

PACS numbers: 46.50.+a, 62.20.M-, 62.20.me, 81.40.Np, 81.40.Lm, 81.70.Bt

## **Фрактографічне обґрунтування втрати опору крихкому руйнуванню сталі після експлуатації в елементах морського порталного крана**

О. О. Немчук, Г. В. Кречковська \*

*Одеський національний морський університет,  
вул. Мечникова, 34,  
65029 Одеса, Україна*

*\*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,  
вул. Наукова, 5,  
79060 Львів, Україна*

Портальні крани тривалий час експлуатують у режимі інтенсивного циклічного навантаження, що зумовлює втрату вихідних механічних властивостей сталей, особливо їх опору крихкому руйнуванню. Під час експлуатації крана в різних конструкційних елементах виникають різні напруження і тому можна очікувати, що міра деградації металу цих елементів буде також різною. Випробування на ударну в'язкість зразків Шарпі (KCV), вирізаних з листової сталі типу СтЗсп, експлуатованої впродовж 33 років у відповідальних елементах морського порталного крана типу «Sokol», виявили істотне зниження опору крихкому руйнуванню металу за дії на нього більш високих експлуатаційних напружень. Досліджено вплив текстури сталі на міру її експлуатаційної деградації та показано більш інтенсивне зниження ударної в'язкості за випробувань поперечних зразків відносно напрямку вальцювання. Під час фрактографічних досліджень порівняно інформативні ознаки зламів сталі з мінімальними та максимальними рівнями KCV, спричиненими найнижчими та найвищими

Corresponding author: Nemchuk Oleksiy Olehovych  
E-mail: [alnemchuk@gmail.com](mailto:alnemchuk@gmail.com)

*Odesa National Maritime University,  
34 Mechnykova Str., UA-65029 Odesa, Ukraine  
\*G. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute, N.A.S. of Ukraine  
5 Naukova Str., UA-79060 Lviv, Ukraine*

Citation: O. O. Nemchuk and H. V. Krechkovska, Fractographic Substantiation of the Loss of Resistance to Brittle Fracture of Steel after Operation in the Marine Gantry Crane Elements, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 6: 825–836 (2019) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.41.06.0825](https://doi.org/10.15407/mfint.41.06.0825).

ми напруженнями під час її експлуатації в різних елементах крана. Виділялися ділянки зламів одразу за концентратором напружень, які відповідали стадії в'язкого зародження руйнування від дна концентратора, та наступні за ними центральні частини поширення руйнування. Фрактографічним аналізом на макро- і мікрорівнях обґрунтовано, що головна ознака експлуатаційної деградації сталі пов'язана з її схильністю до низькоенергоємного розшарування вздовж границь між витягнутими вальцюванням неметалевими включеннями і феритною матрицею (через порушення когезії вздовж міжфазних меж). Цей ефект проявився максимально, з одного боку, для сталі, експлуатованої за більш високих робочих напружень, а з іншого боку, за випробувань поперечних зразків, коли магистральний напрям поширення руйнування збігався з напрямом вальцювання прокату.

**Ключові слова:** порталний кран, експлуатаційна деградація сталі, опір крихкому руйнуванню, розшарування, вплив водню, фрактографічний аналіз.

Portal cranes are operated for a long time in the intensive cyclic loading, which leads to the loss of the initial mechanical properties of steels, especially of their resistance to brittle fracture. The different stresses arise in different structural elements during the crane operation, and therefore it can be expected that the degradation degree of metal in these elements will also be different. The impact toughness tests using Charpy specimens (KCV), cutting from the St3sp sheet steel, after 33 years of operation in the responsible elements of the 'Sokol' type marine gantry crane, showed a significant decrease in the brittle fracture resistance of metal due to exposure of the higher operating stresses. The effect of steel texture on its operational degradation degree is investigated and a more intensive decrease in the impact toughness of transverse specimens (relative to the rolling direction) is shown. During the fractographic studies, the informative signs of the fracture surfaces of specimens with the minimum and maximum KCV levels, which correlated with the minimum and maximum (from the analysed variants) stresses in various elements of the crane during their operation, are compared. The areas on fracture surfaces directly behind the stress concentrators, corresponding to the stage of ductile nucleation of failure from the concentrator's bottom, and the central parts on them, corresponding to subsequent fracture propagation, are allocated. With use macro- and microfractography analysis, it is substantiated that the main feature of the operational degradation of steel is associated with its tendency to low-energy delamination along interfaces between non-metallic inclusions and ferritic matrix, which elongated along the rolling direction. This effect is maximally revealed, on the one hand, for steel used at higher operating stresses, and, on the other hand, for transverse specimens, when the main direction of the fracture propagation coincides with the rolling direction.

**Key words:** portal crane, operational degradation of steel, resistance to brittle fracture, delamination, hydrogen influence, fractography analysis.

Портальные краны продолжительно эксплуатируются в режиме интен-

сивного циклического нагружения, что приводит к потере исходных механических свойств сталей, особенно их сопротивления хрупкому разрушению. Во время эксплуатации крана в разных конструктивных элементах возникают разные напряжения и поэтому можно ожидать, что степень деградации металла этих элементов будет также различной. Испытания на ударную вязкость образцов Шарпи (KCV), вырезанных из листовой стали типа СтЗсп, после эксплуатации в течение 33 лет в ответственных элементах морского порталного крана типа «Sokol», показали существенное снижение сопротивления хрупкому разрушению металла при воздействии на него более высоких эксплуатационных напряжений. Исследовано влияние текстуры стали на степень её эксплуатационной деградации и показано более интенсивное снижение ударной вязкости поперечных образцов относительно направления прокатки. При фрактографических исследованиях сравнивались информативные признаки изломов стали с минимальными и максимальными уровнями KCV, которые коррелировали с минимальными и максимальными (из проанализированных) напряжениями в различных элементах крана во время их эксплуатации. Выделялись участки изломов непосредственно за концентраторами напряжений, соответствующие стадии вязкого зарождения разрушения от дна концентратора, и следующие за ними центральные части распространения разрушения. Фрактографическим анализом на макро- и микроуровнях обосновано, что главный признак эксплуатационной деградации стали связан с её склонностью к низкоэнергетическому расслоению вдоль границ между вытянутыми вальцовкой неметаллическими включениями и ферритной матрицей (из-за нарушения когезии вдоль межфазных границ). Этот эффект проявился максимально, с одной стороны, для стали, эксплуатируемой при более высоких рабочих напряжениях, а с другой стороны, при испытании поперечных образцов, когда магистральное направление распространения разрушения совпадало с направлением прокатки.

**Ключевые слова:** порталный кран, эксплуатационная деградация стали, сопротивление хрупкому разрушению, расслоение, влияние водорода, фрактографический анализ.

*(Отримано 5 листопада 2018 р.; остаточн. варіант — 25 березня 2019 р.)*

## 1. ВСТУП

Морське обладнання для розвантажувальних робіт (у тому числі порталні крани) відносять до конструкцій тривалої експлуатації, тому проблема деградації металу (за результатами оцінювання їх поточних механічних характеристик) актуальна для обґрунтування їх працездатності [1–3]. Таке обладнання експлуатують за впливу інтенсивних циклічних навантажень, що сприяє вичерпуванню здатності сталей пластично деформуватися і знижує їх опір крихкому руйнуванню. Ці обставини необхідно враховувати при прогнозуванні залишкового ресурсу таких конструкцій [4, 5].

Основні конструкційні елементи порталних кранів виготовляють з листового або фасонного прокату з властивою їм текстурою вальцювання. Тому слід брати до уваги напрям вирізання зразків для механічних випробувань відносно напрямку вальцювання, а також можливу відмінність між ними за мірою експлуатаційної деградації металу, встановленою на зразках різної орієнтації [6, 7]. Відомо [8–10], що такі характеристики опору крихкому руйнуванню, як ударна в'язкість і тріщиностійкість, є найчутливішими до зміни стану матеріалу внаслідок експлуатації, тому їх найчастіше використовують для оцінювання експлуатаційної деградації сталей. З іншого боку, за цими показниками судять про небезпеку важкопрогнозованого крихкого руйнування елементів конструкцій.

Опір крихкому руйнуванню матеріалів пов'язаний з його енергоємністю, тому при дослідженнях експлуатаційної деградації сталей ефективно використовують фрактографічний аналіз [11, 12]. Мета даної роботи — на основі макро- та мікрофрактографічного аналізу поверхонь зламів після випробувань сталі на ударну в'язкість встановити особливості механізмів руйнування в залежності від міри деградації металу та орієнтації зразків відносно напрямку вальцювання прокату.

## 2. МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Об'єкт дослідження — елементи морського порталного крана типу «Sokol», виготовленого на заводі «Кранбау Еберсвальде» (Німеччина), після 33 років експлуатації. В якості матеріалу елементів конструкції використано листову низьковуглецеву сталь St-38b-2 феритперлітного класу, вітчизняним аналогом якої є сталь СтЗсп. Попередньо, використавши розрахунково-експериментальний метод [13], визначили напруження  $\sigma_e$ , що виникають на поверхні листового прокату низки ключових елементів крана під час їх навантаження (близьких до експлуатаційних та з урахуванням конструктивних особливостей їх розташування). Серед них такі елементи як нижня полиця хобота, задня полиця стріли, верхня полиця коромисла противаги, права стінка колони в районі кронштейна кореневих шарнірів та задня стінка колони над машинним відділенням. Таким чином, можна було ранжувати метал цих елементів у доволі широкому діапазоні зміни експлуатаційних навантажень, що, відповідно, мало би впливати на міру деградації сталі. На кожному з таких елементів вибирали по дві різні ділянки (загалом було 10 варіантів ділянок з різним рівнем навантажень під час експлуатації).

Ударну в'язкість KCV визначали за кімнатної температури на зразках Шарпі, вирізаних у повздовжньому і поперечному напрямах відносно напрямку вальцювання відповідних елементів. І якщо

макроплощина руйнування повздовжніх зразків перетинала волокна мікроструктури, то у поперечних вона була паралельною до них. Зазначимо, що в обох випадках концентратор розташовували по товщині листа, що дало змогу певною мірою усереднити оцінки KCV (якщо допускати існування градієнта властивостей по товщині прокату). Фрактографічні особливості руйнування зразків після випробувань на ударну в'язкість дослідили на сканувальному електронному мікроскопі EVO 4XVP.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Напруження, визначені на поверхні елементів з різних ділянок крана, істотно відрізнялися (показник  $\sigma_e$  різнився втричі, табл. 1). Очевидно, що подібні відмінності за напруженим станом елементів існують також за реальних умов навантаження під час експлуатації крана. Відповідно це вплинуло на ударну в'язкість сталі після її тривалої експлуатації: що вищий рівень  $\sigma_e$ , то нижчий опір крихкому руйнуванню. При цьому найвищі значення KCV виявили на повздовжніх зразках (від 150 до 363 Дж/см<sup>2</sup>), істотно менші — на поперечних (від 45 до 137 Дж/см<sup>2</sup>). Оскільки типовим для кранів є навантаження консольним згином, то припустили, що метал, розташований в зоні циклічного стиску елемента конструкції, мав би бути менш схильним до експлуатаційної деградації порівняно з розташованим в зоні розтягу. Однак у праці [14] на прикладі тривалого експлуатування за циклічного навантаження фасонного прокату з низьковуглецевої сталі експериментально показано, що метал зони

ТАБЛИЦЯ 1. Рівень KCV сталі різних елементів крана у Дж/см<sup>2</sup>.

TABLE 1. The KCV values of the steel from the different crane elements in J/cm<sup>2</sup>.

Позначення	Елемент крана	$\sigma_e$ , МПа	Зразки	
			Повздовжні	Поперечні
1		130	159	60
2	Нижня полиця хобота	110	220	95
3		48	299	114
4	Задня полиця стріли	55	310	123
5		45	303	127
6	Верхня полиця коромисла	50	363	177
7		120	150	45
8	Права стінка колони	145	189	53
9		70	227	125
10	Задня стінка колони	100	312	137

циклічного стиску зазнав майже такого самого істотного зниження опору крихкому руйнуванню, як і метал зони розтягу. Тому не мало змісту виділяти зону розтягу в конструкційних елементах крана.

Мікроструктура сталі — ферит-перлітна з домінуванням фериту, що типово для низьковуглецевих сталей. У площині, паралельній поверхні вальцювання, відповідної текстури не виявлено, зерна фериту та перліту розташовані практично рівномірно. У двох інших площинах в структурі сталі виявили витягнуті зерна перліту. В цих випадках спостерігали також витягнуті темно-сірі ланцюжки неметалевих включень (в основному вздовж напрямку вальцювання).

Порівнювали фрактографічні особливості руйнування зразків, випробуваних на ударну в'язкість. Їх вирізали із найслабше (верхня полиця коромисла, позиція № 6 табл. 1, напруження  $\sigma_e = 50$  МПа,  $KCV = 363$  Дж/см<sup>2</sup> і  $KCV = 177$  Дж/см<sup>2</sup> для повздовжніх і поперечних зразків відповідно) і найсильніше (права стінка колони, поз. № 7,  $\sigma_e = 120$  МПа,  $KCV = 150$  Дж/см<sup>2</sup> і  $KCV = 45$  Дж/см<sup>2</sup>) навантажених під час експлуатації елементів крана. Оскільки метал характеризували за опором крихкому руйнуванню, то вибрані для аналізу зразки з елементів, на які під час експлуатації діяли мінімальні і максимальні напруження, відповідали мінімальній та максимальній мірі експлуатаційної деградації сталі відповідно.

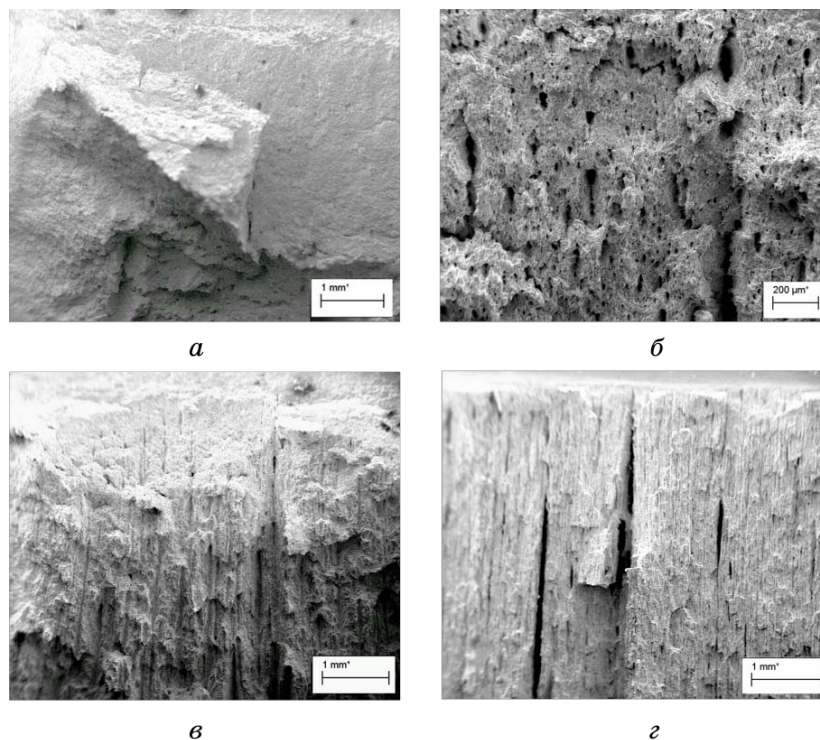
### 3.1. Макрофрактографічний аналіз

Виявили, що загалом експлуатований метал схильний до розшарування вздовж волокон текстури, і ця схильність залежить від рівня робочих напружень в елементі. Оскільки на повздовжніх зразках макроповерхня руйнування перетинала волокна текстури, то їх фрактографічна ознака розшарування проявилася наявністю вторинних тріщин, перпендикулярних до площини руйнування. Так, макрозлам повздовжнього зразка зі слабо навантаженого елемента крана (поз. № 6) практично гладкий, без очевидних слідів розшарування (рис. 1, а), тоді як на зламі повздовжнього зразка з сильніше навантаженого елемента виявили велику кількість різних за розмірами розшарувань, орієнтованих у напрямі поширення руйнування за випробувань на удар (рис. 1, б). Оскільки концентратори на зразках були розташовані по товщині прокату, то розшарування, виявлені на зламі зразка з високонавантаженого елемента крана, пов'язали з перетином площиною руйнування розшарувань, що виникали в напрямі вальцювання елемента через втрату когезії між матрицею і неметалевими включеннями. Подібні результати з явно вираженим макророзшаруванням отримано для тривало експлуатованих труб газогонів, виготовлених з листового прокату [15]. Це явище пов'язали, з одного боку, з експлуатаційною деградацією фізико-механічних властивостей металу, а з іншого — з наводнюван-

ням металу стінки труби [16]. Зазначимо, що статична тріщиностійкість металу прокату, як один із показників опору крихкому руйнуванню, теж високочутлива до текстури вальцованого металу [17].

На зламах поперечних зразків розшарування проявилися чіткіше, однак вплив на них інтенсивності експлуатаційного навантаження не такий очевидний, як у випадку зразків повздовжньої орієнтації. На обох зламах (рис. 1, *в* і *г*) виявили велику кількість різних за довжиною вторинних тріщин, орієнтованих, з одного боку, перпендикулярно макроплощині руйнування, а з іншого, у напрямі поширення руйнування від концентратора напружень. Оскільки і в цьому випадку концентратор на зразку розташовували по товщині листа, то виявлені розшарування теж пов'язали з текстурою прокату.

Зазначимо, що зламу зразка високонавантаженого елемента властива більша кількість практично наскрізних (від надрізу до про-



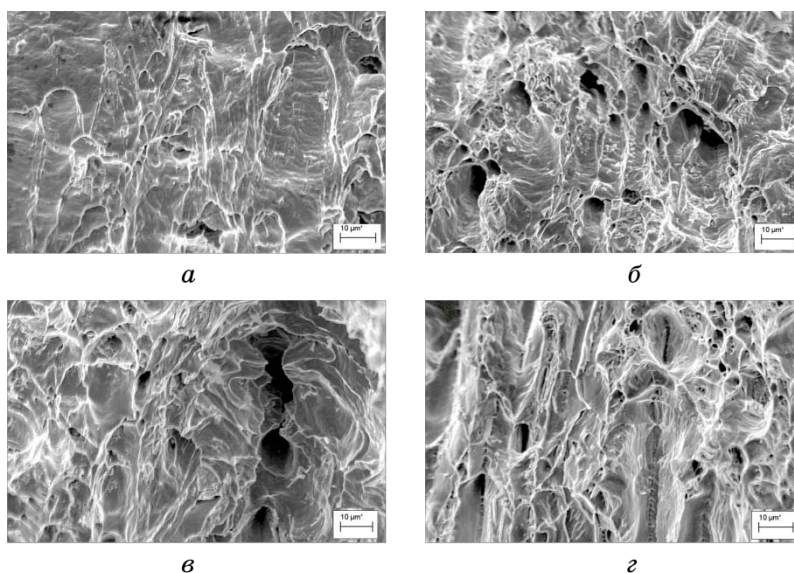
**Рис. 1.** Макрофрактограми в околі концентраторів напружень зламів повздовжніх (*а*, *б*) і поперечних (*в*, *г*) зразків, вирізаних із найслабше № 6 (*а*, *в*) і найсильніше № 7 (*б*, *г*) навантажених елементів крана.

**Fig. 1.** Macrofractograms of the surface of fractures in the vicinity of the stress concentrators at the longitudinal (*a*, *б*) and transversal (*в*, *г*) specimens, cutting from minimal No. 6 (*a*, *в*) and maximal No. 7 (*б*, *г*) loaded elements of the crane.

тилежного краю зразка) розшарувань (рис. 1, *з*), а також більше розкриття таких тріщин, що свідчить про вищу інтенсивність напружень, які спричиняють такі розшарування.

### 3.2. Мікрофрактографічний аналіз

Виділяли ділянку зламу зразка одразу за концентратором напружень, яка характеризувала початковий етап руйнування зразка, та частину зламу відразу за нею. Стартовій ділянці поверхні руйнування властивий типовий для ударних випробувань таких сталей в'язкий механізм із формуванням ямкового рельєфу (рис. 2). Однак відзначили певні відмінності для зразків різної орієнтації. На зламах повздовжніх зразків виявили плиткі ямки параболічної форми (рис. 2, *а* і *б*), причому незалежно від рівня експлуатаційних напружень під час експлуатації елемента. На мікрорівні це є ознакою домінування зсувного механізму деформування металу аж до руйнування перетинок між порами. Спостерігали також сліди від включень на зламах у формі доволі великих за розмірами (до 7 мкм) та ще й глибоких ямок. На зламі зразка з металу менш навантаже-



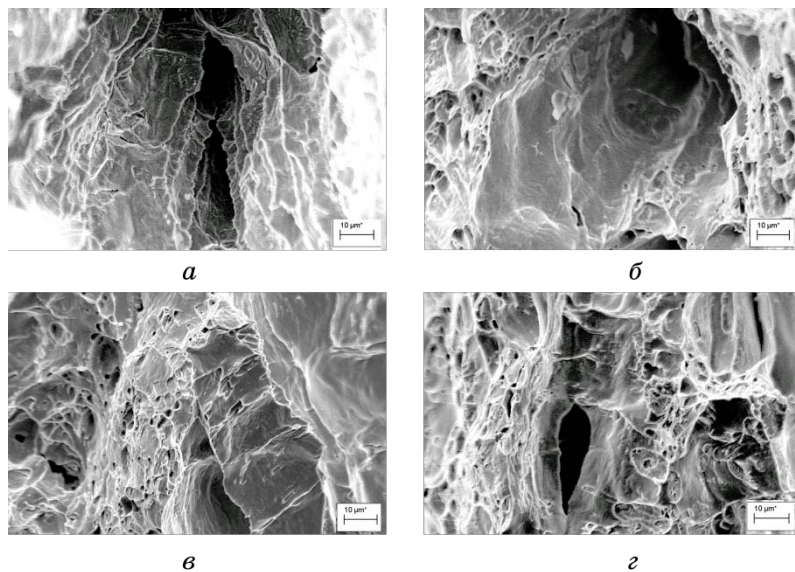
**Рис. 2.** Мікрофрактограми зламів поблизу концентратора напружень повздовжнього (*а*, *б*) і поперечного (*в*, *з*) зразків, вирізаних з елементів № 6 (*а*, *в*) і № 7 (*б*, *з*).

**Fig. 2.** Microfractograms of the surface of fractures in the vicinity of the stress concentrators at the longitudinal (*a*, *б*) and transversal (*в*, *з*) specimens, cutting from the No. 6 (*a*, *в*) and No. 7 (*б*, *з*) elements.



ного елемента (поз. № 6) такі ямки траплялися рідше (рис. 3, *a*), тоді як на зламі зразка з максимально навантаженого елемента (поз. № 7) вони домінували (рис. 2, *б*). Звідси зробили висновок, що саме експлуатаційні навантаження відповідальні за декогезію включень від матриці. Адже чим вищі експлуатаційні напруження в елементі, тим більше слідів від включень спостерігали на зламі зразка з такого металу.

У рельєфі зламу поперечних зразків (рис. 2, *в* і *г*) домінували довгі розшарування в напрямі руйнування, що виникли ще на етапі експлуатації металу вздовж меж неметалевих включень з матрицею. На їх дні спостерігали чіткі сліди цих включень. Розташовані між розшаруваннями прошарки неушкодженого металу поділили робочий переріз зразка на тонкі фрагменти. У межах цих прошарків руйнування відбувалося шляхом утворення об'ємніших, ніж на зламах повздовжніх зразків, практично рівновісних та дрібніших ямок, сформованих за механізмом відриву. У більшій мірі це стосувалося зламу металу, експлуатованого за жорсткіших силових умов експлуатації (рис. 2, *г*). Відповідно для металу, експлуатованого за нижчого рівня навантажень (рис. 2, *в*), зсувна природа формування ямок залишалася відчутнішою.



**Рис. 3.** Мікрофрактограми в центрі зламів повздовжнього (*a*, *б*) і поперечного (*в*, *г*) зразків, вирізаних з елементів № 6 (*a*, *в*) і № 7 (*б*, *г*).

**Fig. 3.** Microfractograms in the centre of the surface of fractures at the longitudinal (*a*, *б*) and transversal (*в*, *г*) specimens, cutting from the No. 6 (*a*, *в*) and No. 7 (*б*, *г*) elements.

З просуванням тріщини від надрізу вглиб перерізу зразків зберігався механізм загалом в'язкого ямкового руйнування, однак рельєфність зламів зростала (рис. 3), що є ознакою підвищення енергоємності руйнування. Попри приблизну відповідність розмірів ямок від неметалевих включень на зламах зразків металу, на які впливали різні експлуатаційні напруження, їх кількість за вищих напружень виявилася значно більшою. Часто вони зливалися між собою, формуючи глибокі і довгі розшарування в напрямі поширення руйнування. На зламі повздовжнього зразка, менше навантаженого під час експлуатації металу, такі глибокі розшарування у напрямі поширення руйнування були скоріше винятком (рис. 3, а). В більшості випадків на зламах повздовжніх зразків домінували великі і глибокі ямки, як сліди, що полишили по собі неметалеві включення (рис. 3, б).

На поперечних зразках рельєф в центрі зламів формували розшарування, перетинки між якими руйнувалися внаслідок витягування з формуванням об'ємніших ямок, порівняно з плиткішими параболічними ямками зсувного характеру на зламах повздовжніх зразків. Крім того, ямки були дрібніші й практично рівновісні, що вказує на їх формування за механізмом відриву (рис. 3, в і г). В більшій мірі це стосувалося зламу металу, експлуатованого за жорсткіших силових умов (рис. 3, г). Тоді як для металу, експлуатованого за нижчого рівня навантаження, зсувна складова у формуванні ямок проявлялася сильніше (рис. 3, в).

На основі результатів фактографічних досліджень з'ясували роль експлуатаційних умов навантаження елементів крану у формуванні розшарувань. Можна однозначно стверджувати, що за вищих експлуатаційних напружень в аналізованих елементах сильніше проявляється експлуатаційна деградація металу зростанням його схильності до відшарування неметалевих включень від матриці. Експлуатаційна зміна стану металу супроводжується різким зниженням енергоємності руйнування за ударних випробувань зразків з концентраторами напружень за ключової ролі розшарувань. Цей ефект спостерігали незалежно від орієнтації ударних зразків, але максимально він проявився, коли напрямком вальцювання прокату співпадав з магістральним напрямом поширення руйнування в зразках під час їх випробувань на удар (на поперечних зразках). Тому саме поперечно орієнтовані зразки слід використовувати для оцінювання поточного технічного стану тривало експлуатованого металу.

Узагальнюючи зазначимо, що ферит-перлітні сталі, які використовують при виготовленні елементів порталних кранів, за кімнатної температури звичайно руйнуються за високоенергоємним в'язким механізмом шляхом формування порожнин та руйнування перетинок між ними. Однак тривала експлуатація такої сталі вальцованого прокату привела до істотної втрати її опору крихкому руйнуванню через схильність металу до розшарування, що фрактографічно підтверджено на макро- та мікрорівні. Відповідно, попри збереження типових ознак в'язкого руйнування, пояснено істотно нижчу ударну

в'язкість сталі, експлуатованої за жорсткіших силових умов. Це дає підстави вважати, що виявлені на зламах ділянки розшарування металу, спричиненого його експлуатацією, слід також віднести до фрактографічних ознак його окрихчення (додатково до типових, які зазвичай проявляються за низькотемпературних випробувань такого класу сталей).

#### 4. ВИСНОВКИ

Виявлено узгодженість рівня експлуатаційних напружень в конструкційних елементах крану з опором крихкому руйнуванню та встановленими фрактографічними ознаками експлуатаційної деградації сталі: що вищий рівень напружень в елементі під час експлуатації, то нижчий рівень опору крихкому руйнуванню та чіткіша візуалізація мікророзшарування в металі між матрицею і витягнутими вздовж волокон текстури вальцювання неметалевими включеннями.

Фрактографічно виявлені мікророзшарування на зламах як по вздовжніх, так і поперечних відносно напрямку вальцювання зразків спостерігали на фоні загалом високоенергоємного ямкового мікрорельєфу в перетинках між ними. Це свідчить про те, що саме розшарування відповідальні за зниження опору крихкому руйнуванню. Відзначено, що і на макро-, і на мікрорівні розшарування на поперечних зразках проявилось чіткіше.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. V. M. Pustovoi and I. O. Reshchenko, *Mater. Sci.*, **48**, Iss. 5: 561 (2013).
2. V. M. Pustovoi, I. O. Reshchenko, and O. I. Zvirko, *Mater. Sci.*, **51**, Iss. 1: 125 (2015).
3. O. O. Nemchuk, *Mater. Sci.*, **53**, Iss. 6: 875 (2018).
4. А. О. Немчук, *Депон. ГНТБ України*, № 1326-Ук96 от 29.05.96.
5. А. О. Немчук, М. А. Стариков, *Труды Одесского политехн. ун-та*, № 2: 36 (2008).
6. H. V. Krechkovs'ka and O. Z. Student, *Mater. Sci.*, **52**, Iss. 4: 566 (2017).
7. A. Y. Krasowsky, A. A. Dolgiy, and V. M. Torop, *Proc. 'Charpy Centary Conference'* (Poitiers: 2001), vol. 1, p. 489.
8. H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyurul'nyk, D. Yu. Petryna, and M. I. Hredil', *Strength Mater.*, **41**, No. 5: 501 (2009).
9. L. K. Polishchuk, H. V. Kharchenko, and O. I. Zvirko, *Mater. Sci.*, **51**, Iss. 2: 229 (2015).
10. S. V. Panin, P. O. Maruschak, I. V. Vlasov, A. S. Syromyatnikova, A. M. Bolshakov, F. Berto, O. Prentkovskis, and B. B. Ovechkin, *Proc. Eng.*, **178**: 597 (2017).
11. H. M. Nykyforchyn, H. V. Krechkovs'ka, A. I. Kutnyi, and O. Z. Student, *Strength Mater.*, **47**, Iss. 5: 679 (2015).
12. S. V. Panin, P. O. Maruschak, I. V. Vlasov, D. D. Moiseenko, P. V. Maksimov,

- F. Berto, R. T. Bishchak, and A. Vinogradov, *Fatigue Fracture Eng. Mater. Struct.*, **40**: Iss. 11: 1838 (2017).
13. А. О. Немчук, М. А. Стариков, *Подъемные сооружения. Спец. техника*, **7**: 30 (2006).
  14. E. V. Kharchenko, L. K. Polishchuk, and O. I. Zvirko, *Mater. Sci.*, **49**, Iss. 4: 501 (2014).
  15. H. Nykyforchyn, O. Zvirko, O. Tsyurulnyk, and N. Kret, *Eng. Failure Analysis*, **82**: 364 (2017).
  16. O. I. Zvirko, A. B. Mytsyk, O. T. Tsyurulnyk, G. Gabetta, and H. M. Nykyforchyn, *Mater. Sci.*, **52**, Iss. 6: 861 (2017).
  17. Р. В. Тельович, Ю. А. Гарасим, Г. В. Кречковська, Н. О. Бондаревська, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 11: 1489 (2018).

## REFERENCES

1. V. M. Pustovoi and I. O. Reshchenko, *Mater. Sci.*, **48**, Iss. 5: 561 (2013).
2. V. M. Pustovoi, I. O. Reshchenko, and O. I. Zvirko, *Mater. Sci.*, **51**, Iss. 1: 125 (2015).
3. O. O. Nemchuk, *Mater. Sci.*, **53**, Iss. 6: 875 (2018).
4. A. O. Nemchuk, *Depon. HNTB Ukraine*, No. 1326-Uk96 from 29.05.96 (in Russian).
5. A. O. Nemchuk and M. A. Starikov, *Trudy Odesskogo Politekh. Un-ta*, No. **2**: 36 (2008) (in Russian).
6. H. V. Krechkovs'ka and O. Z. Student, *Mater. Sci.*, **52**, Iss. 4: 566 (2017) (in Russian).
7. A. Y. Krasowsky, A. A. Dolgiy, and V. M. Torop, *Proc. 'Charpy Centary Conference' (Poitiers: 2001)*, vol. 1, p. 489.
8. H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyurul'nyk, D. Yu. Petryna, and M. I. Hredil', *Strength Mater.*, **41**, No. 5: 501 (2009).
9. L. K. Polishchuk, H. V. Kharchenko, and O. I. Zvirko, *Mater. Sci.*, **51**, Iss. 2: 229 (2015).
10. S. V. Panin, P. O. Maruschak, I. V. Vlasov, A. S. Syromyatnikova, A. M. Bolshakov, F. Berto, O. Prentkovskis, and B. B. Ovechkin, *Proc. Eng.*, **178**: 597 (2017).
11. H. M. Nykyforchyn, H. V. Krechkovs'ka, A. I. Kutnyi, and O. Z. Student, *Strength Mater.*, **47**, Iss. 5: 679 (2015).
12. S. V. Panin, P. O. Maruschak, I. V. Vlasov, D. D. Moiseenko, P. V. Maksimov, F. Berto, R. T. Bishchak, and A. Vinogradov, *Fatigue Fracture Eng. Mater. Struct.*, **40**: Iss. 11: 1838 (2017).
13. А. О. Немчук и М. А. Стариков, *Подъемные Сооружения. Спец. Техника*, **7**: 30 (2006) (in Russian).
14. E. V. Kharchenko, L. K. Polishchuk, and O. I. Zvirko, *Mater. Sci.*, **49**, Iss. 4: 501 (2014).
15. H. Nykyforchyn, O. Zvirko, O. Tsyurulnyk, and N. Kret, *Eng. Failure Analysis*, **82**: 364 (2017).
16. O. I. Zvirko, A. B. Mytsyk, O. T. Tsyurulnyk, G. Gabetta, and H. M. Nykyforchyn, *Mater. Sci.*, **52**, Iss. 6: 861 (2017).
17. R. V. Teliovych, J. A. Harasym, H. V. Krechkovska, and N. O. Bondarevska, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 11: 1489 (2018) (in Ukrainian).