

УДК 621.875.56:539.3:620.17:620.194

ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА КОРОЗІЙНУ ТРИВКІСТЬ СТАЛІ МОРСЬКОГО ПОРТАЛЬНОГО КРАНА

О. О. НЕМЧУК

Одеський національний морський університет

Тензометричним та розрахунковим методами змодельовано експлуатаційне навантаження низки вузлів портального крана і показано узгодженість між результатами оцінювання різними методами напруженого стану поверхні листового прокату. Для цих вузлів визначено ударну в'язкість низьковуглецевої сталі експлуатованого 33 роки крана, а електрохімічним методом – її поляризаційний опір. Не виявлено залежності між ним та експлуатаційним напруженням металу, однак показано чітку кореляцію між механічним та електрохімічним показниками стану сталі: металу з нижчим опором крихкому руйнуванню властивий менший поляризаційний опір. Кореляцію між цими характеристиками можна використовувати для прогнозування експлуатаційної деградації сталей портального крана.

Ключові слова: *портальний кран, низьковуглецева сталь, експлуатаційна деградація, ударна в'язкість, корозійна тривкість.*

Вступ. Тривала експлуатація конструкційних сталей зумовлює втрату їх вихідних механічних властивостей, особливо опору крихкому руйнуванню [1–6], що може ставити під сумнів подальше безпечне використання конструкцій. За впливу на них корозивних середовищ важливою характеристикою стає опірність матеріалу до дії робочих середовищ, яка теж може змінюватися порівняно з вихідними корозійними властивостями [7, 8]. Крім того, знижується опір сталей корозійно-механічному та воднево-механічному руйнуванню [9–11].

До відповідальних конструкцій тривалої експлуатації у корозивно-агресивних середовищах належать морські портальні крани. Специфіка їх механічного стану у циклічному прикладанні робочого навантаження, яке є чинником інтенсифікації деградації матеріалу. Вона проявляється, насамперед, втратою опору крихкому руйнуванню [12]. При цьому тривала експлуатація сталей портального кранів може вплинути і на корозійну тривкість металу. Звідси можна припустити, що зниження не тільки механічних, але і корозійних властивостей залежатиме від рівня навантаження елементів конструкцій, яке різне для різних вузлів портального крана. Мета роботи – оцінити вплив механічного навантаження сталі на деякі характерні вузли тривало експлуатованого морського портального крана і дослідити залежність опору крихкому руйнуванню і корозійної тривкості сталі від її тривалого навантаження.

Методичні аспекти досліджень. З експлуатованого 33 роки крана “Сокіл” виробництва заводу “Кранбау Еберсвальде” (Німеччина) вибрали низку характерних вузлів з профільним прокатом різної товщини t : нижня полиця хобота 16 mm, задня полиця стріли 12 mm, верхня полиця коромисла противаги 10 mm, права стінка колони в районі кронштейна кореневих шарнірів 10 mm, задня стінка колони над машинним відділенням 25 mm. Для кожного з вибраних вузлів виділили дві ділянки, для яких, з одного боку, визначали рівень навантаження, а з

іншого – механічні та електрохімічні властивості. Матеріал конструкції – листова ферито-перлітного класу сталь марки St-38b-2, вітчизняний аналог – сталь СтЗсп.

Розрахунковим та експериментальним тензOMETричним методами [13] визначали розмах напружень $\Delta\sigma_e$ на поверхні листового прокату вибраних вузлів за навантаження крана, близького до експлуатаційного. Схема навантаження моделювала не лише граничну вагу вантажу 32 t на заданому вильоті стріли, але й розгін механізму підйому та його поворот. Цим максимально наближали умови навантаження під час тензOMETрії до граничних експлуатаційних. Оскільки реальне навантаження крана було, очевидно, меншим, то нижчим був і усереднений експлуатаційний рівень напружень. Однак співвідношення між σ_e для різних вузлів крана повинно зберігатися.

Експериментальний метод визначення напружень використали лише для частини зазначених елементів конструкції. Він полягав у зчитуванні інформації з тензодавачів, наклеєних на вертикальних ділянках прокату під кутом 0; 45 і 90° до вибраної осі та розрахунку головних напружень. Тоді за критерієм Мізеса визначали еквівалентні напруження σ_e як визначальні для оцінювання навантаження на поверхні прокату. Розрахунковий метод [14], яким теж оцінювали σ_e , реалізували для всіх досліджуваних вузлів крана.

Характеристикою опору крихкому руйнуванню слугувала ударна в'язкість *KCV*, визначена на стандартних зразках Шарпі з V-подібним надрізом. Зразки вирізали вздовж напрямку вальцювання прокату.

Корозійну активність сталі з огляду на її експлуатаційну деградацію оцінювали поляризаційним опором R_p , який прямопропорційний швидкості корозії. Електрохімічні вимірювання виконували у розчині H_2SO_4 з pH 3, підвищена кислотність якого запобігає утворенню на поверхні сталі оксид-гідроксидних плівок, які спотворюють електрохімічний відгук металевої поверхні. З іншого боку, розчин з такою кислотністю ще не гасить електрохімічний відгук високим корозивним фоном, властивим розчинам з $pH \leq 2$. Будували поляризаційні криві у координатах густина струму поляризації–потенціал поляризації, який змінювали, згідно з методичними рекомендаціями, у діапазоні ± 30 mV відносно потенціалу корозії [15]. R_p визначали графічно, як нахил дотичної до поляризаційної кривої у точці потенціалу корозії.

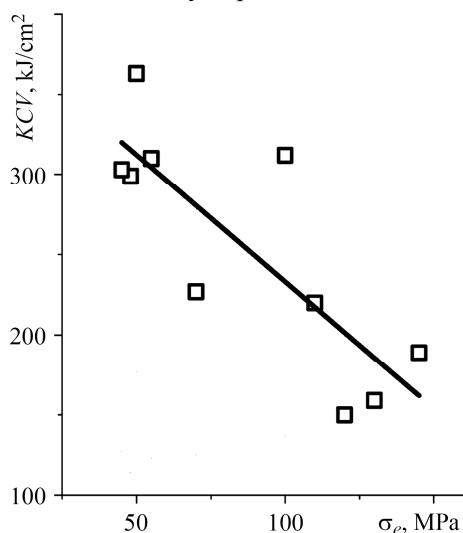


Рис. 1. Залежність *KCV*– σ_e для сталей різних вузлів крана.

Fig. 1. Dependence *KCV*– σ_e for the steels of different crane units.

Результати досліджень та їх аналіз.

Оцінювання напруження σ_e низки відповідальних елементів конструкції крана показало задовільну збіжність результатів, отриманих розрахунковим та експериментальним методами. Це дає підстави використовувати для подальшого аналізу розрахункові результати σ_e , одержані для всіх досліджуваних вузлів крана. При цьому встановлено широкий діапазон зміни σ_e (від 45 до 145 MPa) для однієї модельної схеми навантаження, що вказує на істотні відмінності в експлуатаційних напруженнях для різних вузлів крана. Відповідно можна очікувати і різного ступеня експлуатаційної деградації його сталі, тобто її різних фізико-механічних властивостей. Зазначимо, що для таких конструкцій механічний чинник деградації металу полягає, насамперед, у прикла-

данні циклічних навантажень [12, 13], а саме, розмаху $\Delta\sigma_e$.

Механічні випробиви показали широкий діапазон зміни ударної в'язкості KCV , від 150 до 363 J/cm^2 . Це вказує на розбіжну експлуатаційну деградацію сталі, яку слід пов'язувати з різним напруженням металу різноманітних вузлів крана. Загалом справедливе правило (рис. 1): зі збільшенням розмаху напружень $\Delta\sigma_e$ знижується опір сталі крихкому руйнуванню. Це підтверджує суттєвий вплив робочого циклічного навантаження на експлуатаційну зміну стану металу.

Порівняльний аналіз поляризаційного опору для різноманітних вузлів крана (див. таблицю) свідчить про розбіжну корозійну активність металу в одному середовищі, що можна пояснити його різним станом. Якщо відмінність в експлуатаційному впливі полягала у прикладанні різного розмаху напружень, то слід очікувати кореляції між визначеними значеннями $\Delta\sigma_e$ і тими електрохімічними властивостями, які чутливі до експлуатаційної деградації сталей. До таких характеристик належить саме поляризаційний опір [7, 12].

Напруження, ударна в'язкість та поляризаційний опір сталі різних вузлів крана

№ поз.	Вузол крана	Розмах $\Delta\sigma_e$, МПа		KCV , kJ/cm^2	R_p , $\Omega \cdot \text{cm}^2$
		Експеримент	Розрахунок		
1	Нижня полиця хобота	144	130	159	164
2		114	110	220	175
3	Задня полиця стріли	46	48	299	214
4		51	55	310	202
5	Верхня полиця коромисла	47	45	303	261
6		–	50	363	235
7	Права стінка колони	–	120	150	186
8		142	145	189	241
9	Задня стінка колони	–	70	227	195
10		94	100	312	270

Однак аналіз електрохімічних вимірювань чітко не підтвердив таке припущення. Визначений поляризаційний опір R_p змінився від 164 до 270 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, однак певної закономірності, яка була б пов'язана з експлуатаційними напруженнями $\Delta\sigma_e$, не виявили (рис. 2a). На перший погляд, це суперечить ефективності використання електрохімічних підходів для оцінювання стану сталі тривало експлуатованого порталного крана [12]. Пояснення слід шукати, очевидно, у непрямому зв'язку між характеристиками R_p і $\Delta\sigma_e$. Розмах $\Delta\sigma_e$ впливає на стан металу, який, з одного боку, характеризується механічним показником KCV , а з іншого – електрохімічним R_p [16]. І саме між ними, незважаючи на певний розкид експериментальних результатів, встановлено однозначну кореляційну залежність (рис. 2b): зменшення опору крихкому руйнуванню супроводжується зниженням корозійної тривкості металу. Це підтверджує високу чутливість цього електрохімічного показника до зміни стану металу в результаті його тривалої експлуатації. Відповідно таку залежність можна використовувати для прогнозування ударної в'язкості металу тривало експлуатованого крана.

Щодо відсутності попередньо прогнозованої кореляції між показниками R_p і $\Delta\sigma_e$, то причину слід шукати у значному розкиді експериментальних результатів під час побудови прямолінійних залежностей $KCV-\sigma_e$ (рис. 1) і R_p-KCV (рис. 2b). Однак за їх допомогою можна побудувати залежність $R_p-\Delta\sigma_e$ (пунктирна лінія на рис. 2a), яка і демонструє закономірність зниження корозійної тривкості металу з ростом експлуатаційного навантаження.

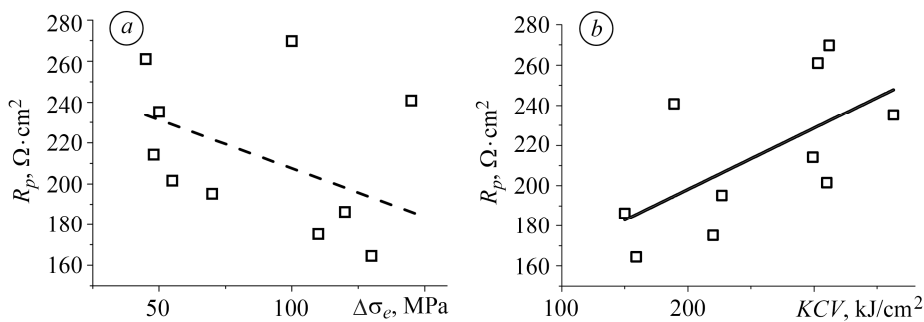


Рис. 2. Залежність поляризаційного опору R_p від розмаху напружень $\Delta\sigma_e$ (a) та ударної в'язкості KCV (b).

Fig. 2. Dependence of polarization resistance R_p on stress range $\Delta\sigma_e$ (a) and impact strength KCV (b).

ВИСНОВКИ

За використання експериментального тензометричного та розрахункового методів проаналізовано можливе експлуатаційне циклічне навантаження металу низки вузлів порталного крана і показано, що воно може відрізнятись втричі. Такі відмінності зумовлюють різний ступінь експлуатаційної деградації сталі, зокрема, її опір крихкому руйнуванню. Електрохімічними вимірюваннями встановлено, що сильніше окрихченому металу властива нижча корозійна тривкість. Побудовану кореляцію між ударною в'язкістю і поляризаційним опором можна використовувати під час неруйнівного контролю поточного стану металу тривало експлуатованого крана.

РЕЗЮМЕ. Тензометрическим и расчетным методами смоделировано эксплуатационное нагружение ряда узлов порталного крана и показано согласованность между результатами оценок разными методами напряженного состояния поверхности листового проката. Для этих узлов определено ударную вязкость низкоуглеродистой стали крана, эксплуатированного 33 года, а электрохимическим методом – ее поляризационное сопротивление. Не выявлено зависимости между ним и эксплуатационным напряжением металла, однако показано четкую корреляцию между механическим и электрохимическим показателями состояния стали: металл с низким сопротивлением хрупкому разрушению имеет более низкое поляризационное сопротивление. Корреляцию между этими характеристиками можно использовать для прогнозирования эксплуатационной деградации сталей порталного крана.

SUMMARY. In-service loading of some units of portal crane was modeled by the strain measurement and calculated methods and an agreement between the results of the stress state evaluation on rolling sheet surface by the different methods was shown. On the other hand, impact strength of low-carbon steel exploited for 33 years and its polarization resistance defined by the electrochemical method were obtained for these units. No dependence between polarization resistance and operated stress of metal was revealed, however a clear correlation between the mechanical and electrochemical parameters of the metal state was shown: the metal of the lower brittle fracture resistance is characterized by the lower polarization resistance. The correlation between these characteristics can be used for prediction of in-service degradation of the portal crane steels.

1. *Degradation of steels used in gas main pipelines during their 40-year operation* / Н. М. Nykyforchyn, О. Т. Tsyruľnyk, D. Yu. Petryna, M. I. Hredil' // *Strength of Materials*. – 2009. – **41**, № 5. – P. 501–505.
2. *Харченко Є. В., Поліщук Л. К., Звірко О. І. Оцінювання експлуатаційної деградації профільної сталі стріли буртоукладника* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2013. – **49**, № 4. – С. 77–82. (Kharchenko E. V., Polishchuk L. K., Zvirko O. I. Estimation of the in-service degradation of steel shapes for the boom of a clamp-forming machine // *Materials Science*. – 2014. – **49**, № 4. – P. 501–507.)

3. *Impact strength of main gas pipeline steel after prolonged operation* / P. O. Maruschak, I. M. Danyliuk, T. Vuherer, R. T. Bishchak // *Metallurgist*. – 2015. – **59**, Issue 3–4. – P. 324–329.
4. *Кречковська Г. В., Студент О. З. Оцінювання деградації сталей парогонів за ударною в'язкістю на зразках з різною геометрією надрізу* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2016. – **52**, № 4. – С. 106–110.
(*Krechkovs'ka H. V., Student O. Z. Determination of the degree of degradation of steels of steam pipelines according to their impact toughness on specimens with different geometries of notches* // *Materials Science*. – 2017. – **52**, № 4. – P. 566–571.)
5. *Features of the microstructural and mechanical degradation of long term operated mild steel* / O. Student, H. Krechkovska, G. Lesiuk, J. Correia // *Int. J. Struct. Integrity*. – 2018. – **9**, № 3. – P. 296–306.
6. *Mechanical analysis at different scales of gas pipelines* / G. Bolzon, B. Rivolta, H. Nykyforchyn, O. Zvirko // *Eng. Failure Analysis*. – 2018. – **90**. – P. 434–439.
7. *Звірко О. І. Електрохімічні методи оцінювання деградації конструкційних сталей тривалої експлуатації* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2016. – **52**, № 4. – С. 26–131.
(*Zvirko O. I. Electrochemical methods for the evaluation of the degradation of structural steels intended for long-term operation* // *Materials Science*. – 2017. – **52**, № 4. – P. 588–594.)
8. *Corrosion degradation of steel of long-term operated gas pipeline elbow with large-scale delamination* / O. I. Zvirko, A. B. Mytsyk, O. T. Tsyurulnyk, G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2016. – **52**, № 6. – С. 104–108.
(*Corrosion degradation of steel of an elbow of gas pipeline with large-scale delamination after long-term operation* / O. I. Zvirko, A. B. Mytsyk, O. T. Tsyurulnyk, G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn // *Materials Science*. – 2017. – **52**, № 6. – P. 861–865.)
9. *Corrosion and stress corrosion cracking of exploited storage tank steel* / A. Zagorski, H. Matysiak, O. Tsyurulnyk, O. Zvirko, H. Nykyforchyn, and K. Kurzydowski // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2004. – **40**, № 3. – С. 113–117.
(*Corrosion and stress corrosion cracking of exploited storage tank steel* / A. Zagorski, H. Matysiak, O. Tsyurulnyk, O. Zvirko, H. Nykyforchyn, and K. Kurzydowski // *Materials Science*. – 2004. – **40**, № 3. – P. 421–427.)
10. *Analysis and mechanical properties characterization of operated gas main elbow with hydrogen assisted large-scale delamination* / H. Nykyforchyn, O. Zvirko, O. Tsyurulnyk, N. Kret // *Eng. Failure Analysis*. – 2017. – **82**. – P. 364–377.
11. *Метод лабораторної деградації конструкційних сталей* / О. Т. Цирульник, Н. В. Крет, В. А. Волошин, О. І. Звірко // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2017. – **53**, № 5. – С. 85–93.
(*A procedure of laboratory degradation of structural steels* / О. Т. Цирульник, Н. В. Крет, В. А. Волошин, О. І. Звірко // *Materials Science*. – 2018. – **53**, № 5. – P. 674–683.)
12. *Пустовой В. М., Рещенко О. І., Звірко О. І. Вплив тривалого циклічного деформування на електрохімічну поведінку сталей морських поргальних кранів* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2015. – **51**, № 1. – С. 111–115.
(*Pustovoi V. M., Reshchenko I. O., Zvirko O. I. Influence of long-term cyclic deformation on the electrochemical behavior of steels of marine gantry cranes* // *Materials Science*. – 2015. – **51**, № 1. – P. 125–130.)
13. *Немчук А. О., Стариков М. А. Определение остаточного ресурса металлоконструкций козлового крана* // *Тр. Одесск. политехн. ун-та*. – 2008. – Вып. 2 (30). – С. 36–39.
14. *Немчук А. О., Стариков М. А. Оценка работоспособности крановых металлоконструкций на основе численных методов* // *Подъемные сооружения. Специальная техника*. – 2006. – Вып. 7. – С. 30–31.
15. *Stern M. A method for determining corrosion rates from linear polarization data* // *Corrosion*. – 1958. – **14**, № 9. – P. 440–444.
16. *Немчук О. О. Особливості діагностування технічного стану сталей портового перевантажувального обладнання* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2017. – **53**, № 6. – С. 116–118.
(*Nemchuk O. O. Specific features of the diagnostics of technical state of steels of the port reloading equipment* // *Materials Science*. – 2018. – **53**, № 6. – P. 875–878.)

Одержано 24.05.2018