

УДК 621.875:620.19

## ВПЛИВ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙНИХ УМОВ НА УДАРНУ В'ЯЗКІСТЬ ЕКСПЛУАТОВАНОЇ СТАЛІ ПОРТАЛЬНОГО КРАНА

П. О. СЕМЕНОВ

*Одеський національний морський університет*

Через експлуатацію порталних кранів сталі основних утримувальних конструкційних елементів втрачають вихідні механічні властивості. Тому оцінено експлуатаційну деградацію сталі крана з урахуванням впливу на опір крихкому руйнуванню екстремальних швидкостей її деформування, зумовлених ударним навантаженням елементів конструкції. Визначено ударну в'язкість зразків Шарпі, вирізаних уздовж і поперек напрямку вальцювання листового матеріалу. Порівняно два стани металу: експлуатаційно деградованого та з додатковим високошвидкісним деформаційним ударним навантаженням. Встановлено суттєве зниження опору крихкому руйнуванню зразків, вирізаних з ділянок поблизу високошвидкісного деформування металу.

**Ключові слова:** *портальний кран, вальцьована сталь, експлуатаційна деградація, ударна в'язкість, високошвидкісне деформування.*

Operation of portal cranes causes a loss of initial mechanical properties of the steels of the main retaining structural elements. Therefore, the operational degradation of crane steel considering the influence of extreme metal deformation rates on the brittle fracture resistance, caused by the impact load of structural elements, is assessed. The impact toughness of the Charpy specimens cut longitudinally and transversally relative to the rolling direction of the sheet material is determined. Two metal states are compared: operational degraded and subjected to an additional high-speed deformation by impact loading. A significant decrease in the brittle fracture resistance of specimens cut out from the areas near high-speed metal deformation is found.

**Keywords:** *portal crane, rolled steel, operational degradation, impact toughness, high speed deformation.*

**Вступ.** Експлуатаційна деградація вальцьованих сталей морських портових конструкцій зумовлена інтенсивним циклічним навантаженням, тому стан металу найчастіше оцінюють, аналізуючи його втомні властивості [1–5]. Однак не рідко не показники втомної міцності, а опору крихкому руйнуванню виявляються чутливішими для визначення поточного стану металу, навіть, якщо втрата вихідних властивостей викликана циклічним навантаженням. Серед них – ударна в'язкість [6–14], в'язкість руйнування та втомний ріст тріщини [15–23], а також опір водневій крихкості [24]. Причина відмінностей у чутливості механічних властивостей до деградації сталей внаслідок циклічного навантаження – різний вплив деформаційного зміцнення металу на втомну міцність та опір крихкому руйнуванню: зростання опору втомному та послаблення крихкому руйнуванню. Оскільки механічні властивості сталей найчастіше оцінюють за ударною в'язкістю, то їй, як правило, віддають перевагу.

Останнім часом морські портові конструкції України зазнають екстремального високошвидкісного деформаційного впливу внаслідок бойових дій, що може додатково негативно впливати на механічні властивості конструкційних сталей,

зокрема, ударну в'язкість. Можна припустити, що не звичайне, а саме швидкісне деформування металу слід розглядати як чинник додаткової його деградації. Це логічно впливає з окрихчення металу внаслідок ударного навантаження зразків, на що вказує ударна в'язкість. Водночас високошвидкісне навантаження елементів конструкцій за екстремальних умов також запобігатиме деформуванню металу як чинника релаксації напружень. Тому не виняток зміна стану металу – його окрихчення, якщо врахувати, з одного боку, утворення високих напружень, а з іншого – відсутність їх релаксації деформаційним способом.

Нижче за ударною в'язкістю оцінено деградацію конструкційної вальцьованої сталі тривало експлуатованого порталного крана через екстремальний деформаційний вплив.

**Методики випроб.** Об'єкт досліджень – порталний кран типу “Альбрехт” виробництва заводу Кранбау Еберсвальде (Німеччина) після 54 років експлуатації в морському порту, конструкційний елемент – поздовжній пояс хобота стріли, виготовлений з листової сталі товщиною 10 mm. Вивчали метал ділянок *A* і *B* (рис. 1*a*), матеріал – низьковуглецева сталь St38-b2 феритно-перлітного класу (аналог сталі Ст3сп).

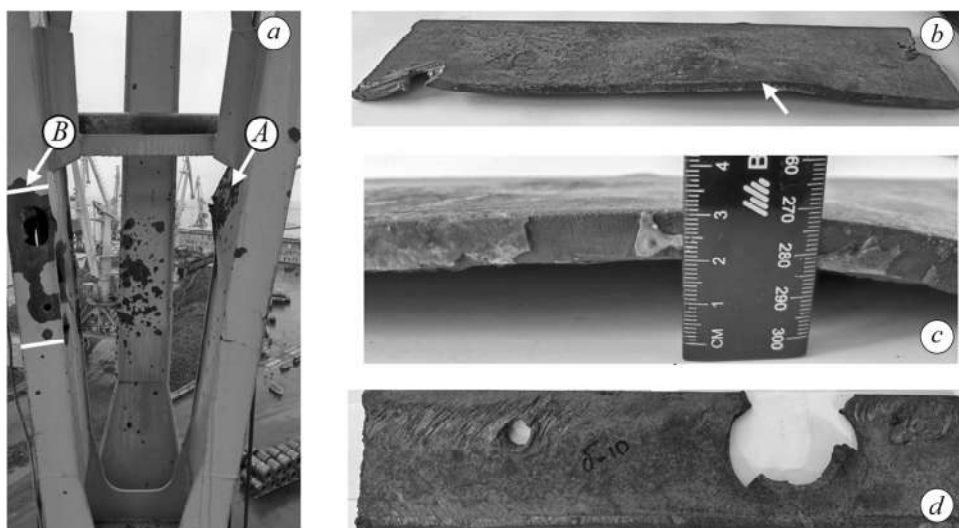


Рис. 1. Фрагмент порталного крана з ураженнями (*a*) та його ділянок *A* (*b*, *c*) і *B* (*d*), вирізаних для досліджень. Стрілка на рис. 1*b* вказує на макроділянку деформування.

Fig. 1. A fragment of the portal crane with damages (*a*) and portal crane sections *A* (*b*, *c*) and *B* (*d*) cut out for the research. The arrow in Fig. 1*b* indicates a macroarea of deformation.

Ділянки *A* і *B* крана зазнали різного екстремального деформаційного впливу. Перша – інтенсивно деформована, про що свідчить її прогин (рис. 1*c*). Зазначимо, що сам факт деформування металу ще не інформує про його швидкість, а це важливо через можливий вплив саме швидкості навантаження на опір крихкому руйнуванню. На ділянці *B* виявили отвори від куль та осколків і спричинені ними осередки руйнування (рис. 1*d*). Тут не було сумнівів про високошвидкісне, співмірне з ударним, деформування металу поблизу цих ушкоджень.

Методика експериментів полягала у порівняльному оцінюванні ударної в'язкості зразків Шарпі з ділянок у зоні екстремального деформаційного впливу та з віддалених від неї. Для її реалізації розробили схему вирізання зразків (рис. 2). Взяли до уваги, що вальцьованим сталям притаманна анізотропія властивостей [6, 7, 12, 25], а їх тривала експлуатація може спричинити інтенсивне розшаруван-

ня вздовж напрямку вальцювання [26, 27], особливо це стосується листової сталі портових конструкцій [27]. Тому важливо випробовувати як поздовжні, так і поперечні до напрямку вальцювання зразки [9–11], кількість яких обмежена через специфіку вирізання з листів після екстремального деформаційного впливу.



Рис. 2. Схема вирізання поздовжніх і поперечних до напрямку вальцювання (вказано стрілкою) зразків Шарпі з ділянок *A* (а) та *B* (б) на віддалі (I) та поблизу (II) екстремального деформаційного впливу.

Fig. 2. A scheme of cutting out longitudinal and transversal to the rolling direction (shown by an arrow) Charpy specimens from sections *A* (a) and *B* (b) distant (I) and near (II) extreme deformation influence.

**Результати та їх обговорення.** Зазначимо, насамперед, особливо низьку ударну в'язкість зразків з ділянки *B*, вирізаних з віддалених від екстремального деформаційного впливу зон (див. таблицю): для поздовжніх  $KCV = 84 \dots 90$ , а для поперечних  $31 \dots 35 \text{ J/cm}^2$ . Ці відмінності використовують також як ознаку деградації сталей [10, 11]. У нашому випадку трикратна різниця додатково підтверджує суттєву експлуатаційну зміну стану металу, яку посилили відчутніші відмінності значень  $KCV$  зразків з ділянки *A*, а також вирізаних подалі від ділянки екстремального деформаційного впливу:  $144 \text{ J/cm}^2$  для поздовжніх зразків проти 27 для поперечних. Якщо для оцінювання експлуатаційної деградації вальцьованих сталей брати до уваги результати випроб поперечних зразків, як зазначено раніше [11], то принципових відмінностей у її визначенні для металу обох ділянок не буде.

Раніше [9] для порталного крана подібної конструкції на основі експериментально-розрахункового методу побудували залежності  $KCV$  металу різних його вузлів від амплітуди циклічної компоненти напружень  $\Delta\sigma_c$  під час експлуатації: зростання напружень спричиняло зниження опору крихкому руйнуванню. Отримані результати збагатили такі залежності новими оцінками ударної в'язкості (рис. 3), які вказують на особливо високий ступінь експлуатаційної деградації металу. Зокрема, в праці [9] ударна в'язкість  $KCV$  поздовжніх зразків змінювалася в діапазоні  $150 \dots 363$ , а поперечних – у межах  $45 \dots 177 \text{ J/cm}^2$ .

### Ударна в'язкість KCV зразків

Ділянки	№ зразка (позначення див. рис. 2)	Близькість до ділянки екстремального деформування (див. рис. 2)	KCV, J/cm <sup>2</sup>	Усереднене значення KCV, J/cm <sup>2</sup>
A	4, 5, 6 / 1, 2, 3	I	148; 153; 130 / 28; 27; 26	144 / 27
	10, 11 / 7, 8, 9	II	58; 54 / 26; 31; 20	56 / 27
B	3, 4 / 1, 2	I	84; 90 / 31; 35	87 / 33
	7, 8 / 5, 6	II	55; 58 / 25; 21	57 / 23

**Примітка:** в чисельнику – результати випроб поздовжніх зразків, у знаменнику – поперечних.

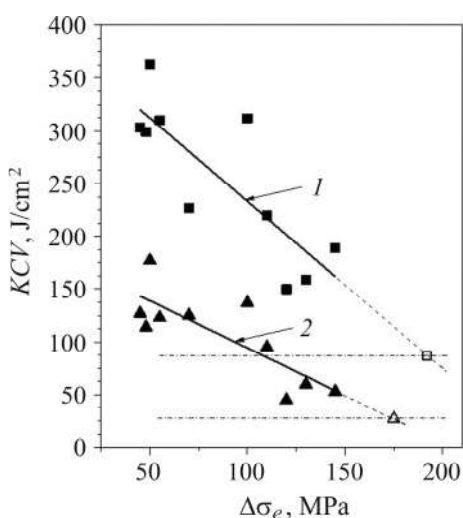


Рис. 3. Залежність ударної в'язкості KCV від амплітуди циклічної компоненти напружень  $\Delta\sigma_e$  для поздовжніх (1) і поперечних (2) зразків з урахуванням результатів праці [9] та отриманих.

Fig. 3. Dependence of impact toughness KCV on amplitude of the cyclic stress component  $\Delta\sigma_e$  for longitudinal (1) and transversal (2) specimens, taking into account the data of the work [9] and the obtained results.

За залежностями KCV– $\Delta\sigma_e$  (рис. 3), опираючись на нові значення ударної в'язкості, усереднені для ділянок A і B, можна прогнозувати амплітуду циклічних напружень, за якої досягалися б такі екстремально низькі значення опору крихкому руйнуванню, особливо для поперечних зразків. Екстраполяція нових результатів (мінімальних значень KCV експлуатаційно деградованої сталі) на раніше отримані залежності KCV– $\Delta\sigma_e$  засвідчила, що ударна в'язкість 87 J/cm<sup>2</sup> для поздовжніх зразків досягається, якщо  $\Delta\sigma_e \sim 190$  МПа, а для поперечних 27 J/cm<sup>2</sup> при  $\sim 175$  МПа. Значення амплітуди напружень  $\Delta\sigma_e$  збігаються, що дає підстави припустити особливо інтенсивний режим експлуатації крана, за якого знижується опір крихкому руйнуванню (в праці [9] максимальна амплітуда циклічної компоненти напружень сягала 150 МПа). Зазначимо, що на циклічне навантаження накладається статичне, яке також різне для різних вузлів крана і визначає коефіцієнт позитивної асиметрії циклу  $R > 0$ .

Порівняльні оцінки однозначно демонструють нижчі значення KCV для поздовжніх і поперечних зразків, вирізаних з ділянок поблизу екстремального деформаційного впливу. Однак ефекти відчутніші для поздовжніх зразків, де незалежно від опору крихкому руйнуванню металу обох ділянок (144 і 87 J/cm<sup>2</sup> для ділянок A і B, відповідно) екстремальне деформування понизило ударну в'язкість KCV до однакових значень 56...57 J/cm<sup>2</sup>. Експлуатаційна деградація сталі для поперечних зразків настільки гранично знизила значення KCV (до 23...33 J/cm<sup>2</sup>), що подальше екстремальне деформування вже незначно вплинуло на окрихчення

металу. Таким чином, можна припустити два граничні значення  $KCV$  через можливий вплив екстремального деформування на опір крихкому руйнуванню:  $\sim 55$  – для поздовжніх зразків і  $\sim 25 \text{ J/cm}^2$  – для поперечних.

Результати макрофрактографічного аналізу зламів зразків з різних досліджуваних ділянок (рис. 4) узгоджуються з опором крихкому руйнуванню сталі. Ударна в'язкість зразків  $20 \dots 153 \text{ J/cm}^2$  чітко корелює з товщиною губ витягування, яка більша для в'язкішого механізму руйнування. Це стосується, насамперед, поздовжніх зразків; на поперечних, значення  $KCV$  яких знаходиться у вузькому діапазоні  $20 \dots 35 \text{ J/cm}^2$ , практично відсутні губи витягування. Крім того, зниження за певних умов опору крихкому руйнуванню зразків супроводжується плоским зломом з яскравим металевим блиском. Що стосується впливу екстремального деформування на механізм руйнування, то фрактографічний аналіз відповідних зразків (рис. 4*b, d, f, h*) відповідав виявленим закономірностям, які свідчили про окрихчення металу.

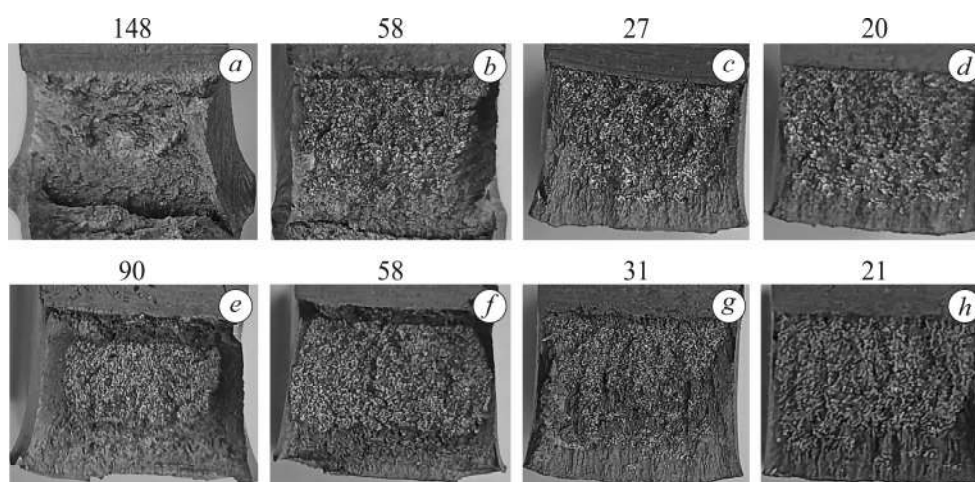


Рис. 4. Злами поздовжніх (*a, b, e, f*) і поперечних (*c, d, g, h*) зразків, вирізаних з ділянок *A* (*a–d*) і *B* (*e–h*) подалі (*a, c, e, g*) і поблизу (*b, d, f, h*) осередків екстремального деформування. Цифри – значення  $KCV$  ( $\text{J/cm}^2$ ).

Fig. 4. Fracture surfaces of longitudinal (*a, b, e, f*) and transversal (*c, d, g, h*) specimens cut out from sections *A* (*a–d*) and *B* (*e–h*) distant (*a, c, e, g*) and near (*b, d, f, h*) areas of extreme deformation. Numbers –  $KCV$  values ( $\text{J/cm}^2$ ).

Отже, експериментально підтверджено безпосередній вплив локального екстремального швидкісного деформування на окрихчення сталі понаднормово експлуатованого морського портового перевантажувального обладнання України, що слід враховувати під час експертизи його технічного стану, щоб обґрунтувати подовження ресурсу безпечної експлуатації. Зафіксували також руйнування антикорозійного лакофарбового покриття на поверхні конструкційних елементів крана після екстремального впливу (див. рис. 1*a*). Необхідність захисту металу, щоб продовжити ресурс конструкції, викликана ще й тим, що загалом експлуатаційна деградація сталей супроводжується послабленням опору корозійному руйнуванню [7]. Не виняток, що така закономірність збережеться і щодо зміни стану металу внаслідок екстремального деформаційного впливу.

#### ВИСНОВКИ

Досліджено деградацію понаднормово експлуатованої сталі хобота стріли порталного крана, а також її додаткове окрихчення через екстремальне швидкісне деформування. Сталі за Шарпі властива особливо низька ударна в'язкість,

зокрема за випробувань поперечних до напрямку вальцювання зразків, з формуванням плоского зламу з характерним металевим блиском без губ витягування. Порівняльний аналіз ділянок подалі та поблизу екстремального деформування листового матеріалу виявив додаткове окрихчення металу, підтвержене оцінками ударної в'язкості та фрактографічним аналізом. Пояснення ефекту засноване на уявленні, що швидкісне, на рівні ударного, навантаження металу створює високі напруження, які в умовах швидкісної пластичної деформації здатні релаксувати лише внаслідок утворення нових поверхонь, тобто через розвиток пошкоженості.

1. *A review of fatigue life prediction method for portal crane* / L. Ren, J. Ma, Y. Tong, and Z. Huang // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. – 2021. – **657**. – Article number 012094. DOI: 10.1088/1755-1315/657/1/012094
2. *Depale B. and Bennebach M. Residual life of structures and equipment* // Procedia Struct. Integr. – 2022. – **638**. – P. 317–330. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.03.033
3. *A review on fatigue monitoring of structures* / N. García-Fernández, M. Aenlle, A. Álvarez-Vázquez, M. Muniz-Calvente, and P. Fernández // Int. J. Struct. Integr. – 2023. – **14**, № 2. – P. 133–165. DOI: 10.1108/IJSI-09-2022-0117
4. *Experimental study of longevity in the metallic structure of boom for a portal crane of seaport* / L. Bovnegra, A. Pavlyshko, O. Nemchuk, V. Strelbitskyi, and I. Karabegovich // Lecture Notes in Mech. Eng. – 2024. – **Adv. Manuf. Process. V**. – P. 432–439. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_40)
5. *Milana G., Banisoleiman K., and González A. Field characterization of location-specific dynamic amplification factors towards fatigue calculations in ship unloaders* // Safety and Reliability. Theory and Applications. – Proc. of the 27<sup>th</sup> European Safety and Reliability Conf., ESREL 2017. – 2017. – P. 2773–2780. DOI: 10.1201/9781315210469-352
6. *Analysis of long-term in-service degradation of the Shukhov tower elements* / H. M. Nykyforchyn, H. V. Krechkovska, A. I. Kutnyi, and O. Z. Student // Strength Mater. – 2015. – **47**. – P. 679–688. DOI: 10.1007/s11223-015-9704-5
7. *Non-destructive evaluation of brittle fracture resistance of operated gas pipeline steel using electrochemical fracture surface analysis* / H. Nykyforchyn, O. Tsyrlunyk, O. Zvirko, and H. Krechkovska // Eng. Fail. Anal. – 2019. – **104**. – P. 617–625. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.06.037
8. *Semenov P. O., and Pustovyi V. M. Complex diagnostics of the state of operated elements of a grab reloader* // Materials Science. – 2020. – **56**, № 2. – P. 181–187. DOI: 10.1007/s11003-020-00413-1
9. *Nemchuk O. O., and Nesterov O. A. In-service brittle fracture resistance degradation of steel in a ship-to-shore portal crane* // Strength Mater. – 2020. – **52**, № 2. – P. 275–280. DOI: 10.1007/s11223-020-00175-w
10. *Analysis of operational factors affecting the serviceability of seaport hoisting and transporting equipment* / H. Nykyforchyn, V. Pustovyi, O. Zvirko, P. Semenov, M. Hredil, O. Nemchuk, O. Oliynyk, and O. Tsyrlunyk // Procedia Struct. Integr. – 2022. – **41**. – P. 326–332. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.05.038
11. *Degradation of steels of the reloading equipment operating beyond its designed service life* / V. M. Pustovyi, P. O. Semenov, O. O. Nemchuk, M. I. Hredil, O. A. Nesterov, and V. V. Strelbitskyi // Materials Science. – 2022. – **57**, № 5. – P. 640–648. DOI: 10.1007/s11003-022-00590-1
12. *In-service degradation of rolled carbon steels: the role of damaging* / H. Nykyforchyn, O. Zvirko, O. Oliynyk, O. Venhryniuk, O. Nesterov, and O. Tsyrlunyk // Procedia Struct. Integr. – 2023. – **47**. – P. 190–194. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.011
13. *Нестеров О. А., Олійник О. О., Демянчук Д. О. Корозійно-втомна міцність експлуатаційно деградованої сталі елементів морського портального крана* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2024. – **60**, № 3. – С. 99–104.
14. *Hydrogen role in strain aging of low alloy steels under operation* / H. Nykyforchyn, O. Tsyrlunyk, O. Venhryniuk, O. Zvirko, O. Student, I. Dzioba, and D. Demianchuk // Procedia Struct. Integr. – 2024. – **59**. – P. 82–89. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.04.013

15. Polishchuk L. K., Kharchenko H. V., and Zvirko O. I. Corrosion-fatigue crack-growth resistance of steel of the boom of a clamp-forming machine // *Materials Science*. – 2015. – **51**, № 2. – P. 229–234. DOI: 10.1007/s11003-015-9834-8
16. Margetin M., Durka R., and Chmelko V. Multiaxial fatigue criterion based on parameters from torsion and axial S-N curve // *Frattura Ed Integrità Strutturale*. – 2016. – **10**, № 37. – P. 146–152. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.37.20
17. Dzioba I., Furmanczyk P., and Lipiec S. Determination of the fracture toughness characteristics of S355JR steel // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2018. – **63**, № 1. – P. 497–503. DOI: 10.24425/118967
18. Influence of loading direction on the static and fatigue fracture properties of the long term operated metallic materials / G. Lesiuk, B. Rymcza, J. Rabięga, J.A.F.O. Correia, A.M.P. De Jesus, and R. Calcada // *Eng. Fail. Anal.* – 2019. – **96**. – P. 409–425. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.11.007
19. Xu B., and Wu Q. Stress fatigue crack propagation analysis of crane structure based on acoustic emission // *Eng. Fail. Anal.* – 2020. – **109**. – Article number 104206. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104206
20. Fatigue failure of a pressing machine / M. Garan, V. Chmelko, M. Šulko, and M. Musil // *Appl. Sci.* – 2021. – **11**. – Article number 398. – P. 1–11. DOI: 10.3390/app11010398
21. Dmytrakh I., Leshchak R., and Syrotyuk A. Effect of environmental composition on fatigue crack growth and hydrogen permeation in carbon pipeline steel // *Lecture Notes in Civil Eng.* – 2021. – **102**. – P. 145–159. DOI: 10.1007/978-3-030-58073-5\_12
22. Zvirko O., Venhryniuk O., and Nykyforchyn H. The effect of long-term operation on fatigue and corrosion fatigue crack growth in structural steels // *Procedia Struct. Integr.* – 2023. – **51**. – P. 24–29. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.10.062
23. Assessment of hydrogen embrittlement of operated pipe steel using the *J*-Integral method / O. T. Tsyurulnyk, O. Z. Student, O. I. Zvirko, D. O. Demianchuk, and O. I. Venhryniuk // *Materials Science*. – 2024. – **59**, № 6. DOI: 10.1007/s11003-024-00830-6
24. Evaluating hydrogen embrittlement susceptibility of operated natural gas pipeline steel intended for hydrogen service / O. Zvirko, H. Nykyforchyn, H. Krechkovska, O. Tsyurulnyk, M. Hredil, O. Venhryniuk, and I. Tsybailo // *Eng. Fail. Anal.* – 2024. – **163**, part A. – Article number 108472. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108472
25. Motra H. B., Hildebrand J., and Dimmig-Osburg A. Influence of specimen dimensions and orientation on the tensile properties of structural steel // *Mater. Test.* – 2014. – **56**. – P. 929–936. DOI: 10.3139/120.110659
26. Nykyforchyn H. M., Zvirko O. I., and Tsyurulnyk O. T. Hydrogen assisted macrolamination in gas lateral pipe // *Procedia Struct. Integr.* – 2016. – **2**. – P. 501–508. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.065
27. Nemchuk O. O. and Krechkovska H. V. Fractographic substantiation of the loss of resistance to brittle fracture of steel after operation in the marine gantry crane elements // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2019. – **41**. – P. 825–836. DOI: 10.15407/mfint.41.06.0825

Одержано 12.08.2024