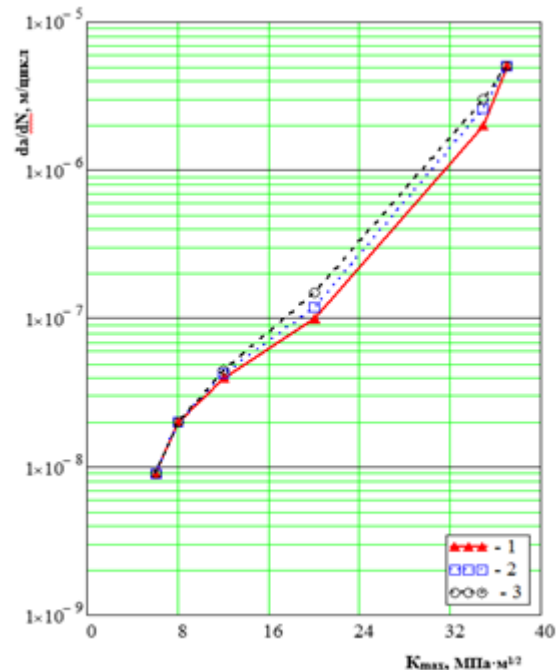
мікроскопі Carl Zeiss EVO-40XVP.

Візуальний огляд зламів зразків показав відсутність відкладення оксидів на ділянках припорогових швидкостях розповсюдження тріщини, що цілком узгоджується з дослідженнями, крім того магістральний напрямок росту тріщини орієнтований справа наліво.

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



а)



б)

Рис. 3. Кінетичні діаграми втомного руйнування зразків зі сталі Ст3, вирізаних на ділянках 1(а) та 2 (б), що експлуатуються впродовж 20 (1), 27 (2) та 38 (3) років

Висновки

Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень показав наступне:

- 1) за заданої асиметрії циклу R 0,05 термін напрацювання не суттєво вплинув на швидкість росту втомної тріщини Ст3 і асиметрію циклу навантаження металу порталних кранів;
- 2) збільшення напрацювання призводить до інтенсифікації росту тріщини лише на низько- та середньоамплітудних ділянках, зокрема в діапазоні значень $K_{max}=12...40$ МПа·м^{1/2} швидкість збільшується у 1,7-2,5 рази. Проте, на низько- та високоамплітудних ділянках розбіжності між швидкостями незначні, що узгоджується з даними, наведеними в літературних джерелах [1, 4, 5];
- 3) більшість поверхонь зразків уражені не глибокими корозійними ушкодженнями у вигляді язв та поверхневих дефектів;
- 4) металографічний аналіз зразків показав відсутність міжкристалічної корозії, магістральний напрямок росту тріщини орієнтований справа наліво.

Література

1. Пустовой В.Н. Металлоконструкции грузоподъемных машин. Разрушение и прогнозирование остаточного ресурса / В. Н. Пустовой. – М. : Транспорт, 1992. – 256 с.
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. Стрельбицький В.В. Експериментальне дослідження впливу напрацювання та асиметрії циклу на тріщиностійкість сталей порталних кранів / В.В. Стрельбицький, О.О. Немчук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – № 1. – С. 245–248.
4. 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.
5. Романів О.М. Вплив експлуатаційної пошкодженості паропровідної сталі 12Х1МФ на характеристики її тріщиностійкості / О.М. Романів, Г.М. Никифорчин, І.Р. Дзюба // Фіз.-хім. механіка

матеріалів. – 1998. – 34, № 1. – С. 101–104.

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. Pustovoj V.N. Metallokonstrukcii gruzopodemnyh mashin. Razrushenie i prognozirovanie ostatochnogo resursa / V. N. Pustovoj. – M. : Transport, 1992. – 256 s.
2. Nemchuk O.O. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuвання na trishchynostiikist stalei portalnykh kraniv / O.O. Nemchuk, V.V. Strelbitskiy // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 1. – S. 17–20.
3. Strelbitskiy V.V. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuвання ta asymetrii tsyklu na trishchynostiikist stalei portalnykh kraniv / V.V. Strelbitskiy, O.O. Nemchuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2020. – № 1. – S. 245–248.
4. Botvina L.R. Vysokociklovoe ustalostnoe razrushenie malouglerodistoy stali posle eyo dlitel'nogo stareniya / 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.
5. Romaniv O.M. Vplyv ekspluatatsiinoi poshkodzhennosti paroprovidnoi stali 12Kh1MF na kharakterystyky yii trishchynostiikosti / O.M. Romaniv, H.M. Nykyforchyn, I.R. Dziuba // Fiz.-khim. mekhanika materialiv. – 1998. – 34, № 1. – S. 101–104.
6. Kharchenko L.Ie. Diahnostyka vodnevoho makrорозsharuvannya v stintsii hynu truby systemy mahistralnykh hazoprovodiv / L.Ie. Kharchenko, O.Ie. Kunta, O.I. Zvirko, R.S. Savula, Z.A. Duriahina // Fiz.-khim. mekhanika materialiv. – 2015. – № 4. – S. 84–90.
7. Nykyforchyn H.M. Dehradatsiia vlastyvostei stalei mahistralnykh hazoprovodiv uprodovzh yikh sorokarichnoi ekspluatatsii / H.M. Nykyforchyn, O.T. Tsyruľnyk, D.Iu. Petryna, M.I. Hredil // Problemy prochnosty. – 2009. – 41, № 5 (401). – S. 66–72.

Рецензія/Peer review : 18.09.2020 р.

Надрукована/Printed : 04.11.2020 р.