

УДК 621.875.5:620.193

**В. Пустовой¹, докт. техн. наук; І. Рещенко²;
О. Звірко³, канд. техн. наук**

¹Одеський національний морський університет, Одеса

²ТОВ «РЕМТЕХМОРПОРТ», Одеса

³Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України

ЕЛЕКТРОХІМІЧНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ МОРСЬКИХ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ

Резюме. Досліджено загальні закономірності експлуатаційної деградації механічних та електрохімічних властивостей сталей морських порталних кранів. Виявлено істотне зниження опору крихкому руйнуванню тривало експлуатованих сталей, що необхідно враховувати при експертизі технічного стану кранів. Показано, що серед електрохімічних характеристик достатньо чутливим до експлуатаційних змін у тривало експлуатованих сталях є поляризаційний опір, який може слугувати інформативним параметром деградації матеріалу впродовж його експлуатації. Встановлено кореляцію між змінами ударної в'язкості та поляризаційного опору сталей кранів, спричиненими їх експлуатаційною деградацією. Запропоновано для неруйнівної діагностики технічного стану сталей морських порталних кранів застосовувати електрохімічний метод. Розроблено портативну електрохімічну комірку, адаптовану для визначення електрохімічних властивостей сталей у польових умовах, за оцінками яких можна прогнозувати їх опір крихкому руйнуванню.

Ключові слова: порталні крани, експлуатаційна деградація, механічні властивості, електрохімічні характеристики, неруйнівна діагностика.

V. Pustovoi, I. Reshchenko, O. Zvirko

ELECTROCHEMICAL METHOD OF CONTROL of IN-SERVICE DEGRADATION of THE MARINE PORTAL CRANES STEELS MECHANICAL PROPERTIES

Summary. At the assessment of the technical state of marine port structures it is important not only to detect in-service damages, but also to evaluate current physico-mechanical properties of the long-term operated steels. The presence of cyclic mechanical loading and marine corrosive environment is the peculiarity of the service conditions of the port structures. This peculiarity is an essential factor in reducing of metal plasticity and, consequently, lowering resistance to brittle fracture. On the other hand, the change of metal state as a result of long-term service causes changing the electrochemical characteristics of metal-environment system.

The paper is devoted to a finding general regularities of the mechanical properties operational degradation of portal structures steels and electrochemical parameters, which are sensitive to in-service changes in a metal, building correlation between them; and developing on this basis the engineering approach of non-destructive diagnostics of the technical state of portal cranes steels.

The general regularities of the operational degradation of mechanical and electrochemical properties of marine portal cranes steels were studied. A significant reduction of brittle fracture resistance of long-term operated steels was found that should be taken into account at an assessment of their technical state. It was shown, that polarization resistance among the electrochemical characteristics is sufficiently sensitive to in-service changes in long-term operated steels, which can serve as an informative parameter of the material degradation during cranes operation. The correlation between changes in impact strength and polarization resistance of portal steels, caused their operational degradation, is established. The electrochemical method was proposed to use for non-destructive diagnostics of steels technical state of marine portal cranes. The portable electrochemical cell adapted to determine the electrochemical properties of steels in the field conditions, according to which their resistance to brittle fracture can be predicted was developed.

Key words: portal cranes, operational degradation, mechanical properties, electrochemical characteristics, non-destructive diagnostics.

Вступ. Значна частина морських портових конструкцій вже вичерпала свій запланований ресурс безпечної експлуатації, тому особливо актуальні питання експертизи їх технічного стану. При її проведенні важливо не тільки виявляти експлуатаційні дефекти, але й оцінювати поточні фізико-механічні властивості тривало експлуатованого металу. Такі підходи використовують останнім часом при експертизі стану обладнання в енергетиці [1], нафтохімії [2], трубопровідному транспорті [3–5], авіапромисловості [6], а також металургії [7]. Загальним висновком таких досліджень є істотне погіршення вихідних характеристик пластичності та, особливо, характеристик опору крихкому руйнуванню.

Особливістю умов експлуатації портових конструкцій є наявність циклічної складової механічного навантаження та наявність корозивно агресивного морського середовища, що слугують вагомим чинником вичерпування пластичності металу і, відповідно, зниження опору крихкому руйнуванню. З іншого боку, зміна стану металу в результаті його тривалої експлуатації спричиняє також зміну електрохімічних характеристик системи метал–середовище, що використовують для розроблення методів неруйнівного контролю поточного стану механічних властивостей [8,9].

Мета роботи – виявити загальні закономірності експлуатаційної деградації механічних властивостей сталей вантажних портових конструкцій та електрохімічні показники, чутливі до експлуатаційних змін у металі, побудувати кореляційні залежності між ними і на цій основі запропонувати інженерний метод неруйнівного контролю стану порталних кранів.

Методика експериментальних досліджень. Об'єкти досліджень – порталні крани типу «Альбрехт», «Ганц» та «Сокіл», виготовлені з листової сталі типу St 38b-2 та експлуатовані впродовж 36...45 років: крани «Альбрехт» (A1, A2, A3 після 45, 38 та 40 років експлуатації відповідно), «Ганц» (Г) після 39 років експлуатації, «Сокіл» (С1 та С5 – після 39 та 36 років експлуатації відповідно). Визначали стандартні механічні характеристики розтягом циліндричних зразків та ударну в'язкість KCV на зразках Шарпі. Результати, отримані за випроб експлуатованих сталей, порівнювали з їх вихідними властивостями, наведеними у сертифікатах заводу-виготовлювача. Зразки вирізали з різних характерних ділянок конструкцій (кронштейн колони, стріла, коромисло противаги, хобот) уздовж напрямку вальцювання листового матеріалу. Мінімумально допустимі значення механічних характеристик за розтягу такі: $\sigma_{0,2} = 240$ МПа, $\sigma_B = 380$ МПа, $\delta = 25$ %.

Електрохімічні дослідження проводили на потенціостаті IPC-Pro. Базові електрохімічні характеристики сталей (стаціонарний потенціал E_{st} та густину струму корозії i_{cor}) визначали з поляризаційних кривих, знятих у потенціодинамічному режимі (швидкість розгортки потенціалу 1 мВ/сек). Використовували триелектродну комірку з насиченим хлоридсрібним електродом порівняння та допоміжним платиновим електродом. За корозивне середовище слугував розчин 0,3% NaCl за природної аерації. Електрохімічні властивості експлуатованих сталей порівнювали з характеристиками сталі Ст3сп у вихідному стані (вітчизняний аналог сталі St 38b-2). Поляризаційний опір R_p розраховували графічно-аналітичним методом за рівнянням Стерна–Гірі [10]

$$\Delta E / \Delta i = R_p = K / i_{cor},$$

де $K = \frac{b_a \times b_c}{2.3 \times (b_a + b_c)}$ – константа, b_a і b_c – константи Тафеля анодної та катодної реакцій.

Результати досліджень. *Закономірності експлуатаційної деградації механічних властивостей сталей.*

Тривала експлуатація порталних кранів вплинула на механічні характеристики сталей порівняно із показниками вихідного стану (табл.1). Для крана «Ганц» знижується границя плинності, однак її значення не опускаються нижче

гранично допустимого рівня. Границя міцності та пластичність не зазнали істотних змін, але ударна в'язкість сталі кронштейну колони близьке до мінімального у вихідному стані, а для сталі стріли – навіть нижче.

Для кранів типу «Альбрехт» незалежно від терміну експлуатації границя плинності коромисла противаги нижча від значення у вихідному стані, а для крана **A2** навіть менша від гранично допустимого рівня (230 МПа проти 240 МПа). Для цього ж крана спостерігається також падіння границі міцності сталей всіх досліджених вузлів. Для всіх інших вузлів характеристики міцності сталей практично не змінюються. Однак виявлено зниження *KCV* сталей практично усіх вузлів, особливо для крана **A3**, причому за незначних змін характеристик пластичності. Зазначимо, що випадки підвищення ударної в'язкості пов'язані з переорієнтацією тріщини в напрямі вальцювання, що й визначало підвищені енергетичні затрати, а не покращення стану металу внаслідок експлуатації.

Таблиця 1

Механічні властивості сталей порталних кранів

Умовне позначення і тип портових конструкцій	Термін експлуатації, роки	Досліджувані вузли	Механічні властивості				
			$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	Ψ , %	δ , %	<i>KCV</i> , Дж/см ²
Г – Кран «Ганц»	0	–	269	426	–	31	161
	39	Кронштейн колони	238	423	68,4	31,8	164
		Стріла	256	426	63,9	29,9	126
A1 – Кран «Альбрехт»	0	–	287	443	–	26	120
	45	Коромисло противаги	247	490	64	29,2	101
		Стріла	294	476	68,9	29,9	181
A2 – Кран «Альбрехт»	0	–	287	538	–	31	109
	38	Коромисло противаги	230	415	67	31	163
		Хобот	321	497	66	27	143
		Стріла	289	451	63	30	131
A3 – Кран «Альбрехт»	0	–	300	474	–	32	123
	40	Коромисло противаги	287	473	63	30	181
		Хобот	320	523	58	27	–
		Стріла	333	478	64	28	78

Таким чином, тривала експлуатація досліджуваних порталних кранів спричиняє, в першу чергу, істотне зниження опору крихкому руйнуванню, що необхідно враховувати при експертизі їх технічного стану.

Обґрунтування використання електрохімічних підходів для прогнозування деградації механічних властивостей сталей.

Деградація механічних властивостей сталей порталних кранів внаслідок їх тривалої експлуатації супроводжується погіршенням їх електрохімічних властивостей (рис.1, табл.2). Зокрема, стаціонарний потенціал експлуатованих сталей **A1**, **C1**, **C5** характеризується від'ємнішим значенням (-650, -660 та -660 мВ відповідно) порівняно зі стаціонарним потенціалом сталі у вихідному стані (-640 мВ). Водночас густина струму корозії сталей тривало експлуатованих порталних кранів (**A1**, **C1**, **C5**) є вищою (на $\approx 10...20\%$) порівняно з i_{cor} неексплуатованої сталі СтЗсп, а їх поляризаційний опір – нижчим. Таким чином, тривала експлуатація портових вантажних конструкцій

спричиняє погіршення не лише механічних характеристик металу, зокрема опору крихкому руйнуванню – ударної в'язкості (табл.1 та 2), а також його електрохімічних властивостей, а саме – стаціонарного потенціалу, густини струму корозії, поляризаційного опору. Отже, достатньо чутливим до експлуатаційних змін у тривало експлуатованих сталях порталних кранів є поляризаційний опір, який може слугувати інформативним параметром деградації матеріалу впродовж його експлуатації.

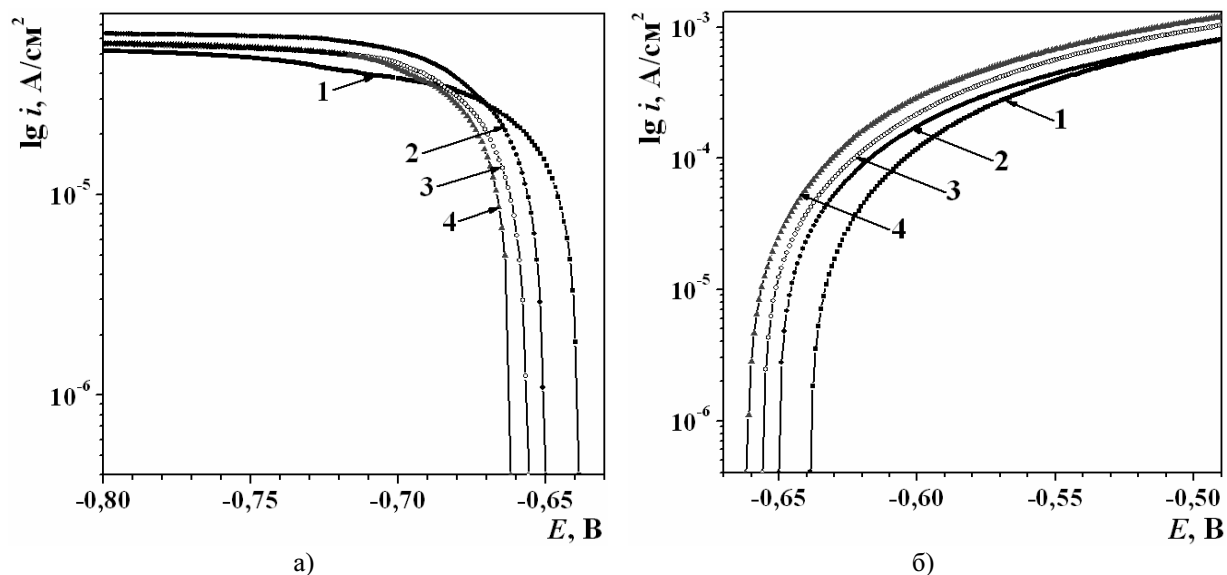


Рисунок 1. Потенціодинамічні поляризаційні катодні (а) та анодні (б) криві сталей у 0,3%-му розчині NaCl: 1 – сталь СтЗсп; 2 – А1; 3 – С1; 4 – С5

Figure 1. Potentiodynamic polarization cathodic (a) and anodic (б) curves of steels in 0.3% NaCl solution: 1 – СтЗсп, 2 – А1, 3 – С1, 4 – С5

Таблиця 2

Вплив тривалої експлуатації на електрохімічні властивості та ударну в'язкість сталей у 0,3%-му розчині NaCl

Матеріал	Термін експлуатації, роки	E_{st} , мВ	i_{cor} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	R_p , Ом·см ²	KCV , Дж/см ²
СтЗсп	0	-640	14,8	925,6	109
А1 – Кран «Альбрехт»	45	-650	16,7	817,7	86
С1 – Кран «Сокіл»	39	-660	16,1	848,1	97
С5 – Кран «Сокіл»	36	-660	17,5	780,3	80

Визначення електрохімічних характеристик сталі можна проводити й у польових умовах неруйнівним способом. Тому, враховуючи подібність тенденцій зниження поляризаційного опору та ударної в'язкості сталі в процесі її тривалої експлуатації, перспективним є можливість прогнозування поточного опору крихкому руйнуванню сталей тривало експлуатованих порталних кранів за зміною їх поляризаційного опору. Для практичної реалізації такої можливості необхідно є кореляція між ударною в'язкістю та поляризаційним опором.

На рис.2 представлена кореляційна залежність між відносними змінами ударної в'язкості та поляризаційного опору сталей типу St 38b-2, спричиненими їх експлуатаційною деградацією. Таким чином, з огляду неруйнівної діагностики технічного стану сталей морських порталних кранів перспективним для контролю

експлуатаційної деградації їх механічних властивостей є запропонований електрохімічний метод.

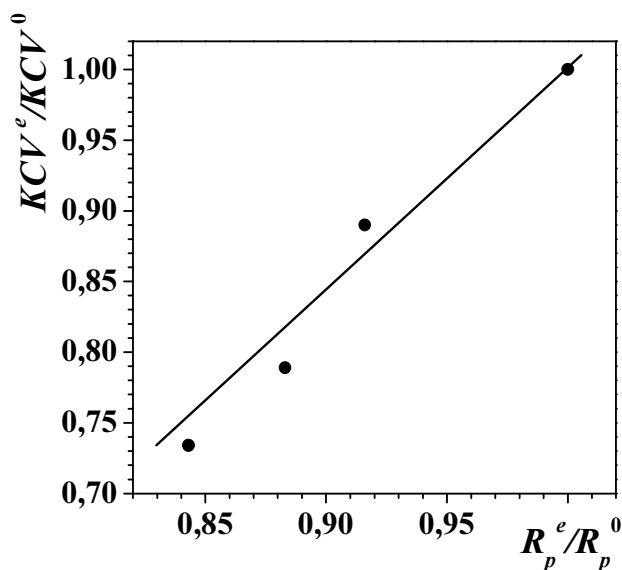


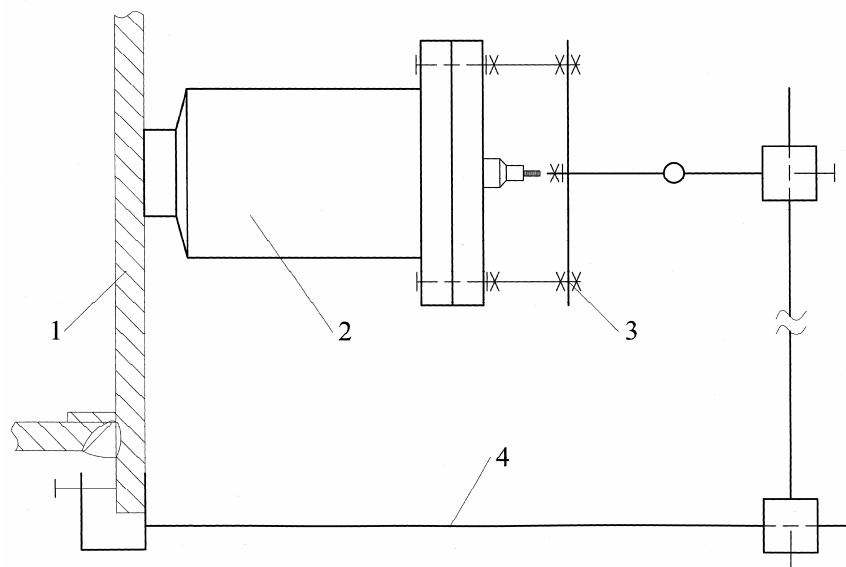
Рисунок 2. Кореляційна залежність між відносними змінами ударної в'язкості та поляризаційного опору (відношення поляризаційного опору деградованого матеріалу R_p^e до поляризаційного опору сталі у вихідному стані R_p^0) для тривало експлуатованих сталей St 38b-2

Figure 2. Correlation between the relative changes in impact toughness (the ratio of impact strength of degraded material KCV^e to impact strength of material in the initial state KCV^0) and polarization resistance (the ratio of polarization resistance of degraded material R_p^e to the polarization resistance of steel in the initial state R_p^0) for long-term exploited St 38b-2 steels

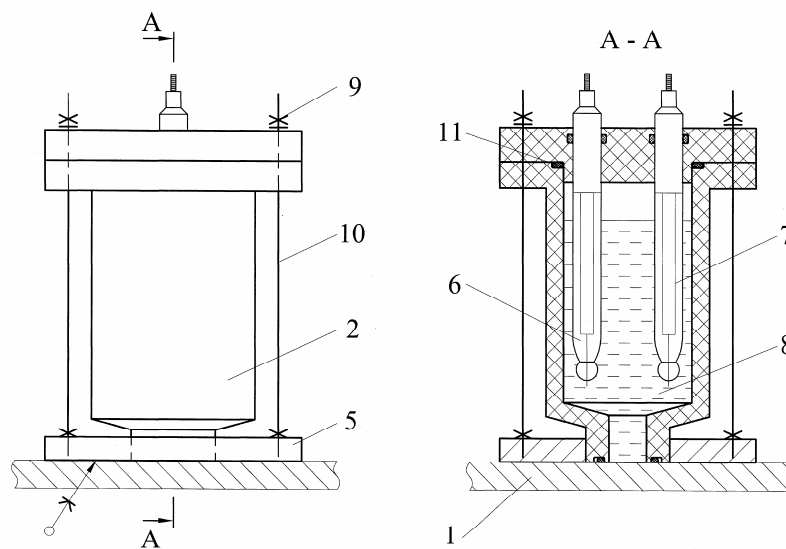
Інженерне вирішення електрохімічних вимірювань на експлуатованих об'єктах.

Для визначення електрохімічних властивостей в польових умовах, за оцінками яких можна прогнозувати опір крихкому руйнуванню експлуатованих сталей, розробили портативну адаптовану електрохімічну комірку (2), яка за допомогою шарнірної підвіски (4) або монтажної шайби (5) кріпиться до досліджуваної поверхні ділянки крана (рис.3).

Електрохімічною коміркою служить фторопластовий циліндр, у якому є отвір діаметром 16 мм, що через гумову прокладку щільно притискається до поверхні металевої конструкції досліджуваного крана й через який корозійне середовище контактує з металом. До корпуса комірки приєднується кришка з органічного скла, яка має п'ять отворів. Два отвори призначені для електрода порівняння та допоміжного електрода, а три отвори – для потрапляння корозійного розчину в комірку і виходу повітря при заповненні які закриваються фторопластовими корками. Електрохімічна комірка є герметичною і може встановлюватись у горизонтальному й вертикальному положеннях або під нахилом (крім стельових положень).



a)



б)

Рисунок 3. Кріплення портативної електрохімічної комірки до досліджуваної ділянки крана шарнірною підвіскою (а) або монтажною шайбою (б): 1 – досліджувана ділянка; 2 – електрохімічна комірка; 3 – притисний пристрій; 4 – шарнірна підвіска; 5 – монтажна шайба; 6 – допоміжний електрод; 7 – електрод порівняння; 8 – корозійний розчин; 9 – гайка з шайбою; 10 – шпилька; 11 – гумова прокладка

Figure 3. Mounting of the portable electrochemical cell to the investigated area of crane by hinged support (a) or by mounting washer (b): 1 – investigated area; 2 – electrochemical cell; 3 – clamping device; 4 – hinged support; 5 – mounting washer; 6 – auxiliary electrode; 7 – reference electrode; 8 – corrosive solution; 9 – nut with washer; 10 – pin; 11 – rubber gasket

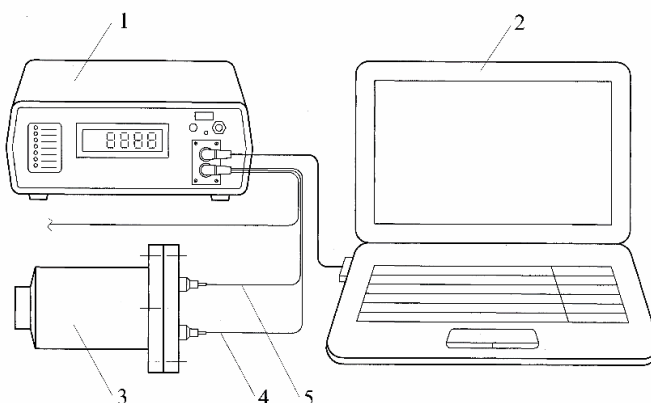


Рисунок 4. Портативний електрохімічний комплекс для визначення електрохімічних властивостей в польових умовах: 1 – потенціостат; 2 – комп’ютер; 3 – електрохімічна комірка; 4 – допоміжний електрод; 5 – електрод порівняння

Figure 4. Portable electrochemical system for determining the electrochemical properties in the field: 1 – potentiostat; 2 – computer; 3 – electrochemical cell; 4 – auxiliary electrode; 5 – reference electrode

Для визначення електрохімічних властивостей в польових умовах використовується портативний електрохімічний комплекс (рис. 4), який складається з потенціостата (1), комп’ютера з програмним забезпеченням (2) та електрохімічної комірки (3) з електродом порівняння (4) і допоміжним електродом (5).

Висновки. Тривала експлуатація морських порталних кранів спричиняє істотне зниження опору крихкому руйнуванню, що необхідно враховувати при експертизі їх технічного стану. Достатньо чутливим до експлуатаційних змін у тривало експлуатованих сталях порталних кранів серед електрохімічних характеристик є поляризаційний опір, який може слугувати інформативним параметром деградації матеріалу впродовж його експлуатації. Встановлено кореляцію між змінами ударної в’язкості та поляризаційного опору сталей кранів, спричиненими їх експлуатаційною деградацією. Для неруйнівної діагностики технічного стану сталей морських порталних кранів запропоновано застосовувати електрохімічний метод. Розроблено портативну електрохімічну комірку, адаптовану для визначення електрохімічних властивостей деградованих сталей у польових умовах, за оцінками яких можна прогнозувати їх опір крихкому руйнуванню.

Conclusions. Long-term operation of marine portal cranes causes a significant reduction of brittle fracture resistance that must be taking into account at the assessment of their technical state. The polarization resistance among the electrochemical characteristics is sufficiently sensitive to in-service changes in the long-term operated steels of portal cranes, which can serve as an informative parameter of the material degradation during its operation. The correlation between changes in impact strength and polarization resistance of gantry steels, caused their operational degradation, is established. The electrochemical method is proposed to use for non-destructive diagnostics of technical state of steels of marine portal cranes. The portable electrochemical cell adapted to determine the electrochemical properties of degraded steels in the field according to which we can predict their resistance to brittle fracture is developed.

Список використаної літератури

1. Student, O.Z. Influence of the long-term operation of 12Kh1M1F steel from different zones of a bend of steam pipeline of a thermal power plant on its mechanical characteristics [Text] / O.Z. Student, L.M. Svirs’ka, I.R. Dzioba // Materials Science. – 2012. – 48, № 2. – P.239–246.

2. Creep of degraded 2.25 Cr–Mo steel in hydrogen [Text] / L.O. Babii, O.Z. Student, A. Zagorski, A.D. Markov // Materials Science. – 2007. – 43, № 5. – P.701–707.
3. Крижанівський, Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: Наук.-техн. пос. у 3-х т. [Текст] / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин; за ред. В.В. Панасюка. – Т.1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – Івано-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2011. – 458 с. – Т.2: Деградація нафтопроводів та резервуарів і її запобігання. – 2011. – 448 с. – Т.3: Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання. – 2012. – 432 с.
4. Чувильдеев, В.Н. Влияние старения на эксплуатационные свойства сталей магистральных газопроводов [Текст] / В.Н. Чувильдеев // Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: сб. трудов науч.-практ. Семинара; под общ. ред. Б.В. Будзуляка, А.Д. Седых. – Нижний Новгород: Университетская книга, 2006. – С.18–67.
5. Krasovskii, A.Ya. Stress-corrosion failures of main pipelines [Text] / A.Ya. Krasovskii, I.V. Lokhman, I.V. Orynyak // Strength of Materials. – 2012. – Vol. 44, № 2. – P.129–143.
6. Ostash, O.P. Degradation of materials and fatigue durability of aircraft constructions after long-term operation [Text] / O.P. Ostash, I.M. Andreiko, Yu.V. Holovatyuk // Materials Science. – 2006. – Т.42, №4. – P.427–429.
7. Ясній, П.В. Ролики МБЛЗ: деградація і тріщиностійкість матеріалів [Текст] / П.В. Ясній, П.О. Марущак. – Джура, 2009. – 232 с.
8. Tsyurul'nyk, O.T. Application of the electrochemical methods in the diagnostics of the engineering state of structural materials [Text] / O.T. Tsyurul'nyk // Materials Science. – 2014. – Т.49, № 4. – P.449–460.
9. Kharchenko, E.V. Estimation of the in-service degradation of steel shapes for the boom of a clamp-forming machine [Text] / E.V. Kharchenko, L.K. Polishchuk, O.I. Zvirko // Materials Science. – 2014. – Т.49, №4. – P.501–507.
10. Шрайер, Л.Л. Коррозия: справочник [Текст] / Л.Л. Шрайер. – М.: Металлургия, 1981. – 632 с.

Отримано 02.03.2015