

УДК 621.875:539.4.01

КОМПЛЕКСНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ЕКСПЛУАТОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ГРЕЙФЕРНОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЧА

П. О. СЕМЕНОВ, В. М. ПУСТОВИЙ

Одеський національний морський університет

Виконано комплексне діагностування технічного стану сталевій конструкції експлуатованого понад 40 років перевантажувача з використанням методів руйнівного та неруйнівного контролю. На вальцьованому фасонному прокаті виявлено втомні тріщини та механічні пошкодження типу зношування. Проаналізовано за допомогою магнетного методу з визначенням коерцитивної сили напружено-деформований стан низки елементів металоконструкції, на основі чого встановлено потенційно небезпечні ділянки. Для них досліджені механічні характеристики міцності, пластичності та ударної в'язкості, в т. ч. фрактографічним аналізом, і показано, що ступінь експлуатаційної деградації металу корелює з оцінками його напружено-деформованого стану.

Ключові слова: *морський перевантажувач, низьковуглецева сталь, експлуатаційна деградація, діагностування поточного стану.*

Вступ. Небезпека експлуатаційної деградації конструкційних сталей тривалій експлуатації полягає в можливій істотній втраті їх опору крихкому руйнуванню [1–4]. За циклічного навантаження, а також можливості наводнювання металу деградація прискорюється через розвиток в об'ємі металу розсіяної мікропошкодженості [5–7]. До відповідальних конструкцій, які експлуатуються за таких умов, належить перевантажувальне обладнання морських портів, тому особливу увагу приділяють діагностуванню їх технічного стану після вичерпування планового ресурсу експлуатації [8–12]. Один із них – грейферний перевантажувач насипних вантажів, оснащений грейфером з великою вантажопідйомністю і високою інтенсивністю експлуатації. Основа його металоконструкції – профільний прокат з низьковуглецевої сталі у гарячевальцьованому стані. Плановий ресурс перевантажувача за його експлуатації у жорсткому режимі 20...25 років, впродовж якого метал зазнає не менше 10^6 циклів навантаження.

Мета роботи – оцінити технічний стан сталевій металоконструкції тривало експлуатованого грейферного перевантажувача на основі комплексу руйнівних та неруйнівних методів діагностування.

Методичні аспекти досліджень. Об'єкт – 40 років експлуатований в особливо важкому режимі грейферний перевантажувач, а предмет діагностування – елементи сталевій металоконструкції. Обстежували для виявлення макропошкоджень на поверхні прокату, дослідження напружено-деформованого стану низки вузлів металоконструкції, визначення стандартних механічних характеристик міцності, пластичності та опору крихкому руйнуванню металу найнавантажениших ділянок.

Магнетним контролем металоконструкцій перевантажувача встановлювали локальні ділянки, які під час експлуатації зазнали значних напружень та максимально накопичили мікропластичні деформації, яким відповідали максимальні

значення коерцитивної сили H_C . Контролювали відповідно до методичних вказівок [13] зі застосуванням магнетного структуроскопа-коерцитиметра КРЦ-М з імпульсним намагнетчуванням у діапазоні заміру $H_C = 1 \dots 40$ А/см. Заміряли коерцитивну силу ненавантаженої металокопструкції з піднятою морською консолю, однак під час замірів на консолі вона займала робоче положення. Для кожної ділянки значення H_C визначали багаторазово.

З виділених як потенційно найдегратованіших ділянок металокопструкції вирізали зразки для визначення механічних характеристик, враховуючи напрям вальцювання прокату, який встановлювали металографічним аналізом. На випробувальній машині УМЕ10-ТМ розтягом (швидкість переміщення активного тримача 0,5 mm/min) циліндричних зразків діаметром робочої частини 5 mm та довжиною 25 mm, вирізаних з прокату у повздовжньому напрямі, визначали границі міцності σ_B та плинності $\sigma_{0,2}$, відносні видовження δ та звуження ψ . Опір крихкому руйнуванню оцінювали за рівнем ударної в'язкості KCV на зразках Шарпі з V-подібним надрізом, враховуючи, що випробування зразків такої геометрії чутливіше відображає експлуатаційну деградацію сталей, ніж зразки Менаже [14]. Зразки вирізали вздовж та поперек напрямку вальцювання прокату.

Результати досліджень та їх аналіз. Обстежуючи металокопструкції, виявили численні експлуатаційні пошкодження різної природи: втомні тріщини (рис. 1), механічні пошкодження (знос), а також корозійні ураження від дії морського середовища, розміри яких перевищують допустимі норми.



Рис. 1. Тріщини на копструкції перевантажувача: ділянки балок моста (а) та морської консолі (b).

Fig. 1. Cracks on the grab reloader structure: parts of bride stringer (a) and sea cantilever stringer (b).

Результати магнетного контролю наведено в табл. 1. Тут H_C^{\min} , H_C^{\max} і H_C^{av} – відповідно виміряні на об'єкті мінімальне, максимальне і середнє значення коерцитивної сили, тоді як H_C^{yield} – значення коерцитивної сили H_C , яке відповідає досягненню сталлю границі плинності і є гранично допустимим.

За результатами магнетного контролю коерцитивна сила для всіх досліджуваних ділянок перевантажувача не перевищує гранично допустимого значення, тобто рівня H_C^{yield} . Однак відзначено істотні відмінності в замірах на різних ділянках, на основі чого їх віднесли до різних категорій з огляду на прогнозування їх безпечної експлуатації. Так, металокопструкції балансирів і ходових візків, порталу, тилової консолі і моста, жорстких відтяжок і пілонів працюють у режимі “надійної” експлуатації, тоді як ліва стінка морської консолі; ліва і права площини вантажного візка – в режимі “контрольованої” експлуатації. Останній ре-

жим означає можливість подальшої експлуатації, однак за періодичного контролю поточного стану металу за визначальними для роботоздатності показниками.

Таблиця 1. Зведена таблиця за результатами магнітного контролю металоконструкцій

Ділянка	H_C^{\min}	H_C^{\max}	H_C^{av}	H_C^{yield}	Режим експлуатації за нормами [13]
	A/cm				
Балансири і ходові візки	1,1	1,5	1,3	5,1	“надійний”
	1,0	1,5	1,2	5,1	“надійний”
	0,8	1,4	1,1	5,1	“надійний”
	0,5	1,0	0,7	5,1	“надійний”
Портал	2,0	2,8	2,4	5,1	“надійний”
	2,0	2,7	2,4	5,1	“надійний”
	1,4	2,2	1,8	5,1	“надійний”
	1,3	3,0	2,1	5,1	“надійний”
	1,1	1,9	1,5	5,1	“надійний”
	1,1	1,9	1,4	5,1	“надійний”
Міст і тилова консоль	0,7	3,0	1,8	5,6	“надійний”
	0,9	2,9	2,0	5,6	“надійний”
	0,7	3,3	2,0	5,1	“надійний”
	0,9	2,0	1,5	5,6	“надійний”
Морська консоль	2,2	4,5	3,3	5,6	“контрольований”
	2,1	4,5	3,2	5,6	“контрольований”
	1,7	3,8	2,7	5,6	“надійний”
Жорсткі відтяжки	1,1	1,7	1,4	5,6	“надійний”
	0,8	1,7	1,3	5,6	“надійний”
Морський пілон	1,1	2,8	1,9	5,1	“надійний”
	1,0	1,9	1,4	5,1	“надійний”
Тиловий пілон	1,1	2,8	1,9	5,1	“надійний”
Вантажний візок	1,4	4,4	2,5	5,6	“контрольований”
	1,7	3,7	2,6	5,6	“надійний”

На основі результатів магнетного контролю виділено три ділянки метало-конструкції (рис. 2): № 1 – верхня полиця морської консолі в районі блочної обойми; № 2 – верхня полиця морської консолі в середній її частині; № 3 – нижня полиця моста в середній частині. Ці ділянки вважали найнебезпечнішими з огляду на можливе подовження терміну їх експлуатації, тому і визначали їхні механічні характеристики (табл. 2).

Згідно з паспортними даними, сталі з досліджених ділянок метало-конструкції за хімічним складом – це конструкційні вуглецеві сталі: звичайної якості марки СтЗсп (ділянки № 1 і 2) і якісна марки Сталь 10 (№ 3), для яких вимоги щодо механічних характеристик регламентують відповідними нормативними документами.

За міцністю і пластичністю сталь з досліджуваних ділянок (табл. 2) не тільки відповідає регламентним нормам, але і характеризується високим рівнем як відносного видовження, так і відносного звуження. Однак за ударною в'язкістю є певні відмінності для сталей різних ділянок, з яких найгірші показники металу ділянки № 2, йому властивий істотно нижчий рівень KCV . При цьому зазначимо, що поперечні зразки виявилися чутливішими до деградації сталей. На них ступінь зниження опору крихкому руйнуванню суттєвіший, ніж на повздовжніх. На це вказує також показник KCV_l / KCV_a – відношення ударної в'язкості повздовжніх KCV_l і поперечних KCV_a зразків. Це особлива ознака експлуатаційної деградації сталей, схильних до розшарування у напрямі вальцювання прокату [9].

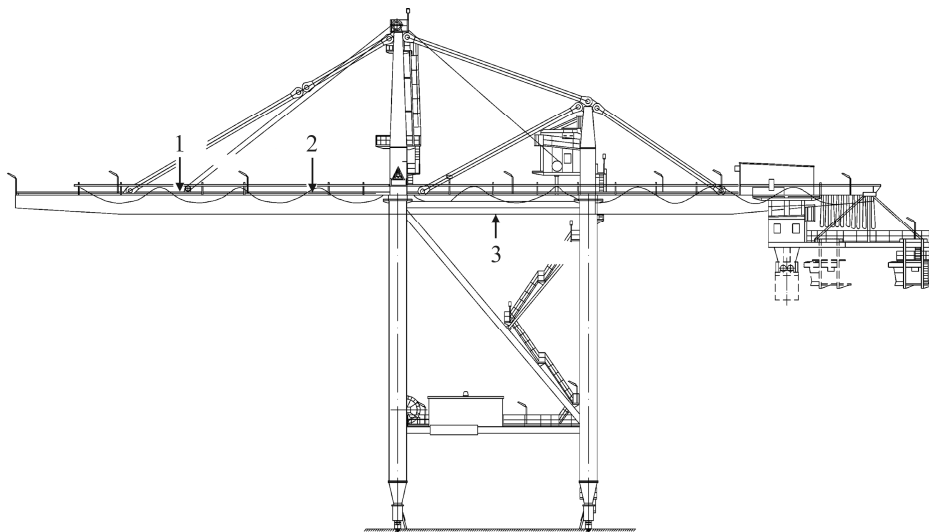


Рис. 2. Схема розміщення на конструкції перевантажувача ділянок для вирізання зразків (1–3 – номери ділянок).

Fig. 2. Location chart of the parts for specimens cutting on the grab reloader (1–3 – parts number).

Таблиця 2. Механічні характеристики сталей різних ділянок металоконструкції

№ ділянки	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	H_C^{av} , A/cm	KCV , J/cm ² , для зразків		KCV_l / KCV_a
	МПа		%			повздовжніх	поперечних	
1	429	251	34,5	69,7	4,5	167	100	0,60
2	410	251	33,7	61,6	4,5	122	66	0,54
3	421	223	38,8	61,6	3,3	147	116	0,79

За допомогою макрофрактографічного аналізу зламів циліндричних зразків після їх випроб на розтяг (рис. 3а–с) виявили загалом в'язкий тип руйнування для всіх варіантів сталей. Відзначили лише дещо крихкіші злами з металу, вирізаного з ділянки № 2, що узгоджується з їх найнижчими характеристиками пластичності (табл. 2). Крім того, в центральній частині зламу цього варіанту металу виявили ознаки однаково орієнтованих дрібних розшарувань (рис. 3б), яких не спостерігали на зламах зразків двох інших (№ 1 і 3, рис. 3а, с). Оскільки розшарування належить до фрактографічних елементів окрихчення тривало експлуатованих сталей [9, 15], то їх появу на зламах зразків з ділянки № 2 можна

трактувати як додатковий доказ інтенсивнішої деградації сталі, експлуатованої за жорсткіших умов навантаження.

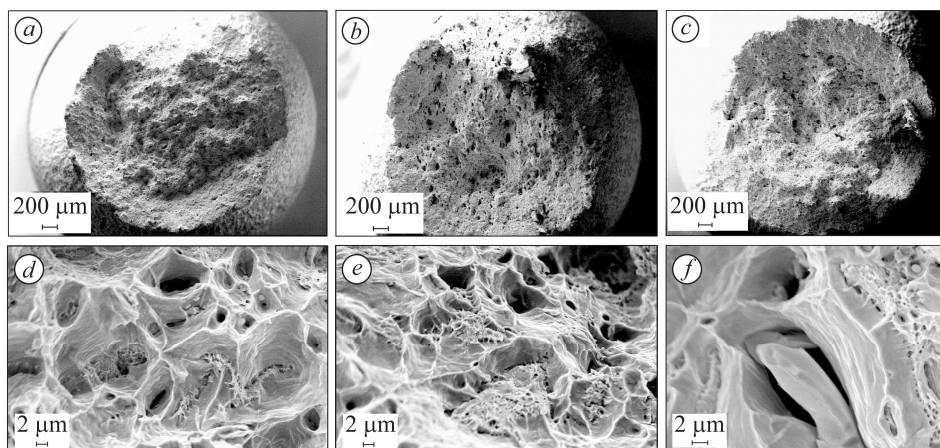


Рис. 3. Макро- (a–c) та мікрофрактограми (d–f) повздовжніх зразків, вирізаних з ділянок № 1 (a, d), 2 (b, e) і 3 (c, f) і випробуваних на розтяг.

Fig. 3. Macro- (a–c) and microfractograms (d–f) of longitudinal specimens cut from parts № 1 (a, d), 2 (b, e) and 3 (c, f) and tested by tension.

Для всіх трьох варіантів металу на мікрорівні підтвердили також в'язкий тип руйнування зразків, випробуваних на розтяг (рис. 3d–f). Поряд з типовим ямковим рельєфом руйнування спостерігали також ознаки мікророзшарувань, які найчіткіше проявилися на зламах зразків з ділянки № 2, яка, згідно з оцінками і ударної в'язкості, і характеристик пластичності, виявилася найінтенсивніше деградованою (табл. 2). Крім того, на зламах сталі ділянки № 2 виявили найбільше великих неметалевих включень, які відповідальні за появу на зламах великих і глибоких ямок. Найменшу їх кількість спостерігали на зламах сталі ділянки № 3 з найкращими механічними характеристиками. Окрім неметалевих включень, основним осередком зародження ямок були ослаблені внаслідок тривалої експлуатації за жорстких умов навантаження елементів конструкції межі між перлітними і феритними зернами, в результаті чого стала можливою декогезія вздовж них (рис. 3d–f). За високої роздільної здатності на дні більшості видовжених ямок (що зумовлено формою зерен перліту) в центральній частині зламів виявили фрактографічні ознаки, які морфологічно відповідали структурі перліту. Припустили, що ослаблення когезії між феритними і перлітними зернами спричинило появу пошкоджень вздовж меж їх розділу, злиття яких створило передумови для формування відшарувань. За активного навантаження зразків розтягом навколишні феритні зерна, які виконували роль неушкоджених під час експлуатації перетинок між розшаруваннями, витягувалися аж до руйнування і формували ямки відривного характеру з перлітними зернами на їх дні.

Як особливість відзначили також відмінність за розмірами і формою зерен перліту на дні великих ямок. Якщо в сталях ділянок № 1 і № 3 перлітні зерна вузькі та довгі, а ямки, сформовані навколо них, відповідно також здебільшого видовжені (рис. 3d, f), то на злам сталі ділянки № 2 зерна перліту більші за розмірами і полігональні за формою (рис. 3e). Якщо припущення про послаблення зв'язків між зернами фериту і перліту під час експлуатації вірне, то зрозуміло, що сталь ділянки № 2 найсильніше ушкоджена (якщо судити за площею тих фрагментів рельєфу, що відтворюють морфологію перліту). Принципово це узгоджу-

ється з її найнижчими характеристиками пластичності і ударної в'язкості порівняно з двома іншими варіантами аналізованих сталей.

Загалом за фрактографічними ознаками зламів осьових зразків усіх трьох ділянок металу з аналізованих елементів конструкції (як і за їх механічними характеристиками після випроб розтягом) можна говорити лише про тенденції їх зміни внаслідок експлуатації, причому вони здебільшого залежать від структурних особливостей сталей, а саме, розміру і морфології зерен перліту, кількості і розміру неметалевих включень як осередків зародження пошкоджень у жорстко навантажених елементах конструкції під час її тривалої експлуатації через ослаблення когезії між цими елементами структури та феритною матрицею.

ВИСНОВКИ

За результатами магнетного контролю з вимірюванням коерцитивної сили більшість елементів металоконструкції тривало експлуатованого грейферного перевантажувача знаходяться в гранично допустимому стані, однак для низки з них коерцитивна сила наближається до свого граничного значення, тому їх подальша експлуатація можлива лише з періодичним контролем визначальних для роботоздатності показників стану металу. Результати неруйнівного контролю корелюють з ударною в'язкістю металу (показовіше з визначеною на поперечних зразках).

РЕЗЮМЕ. Проведено комплексное диагностирование технического состояния стальной конструкции эксплуатируемого свыше 40 лет перегружателя с использованием методов разрушающего и неразрушающего контроля. На фасонном прокате выявлены усталостные трещины и механические повреждения типа износа. Проанализировано с помощью магнитного метода с определением коэрцитивной силы напряженно-деформированное состояние ряда элементов металлоконструкции, на основании чего установлены потенциально опасные участки. Для них исследованы механические свойства прочности, пластичности и ударной вязкости, в т. ч. фрактографическим анализом, и показано, что степень эксплуатационной деградации металла коррелирует с оценками напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: морской перегружатель, низкоуглеродистая сталь, эксплуатационная деградация, диагностирование текущего состояния.

SUMMARY. The complex diagnostics of the technical state of the steel structure of the 40-year operated grab reloader was carried out using the destructive and non-destructive test methods. Fatigue cracks and mechanical damages of wear type were revealed on the profile rolling. The stress-strain state of some elements of metal structure was estimated by the magnetic method with an evaluation of coercive force. The potentially unsafe parts were determined on this base. The mechanical properties of strength, plasticity and impact toughness including fractography analysis were studied for them and it was shown that the level of in-service degradation correlates with an assessment of its stress-strain state.

Keywords: sea grab reloader, low-carbon steel, exploitation degradation, diagnostics of current state.

1. Мешков Ю. Я., Шиян А. В., Звірко О. І. Оцінювання експлуатаційної деградації сталей газопроводів за критерієм механічної стабільності // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50, № 6. – С. 55–59.
(Meshkov Yu. Ya., Shyyan A. V., and Zvirko O. I. Evaluation of the in-service degradation of steels of gas pipelines according to the criterion of mechanical stability // Materials Science. – 2015. – 50, № 6. – P. 830–835.)
2. Features of the microstructural and mechanical degradation of long term operated mild steel / O. Student, H. Krechkovska, G. Lesiuk, J. Correia // Int. J. of Struct. Integr. – 2018. – 9, № 3. – P. 296–306.
3. Кречковська Г. В., Студент О. З., Никифорчин Г. М. Діагностування технічного стану парогонів ТЕС за твердістю і тріщиностійкістю // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – 54, № 5. – С. 22–32.

- (*Krechkovs'ka H. V., Student O. Z., and Nykyforchyn H. M.* Diagnostics of the engineering state of steam pipelines of thermal power plants by the hardness and crack resistance of steel // *Materials Science*. – 2019. – **54**, № 5. – P. 627–637.)
4. *Mechanical analysis at different scales of gas pipelines / G. Bolzon, B. Rivolta, H. Nykyforchyn, O. Zvirko // Eng. Failure Analysis*. – 2018. – **90**. – P. 434–439.
 5. *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., and 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.)
 6. *Оцінювання залишкової довговічності ділянки магістрального газопроводу “Уренгой–Помари–Ужгород” / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара, О. Т. Цирульник, Л. І. Ниркова // Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2012. – **48**, № 2. – С. 103–110.
(*Evaluation of the residual lifetime of a section of a main gas pipeline after long-term operation / O. E. Andreikiv, O. V. Nembara, O. T. Tsyruľnyk, L. I. Nyrkova // Materials Science*. – 2012. – **48**, № 2. – P. 231–238.)
 7. *Пустовой В. М., Реценко О. І., Звірко О. І.* Вплив тривалого циклічного деформування на електрохімічну поведінку сталей морських порталних кранів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2015. – **51**, № 1. – С. 111–115.
(*Pustovoi V. M., Reshchenko I. O., and 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.)
 8. *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.)
 9. *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 // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* – 2019. – **41**. – P. 825–836.
 10. *Немчук О. О.* Вплив експлуатаційного навантаження на корозійну тривкість сталі морського порталного крана // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2018. – **54**, № 5. – С. 121–125.
(*Nemchuk O. O.* Influence of the working loads on the corrosion resistance of steel of a marine harbor crane // *Materials Science*. – 2019. – **54**, № 5. – P. 743–747.)
 11. *Analysis of rotary mechanism fault features on the base of the spectral structure for vibration stochastic recurrence / I. Javorskyj, R. Yuzefovych, P. Semenov, P. Kurapov // Procedia Structural Integrity*. – 2019. – **16**. – P. 205–210.
 12. *Role of in-service conditions in operational degradation of mechanical properties of portal cranes steel / O. Nemchuk, M. Hredil, V. Pustovoy, O. Nesterov // Procedia Structural Integrity*. – 2019. – **16**. – P. 245–251.
 13. *МВ 0.00-7.01-05.* Методичні вказівки з проведення магнітного контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій підіймальних споруд та визначення їх залишкового ресурсу. – Харків: Підійомно-транспортна академія України, 2005. – 58 с.
 14. *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. 121–125.
(*Krechkovs'ka H. V. and 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.)
 15. *Features of stress corrosion cracking of degraded gas pipeline steels / H. Nykyforchyn, H. Krechkovska, O. Student, O. Zvirko // Procedia Structural Integrity*. – 2019. – **16**. – P. 153–160.

Одержано 13.12.2019