

УДК 621.311:699.018.291

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ СТАЛЕЙ ВАНТАЖНИХ МОРСЬКИХ ПОРТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ У ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ

*В. М. ПУСТОВОЙ, І. О. РЕЩЕНКО*

*ТОВ "РЕМТЕХМОРПОРТ", Одеса*

Досліджено вплив тривалості багатоциклового навантаження на комплекс механічних властивостей низькоміцних сталей, що визначають їх конструктивну міцність. Виділено три стадії циклування, яким відповідають чітко виражені закономірності зміни їх властивостей. Встановлено, що впродовж першої чутливі до втоми характеристики міняються практично однаково: дещо підвищується твердість та знижуються відносне видовження і ударна в'язкість. Мікротріщини, що з'являються та розвиваються на другій стадії, впливають тільки на ударну в'язкість: вона падає майже наполовину. Після утворення макротріщини на третій стадії подальше циклування практично не змінює механічні властивості сталей. Показано, що багатоциклова втома викликає подібні зміни стану металу, які притаманні сталям вантажних портових конструкцій упродовж тривалої експлуатації, і її можна використовувати для моделювання у лабораторних умовах експлуатаційної деградації їх механічних властивостей.

**Ключові слова:** *низькоміцна сталь, експлуатаційна деградація, багатоциклове навантаження, діагностика стану металу.*

Оцінювання деградації механічних властивостей відповідальних металевих конструкцій тривалої експлуатації є не тільки важливим аспектом сучасного матеріалознавства, але і актуальним завданням діагностування їх технічного стану і розрахунку залишкового ресурсу. Це зумовлено появою останнім часом низки досліджень, які виявляють істотну деградацію механічних, корозійних та корозійно-механічних властивостей конструкційних матеріалів, що визначають їх роботоздатність. Встановлено, що впродовж тривалої (десятьки років) експлуатації в конструкційних сплавах розвиваються процеси деформаційного старіння і пошкоженості, які суттєво понижують опір матеріалів крихкому руйнуванню, зокрема конструкцій, що експлуатуються за кліматичних температур: магістральних газо- та нафтопроводів, мостів, колій залізниці, літаків тощо [1–7]. Тому найчутливішими показниками деградації сталей виявилися ударна в'язкість і тріщиностійкість. Показано, що експлуатаційна деградація властива також вантажним морським портовим конструкціям, які вже вичерпали свій запланований ресурс безпечної роботи [8, 9]. Тому особливо актуально за експертизи їх технічного стану враховувати не тільки експлуатаційні дефекти типу корозійних виразок чи механічних тріщин, але й спрогнозувати можливу деградацію їх механічних чи інших властивостей, що визначають роботоздатність конструкції.

Парк порталних кранів морських портів України складається, в основному, з імпортних виробів. Останнім часом його оновлюють вітчизняною продукцією. Тому необхідно розробити методологію прогнозування можливої деградації властивостей сталей, з яких вона вироблена. Для цього слід створити такі експрес-методи, які дадуть можливість у лабораторних умовах моделювати їх експлуатаційну деградацію і в короткий термін прогнозувати вплив тривалої експлуатації на зміну властивостей сталей.

Оскільки експлуатаційна деградація сталей проявляється головно у зниженні характеристик їх опору крихкому руйнуванню, для її моделювання пропонують методики, які базуються на вичерпанні пластичності матеріалів. Для цього застосовують і статичні [10], і циклічні [11] навантаження в області значних пластичних деформацій. Проте регламентні статичні чи циклічні експлуатаційні напруження вантажних портових конструкцій зазвичай нижчі за границю текучості [12]. Відповідно і механізми вичерпання пластичності за навантажень вище границі текучості і за набагато менших від неї, але впродовж тривалого часу, можуть бути різні. Тому під час використання методів лабораторного старіння металу за напружень у пластичній області можуть виникати різні за механізмом закономірності зміни властивостей матеріалів.

Мета дослідження – проаналізувати можливість використання попереднього циклічного навантаження як лабораторного методу моделювання деградації властивостей конструкційних сталей вантажних портових конструкцій внаслідок їх тривалої експлуатації.

**Матеріали та методики.** Вивчали механічні властивості сталей 09Г2С і 17ГС, які використовують для виготовлення вітчизняних вантажних морських портових конструкцій. Визначали твердість  $HRB$ , механічні характеристики (границю текучості  $\sigma_{0,2}$ , границю міцності  $\sigma_B$ , відносні звуження  $\Psi$  і видовження  $\delta$ ), розтягуючи циліндричні зразки, та ударну в'язкість  $KCV$  на зразках Шарпі (з V-подібним концентратором). Вплив попереднього циклічного навантаження на механічні характеристики сталей досліджували так: балкові зразки перерізом  $10 \times 10$  mm і довжиною 165 mm циклували розтягом з частотою 10 Hz та асиметрією циклу 0,1 до руйнування або впродовж меншої заданої кількості циклів  $N_k$  на установці УММ-1 зі жорсткою схемою навантаження. За результатами втомних випробувань на базі  $2 \cdot 10^6$  cycles будували криву обмеженої довговічності “максимальне напруження циклу  $\sigma_{max}$ –кількість циклів до руйнування  $N_f$ ”, а зі зразків, що перебували під циклічним навантаженням, виготовляли циліндричні для випроб на розтяг та зразки Шарпі.

**Результати та їх обговорення.** Сталі 09Г2С властиві дещо вищі міцність і твердість проти сталі 17ГС (табл. 1;  $\sigma_{max} = 0$ ), а отже, нижчі пластичність і, особливо, відносне видовження. Крім того, на кривих розтягу сталі 17ГС є полицка текучості, що відсутня для сталі 09Г2С (рис. 1a). Вона вирізняється також меншим деформаційним зміцненням, про що свідчить пологіша крива її розтягу. Опір крихкому руйнуванню сталей пропорційний їх пластичності: ударна в'язкість  $KCV$  міцнішої сталі 09Г2С менша (див. табл. 1). Водночас опір втомному руйнуванню пропорційний їх міцності і твердості: міцнішій сталі 09Г2С властиві вищі границя втоми і обмежена довговічність (рис. 1b).

Попереднє циклічне навантаження кількісно по-різному вплинуло на механічні властивості сталей (табл. 1; рис. 2), але зі збереженням загальних закономірностей до зростання ефектів зі збільшенням параметра  $\sigma_{max}$ . Практично не змінилася границя міцності та дещо зросла границя текучості. Істотно (до 20%) збільшилась твердість, яка мала би корелювати з міцністю. Неузгоджена і поведінка характеристик пластичності внаслідок циклування сталей: значення відносного звуження знаходяться в межах розкиду експериментальних даних, тоді як відносного видовження знижуються до 15%. Найбільше змінюється ударна в'язкість, яка падає до 55% від  $KCV$  вихідного металу і практично не залежить від циклічного навантаження. На кривих розтягу попередньо циклованих зразків, навіть за найменшого  $\sigma_{max}$ , відсутня полицка текучості. Характеристики  $HRB$ ,  $\delta$  і  $KCV$  суттєво змінюються вже за порівняно низьких значень  $\sigma_{max}$ , близьких до границі втоми. Водночас виявити зміну інших малочутливих до циклування показників можна тільки за високих напружень, близьких до границі текучості.

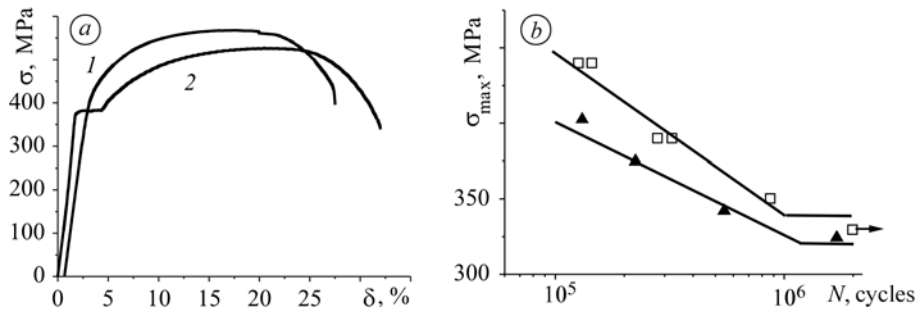


Рис. 1. Криві розтягу (а) та обмеженої довговічності (b) сталей 09Г2С (1, □) та 17ГС (2, ▲) у вихідному стані.

Fig. 1. Tension (a) and limited durability (b) curves of 09Г2С (1, □) and 17ГС (2, ▲) steels in the initial state.

**Таблиця 1. Механічні властивості зразків зі сталей 09Г2С і 17ГС, зруйнованих за різного рівня циклічного навантаження  $\Delta\sigma_{\max}$**

Сталь	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\Psi$	$\delta$	HRB	KCV, J/cm <sup>2</sup>
	MPa			%			
09Г2С	0	400	570	64	27,5	82	266
	330	409	578	64,6	27	88	251
	340	411	570	62,8	24,5	93	—
	350	414	556	65,1	25,1	91	158
	390	413	563	64,3	25	92	147
	440	435	570	61,8	24,9	94	144
17ГС	0	385	535	71	32	78	340
	315	383	531	70,0	31,8	83	345
	325	—	—	—	—	90	249
	340	398	519	71,2	27,9	92	221
	375	407	546	69,9	27,4	90	226
	405	409	537	67,0	27,1	93	215

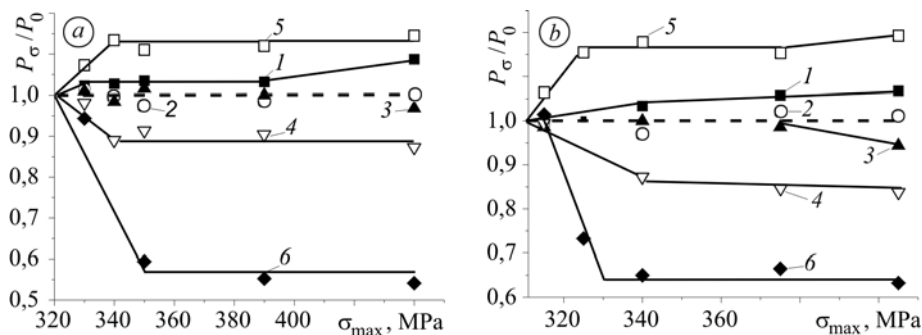


Рис. 2. Відносна зміна механічних властивостей  $P_\sigma/P_0$  сталей 09Г2С (а) і 17ГС (b) залежно від циклічного навантаження  $\sigma_{\max}$  ( $P_0$  – характеристика сталі у вихідному стані,  $P_\sigma$  – після навантаження): 1 –  $\sigma_{0,2}$ ; 2 –  $\sigma_B$ ; 3 –  $\Psi$ ; 4 –  $\delta$ ; 5 – HRB; 6 – KCV.

Fig. 2. Relative change of the mechanical characteristics  $P_\sigma/P_0$  of 09Г2С (a) and 17ГС (b) steels depending on their cyclic loading  $\sigma_{\max}$  ( $P_0$  – steel characteristics in the initial state,  $P_\sigma$  – after cyclic loading): 1 –  $\sigma_{0,2}$ ; 2 –  $\sigma_B$ ; 3 –  $\Psi$ ; 4 –  $\delta$ ; 5 – HRB; 6 – KCV.

Досліджували вплив тривалості циклування (кількість циклів  $N_k$ ) на механічні властивості сталей 09Г2С і 17ГС за  $\sigma_{\max} = 380$  і  $350$  МПа відповідно, відтворюючи зміну стану металу після багатоциклової втоми. Зразки навантажували впродовж різної кількості циклів  $N_k$ , не доводячи їх до руйнування, і визначали механічні характеристики циклованого металу.

Вплив тривалості циклування на механічні властивості (табл. 2) аналізували за відносною зміною відповідних характеристик (рис. 3). Загалом зміна границь текучості і міцності, а також відносного звуження незначна або і повністю відсутня (рис. 3а), при цьому значення  $\sigma_{0,2}$  дещо зростає вже після перших етапів циклування і стабілізується. Границя міцності сталей практично не міняється впродовж циклування зразків аж до кількості циклів  $N_k$ , яке відповідає за кривою обмеженої довговічності кількості циклів до руйнування  $N_f$ . Відносне звуження, для якого отримано найбільший розкид даних, також не міняється, і тільки на кінцевій стадії циклування дещо падає.

**Таблиця 2. Механічні властивості зразків зі сталей 09Г2С і 17ГС після навантаження впродовж різної кількості циклів  $N_k$**

$\sigma_{\max}$	$N_k \cdot 10^3$ , cycles	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\Psi$	$\delta$	<i>HRB</i>	<i>KCV</i> , J/cm <sup>2</sup>
		МПа		%			
380 МПа для сталі 09Г2С	0	400	570	64,0	27,5	82	266
	50	398	574	62,5	25,5	87	260
	100	414	571	64,7	24,9	93	246
	200	422	565	62,8	25,2	94	185
	300	412	563	65,1	24,4	96	155
	400*	435	570	61,8	24,9	95	144
350 МПа для сталі 17ГС	0	385	535	71,0	32,0	78	340
	100	401	547	73,2	27,7	84	325
	200	399	541	69,1	28,2	90	285
	300	405	538	70,4	27,0	87	226
	400	403	532	69,9	27,5	91	210
	490*	409	537	67,0	27,1	92	215

\* – прогнозована за кривою обмеженої довговічності кількість циклів до руйнування  $N_f$ .

Водночас попереднє циклічне навантаження суттєво знижує відносне видовження, ударну в'язкість і підвищує твердість сталей (рис. 3б). Ефект циклування проявляється вже після перших 100 тис. циклів і наростає до досягнення 30% втомної довговічності. Подальша кінетика зміни цих властивостей різна:  $\delta$  залишається на одному рівні, а *HRB* додатково дещо зростає. Закономірність зміни ударної в'язкості складніша: різкий спад до 80% від втомної довговічності з подальшою стабілізацією.

Таким чином, на кривих  $P_k/P_0 - N_k/N_f$  для найчутливіших до циклування характеристик  $\delta$ , *HRB* і *KCV* можна виділити три стадії їх зміни: I – до 30% втомної довговічності інтенсивна зміна всіх властивостей; II – 30...70% довговічності стабільне  $\delta$  на гранично низькому рівні, подальше незначне зростання *HRB* і ще різкіший спад *KCV*; III – практична незмінність всіх характеристик.

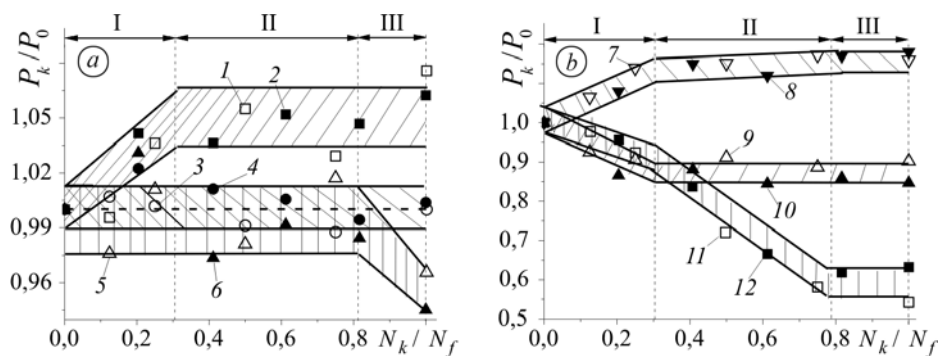


Рис. 3. Відносна зміна механічних властивостей  $P_k/P_0$  сталей 09Г2С (1, 3, 5, 7, 9, 11) і 17ГС (2, 4, 6, 8, 10, 12) ( $P_0$  – характеристика сталі у вихідному стані,  $P_k$  – після навантаження впродовж різної кількості циклів  $N_k$ ): 1, 2 –  $\sigma_{0,2}$ ; 3, 4 –  $\sigma_B$ ; 5, 6 –  $\Psi$ ; 7, 8 –  $\delta$ ; 9, 10 – HRB; 11, 12 – KCV; I–III – стадії циклування.

Fig. 3. Relative change of the mechanical characteristics  $P_k/P_0$  of 09Г2С (1, 3, 5, 7, 9, 11) and 17ГС (2, 4, 6, 8, 10, 12) steels ( $P_0$  – steel characteristics in the initial state,  $P_k$  – after loading for a different number of cycles  $N_k$ ): 1, 2 –  $\sigma_{0,2}$ ; 3, 4 –  $\sigma_B$ ; 5, 6 –  $\Psi$ ; 7, 8 –  $\delta$ ; 9, 10 – HRB; 11, 12 – KCV; I–III – cycling stages.

Проаналізуємо отримані закономірності зміни циклуванням стандартних механічних властивостей сталей згідно з усталеними уявленнями про багаточислову втому низькоміцних сталей [13–16]. Приблизно 15...30% довговічності (стадія I на рис. 3) займає інкубаційний період знеміцнення-зміцнення (передують зародженню пошкоджень, які усуваються термообробкою) та період початку незворотної пошкодженості [13, 17, 18]. Під час інкубаційного періоду формується розвинута коміркова структура і виникають стійкі смуги ковзання, знижується границя пропорційності, росте мікро- (до 30%) і макротвердість (до 15%) та зникає полиця текучості. Щодо границі текучості існують суперечливі дані: спостерігали як її збільшення, так і відсутність впливу циклування. Практично незмінними залишаються границя міцності, пластичність і ударна в'язкість. За різними оцінками тривалість інкубаційного періоду залежно від рівня навантаження і структури низькоміцних сталей займає 2...10% від загальної втомної довговічності. За подальшого циклічного навантаження впродовж стадії I розвивається незворотна пошкодженість: зростає кількість стійких смуг ковзання, які розширюються внаслідок перебудови коміркової структури, що супроводжується зародженням кристалографічно орієнтованих у напрямі дії максимальних дотичних напружень субмікротріщин. На цій стадії, як правило, продовжує зростати твердість і, в деяких випадках, знижується відносне видовження. Незмінними тут залишаються границі текучості і міцності, а також відносне звуження. Період II ідентифікують із розвитком мікротріщин, який завершується формуванням макротріщини (макротріщини), що вказує на початок періоду III – росту макротріщини аж до остаточного руйнування.

Закономірностям зміни ударної в'язкості, яка характеризує опір крихкому руйнуванню, властиві свої особливості. Досліджуючи сталі Ст3 і 40, виявили [19], що за циклування нижче границі втоми ударна в'язкість не міняється, а в зоні розвитку незворотної пошкодженості падає втричі. Однак циклували зразки з надрізом і під незворотною пошкодженістю розуміли розвиток тріщини від надрізу. Для технічного заліза, вуглецевої і ванадієвої сталей зафіксували значне падіння (до 30%) ударної в'язкості KCV та зростання температури крихко-в'язкого переходу (на 90°C) після стадії II, а також не виявили впливу стадії III на ударну в'язкість [20].

Отримані експериментальні результати про зміну механічних властивостей сталей внаслідок циклування загалом корелюють з літературними, тому їх можна пов'язати з певними процесами, що протікають у низькоміцних сталях за багатоциклового навантаження. Зокрема, стадії I властиве підвищення твердості, зниження пластичності та ударної в'язкості через деформаційне зміцнення і вичерпання пластичності, тоді як стадії II внаслідок інтенсивного розвитку мікропошкодженості притаманна низка особливостей: різке зниження ударної в'язкості за практично незмінних твердості та відносного видовження. І якщо зниження ударної в'язкості, викликане мікротріщинами, зрозуміле, то для пояснення відсутності негативного впливу пошкодженості на твердість та пластичність необхідний окремий аналіз.

У нашому випадку незмінність параметрів  $HRB$  і  $\delta$  на стадії II можна пояснити проявом двох протилежних чинників: подальшого деформаційного зміцнення ( $HRB$  повинно зростати, а  $\delta$  – знижуватися) та розвитку мікропошкодженості ( $HRB$  повинно, навпаки, знижуватися, а  $\delta$  – зростати). Зазначимо, що виявлене зниження відносного звуження лише після ~80%-го вичерпання довговічності зразків (рис. 3а) можна пояснити саме інтенсивною пошкодженістю металу. Водночас і деформаційне зміцнення, і розвиток пошкодженості зменшують ударну в'язкість, що проявилось у різкому спаді  $KCV$  на стадії II втоми. На стадії III макротріщини, розвиваючись, очевидно, розвантажують матеріал в інших локальних областях металу, через що в них припиняється процес втоми, а отже, стабілізуються механічні властивості.

Важливо, що за зміною механічних властивостей, зумовлених багатоцикловим навантаженням, можна прогнозувати період безпечної експлуатації конструкцій. Стадію I (зародження і розвиток субмікротріщин у металі) можна розглядати як безпечну через контрольоване вичерпування довговічності і діагностувати за зміною твердості до ~15%. Можливо, навіть доцільніше використовувати статистичний параметр розкиду даних, який чутливіший до деградації матеріалу, ніж усереднене значення твердості [21].

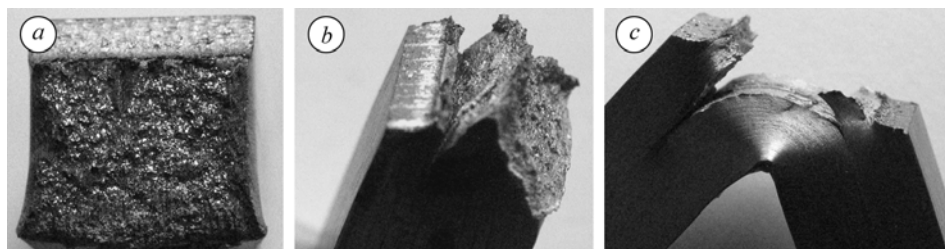


Рис. 4. Типові злами після випроб на ударну в'язкість зразків, вирізаних уздовж напрямку вальцювання з листового матеріалу порталного крана після експлуатації понад 30 років в Одеському морському і Дніпро-Бузькому портах: а – крихке руйнування; б, с – розшарування вздовж напрямку вальцювання.

Fig. 4. Typical fracture surfaces after impact toughness testing of specimens cut out along the rolling direction from a sheet material of a crane exploited for more than 30 years in Odessa and Dnipro-Buh ports: a – brittle fracture; b, c – lamination along the rolling direction.

Подальша експлуатація (стадія II) можлива лише за контролю зниження ударної в'язкості, яке тут інтенсивне і може становити для портових конструкцій 50% і більше від вихідного рівня [21]. Тут слід мати на увазі, що експлуатаційна деградація металу конструкцій може проявлятися у розшаруванні вздовж напрямку його вальцювання (рис. 4), що за ударного навантаження вимагає додаткових затрат енергії, а отже, підвищує значення формально визначеної ударної в'язкості. Однак такі випадки не слід розглядати як підвищення опору матеріалу крихко-

му руйнуванню, оскільки цей феномен пов'язаний з проявом лише геометрично-го чинника – галуження тріщини і поворотом площини руйнування на 90°.

Третя стадія довговічності (розвиток макротріщин) найнебезпечніша для продовження експлуатації, її можна допустити лише за використання методів виявлення в конструкції макродефектів і підходів механіки втомного руйнування з визначенням періоду докритичного росту тріщин. А беручи до уваги негативний вплив атмосфери морських портів на довговічність їх металоконструкцій, то стадію росту в них тріщин прогнозують із урахуванням агресивності довкілля, в першу чергу, його наводнювальної здатності [22, 23].

Таким чином, багаточиклове навантаження низькоміцних сталей вантажних морських портових конструкцій у лабораторних умовах задовільно моделює експлуатаційну деградацію механічних властивостей, а результати оцінювання та аналізу зміни комплексу механічних параметрів ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\Psi$ ,  $\delta$ ,  $KCV$ ) металу упродовж його тривалої експлуатації дають можливість прогнозувати ступінь вичерпування ресурсу їх довговічності.

*РЕЗЮМЕ.* Исследовано влияние длительности многоциклового нагружения на комплекс механических свойств низкопрочных сталей. Выделено три стадии циклирования, которым соответствуют четко выраженные закономерности изменения свойств деформированных сталей. Установлено, что в течение первой стадии чувствительные к усталости характеристики меняются практически одинаково: несколько повышается твердость и снижаются относительное удлинение и ударная вязкость. Микротрещины, которые появляются и развиваются на второй стадии, влияют только на ударную вязкость: она падает почти наполовину. После образования макротрещины на третьей стадии дальнейшее циклирование практически не изменяет механические свойства сталей. Обнаружено, что многоцикловая усталость вызывает аналогичные изменения состояния металла, которые свойственны сталям грузовых портовых конструкций при длительной эксплуатации, и ее можно использовать для моделирования в лабораторных условиях эксплуатационной деградации механических свойств сталей.

*SUMMARY.* The effect of high cycle loading duration on the complex of mechanical properties of low strength steels is investigated. Three stages of cycling are distinguished, to which the well-defined regularities of the properties change of the deformed steels correspond. It was established that at the first stage the fatigue-sensitive characteristics are changed practically equally: a hardness rises somewhat and elongation and impact strength decrease. Microcracks, which appear and develop at the second stage, effect the impact strength only which decreases almost in two times. After the macrocrack formation at the third stage, further cycling practically does not change the mechanical properties of steels. It was shown that the high cycle fatigue causes the similar changes of the metal state as in the steels of cargo port structures during their long-term service and it can be used for modelling in laboratory conditions of the exploited degradation of the mechanical properties of steels.

1. *Трещиностойкость* металла труб нефтепроводов / А. Г. Гумеров, К. М. Ямалеев, Г. В. Журавлев, Ф. И. Бадиков. – М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2001. – 231 с.
2. *Krasowsky A. Y., Dolgiy A. A., and 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.
3. *Окрихчення* сталі магістрального нафтопроводу / О. Т. Цирульник, Г. М. Никифорчин, О. І. Звірко, Д. Ю. Петрина // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – 40, № 2. – С. 125–126. (*Tsyurul'nyk O. T., Nykyforchyn H. M., Zvirko O. I., and Petryna D. Yu.* Embrittlement of the Steel of an Oil-Trunk Pipeline // Materials Science. – 2004. – 40, № 2. – P. 302–304.)
4. *Осташ О. П., Андрейко І. М., Головатюк Ю. В.* Деградація матеріалів і втомна довговічність тривало експлуатованих авіаконструкцій // Там же. – 2006. – 42, № 4. – С. 5–16. (*Ostash O. P., Andreiko I. M., and Holovatyuk Yu. V.* Degradation of Materials and Fatigue Durability of Aircraft Constructions after Long-Term Operation // Materials Science. – 2006. – 42, № 4. – P. 427–439.)

5. *In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel / G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn, E. Lunarska et al. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – 44, № 1. – С. 88–99.*  
(*Gabetta G., Nykyforchyn H. M., Lunarska E., Zonta P. P., Tsyurulnyk O. T., Nikiforov K., Hredil M. I., Petryna D. Yu., and Vuherer T. In-Service Degradation of Gas Trunk Pipeline X52 Steel // Materials Science. – 2006. – 44, № 4. – P. 104–119.*)
6. *Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. пос. / За заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г. М. Никифорчин, С. Г. Поляков, В. А. Черватюк та ін. / За ред. Г. М. Никифорчина. – Львів: Сполом, 2009. – 504 с.*
7. *Lesiuk G. and Szata M. Aspects of structural degradation in old bridge steels by means of fatigue crack propagation // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 1. – С. 76–81.*  
(*Lesiuk G. and Szata M. Aspects of structural degradation in steels of old bridges by means of fatigue crack propagation // Materials Science. – 2011. – 47, № 1. – P. 82–88.*)
8. *Нестеров Е. А. К вопросу о механизмах деградации расчетных металлоконструкций стальных порталных кранов в условиях сверхнормативной эксплуатации // Проблемы техники. – 2009. – № 1. – С. 151–159.*
9. *Реценко І. О., Фуртатов Ю. В. Вплив попереднього деформування сталей вантажних портових конструкцій на їх експлуатаційні властивості // Наукові нотатки. – 2011. – № 32. – С. 339–343.*
10. *ГОСТ 7268-82. Сталь. Метод определения склонности к механическому старению по испытанию на ударный изгиб. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 4 с.*
11. *Иванов А. Р., Большаков А. М., Лыглаев А. В. Ресурс пластичности конструкционных сталей // V Всерос. конф. “Механика микронеоднородных материалов и разрушение”. – 2008. – 8 с. <http://book.uraic.ru/project/conf/txt/008/2008/doc/115-29.02.08>*
12. *Крани порталні, крани-перевантажувачі. Експертне обстеження : ОМД 22460848.003-2009. – Одеса: ТЕС, 2009. – 248 с.*
13. *Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.*
14. *Троценко В. Т. Усталость и неупругость металлов. – К.: Наук. думка, 1971. – 268 с.*
15. *Klesnil M. and Lukas P. Fatigue of metallic materials. – Prague: Academia, 1980. – 239 p.*
16. *Kacanda S. Zmecenieniowe penkanie metali. – Warszawa: Wydawnictwo naukowotechniczne, 1985. – 496 s.*
17. *Попов К. В., Киселев Ю. В. Прочность металлов при циклических нагрузках // Материалы IV сов. по усталости металлов. – М.: Наука, 1967. – 247 с.*
18. *Пенкин А. Г., Терентьев В. Ф., Маслов Л. Г. Оценка степени деградации механических свойств и остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости // [www.sds.ru/articles/degradation/index.html](http://www.sds.ru/articles/degradation/index.html). – 2004. – 46 с.*
19. *Хладостойкость сталей при статическом и циклическом нагружениях / Р. С. Григорьев, В. П. Ларионов, Г. А. Новиков, П. Г. Яковлев – М.: Наука, 1969. – 96 с.*
20. *Иванова В. С., Гуревич С. Е., Копьев И. М. Усталость и хрупкость металлических материалов. – М.: Наука, 1968. – 213 с.*
21. *Лебедев А. О., Музика М. Р. Технічна діагностика стану матеріалу методом L-M твердості // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / За заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 97–101.*
22. *Андрейків О. Є., Гембара О. В. Механіка руйнування та довговічність металевих конструкцій у водневмісних середовищах. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.*
23. *Сакара А. О. Методика розрахунку ресурсу елементів металоконструкцій вантажопіднімальних машин з врахуванням впливу корозійно-активних середовищ: Автореф. дис. .... канд. техн. наук. – Одеса, 2011. – 24 с.*

*Одержано 15.05.2012*