ДОПОВІДІ
НАЦІОНАЛЬНОЇ
АКАДЕМІЇ НАУК
УКРАЇНИ

МЕХАНІКА
MECHANICS

https://doi.org/10.15407/dopovidi2026.04.056
УДК 620.19:621.875

О.І. Звірко, https://orcid.org/0000-0002-6973-6804
П.О. Семенов, https://orcid.org/0000-0003-4121-6011
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
E-mail: olha.zvirko@gmail.com, p.a.semenoff@gmail.com

Вплив попередньої високошвидкісної пластичної деформації на опір крихкому руйнуванню ферито-перлітних сталей

Представлена членом-кореспондентом НАН України С. Ю. Максимовим

Сформульовано науково-технічну проблему втрати працездатності конструкційних ферито-перлітних сталей внаслідок дії екстремальної високошвидкісної пластичної деформації, що супроводжується зниженням їхнього опору крихкому руйнуванню. На прикладі портального крана, виготовленого з листової ферито-перлітної сталі та експлуатованого 51 рік у морському порту, встановлено, що залежно від умов навантаження та орієнтації зразків відносно текстури екстремальні пластичні деформації можуть зумовлювати як зниження ударної в'язкості KCV, так і її підвищення внаслідок зміни траєкторії поширення тріщини через розшарування металу вздовж напрямку вальцювання.

Ключові слова: *високошвидкісне деформування, ферито-перлітна сталь, експлуатаційна деградація, ударна в'язкість, механічні властивості.*

Вступ. Конструкційні матеріали цивільної інфраструктури можуть зазнавати екстремально високошвидкісної пластичної деформації внаслідок інтенсивних динамічних навантажень, зокрема ударів, вибухів, зіткнень, техногенних аварій та інших надзвичайних подій. До таких об'єктів належать портові металоконструкції, особливо перевантажувальне обладнання. Вони експлуатуються в режимі інтенсивного циклічного навантаження, часто десятками років, що спричиняє істотну втрату вихідних механічних властивостей [1—5]. Найпроблемнішим є зниження опору крихкому руйнуванню, що зумовлює також підвищену чутливість сталей до корозійно-механічного руйнування. Це посилює ризик втрати

Цитування: Звірко О.І., Семенов П.О. Вплив попередньої високошвидкісної пластичної деформації на опір крихкому руйнуванню ферито-перлітних сталей. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2026. № 4. С. 56—66. https://doi.org/10.15407/dopovidi2026.04.056

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

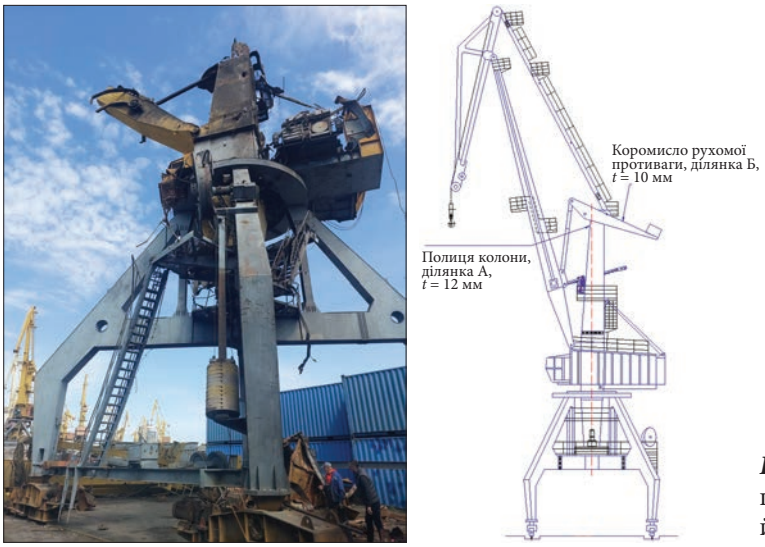
цілісності конструкцій, оскільки морські припортові конструкції зазнають агресивного впливу корозивно-наводнювальних середовищ [6—8]. Визнано, що головний чинник деградації сталей з огляду зниження опору крихкому руйнуванню полягає у розвитку розсіяної в об'ємі металу мікропошкодженості [9].

Основну частку сталевих металоконструкцій перевантажувального обладнання виготовляють із фасонного прокату, в якому мікроструктурні складові витягнуті вздовж напрямку вальцювання [9]. У таких випадках на механічні властивості сталей впливає текстура, а їхній рівень залежить від орієнтації зразків під час вирізання з листового матеріалу стосовно напрямку вальцювання [3, 4, 9]. Під час випробувань зразків, орієнтованих у поперечному до вальцювання напрямку, фіксують нижчі значення ударної в'язкості, ніж у поздовжньому [4, 9]. Встановлено, що експлуатаційна деградація вальцьованих сталей посилює анізотропію характеристик опору крихкому руйнуванню залежно від напрямку вирізання зразків, що пояснюється домінуванням розвитку пошкодженості вздовж витягнутих волокон текстури [3, 4, 9].

Попереднє дослідження показало [10], що високошвидкісна пластична деформація знижує рівень опору крихкому руйнуванню вальцьованих сталей подібно до їхньої тривалої експлуатації, тобто накладаються два чинники деструктивної дії в одному особливо небезпечному напрямку. Відповідно, постає питання щодо можливості подальшого безпечного використання тривало експлуатованого перевантажувального обладнання після певних ремонтних заходів для мінімізації наслідків впливу екстремального характеру.

Мета роботи — аналіз впливу попередньої високошвидкісної пластичної деформації на опір та характер руйнування ферито-перлітних сталей на прикладі перевантажувального обладнання з урахуванням його тривалої експлуатації.

Методика дослідження. Досліджували метал з різних ділянок портального крана "Альбатрос" (рис. 1, *а*), що експлуатувався впродовж 51 року в морському порту та зазнав дії екстремально високошвидкісної пластичної деформації внаслідок інтенсивних динамічних навантажень. Тут поняття "високошвидкісна пластична деформація" використовується насамперед для характеристики умов формування пошкодження конструкції, а не як кількісно встановлений параметр деформування дослідженого металу. Швидкість деформації могла сягати величин у діапазоні 10^2—10^4 $с^{-1}$ за вибухового імпульсного навантаження (основна деформована область — 10^1—10^3 $с^{-1}$, локальна пластична зона — 10^3—10^4 $с^{-1}$) та 10^3—10^5 $с^{-1}$ — за ударно-проникного навантаження (основна деформована область — 10^2—10^4 $с^{-1}$, локальна пластична зона — 10^3—10^5 $с^{-1}$). Для досліджень з крана вирізали фрагменти елементів конструкції з двох місць (див. рис. 1, *б*): колони (умовно ділянка А) та коромисла рухомої противаги (ділянка Б). Елементи конструкції виготовлені з листового прокату, матеріал — маловуглецева ферито-перлітна сталь St38b2 (типу Ст3сп). Ділянка А (лист завтовшки t = 12 мм) зазнала деформування вигином внаслідок високошвидкісного вибухового імпульсного навантаження (рис. 2, *а*). Замірами довжини дуги на розтягнутій поверхні листа (рис. 2, *а*) визначено, що рівень відносної деформації ε (відносного розтягу) становив приблизно 2 %. Така оцінка є орієнтовною, однак її достатньо для ідентифікації характерної стадії деформування металу. Зокрема, значення $\varepsilon \approx 2$ % відповідає відносно невеликому ступеню деформування і дає підстави віднести досліджувану ділянку до початкової стадії пластичного деформування, ближчої до межі плинності, ніж до середини ділянки рівномірного пластичного розтягу або стадії, що безпосередньо передує утворенню



а *б*

Рис. 1. Загальний вигляд пошкодженого портального крана "Альбатрос" (*а*) і його схема (*б*) з позначенням ділянок екстремального впливу (А і Б)

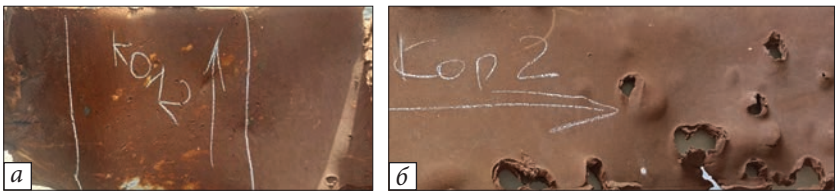


Рис. 2. Уражені частини ділянок А (*а*) і Б (*б*)

шийки. Отже, за величиною деформації метал досліджуваної ділянки А характеризується початковою стадією пластичного деформування.

На ділянці Б завтовшки t = 10 мм виявлено низку отворів у формі еліпса з довжиною більшої осі ≈20 мм (див. рис. 2, *б*) з чіткими ознаками пластичної деформації безпосередньо в їхньому околі внаслідок інтенсивних динамічних ударно-проникних навантажень. Крім того, лист з отворами (ділянка Б) також зазнав деформування вигином, рівень якого, за приблизними оцінками, був дещо меншим, ніж для листа А.

Під час випробувань на розтяг визначали за кімнатної температури базові механічні властивості металу: характеристики міцності (межі плинності σ_Y та міцності σ_{UTS}) і пластичності (відносні видовження δ і звуження ψ), а також ударну в'язкість *KCV* зразків Шарпі як характеристику опору крихкому руйнуванню. Відомо, що показник *KCV* особливо чутливий до зниження температури, але на даному етапі вивчення цієї проблеми для спрощення методики досліджень ми обмежилися випробуваннями за кімнатної температури. Для експериментів використовували стандартизовані зразки: на розтяг — п'ятикратні циліндричні з робочим діаметром 5 мм, а на удар — балкові розміром 10 × 10 × 55 мм. З ураженого листового матеріалу (див. рис. 2) їх вирізали наближено до максимально розтягнутих зон у двох напрямках стосовно напрямку вальцювання: вздовж (поздовжні зразки) та впоперек (поперечні зразки), при цьому намагалися, щоб розташування зразків на розтяг і удар було максимально наближеним одне до одного. Окремо з ділянок А і Б вирізали їхні

неуражені частини, тобто без екстремального деформування. Після випробувань порівнювали механічні властивості уражених і неуражених частин і оцінювали вплив екстремальних умов високошвидкісного деформування на їхню зміну. Для одного стану металу та орієнтації відносно напрямку вальцювання випробовували три зразки на розтяг і п'ять зразків на удар, результати усереднювали. Зазначимо, що різні за станом (уражені і неуражені) частини елементів крана були вирізані з одного листа, що мінімізувало розкид даних, спричинений можливими відмінностями у вихідному стані.

Для оцінки отриманих результатів застосовували макрофрактографічний аналіз зразків, випробуваних на ударну в'язкість, яким обґрунтовували енергоємність руйнування, спричинену екстремальним впливом високошвидкісної деформації.

Результати експериментів та їх аналіз. Характеристики міцності і пластичності загалом чутливі до впливу попереднього високошвидкісного деформування (табл. 1), при цьому виявлено низку особливостей. Метал ділянки Б вирізняється дещо вищою міцністю, ніж ділянки А, що може бути зумовлено як розкидом даних у межах виготовлення листового прокату дещо різної товщини, так і різним ступенем деградації через неоднаковий напружений стан елементів конструкції крана. Вплив екстремальних умов високошвидкісної деформації виявився у зниженні межі міцності σ_{UTS} для обох ділянок і межі плинності σ_Y для металу ділянки Б. Це нетипова механічна поведінка сталі, враховуючи, що вона деформаційно зміцнюється. Такі випадки вважають результатом розвитку розсіяної пошкодженості [9], яка створює в мікрообластях об'єму металу концентрацію напружень.

Вплив високошвидкісної деформації на показники пластичності сталі неоднозначний: спостерігали не тільки їхнє зниження (переважно для матеріалу А і лише частково — для Б), а й відсутність такого впливу чи навіть підвищення. Слід зазначити, що найвище значення відносного звуження ψ (72,1 %), яке спостерігали для ділянки А, загалом є типовим для сталей такого класу [3, 5]. Виявлені відмінності в характеристиках пластичності експлуатованих сталей прокату можуть бути зумовлені неоднорідністю локальної деформації та нерівномірним накопиченням експлуатаційних пошкоджень.

Випробування на ударну в'язкість також виявили низку особливостей (табл. 2, рис. 3). Метал без екстремального впливу на нього високошвидкісної деформації відзначається особливо низькими значеннями *KCV*, усереднені значення знаходилися в діапазоні 33,2—56,2 Дж/см^2, що не властиво сталям такого класу і такої міцності [4, 5]. Це пов'язано з його експлуатаційною деградацією впродовж особливо тривалого терміну (51 рік) у жорстких

Таблиця 1. **Властивості міцності і пластичності сталі для різних ділянок крана залежно від орієнтації зразків і дії високошвидкісної деформації**

Стан ділянки	Тип зразка	Ділянка А				Ділянка Б			
		σ_Y, МПа	σ_{UTS}, МПа	δ, %	ψ, %	σ_Y, МПа	σ_{UTS}, МПа	δ, %	ψ, %
Неуражена	Поздовжній	268	492	32,3	55,2	344	518	27,3	54,6
	Поперечний	269	494	31,3	52,5	363	518	25,5	51,7
Уражена (дія високошвидкісної деформації)	Поздовжній	272	410	27,2	54,4	312	461	27,7	58,0
	Поперечний	279	411	27,5	72,1	333	460	26,8	51,0

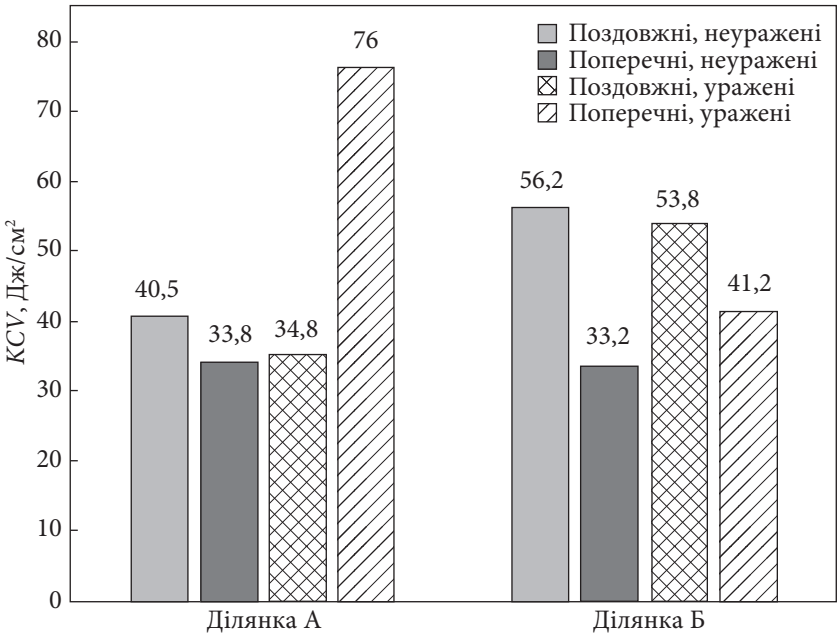


Рис. 3. Усереднені дані *KCV* сталі для різних ділянок крана залежно від орієнтації зразків і дії високошвидкісної деформації

умовах циклічного навантаження, основним чинником якої є розвиток розсіяної в об'ємі металу мікропошкодженості. Зазначимо, що для поздовжніх зразків ділянки Б, вирізаної з коромисла рухомої противаги, отримано дещо вищі значення *KCV* (53,8—56,2 Дж/см^2), ніж для колони (ділянка А, 34,8—40,5 Дж/см^2). Раніше [4] було показано, що відмінності в ударній в'язкості сталі однієї марки, але різних елементів конструкції одного тривало експлуатованого портального крана, зумовлені різним рівнем експлуатаційних напружень.

За всіх умов випробувань поперечних зразків, за одним винятком (метал ділянки А), отримано нижчі значення *KCV*, що, очевидно, пов'язано з полегшеним руйнуванням вздовж витягнутих у напрямку вальцювання елементів мікроструктури [4, 5, 9]. Для сталі ділянки А найбільший вплив високошвидкісної деформації на зниження ударної в'язкості зафіксовано для частини поперечних зразків (13,8 і 22,5 Дж/см^2), що може бути пов'язано з розвитком пошкодженості, додатковим до експлуатаційного. За таких умов процес пластичної деформації як спосіб релаксації напружень ускладнений, а залишається спосіб, який ґрунтується на утворенні нових поверхонь, тобто пошкодженості. Водночас для частини поперечних зразків ділянки А попередня високошвидкісна деформація спричинила підвищення ударної в'язкості сталі (81,2, 127,5 і 135,0 Дж/см^2), що нелогічно, якщо виходити тільки з позицій впливу на опір крихкому руйнуванню деформаційного зміцнення і розвитку пошкодженості.

Випробування сталі ділянки Б не виявили зниження рівня *KCV*, спричиненого високошвидкісною деформацією, що можна пояснити методичними обмеженнями проведення експериментів. На ділянці А зона інтенсивного деформування вигином займала значну область листового матеріалу, тому з неї можна було вирізати зразки на удар і оцінити вплив попереднього деформування на ударну в'язкість. На ділянці Б зона інтенсивної деформації була зосереджена поблизу отвору і нетто-переріз зразка знаходився подалі від його по-

верхні, а також від зони інтенсивної пластичної деформації. Однак листовий матеріал зазнавав, крім того, певного рівня деформації вигином, хоч і меншої інтенсивності, ніж на ділянці А. З цим, очевидно, пов'язано те, що і для металу ділянки Б виявлено підвищення рівня *KCV* під час випробувань поперечних зразків у результаті екстремального впливу (41,2 проти 33,2 Дж/см^2 за відсутності такого впливу), хоч і не таке істотне, як для ділянки А. Це свідчить про формування специфічної закономірності зростання рівня ударної в'язкості під дією чинників, які загальновизнані як окрихчувальні. Для з'ясування цього виконано фрактографічний аналіз.

Дані макрофрактографічних досліджень зломів зразків, випробуваних на ударну в'язкість (рис. 4), загалом узгоджуються з результатами механічних випробувань: що менша енергія руйнування, то крихкіший його характер. Виходячи з цього, на основі аналізу макрогеометрії поверхні руйнування можна пояснити нетиповий позитивний вплив попереднього високошвидкісного деформування металу листового прокату на його опір крихкому руйнуванню. Це стосується насамперед оцінок *KCV* поперечних зразків ділянки А, яка зазнала ураження (13,8; 81,2; 135,0; 22,5; 127,5 Дж/см^2). Фрактографічний аналіз двох зразків із цієї партії (див. рис. 4, *г*, *KCV* = 13,8 Дж/см^2; рис. 4, *ґ*, *KCV* = 135,0 Дж/см^2) демонструє принципово інший характер злому: макрокрихкий, плоский у першому випадку та в'язкий, з розвиненою поверхнею — у другому. Специфіка його геометрії полягає в повороті макроплощини руйнування перпендикулярно до магістрального напрямку, що схематично зображено на рис. 5. Згідно з наведеною схемою напрямок площини поширення руйнування від надрізу спочатку типовий, перпендикулярний до дії максимальних розтягувальних напружень. Однак далі він повертає приблизно на 90° у напрямку вальцювання прокату, що, очевидно, зумовлено ослабленням когезивного зв'язку між витягнутими волокнами текстури. У результаті утворюється гладка поверхня, і подальше руйнування від неї вже потребує значної енергії, що відображається високим рівнем *KCV*. Тобто у точці *B* (див. рис. 5) під час зміни напрямку поширення руйнування відбувається конкурентний процес між впливами: з одного боку, розподілом макронапружень для даної схеми навантаження (механічний чинник), а з іншого — напрямками максимального ослаблення опору мікроруйнуванню (матеріалознавчий чинник). Отримані високі значення ударної в'язкості свідчать на користь переваги матеріалознавчого чинника. Якщо ж у точці біфуркації *B* перевагу має дія механічного чинника, поверхня руйнування крихка (див. рис. 4, *г*) з критично низьким рівнем *KCV*. Цілком можливо, що виявлені особливості зміни пластич-

Таблиця 2. **Значення ударної в'язкості *KCV* (Дж/см^2) сталі для різних ділянок крана залежно від орієнтації зразків і дії високошвидкісної деформації**

Стан ділянки	Тип зразка	Ділянка А		Ділянка Б	
		Для одного зразка	Усереднене значення	Для одного зразка	Усереднене значення
Неуражена	Поздовжній	33,8; 47,5; 46,2; 46,2; 28,8	40,5	55,0; 55,0; 55,0; 62,5; 53,8	56,2
	Поперечний	32,5; 32,5; 38,8; 32,5; 32,5	33,8	36,2; 32,5; 31,2; 37,5; 28,8	33,2
Уражена (дія високошвидкісної деформації)	Поздовжній	37,5; 37,5; 27,5; 41,2; 30,0	34,8	52,5; 58,8; 51,2; 57,5; 48,8	53,8
	Поперечний	13,8; 81,2; 135,0; 22,5; 127,5	76,0	38,8; 41,2; 42,5; 42,5; 41,2	41,2

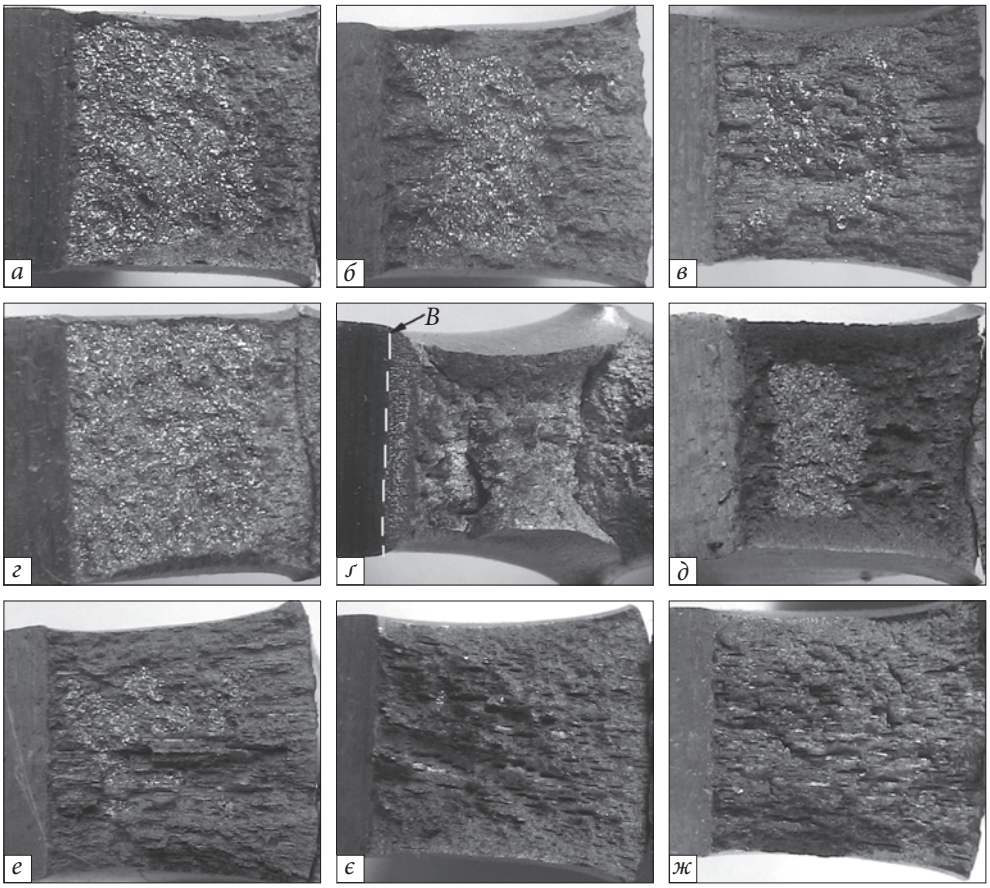


Рис. 4. Поверхні руйнування поздовжніх (*а*, *в*, *д*, *є*) та поперечних (*б*, *г*, *ґ*, *е*, *ж*) зразків, вирізаних з ділянок А (*а*—*ґ*) та Б (*д*—*ж*), неуражених (*а*, *б*, *д*, *е*) та уражених (*в*, *г*, *ґ*, *є*, *ж*) внаслідок бойових дій. Концентратор зразка розташований зліва

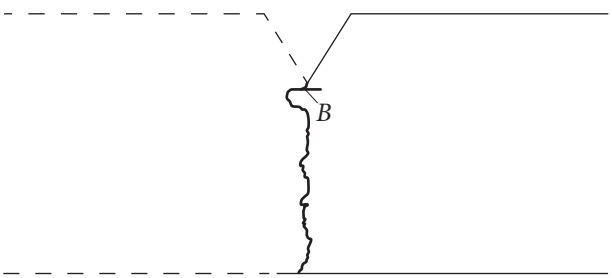


Рис. 5. Схематичне зображення макрогеометрії профілю злому за випробувань на ударну в'язкість поперечного зразка ділянки А після дії високошвидкісної деформації

ності теж зумовлені процесом мікророзшарування. А наявність для однієї партії зразків, причому в безпосередній близькості за розміщенням у листовому матеріалі, різної траєкторії руйнування після точки біфуркації вказує на приблизно однакову ймовірність їх реалізації, а не на принципово різний стан металу.

Загальновідомо, що попередня пластична деформація конструкційних сталей, вичерпуючи пластичність, знижує їхній опір крихкому руйнуванню, зокрема й ударну в'язкість. Однак її істотний вплив за кімнатної температури випробувань виявляється за підвище-

ного рівня пластичної деформації. Зокрема, у праці [11] на прикладі сталі 17Г1С з урахуванням напрямку вирізання зразків показано, що за деформації 3,5 % значення *KCV* знижується в межах 10—23 % за температури випробувань 20 °С. Такі оцінки дають підстави стверджувати, що описані у цій праці механічні ефекти зумовлені саме високошвидкісним пластичним деформуванням сталей прокату даного класу.

Підсумовуючи отримані результати, для оцінювання технічного стану металу, що зазнав високошвидкісного деформування, рекомендовано застосовувати не тільки ударну в'язкість як регламентовану характеристику, але й аналізувати комплекс базових механічних властивостей, а працездатність конструкцій оцінювати за характеристиками, найчутливішими до деградації металу. Оскільки за результатами дослідження встановлено значну просторову неоднорідність механічних властивостей металу в зоні пошкодження, зокрема широкий діапазон значень ударної в'язкості, то оцінювання технічного стану конструкції за усередненими показниками є недостатнім. Особливу увагу необхідно приділяти зонам із найнижчими значеннями ударної в'язкості та вираженою структурно-механічною неоднорідністю.

Отримані результати відкривають перспективи для подальших комплексних міждисциплінарних досліджень для вирішення важливої науково-технічної проблеми втрати працездатності ферито-перлітних сталей металоконструкцій внаслідок дії високошвидкісної пластичної деформації, що супроводжується зниженням їхнього опору крихкому руйнуванню. Необхідне глибше розуміння процесів окрихчення металу на мікрорівні, пов'язане з роллю текстури прокату, підвищенням небезпеки корозійно-механічного і воднево-механічного руйнування з урахуванням можливого синергетичного впливу мультифакторної експлуатаційної деградації та високошвидкісного деформування. Особливо варто зазначити потребу в розвитку науково обґрунтованих методик як руйнівного, так і неруйнівного оцінювання технічного стану сталей металоконструкцій, які зазнали попередньої високошвидкісної пластичної деформації. Такі дослідження доцільно спрямувати на встановлення кількісних взаємозв'язків між показниками опору крихкому руйнуванню та інформативними параметрами неруйнівного контролю (електрохімічними, магнітними, ультразвуковими, електромагнітними, акустико-емісійними та ін.) [12—15], що дасть змогу обґрунтувати ефективні критерії діагностування деградації металу, оцінювання його залишкового ресурсу та підвищення безпеки експлуатації металоконструкцій, зокрема перевантажувальних кранів морських портів.

Висновки. Встановлено, що екстремально високі швидкості навантаження ферито-перлітних сталей тривало експлуатованих металоконструкцій загалом знижують їхні базові механічні властивості, однак у певних випадках неоднозначно на них впливають. Так, характеристики міцності переважно знижуються, що узгоджується з твердженням про зумовленість таких змін розвитком розсіяної в об'ємі металу мікропошкодженості. Стосовно впливу високошвидкісної деформації на ударну в'язкість, то, попри очікуване зниження рівня *KCV*, спричинене деформаційним зміцненням та розвитком пошкодженості, виявлено випадки різкого зростання опору крихкому руйнуванню. Згідно з результатами макрофрактографічного аналізу, вказана особливість пов'язана зі зміною траєкторії поширення тріщини через розшарування поперек магістральної площини руйнування. Отже, отримано незвичний результат, за якого окрихчення сталі на мікрорівні спричиняє зростання енергії руйнування на макрорівні. Враховуючи можливу неоднозначність впливу

високошвидкісної деформації за екстремальних умов на властивості сталей, для прийняття рішення про можливість подальшої експлуатації конструкцій рекомендовано визначати комплекс базових механічних властивостей (міцність, пластичність та ударну в'язкість), при цьому працездатність конструкцій оцінювати за характеристиками, які є найчутливішими до деградації металу.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Kulka J., Mantic M., Fedorko G., Molnar V. Analysis of crane track degradation due to operation. *Eng. Fail. Anal.* 2016. **59**. P. 384—395. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.009
2. Marquez A.A., Venturino P., Otegui J.L. Common root causes in recent failures of cranes. *Eng. Fail. Anal*. 2014. **39**. P. 55—64. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.01.012
3. Nemchuk O.O., 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. https://doi.org/10.1007/s11223-020-00175-w
4. Pustovyi V.M., Semenov P.O., Nemchuk O.O., Hredil M.I., Nesterov O.A., Strelbitskyi V.V. Degradation of steels of the reloading equipment operating beyond its designed service life. *Mater. Sci.* 2022. **57**, № 5. P. 640—648. https://doi.org/10.1007/s11003-022-00590-1
5. Dzioba I., Zvirko O., Pała R., Oliynyk O. Assessment of the structural integrity of the portal crane elements after long-term operation. *Materials*. 2024. **17**, № 24. 6133. https://doi.org/10.3390/ma17246133
6. Omura T., Kudo T., Fujimoto S. Environmental factors affecting hydrogen entry into high strength steel due to atmospheric corrosion. *Mater. Trans*. 2006. **47**, № 12. P. 2956—2962. https://doi.org/10.2320/matertrans.47.2956
7. Zhang F., Wang X., Teng R., Guo X., Wang Y. Study on stress intensity factor of the pit-crack model for portal crane girders. *Sustainability*. 2023. **15**, № 9. 7621. https://doi.org/10.3390/su15097621
8. Peng Z., Bao Z.R., Dan W.J., Wang X.Y. Study on the early corrosion behavior and mechanical properties of low-carbon steel in a simulated seawater environment. *Strength Mater*. 2025. **57**, № 1. 113372. P. 131—144. https://doi.org/10.1007/s11223-025-00752-x
9. Nykyforchyn H., Zvirko O., Oliynyk O., Venhryniuk O., Nesterov O., Tsyrulnyk O. In-service degradation of rolled carbon steels: the role of damaging. *Procedia Struct. Integr*. 2023. **47**. P. 190—194. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.011
10. Semenov P.O. The influence of extreme deformation conditions on the impact toughness of the exploited steel of the portal crane. *Mater. Sci.* 2025. **60**. P. 607—613. https://doi.org/10.1007/s11003-025-00926-7
11. Дядін В.П., Давидов Є.О., Дмитрієнко Р.І. Вплив деформацій від статичних навантажень на ударну в'язкість і в'язкість руйнування циліндричних оболонок. *Автоматичне зварювання*. 2021. № 9. С. 24—30. https://doi.org/10.37434/as2021.09.04
12. Nazarchuk Z., Muravsky L., Kuryliak D. Digital speckle pattern interferometry for studying surface deformation and fracture of materials. *Optical metrology and optoacoustics in nondestructive evaluation of materials.* Singapore: Springer, 2023. P. 149—217. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1226-1_4
13. Juraszek J. Residual magnetic field non-destructive testing of gantry cranes. *Materials*. 2019. **12**, № 4. 564. https://doi.org/10.3390/ma12040564
14. De Arriba López V., Maboudi M., Achanccaray P., Gerke M. Automatic non-destructive UAV-based structural health monitoring of steel container cranes. *Appl. Geomat*. 2024. **16**, № 1. P. 125—145. https://doi.org/10.1007/s12518-023-00542-7
15. Nemchuk O.O., Zvirko O.I. Electrochemical method for the diagnostics of degradation of steels of marine portal cranes. *Mater. Sci*. 2020. **56**, № 3. P. 410—416. https://doi.org/10.1007/s11003-020-00444-8

Надійшла до редакції 29.07.2026

REFERENCES

1. Kulka, J., Mantic, M., Fedorko, G. & Molnar, V. (2016). Analysis of crane track degradation due to operation. Eng. Fail. Anal., 59, pp. 384-395. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.009
2. Marquez, A. A., Venturino, P. & Otegui, J. L. (2014). Common root causes in recent failures of cranes. Eng. Fail. Anal., 39, pp. 55-64. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.01.012
3. Nemchuk, O. O. & Nesterov, O. A. (2020). In-service brittle fracture resistance degradation of steel in a ship-to-shore portal crane. Strength Mater., 52, No. 2, pp. 275-280. https://doi.org/10.1007/s11223-020-00175-w
4. Pustovyi, V. M., Semenov, P. O., Nemchuk, O. O., Hredil, M. I., Nesterov, O. A. & Strelbitskyi, V. V. (2022). Degradation of steels of the reloading equipment operating beyond its designed service life. Mater. Sci., 57, No.5, pp. 640-648. https://doi.org/10.1007/s11003-022-00590-1
5. Dzioba, I., Zvirko, O., Pała, R. & Oliynyk, O. (2024). Assessment of the structural integrity of the portal crane elements after long-term operation. Materials, 17, No. 24, 6133. https://doi.org/10.3390/ma17246133
6. Omura, T., Kudo, T. & Fujimoto, S. (2006). Environmental factors affecting hydrogen entry into high strength steel due to atmospheric corrosion. Mater. Trans., 47, No. 12, pp. 2956-2962. https://doi.org/10.2320/matertrans.47.2956
7. Zhangm F., Wangm X., Tengm R., Guo, X. & Wang, Y. (2023). Study on stress intensity factor of the pit-crack model for portal crane girders. Sustainability, 15, No. 9, 7621. https://doi.org/10.3390/su15097621
8. Peng, Z., Bao, Z. R., Dan, W. J. & Wang, X. Y. (2025). Study on the early corrosion behavior and mechanical properties of low-carbon steel in a simulated seawater environment. Strength Mater., 57, No. 1, 113372, pp. 131-144. https://doi.org/10.1007/s11223-025-00752-x
9. Nykyforchyn, H., Zvirko, O., Oliynyk, O., Venhryniuk, O., Nesterov, O. & Tsyrulnyk, O. (2023). In-service degradation of rolled carbon steels: the role of damaging. Procedia Struct. Integr., 47, pp. 190-194. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.011
10. Semenov, P. O. (2025). The influence of extreme deformation conditions on the impact toughness of the exploited steel of the portal crane. Mater. Sci., 60, pp. 607-613. https://doi.org/10.1007/s11003-025-00926-7
11. Dyadin, V. P., Davydov, Ye. O. & Dmytrienko, R. I. (2021). Influence of deformations from static loads on impact and fracture toughness of cylindrical shells. Autom. Weld., No. 9, pp. 24-30 (in Ukrainian). https://doi.org/10.37434/as2021.09.04
12. Nazarchuk Z., Muravsky L. & Kuryliak D. (2023). Digital speckle pattern interferometry for studying surface deformation and fracture of materials. In: Optical metrology and optoacoustics in nondestructive evaluation of materials. Springer Series in Optical Sciences, Vol. 242 (pp. 149-217). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1226-1_4
13. Juraszek, J. (2019). Residual magnetic field non-destructive testing of gantry cranes. Materials, 12, No. 4, 564. https://doi.org/10.3390/ma12040564
14. De Arriba López, V., Maboudi, M., Achanccaray, P. & Gerke, M. (2024). Automatic non-destructive UAV-based structural health monitoring of steel container cranes. Appl. Geomat., 16, No. 1, pp. 125-145. https://doi.org/10.1007/s12518-023-00542-7
15. Nemchuk O. O. & Zvirko O. I. (2020). Electrochemical method for the diagnostics of degradation of steels of marine portal cranes. Mater. Sci., 56, No. 3, pp. 410-416. https://doi.org/10.1007/s11003-020-00444-8

Received 29.07.2026

O.I. Zvirko, https://orcid.org/0000-0002-6973-6804
P.O. Semenov, https://orcid.org/0000-0003-4121-6011

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine
E-mail: olha.zvirko@gmail.com, p.a.semenoff@gmail.com

INFLUENCE OF PRELIMINARY HIGH-SPEED PLASTIC DEFORMATION ON BRITTLE FRACTURE RESISTANCE OF FERRITIC-PEARLITE STEELS

In the presented study, a scientific and technical problem of loss of serviceability in ferritic-pearlite structural steels due to the action of extreme high-speed plastic deformation, accompanied by a decrease in their resistance to brittle fracture has been formulated. Using the example of a portal crane made of ferritic-pearlite sheet steel and operated for 51 years in a seaport, it has been established that extremely high-speed deformation of ferritic-pearlite steels of long-term operated metal structures have an ambiguous effect on their mechanical properties. Thus, the strength properties of steel generally decrease, which is consistent with the assertion that such changes are caused by the development of dissipated microdamage. At the same time, it has been revealed that, depending on the loading conditions and the orientation of the specimens relative to the texture, high-speed deformation can lead both to a decrease in the impact toughness, as well as to an increase in it due to a change in the crack propagation path caused by metal delamination along the rolling direction, which was confirmed by macrofractographic analysis of the tested specimens. Therefore, considering the potential ambiguity of the effect of deformation under extreme conditions on the properties of steels, it is recommended to determine a set of mechanical properties (strength, ductility, and impact toughness) to decide whether structures subjected to high-speed deformations can continue to be used. Future research will focus on developing non-destructive testing methods to assess the technical condition of steels that have undergone preliminary plastic deformation at high strain rates by establishing correlations between resistance to brittle fracture and informative non-destructive parameters, with the aim of improving the assessment of the operational safety of metal structures.

Keywords: *high-speed deformation, ferritic-pearlite steel, operational degradation, impact toughness, mechanical properties.*