

УДК 621.875.5:620.193

ДЕГРАДАЦІЯ СТАЛЕЙ НАДНОРМАТИВНО ЕКСПЛУАТОВАНОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

В. М. ПУСТОВИЙ¹, П. О. СЕМЕНОВ¹, О. О. НЕМЧУК¹, М. І. ГРЕДІЛЬ²,
О. А. НЕСТЕРОВ¹, В. В. СТРЕЛЬБИЦЬКИЙ¹

¹ Одеський національний морський університет;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Розглянуто особливості оцінювання експлуатаційної деградації сталей листового прокату перевантажувального обладнання. Встановлено, що ударна в'язкість як показник опору крихкому руйнуванню є однією з визначальних механічних характеристик для забезпечення роботоздатності металоконструкцій, а її катастрофічне зниження спричинене мікророзшаруваннями між волокнами структури та витягнутими неметалевими включеннями. Для підвищення чутливості оцінювання деградації сталей слід надавати перевагу випробуванням поперечних щодо напрямку вальцювання зразків. Для наднормативно експлуатованих конструкцій рекомендовано граничне значення ударної в'язкості на рівні 30 J/cm², за якого очікують високий ризик неконтрольованого руйнування.

Ключові слова: портовий кран, вальцьована сталь, експлуатаційна деградація, мікророзшарування, ударна в'язкість.

Peculiarities of operational degradation of rolled steels of reloading equipment are considered. It is found that impact toughness as an indicator of brittle fracture resistance is one of the defining mechanical characteristics to ensure the operability of metal structures, and its catastrophic decrease is caused by microdelaminations between the structure layers and elongated non-metallic inclusions. To increase the sensitivity of assessing the steel degradation, transverse specimens with respect to the rolling direction are preferable for the impact testing. The limit value of impact strength of 30 J/cm² is recommended for excessively operated structures, at which a risk of uncontrolled fracture is high.

Keywords: port crane, rolled steel, operational degradation, microdelamination, impact toughness.

Вступ. Металоконструкції портів кранів експлуатують за багатоциклового навантаження і цю особливість першочергово враховують у відомих підходах до обґрунтування планового ресурсу їх безпечної експлуатації. У них оперують вихідним станом металу та регламентують його механічні властивості. Однак такі підходи малопридатні для обґрунтування безпечної наднормативної експлуатації сталевих конструкцій, оскільки не враховують деградацію механічних властивостей металу впродовж тривалої експлуатації за інтенсивного циклічного навантаження. Досвід тривалої експлуатації конструкційних сталей показує, що найістотніше знижуються їх характеристики опору крихкому руйнуванню, що підвищує ризик раптового порушення цілісності інженерних конструкцій [1–4]. Серед них найуживаніша ударна в'язкість [5, 6], мінімально допустимий рівень якої найчастіше регламентують у нормативних документах для вихідного стану металу. З іншого боку, вимоги до опору крихкому руйнуванню для металоконструкцій нормативної і наднормативної експлуатації повинні відрізнятися [7]. Крім то-

го, зазначимо, що для виготовлення великогабаритних кранів зазвичай використовують металопрокат, для якого механічні властивості, насамперед ударна в'язкість, залежать від орієнтації зразків стосовно напрямку вальцювання [8, 9]. Мета роботи – на основі комплексного дослідження технічного стану наднормативно експлуатованого перевантажувального обладнання та аналізу окремих випадків його руйнування обґрунтувати граничний рівень ударної в'язкості сталей вальцьованих металлоконструкцій.

Об'єкт досліджень – 16 одиниць перевантажувального обладнання: крани Альбрехт, Сокіл, Ганц, Крупп, Конє, причальний грейферний перевантажувач (ППП), судноавантажувальна машина (СНМ), стакер та вагоноперекидач, тривалість експлуатації яких за окремим винятком перевищила нормативний термін служби. Досліджувані металлоконструкції виготовлені з листового прокату низки вуглецевих та низьколегованих сталей.

Узагальнені закономірності експлуатаційної деградації сталей за показником ударної в'язкості. Визначали ударну в'язкість KCV зразків Шарпі, вирізаних із окремих вузлів досліджуваного перевантажувального обладнання вздовж (KCV_l) та поперек (KCV_c) до напрямку вальцювання. Окремо на прикладі експлуатованого впродовж 33 років порталного крана Сокіл експериментально-розрахунковим методом оцінили циклічну напруженість $\Delta\sigma_e$ на поверхні прокату для низки відповідальних вузлів металлоконструкції за близького до реальних умов механічного навантаження [3]. Це дало можливість, з одного боку, виявити потенційно найнебезпечніші ділянки кранів такої конструкції, що важливо враховувати під час їхньої періодичної технічної діагностики, а з іншого – побудувати кореляційні залежності між показником $\Delta\sigma_e$ та показниками експлуатаційної деградації сталей [2].

Під час оцінювання ступеня експлуатаційної деградації металу різних ділянок за розмахом напружень $\Delta\sigma_e$ встановлено ділянки крана, які зазнають найбільших та найменших навантажень [3]. Зокрема, найменший розмах $\Delta\sigma_e \sim 50$ МПа властивий верхній полиці коромисла, де ударна в'язкість KCV_l металу становила ~ 360 Дж/см². Це значення не лише найвище з-поміж усіх досліджених ділянок крана, але й особливо високе для такого класу сталей. Тому припустили відсутність деградації її металу, а рівень $KCV_l = 360$ Дж/см² умовно прийняли за вихідний стан [10].

Із визначених значень KCV побудували залежності $KCV-\Delta\sigma_e$ окремо для поздовжніх і поперечних зразків [3]. Зазначимо низку важливих закономірностей. Зокрема, значення KCV для цих зразків, вирізаних з одного вузла конструкції, суттєво відрізняються. З іншого боку, для кожної орієнтації зразків виявили широкий діапазон значень ударної в'язкості металу з різних вузлів крана: що вищі напруження $\Delta\sigma_e$, то нижчий опір крихкому руйнуванню. Вищі значення KCV властиві поздовжнім зразкам (KCV_l), у межах 150...363 Дж/см², істотно менші – поперечним (KCV_c), 45...137 Дж/см². Таким чином, ударна в'язкість металу, вирізаного з різних вузлів крана, може відрізнятися вдвічі-втричі, що пов'язано з різним ступенем їх експлуатаційної напруженості. Відношення KCV_c / KCV_l (рис. 1а) знижується з підвищенням показника $\Delta\sigma_e$, що пов'язали з деградацією металу впродовж його тривалої експлуатації, яка інтенсивніша у площині вальцювання. Таким чином, це відношення можна вважати діагностичною ознакою експлуатаційної деградації вальцьованих сталей портювих конструкцій. Воно також вказує на перевагу поперечних зразків для оцінки технічного стану сталі за її опором крихкому руйнуванню, і саме їх слід рекомендувати для діагностування стану портювих металлоконструкцій.

Зважаючи на значний розкид даних на рис. 1а, окремо проаналізували результати випробувань зразків з тоншого, 10 і 12 мм (рис. 1б, крива 1), та товстішого

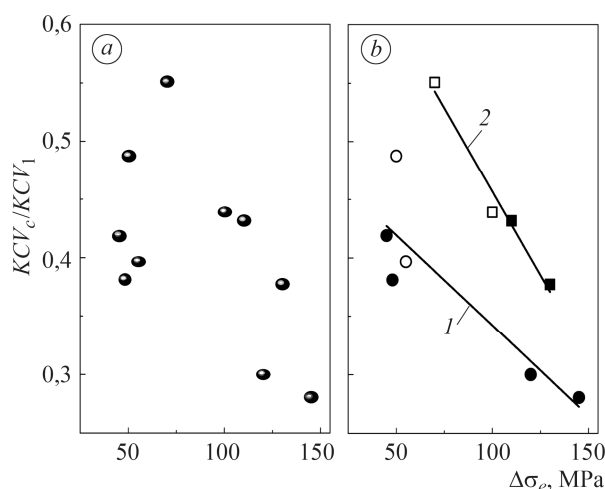


Рис. 1. Співвідношення ударної в'язкості поперечних KCV_c та поздовжніх KCV_1 зразків залежно від напруження $\Delta\sigma_e$ (a) для металопрокату завтовшки 10 (●), 12 (○) mm (1) і 16 (■), 25 mm (□) (2) (b).

Fig. 1. The ratio of impact strength of circumferential specimens KCV_c to longitudinal ones KCV_1 vs. stress $\Delta\sigma_e$ (a) for the rolled steel sheets of thickness (1) 10 (●), 12 (○) mm (1) and 16 (■), 25 mm (□) (2) (b).

зниження опору крихкому руйнуванню вздовж волокон структури можна вважати результатом не тільки експлуатаційного навантаження, а сумісного впливу робочих напружень і наводнювання металу.

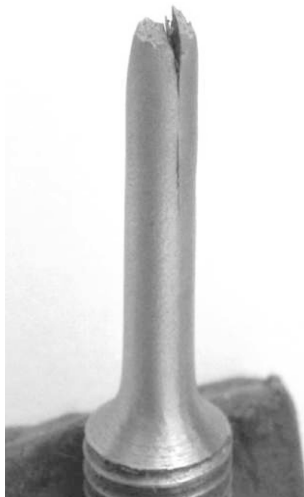


Рис. 2. Злам зразка після випробувань розтягом.

Fig. 2. Fracture surface of the specimen after tensile tests.

45 J/cm²) навантажених під час експлуатації елементів крана [17].

Мікрофрактографічним аналізом підтверджено причину різкого експлуатаційного зниження опору крихкому руйнуванню сталей листового прокату – мікророзшарування між волокнами структури та витягнутими у напрямі вальцюван-

прокату – 16 і 25 mm (крива 2). Так, виділені дві залежності, які демонструють зниження відношення KCV_c / KCV_1 зі збільшенням розмаху напружень $\Delta\sigma_e$ та вказують на вищий ступінь експлуатаційної деградації металу тоншого листового прокату. Вища схильність до розшарування між волокнами структури у тонколистовому прокаті, можливо, пов'язана з особливостями технології його виготовлення. Однак, зважаючи на можливий наводнювальний вплив морської атмосфери [11, 12], є підстави пов'язувати таку особливість залежності $KCV_c / KCV_1 - \Delta\sigma_e$ з водневою деградацією сталі. Таким чином, експлуатаційне

Експлуатаційну деградацію досліджуваних сталей пов'язали з розвитком мікропошкодженості [13] у напрямі вальцювання, яке може проявлятися і на макрорівні. Зокрема, рис. 2 ілюструє тріщиноутворення по твірній циліндричного зразка, вирізаного у поздовжньому напрямі, після його випробувань розтягом. Це макророзшарування проявилось у тривало експлуатованій сталі під час механічних випробувань, однак, є результатом попереднього розвитку пошкодженості на мікрорівні [14, 15].

Виявлене експлуатаційне зниження опору крихкому руйнуванню сталей портових конструкцій означає зниження енергоємності руйнування [16], тому для виявлення механізму деградації сталей фрактографічним аналізом дослідили зразки на ударну в'язкість, вирізані з найслабше (верхня полиця коромисла, напруження $\Delta\sigma_e = 50$ МПа, $KCV = 363$ і 177 J/cm² для поздовжніх і поперечних зразків відповідно) і найсильніше (права стінка колони, $\Delta\sigma_e = 120$ МПа, $KCV = 150$ і

ня неметалевими включеннями [17]. Можна однозначно стверджувати, що експлуатаційна деградація металу в аналізованих елементах сильніше проявляється за вищих експлуатаційних напружень через зростання схильності до відшарування неметалевих включень від матриці. Цей ефект спостерігали незалежно від орієнтації зразків Шарпі, але максимально він проявився, коли напрям вальцювання збігався з магістральним напрямом поширення їх руйнування.

Викладені результати механічних та фрактографічних досліджень експлуатаційного зниження опору крихкому руйнуванню сталей, зокрема, кореляція між ступенем зниження ударної в'язкості та рівнем напруженості різних елементів конструкції за циклічною складовою, залежність ударної в'язкості від напряму вирізання зразків, а також її чутливість до мікророзшарування обґрунтовують ударну в'язкість як визначальну механічну характеристику для оцінювання роботоздатності сталей наднормативно експлуатованого портового перевантажувального обладнання.

Важливим аспектом аналізу змін механічних властивостей, зумовлених багаточисливим навантаженням, є їх використання для прогнозування періоду безпечної експлуатації конструкцій. Початкову стадію втоми, а це зародження і розвитку субмікротріщин у металі, можна розглядати як безпечну з огляду контрольованого вичерпування довговічності [18]. Її можна діагностувати за зміною твердості до 15%. Подальша експлуатація можлива лише за контролю зниження ударної в'язкості, яке на цій стадії інтенсивне і може становити для портових конструкцій 50% і більше від початкових значень.

Регламентация граничних значень ударної в'язкості. Для безпечної експлуатації металоконструкцій портового перевантажувального обладнання, які працюють у наднормативному режимі, важливим є не лише зниження механічних характеристик експлуатованого матеріалу відносно їх значень у вихідному стані, але і зіставлення з гранично допустимими значеннями, прийнятими в галузі під час проектування конструкцій вантажопідіймального обладнання [19–21]. Зазначимо, що мінімальне паспортне значення ударної в'язкості для такого типу кранів, яке закладене заводами-виробниками під час розрахунків довговічності та міцності конструкцій, становить $\sim 65 \text{ J/cm}^2$. Воно стосується вихідного стану, але часто вважають, що такі нормативні вимоги застосовні й до експлуатованого металу. Однак за мінімально допустимого значення ударної в'язкості вихідного металу складно забезпечити плановий ресурс елемента конструкції навіть за дотримання паспортних режимів експлуатації, оскільки ця характеристика знижується впродовж усього її періоду і опускається нижче регламентованого для вихідного стану рівня незалежно від того, чи вже вичерпано плановий ресурс. Вказане протиріччя можна усунути введенням додаткового граничного рівня характеристики опору крихкому руйнуванню саме для наднормативно експлуатованого металу. При цьому слід надати перевагу випробам поперечних до напряму вальцювання зразків як чутливіших для оцінювання деградації сталей. Для цього визначили ударну в'язкість елементів металоконструкцій найпоширеніших типів перевантажувальних портових кранів (див. таблицю).

Узагальнено результати оцінок KCV_c поперечних зразків досліджуваного перевантажувального обладнання (рис. 3). Середнє значення ударної в'язкості становить 59 J/cm^2 , що близьке до мінімально допустимого паспортного значення 65 J/cm^2 , проте більшій частині досліджених елементів конструкцій властиві нижчі значення KCV_c , до 14 J/cm^2 . Це надто низький опір крихкому руйнуванню сталі, близький до ударної в'язкості сірих чавунів [22] через наявність у них гострих графітових включень, які виконують роль концентраторів напружень.

Ударна в'язкість досліджених вузлів портового перевантажувального обладнання

№ з/п	Тип та № крана	$\tau_{expl.}$, years	$\tau_{normative}$, years	Елемент металоконострукції, марка сталі*	KCV_e , J/cm ²
ДП "Одеський МТП"					
1	"Альбрехт" інв. № 1507	38	12	Стріла	37
				Коромисло противаги***	28
				Хобот	48
2	"Альбрехт" інв. № 1504	43	12	Стріла	50
				Коромисло противаги	107
				Хобот	39
3	"Альбрехт" інв. № 1500	45	12	Стріла	31
				Коромисло противаги	56
4	"Альбрехт" інв. № 1501	56	12	Стріла**	30
				Коромисло противаги	69
				Тяга коромисла	51
5	"Альбрехт" інв. № 1503	56	12	Стріла	31
6	"Альбрехт" інв. № 1506	56	12	Стріла	79
				Коромисло противаги**	14
				Тяга коромисла	43
7	"Ганц" інв. № 1214	39	12	Стріла, ВСтЗсп	126
ДП "Маріупольський МТП"					
8	"Сокіл" інв. № 1	39	12	Стріла**	20
9	"Сокіл" інв. № 5	36	12	Стріла***	24
ДП "СК "ОЛЬВІЯ"					
10	"Сокіл" інв. № 82	32	12	Стріла	118
				Коромисло противаги	152
				Хобот	77
				Стінка колони	49
				Полиця колони	131
"Дніпро-Бузьський МП"					
11	"Крупп" інв. № КГП № 2	31	12	Пілон, St37	210
				Міст, St37***	72
				Оголовок пілона, St37	86
ДП "МТП "Чорноморськ"					
12	"Конє" інв. № 131	20	12	Морська консоль, Fe52 D***	105
ТОВ "ГІС-Вугілля"					
13	ПГП інв.№ ГП2	41	12	Морська консоль 1, СтЗсп***	100
				Морська консоль 2, СтЗсп***	66
				Міст, Сталь 10***	116
ТОВ "ГІС-Руда"					
14	СНМ інв. № 18СП1	44	20	Стріла	118
15	Стакер інв. № 18С1	44	20	Стріла, 09Г2С	58
16	Вагоноперекидач інв. № 18ВО1	13	20	Диски, 14Г2	92

Примітки: * – сталь St38-b2, якщо не вказано інше; ** – аварійно зруйнувалися; *** – виявлені значні втомні пошкодження.

Однак відмінність між чавунами та досліджуваними сталями в тому, що у першому випадку концентратори напружень металургійного, а в другому – експлуатаційного походження.

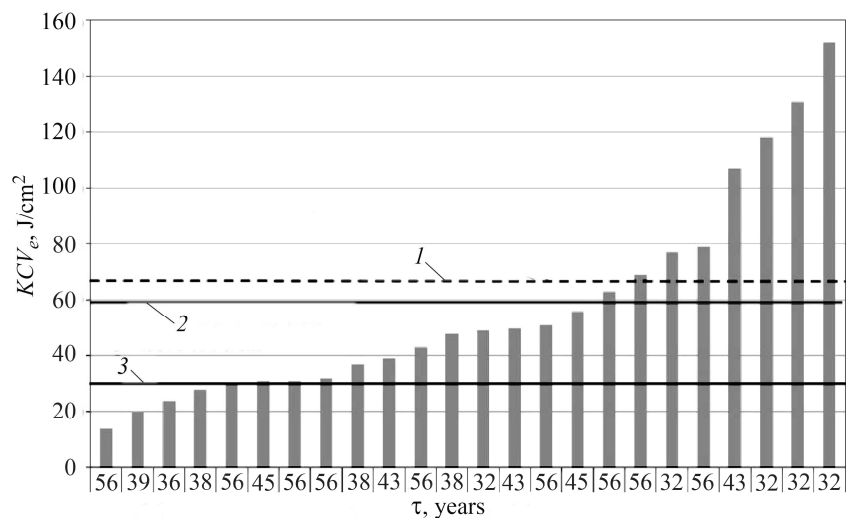


Рис. 3. Розподіл ударної в'язкості KCV_e досліджених зразків для сталі St38b-2 за різної тривалості експлуатації (див. таблицю): 1 – мінімальне паспортне значення; 2 – середнє; 3 – граничне значення.

Fig. 3. Impact toughness KCV_e distribution for the tested specimens of St38b-2 steel after different operation times (see Table): 1 – minimal regulatory value; 2 – average; 3 – limit values.

Щоб встановити граничні значення ударної в'язкості наднормативно експлуатованого металу, використали результати технічних експертиз проаналізованих конструкцій для виявлення в них макродефектів типу втомних тріщин, за яких існує висока ймовірність руйнування елемента конструкції. Крім того, брали до уваги рівень KCV_c металу поблизу місця аварійно зруйнованого обладнання, вважаючи, що в такому випадку він нижче граничного.

Встановлено, що зразки з мінімальними значеннями ударної в'язкості (14...30 J/cm²) відібрано з елементів металоконструкцій портових кранів, які аварійно зруйнувалися під час експлуатації відповідно до паспортного режиму з номінальним вантажем або мали значні втомні пошкодження в основному металі (рис. 4). У першому випадку тяга коромисла противаги крана зруйнувалася від втомної поверхневої напівеліптичної тріщини, а в другому таку тріщину виявили в стрілі крана під час періодичного контролю його стану.

На основі аналізу за граничне значення ударної в'язкості металу підймально-розвантажувального обладнання в умовах його наднормативної експлуатації рекомендовано рівень $KCV_c = 30$ J/cm². Він удвічі нижчий за мінімальні паспортні значення 65 J/cm², які закладено заводом-виробником кранів для забезпечення планового ресурсу металоконструкції ~30 років. Можна припустити, що елемент конструкції, виготовлений з металу з $KCV_c \sim 65$ J/cm², за дотримання паспортного режиму експлуатації досягне граничного стану $KCV_c = 30$ J/cm² зі завершенням паспортного нормативного терміну.

Таким чином, запропоновано граничне значення ударної в'язкості як характеристики опору крихкому руйнуванню наднормативно експлуатованих металоконструкцій перевантажувального обладнання. Воно не протирічить паспортним мінімально допустимим значенням цієї характеристики для вихідного стану, оскільки на них покладена різна відповідальність. Дотримання регламентних норм

для вихідного стану металу та паспортного режиму експлуатації означає гарантовану реалізацію планового ресурсу обладнання. Оскільки ударна в'язкість сталей у вихідному стані часто суттєво вища за мінімально допустимий рівень, це уможлиблює наднормативну експлуатацію таких конструкцій. Щодо запропонованого граничного рівня KCV_c , то він стосується лише наднормативно експлуатованого обладнання.

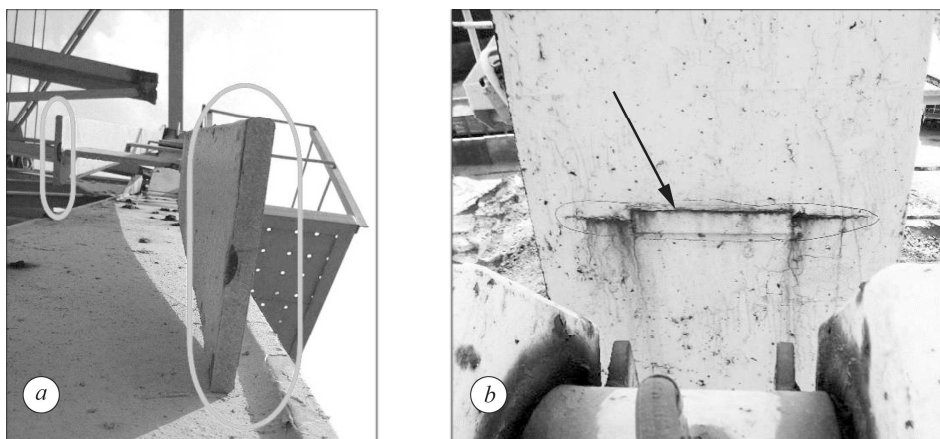


Рис. 4. Аварійне руйнування тяги коромисла противаги портального крана “Альбрехт” (а) та втомна макротріщина (позначена стрілкою) у стрілі портального крана “Сокіл” (б).

Fig. 4. Emergency fracture of a counterweight of the portal crane “Albrecht” (a) and a fatigue macrocrack (indicated by arrow) in the jib of the portal crane “Sokil” (b).

ВИСНОВКИ

Узагальнено закономірності деградації вальцьованих сталей наднормативно експлуатованих конструкцій портового перевантажувального обладнання. Основний механізм деградації полягає у розвитку мікропошкодженості вздовж напрямку вальцювання, тому випробування на удар зразків, вирізаних уперек до напрямку вальцювання, є чутливіші для оцінювання технічного стану металу. Проаналізовано умови виявлення в досліджуваному перевантажувальному обладнанні макродефектів типу втомних тріщин та зіставлено їх із результатами оцінювання ударної в'язкості поперечних зразків відповідних конструкційних елементів. Встановлено, що аварійні руйнування або значні втомні пошкодження відповідали металу з мінімальними значеннями ударної в'язкості ($14...30 \text{ J/cm}^2$). На цій основі для наднормативно експлуатованих металоконструкцій рекомендовано граничне значення ударної в'язкості на рівні 30 J/cm^2 .

1. *Assessment of operational degradation of pipeline steels* / H. Nykyforchyn, O. Zvirko, I. Dzioba, H. Krechkovska, M. Hredil, O. Tsyurulnyk, O. Student, S. Lipiec, and R. Pala // *Materials*. – 2021. – **14**. – 3247 p.
2. *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.
3. *Nemchuk O. O., Nesterov O. A. In-service brittle fracture resistance degradation of steel in a ship-to-shore portal crane* // *Strength of Materials*. – 2020. – **52**, № 2. – P. 275–280.
4. *Cheruvu N. S. Degradation of mechanical properties of Cr–Mo–V and 2.25Cr–1Mo steel components after long-term service at elevated temperatures* // *Met. Trans. A*. – 1989. – **20**, № 1. – P. 87–97.
5. *Low temperature impact toughness of the main gas pipeline steel after long-term degradation* // P. O. Maruschak, I. M. Danyliuk, R. T. Bishchak, and T. Vuherer // *Central European J. of Eng.* – 2014. – **4**, № 4. – P. 408–415.

6. *Non-destructive* evaluation of brittle fracture resistance of operated gas pipeline steel using electrochemical fracture surface analysis / H. Nykyforchyn, O. Tsyurulnyk, O. Zvirko, H. Krechkovska // Eng. Failure Analysis. – 2019. – **104**. – P. 617–625.
7. *Assessment* of in-service degradation of gas pipeline steel taking into account susceptibility to stress corrosion cracking / O. Zvirko, G. Gabetta, O. Tsyurulnyk, N. Kret // Procedia Structural Integrity. – 2019. – **16**. – P. 121–125.
8. *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.
9. *Influence* of textures of pipeline steels after operation on their brittle fracture resistance / O. I. Zvirko, N. V. Kret, O. T. Tsyurulnyk, T. P. Vengrynyuk // Materials Science. – 2018. – **54**, № 3. – P. 400–405.
10. *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. *Hydrogen* entry into steel during atmospheric corrosion process / T. Tsuru, Ya. Huang, Md. R. Ali, A. Nishikata // Corr. Sci. – 2005. – **47**, № 10. – P. 2431–2440.
12. *Omura T., Kudo T., and Fujimoto S.* Environmental factors affecting hydrogen entry into high strength steel due to atmospheric corrosion // Mat. Trans. – 2006. – **47**, № 12. – P. 2956–2962.
13. *Hredil M.* Role of disseminated damages in operational degradation of steels of the main gas conduits // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – 2011. – 33(Spec. Iss.). – P. 419–426.
14. *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.
15. *Nykyforchyn H. M., Zvirko O. I., Tsyurulnyk O. T.* Hydrogen assisted macrolamination in gas lateral pipe // Procedia Structural Integrity. – 2016. – **2**. – P. 501–508.
16. *Fractographic* features of long term operated gas pipeline steels fracture under impact loading / M. Hredil, H. Krechkovska, O. Student, I. Kurnat // Procedia Structural Integrity. – 2019. – **21**. – P. 166–172.
17. *Nemchuk O. O., 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.
18. *Реценко І. О., Фуртатов Ю. В.* Деградація розрахункових металоконструкцій порталних кранів в умовах тривалої наднормативної експлуатації // Машинознавство. – 2011. – № 9–10. – С. 36–40.
19. *Iegupov K., Rudenko S., Nemchuk O.* Safety and development of marine transportation-technological systems // Industrial Machine Building: Civil Engineering. – 2018. – **51**, Iss. 2. – P. 45–49.
20. *Failure* analysis of the tower crane counterjib / N. D. Zrnic, S. M. Bosnjak, V. M. Gasic, M. A. Arsic, and Z. D. Petkovic // Procedia Eng. – 2011. – **10**. – P. 2238–2243.
21. *Semenov P. O., Pustovyi V. M.* Complex diagnostics of the state of operated elements of a grab reloader // Materials Science. – 2020. – **56**, № 2. – P. 181–186.
22. *Gregorutti R. W., Grau J. E.* Mechanical properties of compacted graphite cast iron with different microstructures // Int. J. of Cast Metals Research. – 2014. – **27**, № 5. – P. 275–281.

Одержано 14.06.2021