

РОЗДІЛ 5

СТАЛІ ПРОФІЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ, ЕКСПЛУАТОВАНИХ В АТМОСФЕРНИХ УМОВАХ

5.1. Особливості деградації сталей елементів сіткових гіперболоїдних веж

Профільний прокат широко використовують для спорудження різноманітних інженерних конструкцій. Вік деяких з них понад 100 років (наприклад, сталеві мости, вежі), при цьому значна їх частина дотепер знаходиться в експлуатації. Однак постає питання про можливу деградацію металу впродовж такого тривалого часу, тобто втрату ним вихідних, першочергово механічних, властивостей. Складність таких оцінок у тому, що необхідно зважати на принципово різну якість металу, виготовленого в різні часові періоди: 100 і більше років тому та на сучасному етапі. З розвитком технології металургійного процесу якість фасонного прокату підвищувалася, в тому числі і завдяки зниженню вмісту шкідливих домішок та неметалевих включень у сталях. Тоді зменшувалась імовірність розшарування вздовж меж витягнутих у напрямі вальцювання неметалевих включень, а отже, підвищувалась опірність сталей крихкому руйнуванню та дії корозивно-наводнювальних середовищ. Таким чином, порівнянням властивостей експлуатованого тогочасного та неексплуатованого сучасного прокату не можна чітко сформулювати ступінь експлуатаційної деградації металу. Частково вирішити цю проблему можна, якщо зіставляти властивості металу різних ділянок конструкції, з яких частина не зазнавала суттєвих механічних навантажень. Тут можна припустити незначні зміни стану металу, якщо вважати головним чинником експлуатаційної деградації конструкційних сталей робочі напруження.

Розглядаючи ймовірність впливу агресивних середовищ на фізико-механічні властивості сталей “в об’ємі” елемента конструкції, слід брати до уваги тільки роль водню, утвореного внаслідок електрохімічної реакції в системі “метал–середовище”. Тоді метал деградує вже за сумісної дії напружень і водню, абсорбованого сталлю. Сталі профільних конструкцій найчастіше експлуатують за атмосферних умов, які зазвичай розглядають лише як корозійно-агресивні, але можуть володіти і певною наводнювальною здатністю. Це стосується як морської атмосфери [1], так і атмосфери поблизу промислових, особливо хімічних, підприємств. Загальновідомо, що водневий показник рН водного середовища т.зв. кислотних дощів значно нижчий за нейтральне значення, що підвищує імовірність корозії з водневою деполяризацією, а отже, і наводнювання металу.

В Україні останнім часом звернули особливу увагу на інженерні конструкції у вигляді гіперболоїдних сіткових веж, збудованих на початку ХХ сторіччя за проектами інженера В.Г. Шухова [2, 3], в основі яких – одноповерховий гіперболоїд (двічі лінійна поверхня, через будь-яку точку якої можна провести дві прямі, що перетинаються і цілковито належать їй). Встановлення балок уздовж цих прямих, що формують сіткову поверхню, забезпечує збереження форми конструкції за дії зовнішніх сил (навіть, якщо балки з'єднані між собою шарнірами). За однакової тримкої здатності їх металоємність втричі менша, ніж інших тогочасних конструкцій. Цей принцип донині використовують для зведення сучасних висотних споруд і конструкцій, зокрема, Kobe Port Tower в Японії, телевежі в Австралії, Ještěd у Чехії, Гуанчжоу в Китаї, торгово-розважального центру Хан Шатир у Казахстані, Aspire Tower у Катарі тощо. З-поміж збудованих веж Шухова в Україні досьгодні збереглися два діючі маяки в Дніпровському лимані (Аджигольські, рис. 5.1) та кілька водонапірних веж у Миколаєві, Черкасах (рис. 5.2), Білій Церкві; Конотопі та Помошні, які вже не використовують для водопостачання, але їх важливо зберегти як пам'ятки індустриальної архітектури.

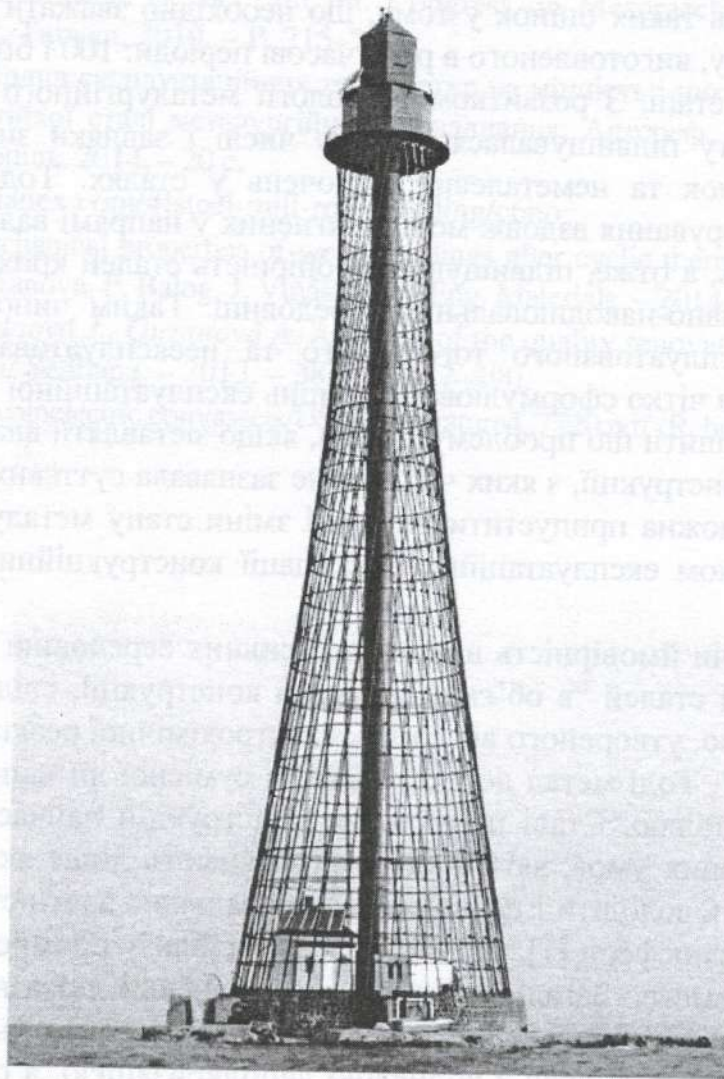


Рис. 5.1. Маяк у гирлі Дніпра, збудований у 1911 році.

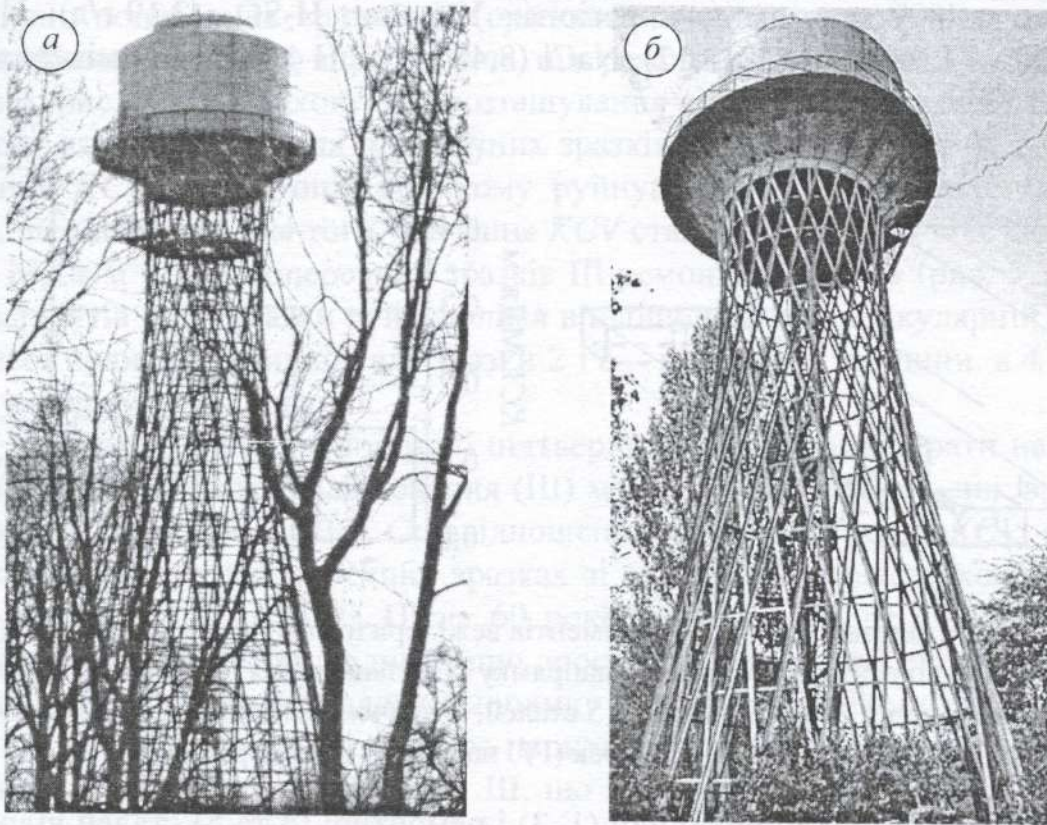


Рис. 5.2. Водонапірні вежі у Черкасах (а) і Миколаєві (б), збудовані відповідно у 1911 та 1907 роках.

Головними конструктивними елементами веж Шухова є кутники з малоуглецевої сталі, які і формують власне сіткову конструкцію. Під час монтажних робіт окремі елементи веж з'єднували лише заклепками. Внаслідок тривалої експлуатації метал кутників і клепані з'єднання зазнали суттєвих корозійних ушкоджень. Для забезпечення роботоздатності та підтримання належного технічного стану конструкцій здійснювали ремонтні роботи, використовуючи сучасний метал та тогочасну технологію зварювання. Це додатково ускладнює оцінювання міцності та довговічності зварних з'єднань автентичних сталей, до яких не висували вимоги щодо можливості їх зварювання.

Виконано комплекс досліджень технічного стану сталей веж Шухова [4–6], основні з яких стосувалися водонапірної вежі у Черкасах. Випробували старовинну сталь (кутник $120 \times 120 \times 10$ мм) та ремонтну, використану під час реконструкції вежі в 1944 р. ($150 \times 150 \times 10$ мм). Кутники з'єднані між собою горизонтально розташованими кільцеподібними ободами зі сталевих смуг або кутників. Для оцінювання стану металу заміряли твердість HV , визначали ударну в'язкість KCV та випробовували розтягом, щоб встановити характеристики міцності та пластичності. Зразки по-різному орієнтували до напрямку вальцювання, а концентратор на них нарізали з боку внутрішньої поверхні полицки кутників, інтенсивніше пошкодженої корозією, або з їх торця (рис. 5.3а). Розтягом зразки випробовували у повітрі та в середовищі синтетичного кислотного дощу за швидкості деформування 3×10^{-3} та $1,7 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ відповідно. Склад кислотного дощу вибрали, ґрунтуючись на аналізі атмос-

ферних опадів у промислових регіонах України: H_2SO_4 (3,19 г/л); Na_2SO_4 (3,2); HNO_3 (1,58); $NaNO_3$ (2,12); $NaCl$ (8,48 г/л); рН 4,4; рівень мінералізації 0,3%.

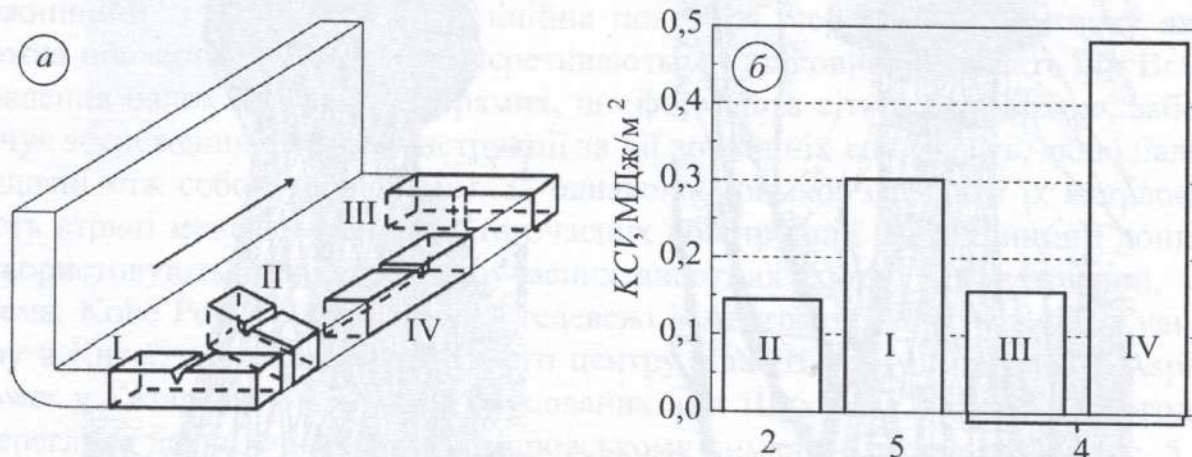


Рис. 5.3. Схема вирізання зразків із елементів вежі, орієнтованих під кутами 90° (I, III); 70° (II) і 0° (IV) до вказаного стрілкою напрямку їх вальцювання (а), та ударна в'язкість KCV старовинної 2 та ремонтної 4; 5 сталей, визначена на зразках, орієнтованих уздовж (I, II, III) і впоперек (IV) напрямку вальцювання (б).

Хімічний склад старовинної (1–3) і ремонтної (4 та 5) сталей відрізнявся головно за вмістом вуглецю. Причому його вміст у старовинній коливався від кутника до кутника сильніше, ніж у ремонтній (табл. 5.1). Загалом їх склад відповідав сучасним низько- і середньовуглецевим сталям. Твердість HV ремонтної сталі теж стабільніша і коливалася від 112 до 123, а її середні значення становили 117 і 118 на кутнику 4 і 5 відповідно. Твердість старовинної сталі істотно нижча і змінювалася від 64 до 92 HV , а її середнє значення – від 71 на кутнику 1 до 83 на кутнику 3. Нижча твердість старовинної сталі першочергово пов'язана з нижчим вмістом у ній вуглецю, але й, можливо, з розсіяною пошкодженістю, сформованою під час 100-річної деградації металу, яка також знижує твердість [7, 8].

Таблиця 5.1

Хімічний склад і твердість HV сталей елементів вежі Шухова

Сталь	Вміст елементів, мас.%						Твердість HV
	C	Mn	Si	Cu	S	P	
1	0,28	0,48	0,006	0,013	0,043	0,019	83
2	0,34	1,49	0,030	0,008	0,012	0,052	79
3	0,16	0,40	0,005	0,015	0,062	0,057	71
4	0,40	0,62	0,230	0,108	0,030	0,028	117
5	0,34	0,64	0,270	0,104	0,066	0,038	118

Результати випроб на удар. Попри однаковий вміст вуглецю в старовинній 2 і ремонтній 5 сталях, ударна в'язкість KCV першої, визначена на

практично поперечних зразках II (орієнтованих під кутом 70° до напрямку вальцювання; рис. 5.3а), вдвічі нижча, ніж ремонтної 5 ($0,15$ і $0,3$ МДж/м² відповідно; рис. 5.3б). Враховуючи розташування зразків старовинної сталі 2 до напрямку вальцювання, для поперечних зразків слід сподіватися на ще нижчі значення *KCV*. Тобто опір крихкому руйнуванню старовинної сталі, ймовірно, ще нижчий. Крім того, значення *KCV* сталі 2 практично таке саме ($0,15$ і $0,16$ МДж/м²), як і поперечних зразків III ремонтної сталі 4 (рис. 5.3а). Для всіх варіантів сталі зразки руйнувалися в площині, перпендикулярній до внутрішньої полицки кутників, але зразки 2 і 5 – поперек її товщини, а 4 (зразки III) – у напрямі вальцювання.

На прикладі ремонтної сталі підтвердили, що енерговитрати на руйнування вздовж напрямку вальцювання (III) менші ($0,16$ МДж/м²), ніж впоперек (IV; $0,48$ МДж/м², рис. 5.3б). Співвідношення ударної в'язкості *KCV*, отриманої на поздовжніх і поперечних зразках зі сучасного металопрокату, змінюється в межах $1,1 \dots 1,4$ [9]. Після 60 років експлуатації це співвідношення збільшилося втричі, що свідчить про зростання схильності експлуатованого металу до розшарування вздовж напрямку вальцювання. Тому для оцінювання стану експлуатованого сталевого прокату рекомендовано використовувати зразки поперечної орієнтації типу III, що забезпечують найконсервативнішу оцінку опору крихкому руйнуванню.

Фрактографічні особливості руйнування зразків Шарпі. Загалом макрозлами зразків старовинної 2 та ремонтної 5 сталей плиткі і без губ витягування. Це макроознаки крихкого руйнування, яке розпочинається в центральній (по товщині) частині зразка і віялом поширюється від осередку зародження, формуючи на зламах макрогребені відриву. Старовинна сталь 2 на початковому етапі руйнувалася від вершини концентратора напружень за зсувним механізмом, про що свідчать параболічні ямки, витягнуті у напрямі руйнування (рис. 5.4а).

Подальший ріст відбувався за в'язким механізмом шляхом утворення доволі плитких ямок, їх росту та руйнування перетинок між ними внаслідок відриву, часом перемежованих ямками зсуву (рис. 5.4б). В'язке руйнування на глибину до 50 мкм завершилося домінуванням на зламі крихких фасеток крізьзеренного відколу з характерними гребенями відриву у вигляді річкових візерунків. Крізьзеренний відкол переважав у межах феритних зерен, тоді як в перлітних пластинки цементиту відокремлювалися від фериту з утворенням характерного структурно обумовленого смугастого рельєфу (рис. 5.4б). Крім того, особливістю руйнування старовинної сталі є сліди від неметалевих включень на зламах. Самі включення переважно відсутні, що є доказом їх слабкої когезії з матрицею, спричиненої експлуатацією.

Особливістю руйнування ремонтної сталі 5 є набагато ширша (до $0,5$ мм), неперервна вздовж фронту тріщини зона в'язкого рельєфу. Характерні стрічки відшарувань уздовж меж неметалевих включень з матрицею пов'язали з їх низькою когезією (рис. 5.4в). Їх залишки часом спостерігали на дні таких продовгуватих елементів рельєфу. Порівняно зі старовинною сталлю виявили більшу кількість і рельєфність, але менші за розмірами ямки відриву,

сформовані внаслідок витягування перетинок між паралельними рядами ямок навколо неметалевих включень. Крім того, на зламі чітко ідентифікували перлітні зерна з пластинковою будовою з розшаруваннями вздовж меж пластин цементиту і фериту (рис. 5.4з). Зафіксували також більшу, ніж у старовинній сталі, кількість поліедричних зерен перліту, що узгоджується з результатами металографічної експертизи структури обох сталей [4]. З поширенням руйнування на зламах переважають фасетки крихкого крізьзеренного відколу. Спільною особливістю для обох сталей є вторинне розтріскування вздовж меж структурних компонентів (пластин цементиту та фериту) в перлітних зернах навіть на етапі відкольного руйнування.

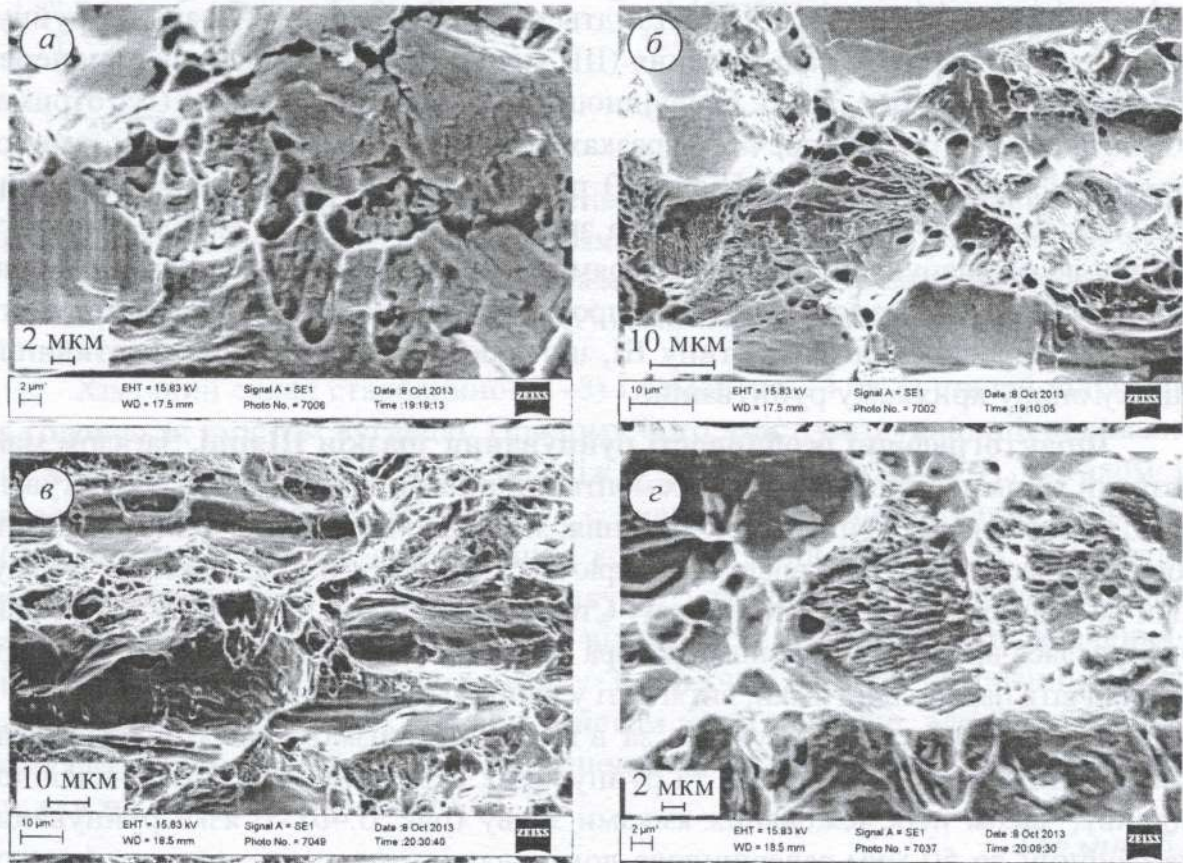


Рис. 5.4. Мікрофрактограми зони в'язкого підростання тріщин від концентратора напружень на поверхнях руйнування ударних зразків зі старовинної (а, б) та ремонтної (в, г) сталей.

Отже, фрактографічно підтверджено істотно нижчий запас пластичності старовинної сталі проти ремонтної. Про це свідчить менша протяжність зони в'язкого руйнування в ній, менші рельєфність ямок відриву та кількість включень на дні ямок через порушення їх зв'язку з матрицею.

Механічні властивості за випроб розтягом. Характеристики міцності ($\sigma_{0,2}$ та σ_B) ремонтної сталі 4 і 5 суттєво вищі, ніж старовинної 1–3, що пов'язали з різним вмістом вуглецю в них. Нижча міцність старовинної сталі узгоджується з її вищими характеристиками пластичності. Як і сподівалися, ха-

рактистику, визначені на поздовжніх зразках ремонтної сталі 4, виявилися вищими, ніж на поперечних 5 (табл. 5.2). Адаже енергоємність руйнування кутників попереа напруау вальцювання вища, ніж уздовж нього.

Таблиця 5.2

Механічні характеристики сталей елементів вежі за розтягу

Сталь	Орієнтація зразків до напрямку вальцювання	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	Вміст вуглецю, мас. %
		МПа		%		
1	Поперечна	482	310	26,3	41	0,28
2	Під кутом 70°	383	220	30	47,6	0,34
3	Поздовжня	420	227	25,6	66	0,16
4	—//—	651	416	23	48,4	0,40
5	Поперечна	637	424	22,4	41,7	0,34

Старовинні сталі з різних елементів вежі істотно відрізнялися за вмістом вуглецю, що спричинило значний розкид даних під час визначення їх характеристик. Попри те, для неї відзначили протилежну тенденцію зміни характеристик міцності залежно від орієнтації зразків. Зокрема, найвищу міцність отримали на чітко поперечних зразках сталі 1. На поздовжніх сталі 3 вони значно нижчі (ймовірно, через суттєво менший вміст вуглецю в ній). Однак у сталі 2 з навіть дещо вищим вмістом вуглецю, ніж у сталі 1, і за відхилення зразків від поперечної орієнтації всього на 20° теж зафіксували відчутне зниження характеристик міцності. Тому дійшли висновку, що тривало експлуатованій старовинній сталі властива протилежна до відомої тенденція зміни характеристик міцності залежно від орієнтації зразків.

Стосовно характеристик пластичності сталі 1 з поперечною і сталі 3 з повздовжньою орієнтаціями зразків, то за практично однакових значень δ значення ψ сталі 3 було вищим (через найнижчий вміст вуглецю в ній). Попри найвищий вміст вуглецю в сталі 2 (з майже поперечною орієнтацією зразків), її характеристики міцності найнижчі, а пластичності найвищі (за винятком ψ , яке в сталі 3 було найвищим через невеликий вміст вуглецю).

Під час тривалої експлуатації елементи вежі зазнавали атмосферного впливу, що призвело до появи корозійних виразок та розшарування металу в напрямі вальцювання (особливо на стиках двох елементів, з'єднаних заклепками, де корозійні процеси особливо активні через застій середовища). Крім того, в старовинній сталі виявили велику кількість неметалевих включень, які спричиняють електрохімічну гетерогенність на мікроструктурному рівні. Вони виконують роль ефективних катодів за електрохімічної взаємодії металу з водним середовищем. Локалізація катодного процесу на неметалевих включеннях з утворенням водню як одного з продуктів реакції сприяє наводнюванню матриці в їх околі. Тоді, з одного боку, суттєво знижується опір сталі корозії [10], а з іншого, – абсорбований металом водень може дифундувати до неметалевих включень, сприяти їх декогезії від матриці та молізуватися в порах

уздовж меж їх поділу. Локальні напруження від тиску водню в таких порожнинах та концентрація напружень в околі неметалевих включень (особливо лінзоподібної форми) можуть навіть спричинити розтріскування сталі за механізмом водневого окрихчення. Адже її опір крихкому руйнуванню суттєво знизився внаслідок тривалої (понад сто років) експлуатації.

Враховуючи, що електрохімічна гетерогенність на мікроструктурному рівні в елементах вежі сприяє їх наводнюванню, порівняли механічні характеристики за розтягу поперечних зразків старовинної та ремонтної сталей за впливу синтетичного кислотного дощу (рис. 5.5). Так моделювали наслідки атмосферного впливу на напружений метал елементів вежі. З отриманих результатів дійшли висновку, що за впливу середовища характеристики міцності та пластичності обох сталей нижчі, ніж у повітрі.

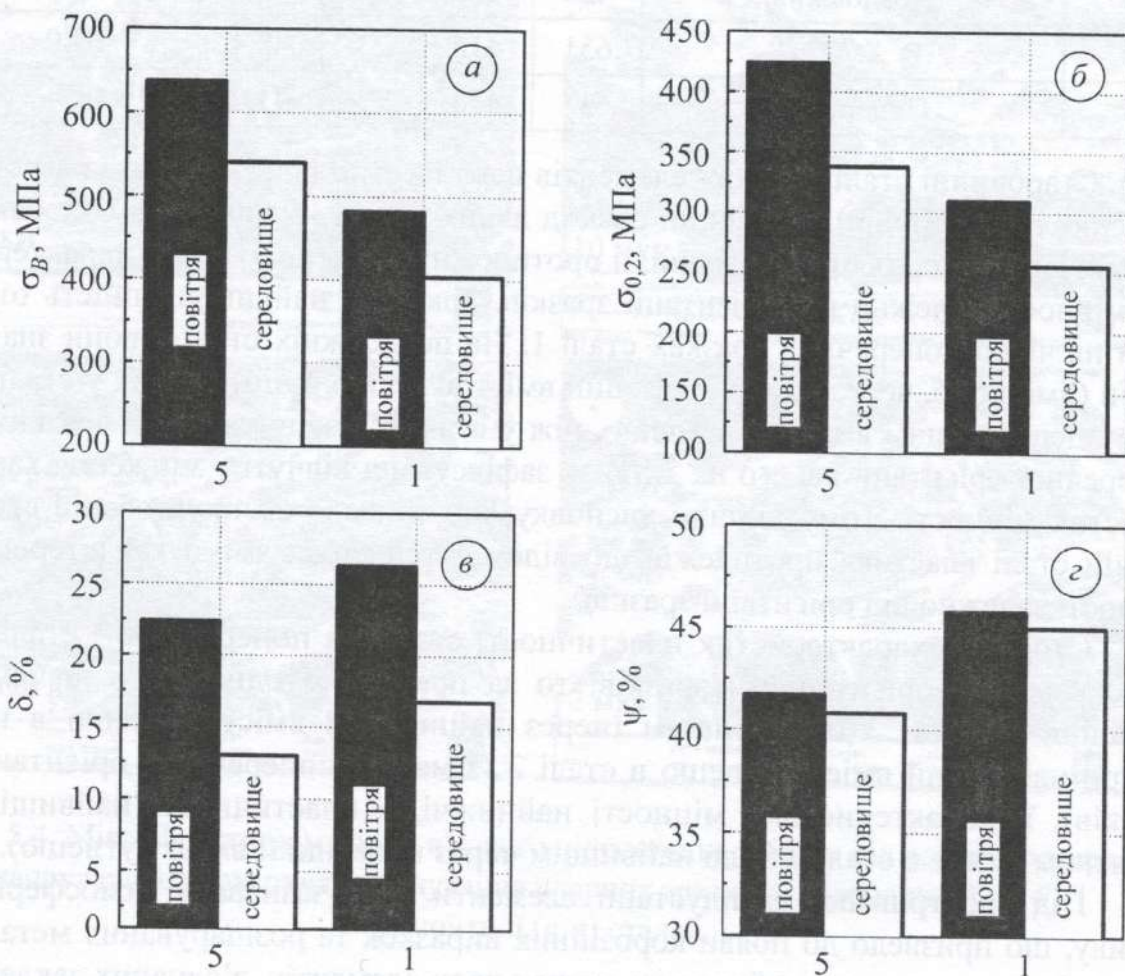


Рис. 5.5. Механічні характеристики за розтягу після випроб поперечних зразків у повітрі (чорні стовпчики) та в корозивному середовищі (білі) старовинної 1 та ремонтної 5 сталей.

Зауважили також, що і у повітрі, і в середовищі всі характеристики міцності старовинної сталі нижчі, ніж ремонтної. Це може бути наслідком не лише досконалішої технології виготовлення ремонтної сталі з кращими початковими характеристиками, але й сильнішої деградації старовинної впродовж тривалішої експлуатації. А нетиповий (протилежний) ефект зміни характеристик пла-

стичності тривало експлуатованого металу (особливо за наводнювання) вже фіксували неодноразово, зокрема, для металу зварного шва [7] та основного металу [11] головних парогонів ТЕС, сталей газо- та нафтогонів [12]. Його пов'язують зі зростанням макровидовження зразків внаслідок розкриття розпорошених в їх перерізі пошкоджень, які розкриваються вже на етапі рівномірного видовження. Оскільки за впливу будь-яких інших чинників обидві характеристики пластичності змінюються якісно подібно, то протилежну тенденцію їх зміни можна пояснити сильнішою деградацією старовинного металу.

Фрактографічні особливості руйнування сталей за випроб розтягом. Макрозлами зразків старовинного металу після випроб у повітрі мали характерний вигляд чашки. Конусна частина зламів поздовжніх зразків ширша, ніж поперечних. На макрозламах ремонтного металу незалежно від орієнтації зразків, випробуваних у повітрі, конусна частина практично відсутня, а на поперечному зразку, крім того, проявилася текстура. Фрактографічні особливості руйнування і ремонтної, і старовинної сталей у середовищі порівнювали на поперечних зразках. Їх макрозлами практично нормально орієнтовані без очевидних конусних частин.

За вищої роздільної здатності для зламів всіх зразків обох сталей у повітрі в центральній їх частині, де переважно розпочинається руйнування гладких зразків, спостерігали типове в'язке руйнування шляхом зародження і росту мікропорожнин із деформуванням перетинок між ними аж до їх руйнування та формування ямкового (димплого) рельєфу зламу (рис. 5.6).

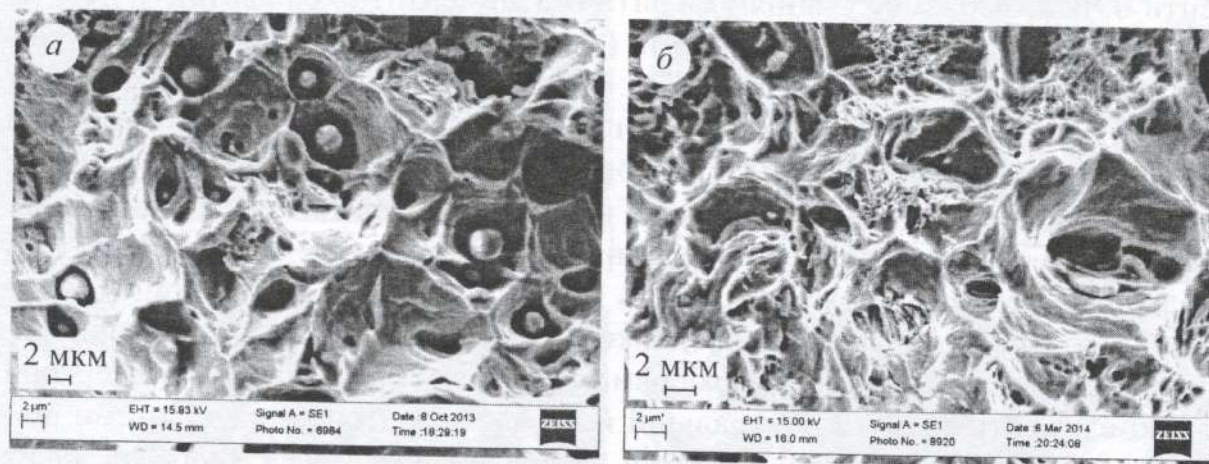


Рис. 5.6. Мікрофрактограми центральної частини зламів поздовжніх зразків старовинної 3 (а) та поперечних ремонтної 4 (б) сталей після їх випроб розтягом у повітрі.

Крім того, порожнини в старовинній сталі зароджувалися на неметалевих включеннях діаметром 3...4 мкм (рис. 5.6а), а в ремонтній – 0,3...1,5 мкм (рис. 5.6б). Це зумовило значно більші за розмірами ямки на зламах старовинної сталі, ніж ремонтної. Після випроб у повітрі поздовжніх зразків обох сталей неметалеві включення залишилися в ямках, утворених під час деформування металу навколо них.

У межах перлітних зерен руйнування обох сталей, як за випроб ударом, відбувалося вздовж меж поділу фаз з утворенням характерного смугастого, або дрібноямкового рельєфу, зумовленого пластинами цементиту і фериту. Макротекстурованість рельєфу поперечних зразків спричинена стрічками продовговатих ямок навколо неметалевих включень, орієнтованих у напрямі вальцювання. В околі бічних поверхонь усіх випробуваних у повітрі зразків зафіксували рельєф із параболічних ямок, який типовий для конусної частини зламів гладких зразків і свідчить про завершальний етап їх руйнування зсувом.

Після випроб у середовищі тріщини у зразках зі старовинної і ремонтної сталей зароджувалися не лише в центрі перерізу зразків, як у повітрі, але і в декількох місцях по периметру від їх бічних поверхонь (рис. 5.7а, б). Руйнування розпочиналося вздовж меж поділу фериту і перліту в місцях з високою густиною перлітних зерен, що виходили на бічну поверхню зразків. При цьому в обох випадках фіксували вторинне розтріскування вздовж цих меж та чітко окреслені міжфазні межі між пластинками цементиту та фериту в межах перліту. Дійшли висновку, що саме міжфазні межі найсхильніші до впливу середовища, яким моделювали вплив атмосферних опадів. Такі поверхневі пошкоди на зразках сприяють локалізації деформаційних процесів і пришвидшують руйнування загалом.

Вплив середовища проявився також появою в центральній частині зламів обох сталей фрактографічних ознак пошкодженості, що могла виникнути під час експлуатації (рис. 5.7в, г). У ремонтній сталі – це округлі фрагменти з чітким розмежуванням феритних і цементитних пластин у перліті та гладким рельєфом із характерними (хоч і невисокими) елементами відколу в межах феритних зерен (рис. 5.7г). У старовинній сталі такою ознакою є великі і водночас плиткі ямки з гребенями відриву вздовж їх периметра, на дні яких чітко проглядався пластинковий рельєф перліту (внизу рис. 5.7в). Еліптична форма цих ямок зумовлена витягнутою формою перлітних зерен. Руйнування, найімовірніше, розпочиналося вздовж меж поділу фериту з перлітними зернами (можливо, навіть на етапі тривалої експлуатації). Внаслідок активного навантаження пошкодження розвивалися, формуючи порожнини за деформаційним механізмом. Причому в обох варіантах сталі крихкі елементи зламу в центральній його частині оточені класичними рівновісними ямками відриву. Оскільки за випроб цих сталей у повітрі таких особливостей не спостерігали, то їх появу пов'язали з дифузією і накопиченням водню в дефектах, утворених під час експлуатації, та локальним полегшенням руйнування в їх околі. Подібні фрактографічні ознаки окрихчення в центрі перерізу гладких зразків, які перед випробами одновісним розтягом наводнювали, описані раніше [13]. Їх пояснили накопиченням водню в дефектах, які виникли на етапі експлуатації сталі, що проявилось елементами локального крихкого руйнування в центрі перерізу зразка.

Таким чином, сталям тривало експлуатованих кутників веж Шухова властиві наднизькі твердість та опір крихкому руйнуванню, що не вдається пояснити лише якістю тогочасного металопрокату. Тому можна дійти вис-

новку, що під час експлуатації відбувається деградація технічного стану сталей, спричинена першочергово розвитком у них розсіяної пошкодженості. На це вказує також більше відносне видовження старовинної сталі за нижчих твердості та ударної в'язкості. Фрактографічно підтверджено присутність експлуатаційних пошкоджень в об'ємі металу, які за умов наводнювання зразків зі середовища ініціюють крихке руйнування в центральній частині їх перерізу.

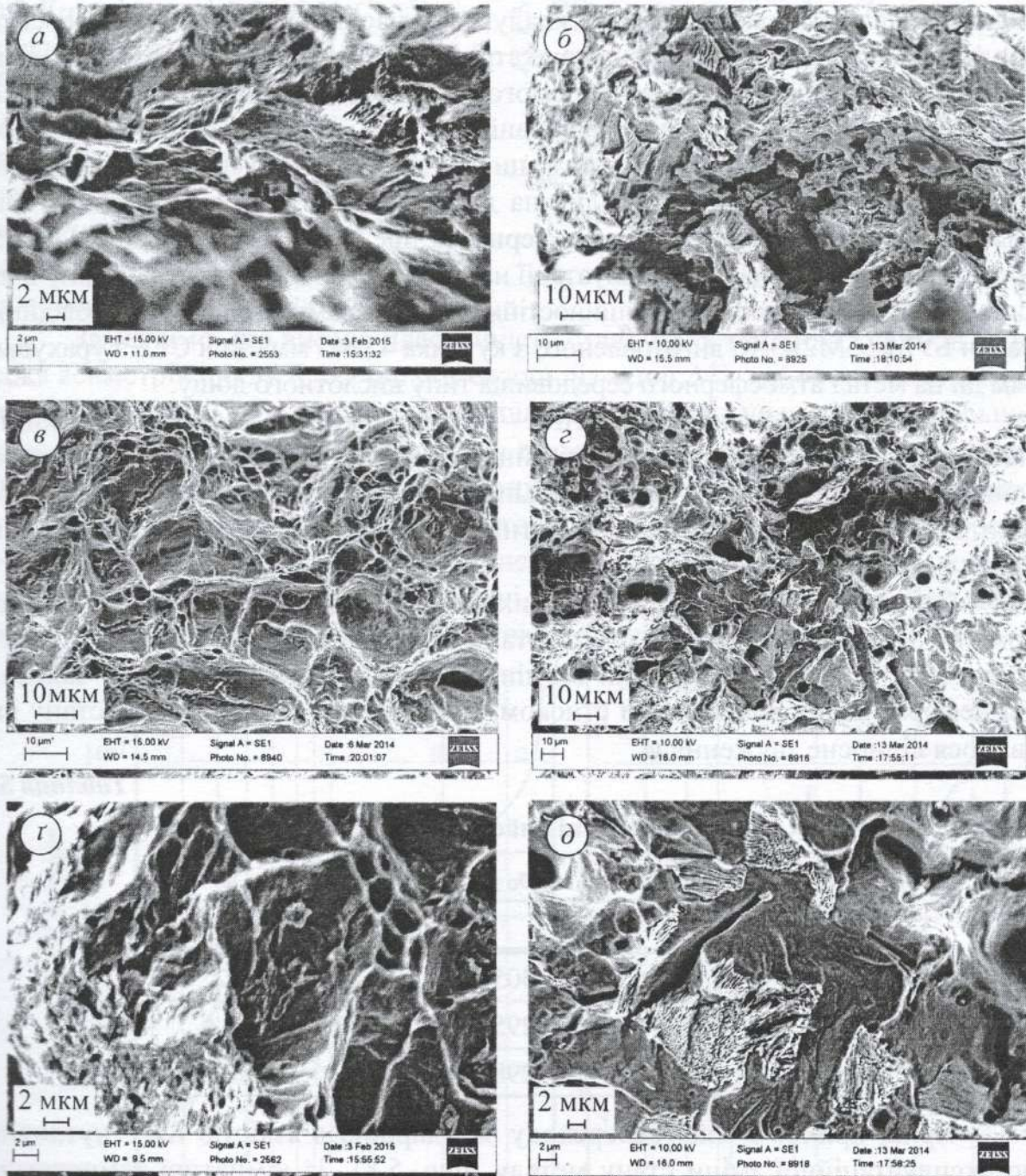


Рис. 5.7. Мікрофрактограми зламів поперечних зразків старовинної 1 (а, в, r) та ремонтної 5 (б, г, д) сталей після їх повільного розтягу в середовищі синтетичного кислотного дощу в околі відповерхневих пошкоджень (а, б) та в центральній частині зламів (в-д).

5.2. Особливості деградації сталі стріли буртоукладника

Проблема експлуатаційної деградації стану конструкційних сталей стоується і різного виду підйимально-транспортувальних механізмів, до яких належать і машини неперервної дії, які виконують різні складальні операції та є ефективними засобами механізації на кар'єрах відкритого видобування корисних копалин, а також під час складування насипної сільськогосподарської продукції. Таке обладнання оснащене стрілоподібною конструкцією, що утримується під заданим кутом за допомогою відтяжок, закріплених на вантовій опорі. На стрілі влаштовано стрічковий конвеєр, який транспортує вантаж. Обладнання експлуатується в режимі циклічного навантаження, тому важливо оцінити, з одного боку, його вплив на деградацію металу, а з іншого – крім загальноживаних механічних характеристик, ще і його ЦТ. У працях [14, 15] досліджено вплив тривалої експлуатації на міцність та пластичність, ударну в'язкість та корозійно-циклічну тріщиностійкість сталі рами стріли буртоукладника марки БУМ-65М2Б3-К, виготовленого з кутника 45×45 мм сталі Ст3, з урахуванням дії на метал атмосферного середовища типу кислотного дощу.

Вивчали три стани металу: № 1 – умовно вихідний (з елемента рами, на який практично не діяли експлуатаційні навантаження); № 2 і 3 – експлуатований за дії розтягальних та стискальних циклічних напружень. Зразки вирізали з полицки експлуатованого кутника, момент опору якої був менший проти робочого згинального.

Серед механічних характеристик, визначених під час розтягу зразків, помітно знизилися внаслідок експлуатації лише характеристики пластичності (табл. 5.3), хоч не спостерігали відмінності у властивостях металу залежно від деформування розтягом чи стиском. Чутливішим до зміни його стану виявилось відносне звуження ψ .

Таблиця 5.3

Механічні властивості сталі

№ стану	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	МПа		%	
1	434	305	31,9	72
2	436	295	28,1	64,4
3	450	298	28,0	58,2

Криві крихко-в'язкого переходу за ударною в'язкістю KCV чутливіші до експлуатаційної зміни стану металу (рис. 5.8). За кімнатної температури значення KCV металу всіх станів високе, однак, знижується від 160 до 120 Дж/см² внаслідок експлуатації. Для експлуатованого металу залежності $KCV-T$ істотно зміщені в область підвищених температур. Гранично низькі значення KCV (~8 Дж/см²) фіксували при температурі випроб -40 та -60°C,

при цьому відмінностей у опорі крихкому руйнуванню різних станів сталі не спостерігали. Зазначимо, що ступінь деградації металу не залежав від знака робочих циклічних напружень.

ЦТ металу визначали на плоских зразках $4 \times 18 \times 140$ мм консольним згином із частотою навантаження 5 Гц у повітрі і 0,3 Гц у розчині 0,01н. NaCl, підкисленому кислотою HCl до pH 4. Асиметрія циклу $R = 0,1; 0,6$ і 0,75, її високі значення відтворювали робочі умови циклічного навантаження. Кінетику росту втомних тріщин описували КДВР у координатах розмах КІН ΔK –швидкість росту тріщини da/dN .

Зазначимо, що висока пластичність сталі, мала товщина t зразків та висока асиметрія циклу R значно обмежили діапазон ΔK , для якого можна будувати КДВР (рис. 5.9). Зокрема, пластичний колапс наступав за максимального значення КІН $K_{max} \sim 35 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, а з підвищенням R відповідно звужувався діапазон ΔK , для якого можна виконувати експерименти. Умовам плоскої деформації відповідали лише припорогові ділянки КДВР. Тому тільки порогові КІН ΔK_{th} тут можна вважати характеристиками сталей. З іншого боку, товщина зразків практично відповідала товщині кутника, тому отримані КДВР можна використовувати для розрахунків довговічності конструкцій на стадії РВТ.

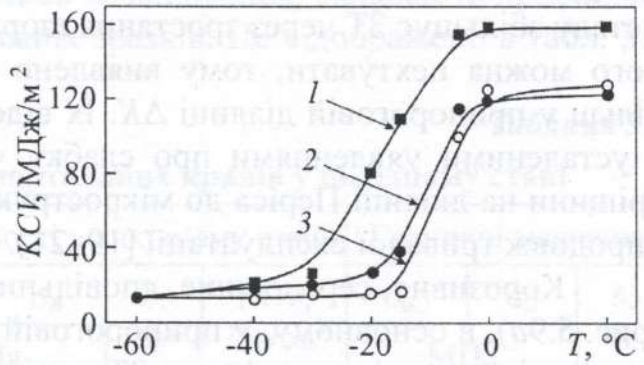


Рис. 5.8. Залежності $KCV-T$ для сталі Ст3 різних станів (криві 1–3 відповідають номеру стану у табл. 5.3).

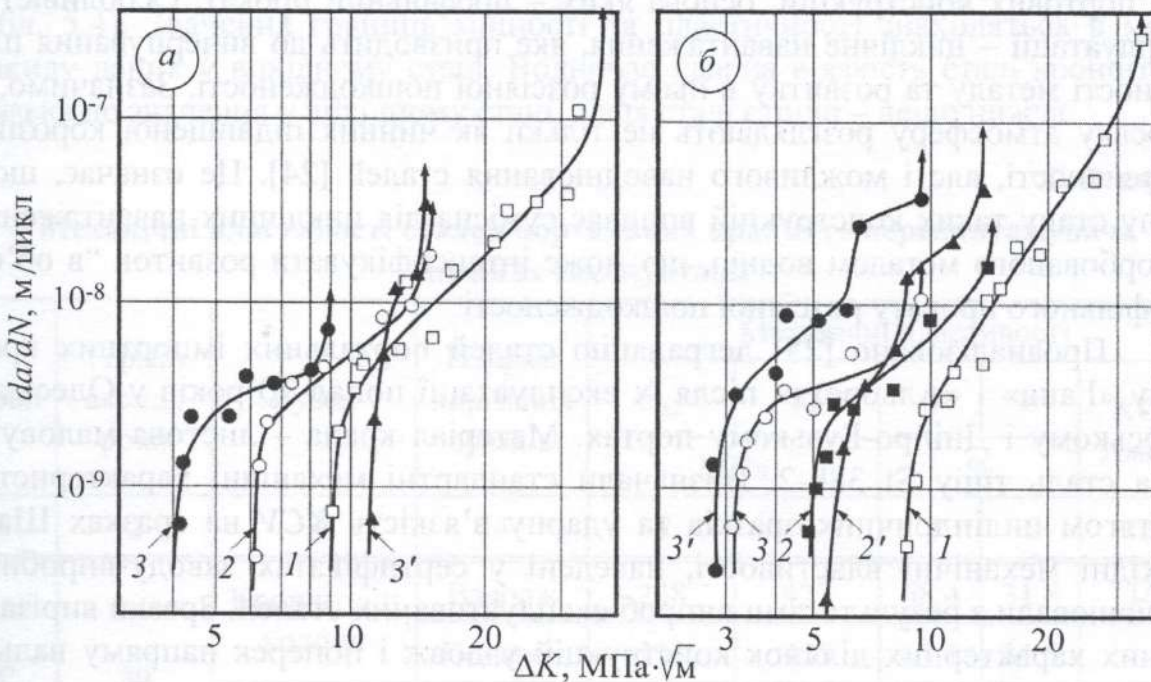


Рис. 5.9. КДВР сталі Ст3 у вихідному (а) та експлуатованому (б) станах для $R = 0,1$ (1); 0,6 (2, 2') і 0,75 (3, 3') за випроб у повітрі (1–3) і в корозивному середовищі (2', 3').

За асиметрії циклу $R = 0,1$ не виявлено впливу експлуатації сталі на швидкість РВТ у повітрі, що можна пояснити протиборною дією двох чинників: деградацією металу, що пришвидшує руйнування, та зростанням закриття тріщини [16], яке сповільнює її ріст. Адже відомо [17], що експлуатація металу збільшує ЗТ через зростання шорсткості поверхні. Однак за високих R його можна нехтувати, тому виявлено відмінності в швидкості da/dN здебільш у припороговій ділянці ΔK . Їх відсутність для вищих ΔK узгоджується з усталеними уявленнями про слабку чутливість кінетики втомного росту тріщини на ділянці Періса до мікроструктурних змін у сталях [18] та їх стану впродовж тривалої експлуатації [19–21].

Корозивне середовище сповільнило РВТ для вихідного стану сталі (рис. 5.9a), в основному, у припороговій ділянці навантажень, що пояснюють реалізацією не тільки ефекту ЗТ навіть за високих R , але і її корозійним затупленням та зростанням опору зсуву за дії водню [18, 22, 23]. Однак це середовище вже негативно вплинуло на РВТ в експлуатаційно окрихченій сталі, за винятком припорогової ділянки кінетичної діаграми при $R = 0,6$. Виявлене на КДВР стрімке зростання РВТ за $\Delta K \sim 6$ і 8 МПа для $R = 0,75$ і $0,6$ відповідно (а це, приблизно, $K_{\max} \sim 22$ МПа) можна пояснити схильністю експлуатованого металу до корозійно-статичного росту тріщини.

5.3. Особливості деградації сталей вантажних морських портових конструкцій

Експлуатаційна деградація конструкційних сталей стосується і вантажних портових конструкцій, основа яких – профільний прокат. Особливість їх експлуатації – циклічне навантаження, яке призводить до вичерпування пластичності металу та розвитку в ньому розсіяної пошкодженості. Зазначимо, що морську атмосферу розглядають не тільки як чинник підвищеної корозійної агресивності, але і можливого наводнювання сталей [24]. Це означає, що на зміну стану таких конструкцій впливає сумісна дія циклічних навантажень та абсорбованого металом водню, що може інтенсифікувати розвиток “в об’ємі” профільного прокату розсіяної пошкодженості.

Проаналізовано [25] деградацію сталей порталних імпорتنних кранів типу «Ганц» і «Альбрехт» після їх експлуатації понад 30 років у Одеському морському і Дніпро-Бузькому портах. Матеріал крана – листова маловуглецева сталь типу St 38b-2. Визначали стандартні механічні характеристики розтягом циліндричних зразків та ударну в’язкість KCV на зразках Шарпі. Вихідні механічні властивості, наведені у сертифікатах заводу-виробника, порівнювали з результатами випроб експлуатованих сталей. Зразки вирізали з різних характерних ділянок конструкцій уздовж і поперек напрямку вальцювання листового матеріалу.

Механічні властивості у вихідному стані та гранично допустимі наведені в табл. 5.4 без зазначення напрямку вирізання зразків. Однак можна до-

пустити, що вздовж напрямку вальцювання, як зазвичай атестують метал прокату. Зауважимо при цьому, що згідно з нормативним документом [26], який визначає використання металопрокату для виготовлення порталних кранів, значення KCV зразків, вирізаних поперек вальцювання, складають приблизно 60% від отриманих за випроб поздовжніх зразків. Це відображено в табл. 5.4 відповідним перерахунком.

Таблиця 5.4

Механічні властивості сталей порталних кранів у вихідному стані

Умовне позначення і тип крана	Термін експл., роки	Властивості у вихідному стані				Граничні значення		
		$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ , %	KCV , Дж/см ²	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ , %
		МПа				МПа		
Г – «Ганц»	39	269	426	31	161 / 96	240	380	25
A1 – «Альбрехт»	45	287	443	26	120 / 65			
A2 – «Альбрехт»	38	287	538	31	109 / 65			
A3 – «Альбрехт»	40	300	474	32	123 / 74			

Примітка: у знаменнику – розрахункові значення KCV для зразків, вирізаних поперек напрямку вальцювання.

Тривала експлуатація суттєво змінила механічні характеристики сталей порівняно із їх властивостями у вихідному стані (табл. 5.5). Очевидно, різні умови експлуатації різних кранів і їх різних вузлів могли зумовити і деякі відмінності в закономірностях деградації металу. Зокрема, для крана типу Г границя плинності сталі знижується, однак, не нижче гранично допустимого рівня (табл. 5.4). Значення границь міцності та пластичності знаходяться в межах розкиду даних у вихідному стані. Водночас ударна в'язкість сталі кронштейна близька до значення у вихідному стані, а для сталі стріли – дещо нижча.

Таблиця 5.5

Механічні властивості сталей порталних кранів та перевантажувача після їх експлуатації

Кран	Термін експл., роки	Вузол	Напрямок вирізання зразків	Механічні властивості				
				$\sigma_{0,2}$	σ_B	ψ	δ	KCV , Дж/см ²
				МПа		%		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Г	39	Кронштейн колони	Вздовж	238	423	68,4	31,8	164
			Поперек	233	425	65,1	31,5	–
		Стріла	Вздовж	256	426	63,9	29,9	126
			Поперек	255	429	57,3	25,6	–

Продовження табл. 5.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
A1	45	Коромисло противаги	Вздовж	247	490	64	29,2	101
			Поперек	273	481	57,2	27,6	56
		Стріла	Вздовж	294	476	68,9	29,9	181
			Поперек	280	470	67,5	26,7	31
A2	38	Коромисло противаги	Вздовж	230	415	67	31	163
			Поперек	225	417	62	29	50
		Хобот	Вздовж	321	497	66	27	143
			Поперек	319	515	57	28	107
		Стріла	Вздовж	289	451	63	30	131
			Поперек	277	458	68	34	39
A3	40	Коромисло противаги	Вздовж	287	473	63	30	181
			Поперек	281	455	58	28	38
		Хобот	Вздовж	320	523	58	27	*
			Поперек	318	521	54	25	48
		Стріла	Вздовж	333	478	64	28	78
			Поперек	296	473	51	25	42

* – не вираховували середнє значення, оскільки деякі зразки не руйнувалися внаслідок розшарування вздовж осі зразка.

Для крана A2 границя плинності коромисла противаги нижча від гранично допустимого рівня. Для всіх інших вузлів кранів цього типу характеристики міцності сталей практично не змінилися. Однак істотно знижується KCV сталей практично усіх вузлів, особливо для крана A3.

Розкид експериментальних даних набагато більший, ніж для випроб у вихідному стані (рис. 5.10). Це вказує на те, що структура металу внаслідок тривалої експлуатації сильніше деградує на окремих ділянках конструкції. Тому усереднені значення не завжди відтворюватимуть реальний технічний стан металу, оскільки руйнування крана може спричинити деградація металу нижче критичного рівня тільки на цих ділянках.

Паспортні дані заводу-виробника містили з-поміж характеристик пластичності тільки відносне видовження δ , тому пластичність експлуатованих і неексплуатованих сталей можна порівнювати лише за цим показником, який загалом мало змінюється для всіх кранів (рис. 5.10б). Значення, дещо нижчі за мінімальне, у вихідному стані отримано лише за випроб сталей кранів «Альбрехт», особливо на зразках, вирізаних поперек вальцювання.

За відносне звуження ψ сталей у вихідному стані умовно прийняли усереднені значення експериментальних результатів, отриманих на експлуатованих сталях, відносне видовження δ яких відповідає сталям у вихідному стані. Для показника ψ розкид даних набагато більший і негативний вплив експлуатації сильніший порівняно з відносним видовженням. Загалом можна стверджувати, що тривала експлуатація сталей портових кранів спричиняє помітне зниження їх пластичності, під час оцінювання якої слід віддавати перевагу відносному звуженню.

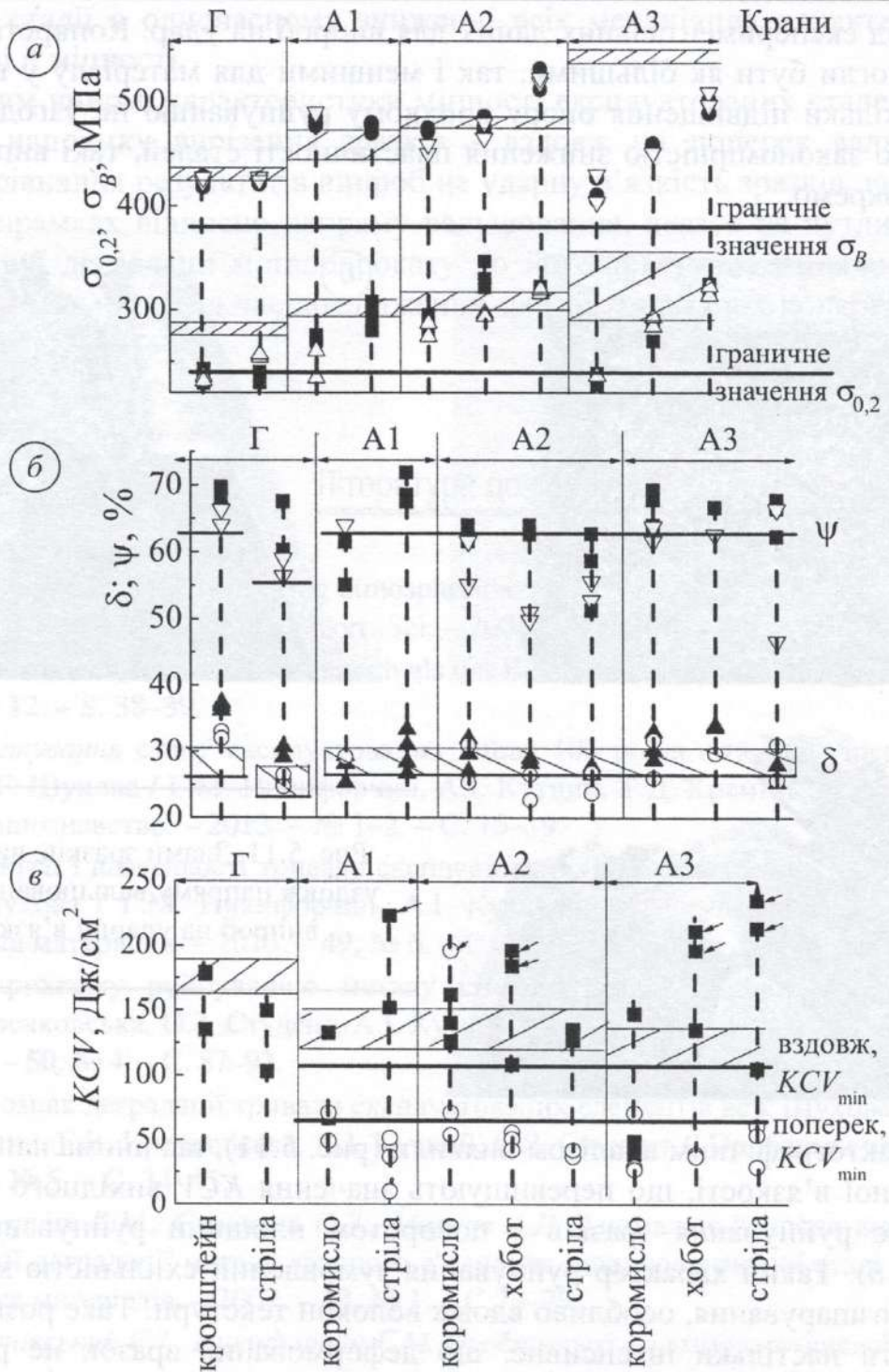


Рис. 5.10. Експериментальні значення механічних характеристик сталей окремих вузлів порталних кранів: а – $\sigma_{0,2}$ та σ_B ; б – ψ та δ ; в – KCV . Заштриховані ділянки відповідають розкиду значень цих характеристик у вихідному стані.

Вертикальні стрілки – зразки не зруйнувалися внаслідок розшарування вздовж осі зразка, а косі – зруйнувалися.

Внаслідок експлуатації опір крихкому руйнуванню KCV практично для всіх досліджених вузлів кранів знизився. А в локальних місцях, наприклад для коромисла противаги крана А3, на зразках, вирізаних уздовж вальцювання, отримали значення 39 проти 109 $\text{Дж}/\text{см}^2$ для вихідного стану металу, що свідчить про кардинальний спад ударної в'язкості. Зазначимо особливо силь-

ний розкид експериментальних даних для випроб на удар. Конкретні значення *KCV* могли бути як більшими, так і меншими для матеріалу у вихідному стані. Оскільки підвищення опору крихкому руйнуванню не узгоджується з виявленою закономірністю зниження пластичності сталей, такі випадки аналізували окремо.

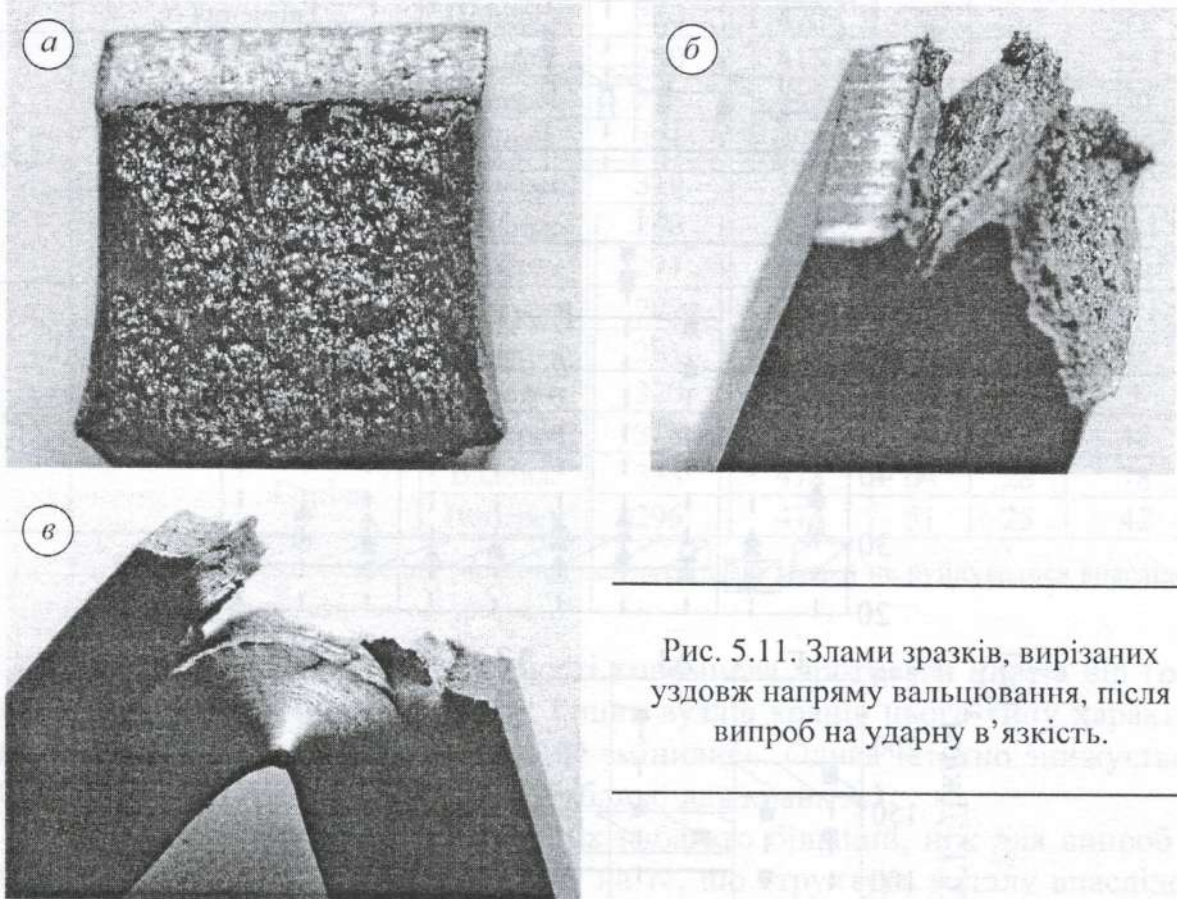


Рис. 5.11. Злами зразків, вирізаних уздовж напрямку вальцювання, після випроб на ударну в'язкість.

Фрактографічним аналізом виявили (рис. 5.11), що аномальним значенням ударної в'язкості, що перевищують значення *KCV* вихідного матеріалу, відповідає руйнування зразків з поворотом площини руйнування на 90° (рис. 5.11б). Такий характер руйнування зумовлений схильністю металопрокату до розшарування, особливо вдовж волокон текстури. Таке розшарування може бути настільки інтенсивне, що деформований зразок не руйнується (рис. 5.11в). Природно, що такі випадки не слід розглядати як підвищення опору матеріалу крихкому руйнуванню, а навпаки – як полегшення росту тріщини вздовж напрямку вальцювання.

Отже, тривала експлуатація порталних кранів спричиняє деградацію механічних властивостей металу цих конструкцій, першочергово – ударної в'язкості. Вважають, що зниження характеристик пластичності і опору крихкому руйнуванню внаслідок тривалого деформування навіть в області пружних деформацій зумовлене деформаційним старінням. Однак воно призводить також до зростання характеристик міцності, тоді як у досліджуваному випадку спостерігали в основному зниження границі плинності. Це вказує на те, що паралельно також накопичується об'ємна пошкодженість, і особли-

вість цієї стадії в одночасному зниженні всіх механічних характеристик, в тому числі й міцності.

Таким чином, характеристики міцності експлуатованих сталей не залежать від напрямку вирізання зразків – вздовж чи поперек вальцювання. Однак порівняння результатів випроб на ударну в'язкість зразків, вирізаних у різних напрямках відносно напрямку вальцювання, вказує на чутливість експлуатаційної деградації металопрокату до його текстури: зміна механічних показників сильніша під час дослідження зразків, вирізаних поперек напрямку вальцювання.

Література до розділу 5

1. *Hydrogen entry into steel during atmospheric corrosion process* / T. Tsuru, Ya. Huang, Md. R. Ali, and A. Nishikata // *Corr. Sci.* – 2005. – **47**, № 10. – P. 2431–2440.
2. *Kutnyi A., Becker K. Raffinierter noch als der Eiffelturm* // *Deutsches Ingenieur Blatt.* – 2011. – **12**. – S. 38–39.
3. *Діагностування стану експлуатованих понад 100 років сіткових гіперболоїдних веж* В.Г. Шухова / Г.М. Никифорчин, А.І. Кутний, Т.Д. Кремінь, О.Т. Цирульник // *Машинознавство.* – 2013. – № 1–2. – С. 15–19.
4. *Структура і властивості тривало експлуатованих сталей гіперболоїдних сіткових веж* Шухова / Г.М. Никифорчин, А.І. Кутний, О.З. Студент та ін. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2013. – **49**, № 6. – С. 70–78.
5. *Опір крихкому руйнуванню металу сіткової гіперболоїдної вежі* Шухова / Г.В. Кречковська, О.З. Студент, А.І. Кутний та ін. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2014. – **50**, № 4. – С. 87–93.
6. *Аналіз ознак деградації тривало експлуатованих елементів веж* Шухова / Г.М. Никифорчин, Г.В. Кречковська, А.І. Кутний, О.З. Студент // *Проблеми прочності.* – 2015. – № 5. – С. 34–45.
7. *Никифорчин Г.М., Студент О.З., Марков А.Д. Аномальний прояв високотемпературної деградації металу зварного з'єднання оццаднолегованої сталі* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2007. – **43**, № 1. – С.73–79.
8. *Крижанівський Є.І., Никифорчин Г.М. Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів* – 2011. – **47**, № 2. – С. 11–20.
9. *Исследование хладноломкости сталей 09Г2С и ВСтЗсп* / К.И. Еремін, В.Д. Науменко, Б.А. Шашко и др. // *Металловедение и терм. обработка.* – 1990. – № 2. – С. 82–83.
10. *Захарчук В. Г., Цирульник О.Т., Никифорчин Г.М. Електрохімічні та корозійні властивості наводнених сталей 45 і 12Х18Н10Т* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2005. – **41**, № 2. – С. 66–76.
11. *Студент О.З., Кречковська Г.В. Анізотропія механічних властивостей деградованої сталі 15Х1М1Ф після її експлуатації на парогонгах ТЕС* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2011. – **47**, № 5. – С. 19–26.

12. *In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel* / G. Gabetta, H. Nykyforchyn, E. Lunarska et al. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – **44**, № 1. – С. 88–99.
13. Студент О.З., Никифорчин Г.М., Марков А.Д. Особливості впливу водню на властивості і механізм руйнування металу зварних з'єднань паропроводів ТЕС // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – **42**, № 4. – С.26–35.
14. 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.
15. Поліщук Л.К., Харченко Є.В., Звірко О.І. Корозійно-циклічна тріщиностійкість сталі стріли буртоукладника // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – **51**, № 2. – С. 77–82.
16. Elber W. Damage Tolerance in Aircraft Structures / ASTM STP. – 1971. – **486**. – P. 230–262.
17. Student O.Z., Cichosz P., Szymkowski J. Correlation between fracture roughness and fatigue threshold of high temperature degraded steel // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – **35**, № 6. – С. 37–42.
18. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В.В. Панасюка. Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин и др. – К.: Наук. думка, 1990. – 680 с.
19. Krasowsky A.Y., Dolgiy A.A., Torop V.M. Charpy testing to estimate pipeline steel degradation after 30 years of operation // Proc. “Charpy Centary Conference”, Poitiers. – 2001. – **1**. – P. 489–495.
20. Effect of ageing of steam pipeline steel on its fatigue crack growth resistance / H.M. Nykyforchyn, O.Z. Student, B.P. Loniuk et al. // Proc. Int. Conf. Mechanical Behaviour of Materials – ICM8: Progress in Mechanical Behaviour of Materials, Victoria, Canada, 1999. – Victoria: Fleming Printing Ltd., 1999. – **1**. – P. 398–403.
21. Студент О.З., Лонюк Б.П. Ріст утомних тріщин у сталі 15Х2МФА, витриманій у високотемпературному водні // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1997. – **33**, № 4. – С. 121–126.
22. Никифорчин Г.М. Прояв водневої та низькотемпературної крихкості в припороговій циклічній тріщиностійкості матеріалів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – **38**, № 4. – С. 5–16.
23. Никифорчин Г.М., Студент О.З. Вплив водню на формування порогів утоми конструкційних сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – **37**, № 2. – С. 97–106.
24. Hydrogen entry into steel during atmospheric corrosion process / T. Tsuru, Y. Huang, M. R. Ali, A. Nishikata // Corr. Sci. – 2005. – **47**, № 10. – P. 2431–2440.
25. Реценко І.О., Фуртатов Ю.В. Вплив попереднього деформування сталей вантажних портових конструкцій на їх експлуатаційні властивості // Наук. нотатки. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ. – 2011. – Вип. 32. – С. 339–343.
26. Fachbereichstandard Deutsche Demokratische Republik TGL-7960 “Allgemeine Baustähle Stahlmarken. Allgemeine Technische Bedingungen”. – VEB Qualitäts und Edelstahl Kombinat, Brandenburg, 1981. – 8 s.

27. ГОСТ 25.502-79 (с изм. № 1). Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 34 с.
28. Панасюк В.В., Осташ О.П., Костык Е.Н. Зарождение усталостных трещин у концентраторов напряжений // Физ.-хим. механика материалов. – 1985. – 31, № 6. – С. 3–10.
29. Socie D.F. A procedure of estimating the total fatigue life of notched and cracked members // Eng. Fract. Mech. – 1979. – 11. – P. 851–859.
30. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. пос. / За заг. ред. В.В. Панасюка. Т. 14: Концентрація напружень у твердих тілах з вирізами / М.П. Саврук, А. Казберук. – Львів: Сполом, 2012. – 384 с.
31. РД 50–345–82. Методические указания. Расчеты и испытание на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 96 с.
32. Влияние цикличности нагружения на характеристики трещиностойкости сталей / В.Т. Трошенко, В.В. Покровский, Ю.С. Скоренко и др. // Проблемы прочности. – 1980. – № 11. – С. 3–10.
33. Патент України № 64240А. Спосіб визначення розміру зони передруйнування / О.П. Осташ, В.М. Учанін, І.М. Андрейко, Ю.В. Головатюк. – Опубл. 16.02.2004; Бюл. № 2.
34. Influence of inclusions on the fatigue resistance of high-strength steels / J.L. Castagne, J.H. Davidson, F. Duffaut, J. Morlet // Production and Application of Clean Steels. Proceedings Int. Conf., Balatonfured, London, 1970. – P. 221–226.

Технічна діагностика матеріалів і конструкцій [Текст] : довід. посіб. : у 8 т. / за заг. ред. акад. НАН України З.Т. Назарчука ; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Львів : Простір-М, 2016. - ISBN 978-617-7501-02-1.

Т. 1 : Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів / Є. І. Крижанівський [та ін.] ; за ред. акад. НАН України Є. І. Крижанівського. - 2016. - 356 с.

РОЗДІЛ 5.

СТАЛІ ПРОФІЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ, ЕКСПЛУАТОВАНИХ В АТМОСФЕРНИХ УМОВАХ