

УДК 621.311:699.018.291

І.О.Рещенко, Ю.В.Фуртатов

ТОВ «РЕМТЕХМОРПОРТ»

ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОГО ДЕФОРМУВАННЯ СТАЛЕЙ ВАНТАЖНИХ ПОРТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ

Проаналізовано вплив тривалої експлуатації портальних кранів типу «Ганц» і «Альбрехт» на деградацію механічних властивостей сталей. Встановлено, що для сталей високо навантажених вузлів спостерігається після їх експлуатації понад 38 років суттєве падіння характеристик міцності і пластичності, однак особливо різко знижується ударна в'язкість. Це вказує на ризик подальшої експлуатації цих вантажопідіймальних порткових конструкцій.

Значна частина морських порткових конструкцій вже вичерпала свій запланований ресурс безпечної експлуатації, тому особливо актуальні питання експертизи їх технічного стану не тільки на наявність експлуатаційних дефектів типу корозійних виразок чи механічних тріщин, але й оцінювання стану сталей з огляду можливої деградації їх механічних чи інших властивостей, що визначають роботоздатність конструкції. Такі підходи особливо інтенсивно розвиваються останнім часом при обґрунтуванні подовження терміну експлуатації конструкцій відповідального призначення у енергетиці [1], нафтохімії [2], магістральному трубопроводному транспорті [3, 4], а також авіапромисловості [5], при цьому виявлено суттєве погіршення їх вихідних властивостей.

Практика експлуатації вантажних порткових конструкцій вказує на те, що їх окремі вузли зазнають поряд із регламентним статичним експлуатаційним навантаженням також і суттєве циклічне навантаження внаслідок постійної і випадкової дії різних чинників (вітрове навантаження, вібрація внаслідок роботи електродвигунів, ривки від переключення механізмів приводу руху вантажу). Під впливом сумісної тривалої дії статичного і циклічного навантажень у низьколегованих сталях відповідальних об'єктів, наприклад в мостових конструкціях, магістральних трубопроводах, великосмних резервуарах зберігання нафти, протікають суттєві зміни їх структури і властивостей, зумовлені в основному розвитком деформаційного старіння [6]. Ці зміни, які ще називають експлуатаційною деградацією сталей, не завжди приводять до погіршення їх міцності, однак досить сильно понижують опір матеріалу крихкому руйнуванню, особливо за низьких температур [4, 7]. Деформаційне старіння зумовлене наявністю в металі домішок вуглецю і азоту, які взаємодіючи з дислокаційною структурою, викликають окрихчення сталей, так як зменшують можливість релаксації пружних напружень за рахунок пластичної деформації. Оскільки процеси руху і розмноження дислокацій в локальних об'ємах металу протікають при напруженнях, значно менших статичної межі текучості, то і процеси деформаційного старіння в сталях протікають при експлуатаційних навантаженнях. Наприклад, було показано, що статичне і динамічне деформаційне старіння в низьковуглецевій сталі за повторного розтягу спостерігається при напруженнях, значно менших межі витривалості [7].

Мета роботи – оцінити деградацію сталей вантажних порткових конструкцій на основі порівняння паспортних значень їх механічних характеристик у вихідному стані із результатами стандартних випроб матеріалів після експлуатації понад 38 років у Одеському морському порту.

Об'єкт та методика досліджень

Досліджували механічні властивості сталей тих вузлів кранів типу «Альбрехт» і «Ганц», що зазнають найінтенсивніше деформування. Матеріал крану – листовая сталь типу St 38b-2. Визначали стандартні механічні характеристики розтягом циліндричних зразків та ударну в'язкість *KCV* на зразках Шарпі (з *V*-подібним концентратором). Результати, отримані за випроб експлуатованих сталей, порівнювали їх з вихідними властивостями, приведеними у сертифікатах заводу-виготовлювача. Зразки вирізали з різних характерних ділянок конструкцій вздовж і поперек напрямку вальцювання листового матеріалу.

В табл. 1 приведені паспортні мінімальні значення механічних характеристик металу, використаного для виготовлення конструкцій, без зазначення напрямку вирізання зразків. Можна вважати, що тут розглядається зазвичай використовуваний варіант випроб зразків, вирізаних вздовж напрямку вальцювання. У цьому випадку площа руйнування перерізає волокна структури, тому досягаються максимальні властивості. Проте згідно нормативного документу [8], який визначає використання металопрокату для виготовлення портальних кранів, значення *KCV*

зразків, вирізаних поперек вальцювання, складають приблизно 60% від значень, отриманих при випробуваннях зразків, виготовлених традиційно, що відбито в табл. 1 відповідним перерахунком.

Таблиця 1.

Механічні властивості сталей порталних кранів у вихідному стані

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

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

Результати експериментальних досліджень та їх аналіз

Тривала експлуатація суттєво впливає на усереднені значення певних стандартних механічних характеристик сталей деяких досліджених вузлів вантажних портових конструкцій порівняно із результатами їх випроб у вихідному стані (табл. 2).

Для крану типу «Ганц» спостерігається однозначне зниження границі плинності обох досліджених вузлів відносно їх мінімальних значень у вихідному стані. Проте вони не опускаються нижче гранично допустимого рівня (табл. 1). Значення границі міцності та пластичності цих вузлів знаходиться в межах розкиду даних у вихідному стані. Усереднене значення ударної в'язкості сталі кронштейну колони крану «Ганц» близьке до мінімального у вихідному стані, а для сталі стріли – дещо нижче.

Для кранів типу «Альбрехт» незалежно від терміну експлуатації границя плинності коромисла противаги нижча від мінімально допустимого значення у вихідному стані, а для крану A2 навіть менші від гранично допустимого рівня. Для цього ж крану спостерігається також падіння усереднених значень границі міцності сталей всіх досліджених вузлів нижче від їх мінімальних значень у вихідному стані. Для всіх інших вузлів досліджених кранів типу «Альбрехт» характеристики міцності сталей практично не міняються. Також дуже сильно виражено ефект падіння ударної в'язкості сталей практично усіх вузлів кранів типу «Альбрехт», особливо для крану A3. При цьому таке різке зниження опору крихкому руйнуванню сталей спостерігається на фоні незначних змін їх характеристик пластичності.

Зазначимо, що незважаючи на порівняно незначні зміни усереднених значень стандартних механічних характеристик сталей досліджених кранів, спостерігається суттєвий розкид конкретних експериментальних даних – набагато більший, ніж у випадку випроб у вихідному стані (рис. 1). Це вказує на те, що деградація структури металу внаслідок його тривалої експлуатації протікає сильніше в окремих локальних ділянках конструкції. Звідси, навіть за відсутності негативного впливу експлуатації на усереднене значення якоїсь механічної

Таблиця 2.

Механічні властивості сталей порталних кранів після їх експлуатації

Умовне позначення портових конструкцій	Термін експл., роки	Досліджувані вузли	Напрямок вирізки зразків	Усереднені експериментальні значення				
				$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	Ψ , %	δ , %	KCV , Дж/см ²
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	-
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 проти ваги	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 проти ваги	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		

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

характеристики металу певного вузла крану, окремі його ділянки можуть деградувати нижче її критичного (мінімально допустимого) рівня. Дійсно, на відміну від усереднених значень границі текучості, практично для всіх вузлів досліджених кранів отримано окремі її значення, які або нижче мінімальних у вихідному стані, або нижче гранично допустимих (рис. 1а). Особливо сильно знижується внаслідок тривалої дії експлуатаційних навантажень $\sigma_{0,2}$ сталі кронштейну колони крану «Ганц» та коромисла проти ваги кранів «Альбрехт». Границя міцності експлуатованих сталей не зазнає таких змін. Проте все ж отримано окремі значення багатьох вузлів кранів Г, A2, A3 нижче мінімальних, а стосовно коромисла проти ваги крану A3 - навіть близько до гранично допустимих. З отриманих результатів також слідує, що характеристики міцності експлуатованих сталей не залежать від напрямку вирізання зразків – вздовж чи поперек вальцювання.

Порівняння характеристик пластичності експлуатованих і не експлуатованих сталей можна було проводити тільки по відносному видовженню, яке загалом мало міняється для всіх кранів (рис. 1б). Деяко нижче мінімальних значень у вихідному стані отримано лише при випробах сталей кранів «Альбрехт», особливо на зразках вирізаних поперек вальцювання. Умовно за мінімальне значення відносного звуження сталей у вихідному стані прийняли усереднені значення тих експериментальних результатів, отриманих на експлуатованих сталях, відносне видовження яких відповідає мінімальним значенням відносного видовження сталей у вихідному стані. З отриманих результатів слідує, що для відносного звуження спостерігається набагато більший розкид даних і сильніший негативний вплив експлуатації порівняно із відносним видовженням. Загалом можна стверджувати, що тривала експлуатація сталей портових кранів спричиняє помітне зниження їх пластичності, при оцінюванні якої слід віддавати перевагу відносному звуженню.

Звертає на себе увагу надзвичайно сильний розкид експериментальних даних випроб на ударну в'язкість, яка, на перший погляд, не дає можливості судити про вплив експлуатації на опір сталей крихкому руйнуванню. Конкретні значення KCV можуть бути як більшими, так і меншими ударної в'язкості вихідного матеріалу. Оскільки підвищення опору крихкому руйнуванню не узгоджується з виявленою закономірністю зниження пластичності сталей, такі випадки аналізувалися окремо.

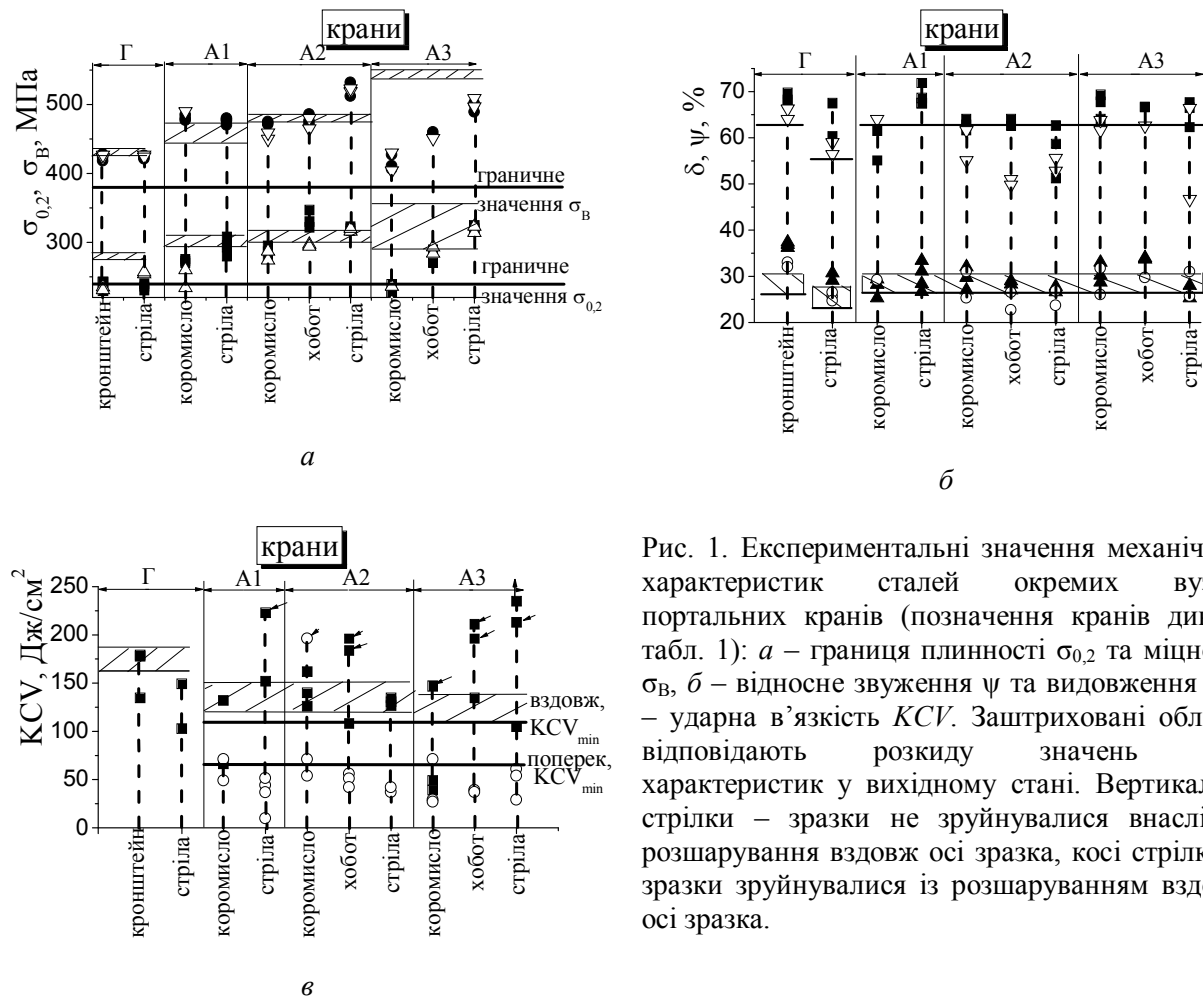


Рис. 1. Експериментальні значення механічних характеристик сталей окремих вузлів порталних кранів (позначення кранів див. у табл. 1): *а* – границя плинності $\sigma_{0,2}$ та міцності σ_B , *б* – відносне звуження ψ та видовження δ , *в* – ударна в'язкість KCV . Заштриховані області відповідають розкиду значень цих характеристик у вихідному стані. Вертикальні стрілки – зразки не зруйнувалися внаслідок розшарування вздовж осі зразка, косі стрілки – зразки зруйнувалися із розшаруванням вздовж осі зразка.

Фрактографічним аналізом виявлено (рис. 2), що аномально високим значенням ударної в'язкості, що перевищують значення KCV вихідного матеріалу, відповідає руйнування зразків з поворотом площини руйнування на 90° (рис. 2б). Такий характер руйнування зумовлений схильністю металопрокату до розшарування, особливо вдовж волокон текстури. Таке розшарування може бути настільки інтенсивне, що деформований зразок не руйнується (рис. 2в). Природно, що тоді поширення тріщини при ударному навантаженні пов'язано з додатковими затратами енергії, це відбивається на підвищенні значень формально визначеної ударної в'язкості. Однак такі випадки не слід розглядати як підвищення опору матеріалу крихкому руйнуванню з точки зору фізики деформування і руйнування, оскільки цей феномен пов'язаний з проявом чисто геометричного чинника – галуження тріщини. З огляду на це можна стверджувати, що практично для всіх досліджених вузлів кранів експлуатація зумовлює суттєве зниження їх опору крихкому руйнуванню. А в локальних місцях, наприклад для коромисла противаги крану А3, на зразках, вирізаних вздовж прокатування, отримано значення 39 Дж/см^2 проти 109 Дж/см^2 для вихідного стану металу, що свідчить про кардинальний спад ударної в'язкості.

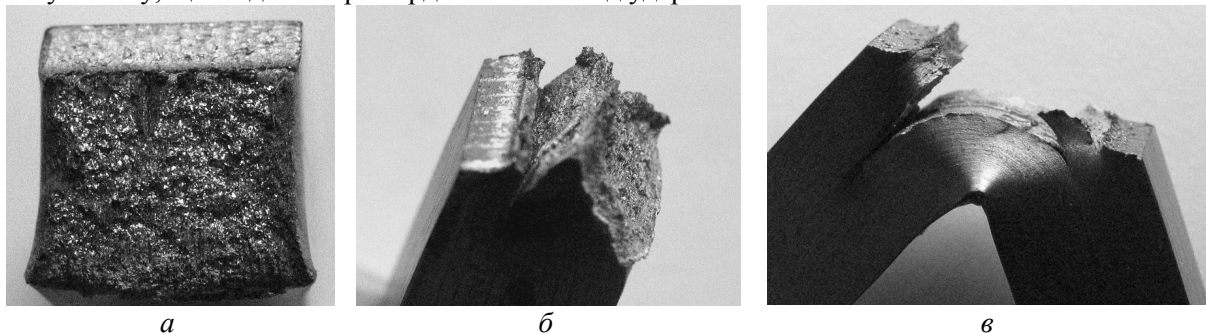


Рис. 2. Злами зразків, вирізаних вздовж напрямку вальцювання, після випроб на ударну в'язкість.

Таким чином, експлуатація порталних кранів на протязі 38...45 років спричиняє деградацію механічних властивостей металу, в більшій чи меншій мірі, всіх досліджуваних вузлів. В першу чергу це стосується ударної в'язкості. Однак для деяких вузлів виявлено і суттєве падіння границі плинності і відносного звуження. Вважають, що зниження характеристик пластичності і опору крихкому руйнуванню внаслідок тривалого деформування навіть в області пружних деформацій зумовлене протіканням процесу деформаційного старіння. Однак воно приводить також до зростання міцності, тоді як у нашому випадку спостерігається зниження границі плинності. Це вказує на те, що паралельно протікає також процес накопичення об'ємної пошкодженості. Особливість цієї стадії полягає в одночасному зниженні всіх характеристик, в тому числі і міцності. Звідси, за характером зміни характеристик міцності можна судити про домінуючу стадію деградації під час діагностування стану матеріалу конструкції.

Порівняння результатів випроб зразків, вирізаних у різних напрямках відносно напрямку вальцювання, вказує на чутливість експлуатаційної деградації металопрокату до його текстури: спостерігається сильніша зміна механічних показників при дослідженні зразків «поперек вальцювання».

За узагальненим аналізом можна зробити висновок, що важливим є не тільки рівень зниження механічних характеристик експлуатованого металу відносно їх значень у вихідному стані, але і співставлення з гранично допустимими значеннями, прийнятими в галузі при проектуванні конструкцій. За характеристиками міцності таким умовам не відповідають коромисла противаги всіх кранів типу «Альбрехт», а також кронштейн колони крану «Ганц». Це вказує на те, що подальша їх експлуатація проблематична.

На жаль, нам невідомі гранично допустимі мінімальні рівні ударної в'язкості. Однак поза сумнівами, отримані значення в діапазоні 27...39 Дж/см² (а це у 5 варіантах із 12 досліджених станів металу) знаходяться нижче можливих граничних значень для такого типу металоконструкцій. Такі низькі рівні *KCV* властиві конструкційним низьковуглецевим сталям лише після термічної обробки, що забезпечує підвищену міцність матеріалу. Звідси слідує, що тривала експлуатація вантажних портових конструкцій зумовлює кардинальний спад їх опору крихкому руйнуванню, в тому числі можливе різке зниження тріщиностійкості, опору корозійній втомі і корозійному розтріскуванню. Це дуже важливо, оскільки ці металоконструкції працюють в умовах можливої корозійно-агресивної дії морської атмосфери, що може викликати об'ємне наводнювання металу в процесі його тривалої експлуатації [9]. А це в свою чергу вимагає враховувати сумісний вплив тривалого (в тому числі і циклічного) навантаження та абсорбованого водню, який інтенсифікує розвиток пошкодженості деформаційно старіючого металу.

1. Г.М. Никифорчин, Студент О.З., Степенюк С.М., Марков А.Д. Оцінка технічного стану зварних з'єднань парогонів ТЕС з урахуванням водневої деградації експлуатованого металу // Зб. «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, машин та споруд». – 2006. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – С. 295–299.
2. Л.О. Бабій, О.З. Студент, А. Загурський, А.Д. Марков. Повзучість у водні експлуатованої сталі 2,25Cr-Mo // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – № 5. – С. 91–96.
3. О.Т. Цирульник, Г.М. Никифорчин, О.І. Звірко, Ю.Д. Петрина. Окрихчення сталі магістрального нафтопроводу // Там же. – 2004. – № 2. – С. 125–126.
4. G. Gabetta, H.M. Nykyforchyn, E. Lunarska, P.P. Zonta, O.T. Tsyurulnyk, K. Nikiforov, M.I. Hredil, D.Yu. Petryna, T. Vuherer. In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel // Там же. – 2008. – № 1. – С. 88–99.
5. О. П. Осташ, І. М. Андрейко, Ю. В. Головатюк. Деградація матеріалів і втомна міцність тривало експлуатованих авіаконструкцій // Там же. – 2006. – № 4. – С. 5–16.
6. // www.sds.ru/articles/degradation/index.html, 2004. Стандарт TGL 7960.
7. T. Tsuru, Y. Huang, M. R. Ali, A. Nishikata Hydrogen entry into steel during atmospheric corrosion process // Corrosion Science. – 2005. – v.47. – P. 2431–2440.