

УДК 622.691.4.053:620.178.7

ВПЛИВ ТЕКСТУРИ ЕКСПЛУАТОВАНИХ СТАЛЕЙ ГАЗОПРОВОДІВ НА ЇХ ОПІР КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ

О. І. ЗВІРКО¹, Н. В. КРЕТ¹, О. Т. ЦИРУЛЬНИК¹, Т. П. ВЕНГРИНЮК²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Випробуваннями на ударну в'язкість зразків Шарпі, вирізаних у різних напрямках відносно осі труби, встановлено відмінності в опорі крихкому руйнуванню феритно-перлітних сталей у вихідному та експлуатованому станах залежно від орієнтації зразків. Найвищий рівень ударної в'язкості властивий осьовим зразкам, дещо менший – тангенціальним, а найнижчий – радіальним зразкам, у яких площина руйнування паралельна площині вальцювання. Тривала експлуатація сталей істотно зменшує їх опір крихкому руйнуванню, при цьому ударна в'язкість радіальних зразків зазвичай нижча за регламентовану в галузі.

Ключові слова: *трубопровідні сталі, ударна в'язкість, експлуатаційна деградація, вплив текстури.*

Тривала експлуатація магістральних газопроводів зумовлює втрату вихідних фізико-механічних властивостей їх сталей [1–6], що негативно впливає на їхню роботоздатність. Транспортвані вуглеводні є джерелом наводнювання стінки труби, що додатково інтенсифікує експлуатаційну деградацію металу і, відповідно, погіршує його властивості [7, 8]. Встановлено, що з базових механічних властивостей найістотніше знижується опір матеріалу крихкому руйнуванню, який у нормативних документах найчастіше регламентують рівнем ударної в'язкості. З іншого боку, газопровідні труби здебільшого виготовляють з листового прокату, якому характерна анізотропія властивостей, у тому числі ударної в'язкості. Однак слід враховувати і те, що експлуатація сталей спричиняє не тільки зниження опору крихкому руйнуванню, але і збільшує відмінності у значеннях ударної в'язкості зразків, вирізаних у різних напрямках відносно осі труби [9]. Відповідно рекомендують певну схему вирізання зразків з труб, яка забезпечує вищу чутливість ударної в'язкості до експлуатаційної деградації сталей.

Сталям магістральних газопроводів властива схильність до розшарування вздовж площини вальцювання, що за наводнювання стінки труби з внутрішньої поверхні може призводити навіть до утворення закритих дефектів значної площі [10, 11]. Відповідно, це явище загострює проблему оцінювання анізотропії механічних властивостей тривало експлуатованого металу, зокрема, ударної в'язкості. Нижче досліджено вплив орієнтації вирізання зразків Шарпі з труб газопроводів на ударну в'язкість низки феритно-перлітних сталей з урахуванням їх експлуатаційної деградації.

Методичні аспекти досліджень. Випробували вітчизняні феритно-перлітні сталі 20, 17Г1С та закордонного виробництва Х60 труб різного зовнішнього діаметру D та товщини стінки t у вихідному стані (труби резервного запасу) та після різних термінів експлуатації в системі магістральних газопроводів. Використали сталі 17Г1С та Х60 труб лінійної частини трубопроводів і сталь 20 – гину відповідно

від компресорної станції труби. В останньому випадку дослідили метал розтягнутої ділянки гину, де виявили макророзшарування [10–12], та прилеглої до нього прямої ділянки. Характеристики міцності (границі міцності σ_B та текучості $\sigma_{0,2}$) та пластичності (відносні зрушення Ψ та видовження δ) сталей наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Механічні властивості за розтягу досліджуваних сталей

Сталь	Стан	$D \times t$, mm	Тривалість експлуатації τ , years	$\sigma_{0,2}$	σ_B	Ψ	δ
				МПа		%	
17Г1С	Вихідний	1020×11	0	392	620	72	23,9
	Експлуатований	1020×17	29	485	627	64	19,1
	Експлуатований	1220×12	36	461	624	60	19,9
Х60	Вихідний	1220×15	0	480	585	82	23,5
	Експлуатований	1420×17	25	502	633	71	18,5
20	Експлуатований, пряма ділянка	219×18	40	293	482	64	17,6
	Експлуатований, ділянка гину			324	507	68	20,2

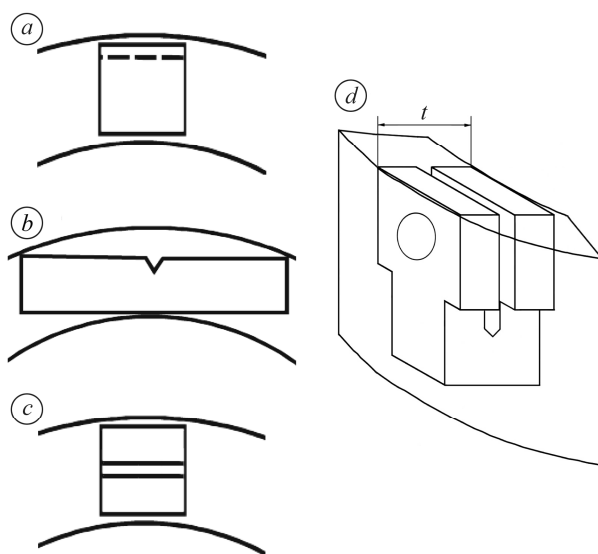


Рис. 1. Схема вирізання зразків Шарпі з труби в осьовому (а), тангенціальному (b) та радіальному (c, d) напрямках.

Fig. 1. Scheme of Charpy specimens cut out from the pipe in the longitudinal (a), transverse (b) and radial (c, d) directions.

Зразки для випробувань на ударну в'язкість вирізали з труб у трьох різних напрямках: осьовому, тангенціальному та радіальному (рис. 1). Для перших двох випадків (рис. 1a, b) не виникало особливих труднощів у виготовленні зразків необхідної довжини 55 mm, однак довжина радіального зразка (рис. 1c) обмежувалася товщиною стінки труби, яка була ≤ 18 mm. Тому для забезпечення можливості оцінити ударну в'язкість трубних сталей у радіальному напрямі запропоновано [12] спеціальну конструкцію комбінованого зразка з трьох частин, у якій робоча частина (рис. 1d) відповідає схемі на рис. 1c. Призначення двох бокових частин такого зразка – видовження до таких розмі-

рів, щоб його можна було розміщати на опорах копра, дотримуючись стандартизованої схеми ударного навантаження. Крім того, конструкція бокових частин зразка дещо ускладнена, щоби зробити можливим приварювання до них центральної його частини локальними місцями, віддаленими від робочого січення.

Результати експериментів та їх аналіз. Для сталей 17Г1С та Х60 зберігається типова закономірність – погіршення характеристик пластичності з підвищенням міцності металу (табл. 1). Зважаючи на це, експлуатованим сталям властива дещо вища міцність, що дає підстави вважати, що зміцнення та окрихчення металу відбулося внаслідок експлуатації, а не пов'язано з відмінностями у стані металу різних труб. Стосовно сталі 20 зазначимо, що вихідний стан металу не досліджували, проте порівнянням властивостей металу експлуатованих 40 років прямої ділянки труби та гину не підтвердили типову закономірність: гину властиві вищі характеристики і міцності, і пластичності. Цю особливість пов'язали зі схильністю сталі до воднем спричиненого розшарування (190×380 mm), яке виявили на досліджуваному гині у розтягнутій його частині [10, 12] і зробили висновок, що під час оцінювання показників пластичності на їх значення можуть впливати мікропошкоди в об'ємі стінки труби, орієнтовані у напрямі вальцювання.

Результати випроб на ударну в'язкість (табл. 2) показали істотну залежність значень *KCV* не тільки від стану сталей (вихідного чи експлуатованого), але й орієнтації зразків. Найвищі значення *KCV* отримали для осьових зразків незалежно від стану металу. Тангенціальним зразкам властиві нижчі значення *KCV*, при цьому для неексплуатованого металу відмінності несуттєві, тоді як для експлуатованого вони можуть бути у 1,5 рази меншими за ударну в'язкість осьових зразків. Це означає, що текстура вальцьованого прокату суттєвіше впливає на опір крихкому руйнуванню експлуатаційно деградованих сталей. Такий висновок узгоджується з результатами випроб на ударну в'язкість тривало експлуатованих сталей парогонів ТЕС з використанням зразків різноорієнтованих стосовно осі товстостінної труби [9].

Таблиця 2. Ударна в'язкість сталей залежно від орієнтації зразків

Сталь	Стан	<i>KCV</i> , J/cm ²		
		Осьові	Тангенціальні	Радіальні
17Г1С	Вихідний	152	129	–
	Експлуатований 29 років	–	113	19
	Експлуатований 36 років	–	84	38
Х60	Вихідний	342	326	58
	Експлуатований	326	214	37
20	Експлуатований, пряма ділянка	131	–	28
	Експлуатований, ділянка гину	188	–	20

Однак найнижчі значення *KCV*, в діапазоні 19...58 J/cm², отримали для радіальних зразків, площина руйнування яких паралельна площині вальцювання. Найвищий рівень ударної в'язкості властивий сталі у вихідному стані і він близький до граничнодопустимого для випроб зразків іншої орієнтації. Для експлуатованого металу отримані значення надзвичайно низькі і є свідченням особливо низького опору крихкому руйнуванню у площині, паралельній вальцюванню. Це слід пов'язувати з експлуатаційним ослабленням когезії між волокнами вальцьованого прокату, а також між матрицею та неметалевими включеннями, які витягнуті у напрямі вальцювання та утворюють протяжні ланцюжки, що, відповідно, сприяє розвитку мікропошкод, орієнтованих у цьому напрямі.

Макрофрактографічний аналіз зламів після випроб на ударну в'язкість виявив принципові відмінності у характері руйнування зразків, орієнтованих у різних напрямках відносно осі труби. Злами стандартних осьових чи тангенціальних зразків з неексплуатованої сталі мають матовий волокнистий вигляд з великими

т.зв. губами витягування (рис. 2а), що свідчить про в'язкий характер руйнування з відповідно високим значенням $KCV = 152 \text{ J/cm}^2$. Елементів типового кристалічного зламу, властивих крихкому руйнуванню, не виявили. Характерних ознак кристалічного зламу не спостерігали також і на зламі радіального зразка з експлуатаційно деградованої сталі, якій властивий гранично низький рівень $KCV = 19 \text{ J/cm}^2$, однак руйнування є крихким, без слідів пластичної деформації та губ витягування. Це означає, що низькоенергоємному руйнуванню у площині розшарування притаманний не кристалічний, а матовий макрохарактер поверхні, однак це не викликає сумнівів у крихкій поведінці матеріалу.

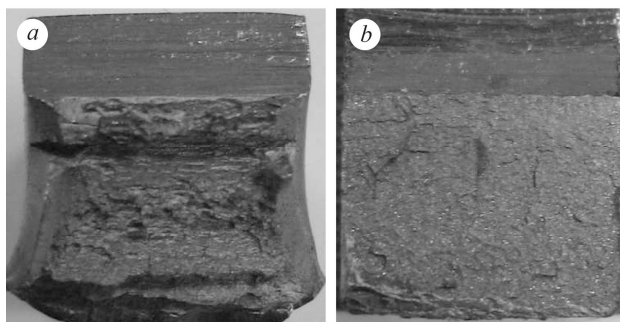


Рис. 2. Fig 2.

Рис. 2. Макрохарактер руйнування за випроб на ударну в'язкість сталі 17Г1С у вихідному стані (а) та після 29 років експлуатації (b).

Fig. 2. Macroscopic nature of fracture during impact strength tests of 17Г1С steel in as-received state (a) and after 29 years of operation (b).



Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Поперечний профіль зруйнованого осьового зразка Шарпі розтягнутої частини гину зі сталі 20.

Fig. 3. Cross-section of fractured longitudinal Charpy specimen of 20 steel of the elbow tension part.

Виявили неузгодженість між значеннями ударної в'язкості, отриманими випробуваннями стандартних та радіальних зразків, яка полягає у тому, що стану металу з нижчим значенням KCV не відповідає менше значення, визначене на звичайних зразках. Для прикладу, для експлуатованої 29 років сталі 17Г1С визначена на радіальних зразках $KCV = 19 \text{ J/cm}^2$, а на тангенціальних – 113 J/cm^2 . Водночас для сталі 17Г1С після 35 років експлуатації відповідні значення становлять 38 та 84 J/cm^2 . Це пояснили тим, що за випробувань стандартних зразків площа руйнування перетинає мікротріщини, орієнтовані уздовж вальцювання, що вимагає додаткових затрат енергії на їх подолання, а це, у підсумку, збільшує рівень KCV . Це ілюструє поперечний профіль зламу зразка Шарпі осьової орієнтації зі сталі 20, схильної до воднем спричиненого розшарування (рис. 3). Тобто можна було би очікувати інтенсивнішого зниження за тривалої експлуатації ударної в'язкості, визначеної згідно зі стандартною методикою, якби не розвиток в об'ємі металу орієнтованої у напрямі вальцювання пошкоджуваності.

Таким чином, для сталей вальцюваного прокату з чітко вираженою текстурою важливо розділяти стадію розвитку експлуатаційної пошкоджуваності на періоди утворення хаотично орієнтованих дефектів та мікротріщин розшарування, орієнтованих у напрямі вальцювання, внаслідок експлуатаційного зниження когезії між волокнами вальцюваного прокату для коректного оцінювання їх характеристик.

ВИСНОВКИ

Експлуатаційна деградація феритно-перлітних сталей магістральних газопроводів попри загалом істотне зниження опору крихкому руйнуванню металу надає низку особливостей, пов'язаних зі зниженням когезії між волокнами вальцьованого прокату та розвитком мікротріщин розшарування, орієнтованих у напрямі вальцювання. Порівняльним аналізом ударної в'язкості *KCV* трубних сталей з використанням осьових та тангенціальних зразків Шарпі, а також радіальних спеціальної конструкції, встановлено вплив текстури сталей на її рівень. З одного боку, такого типу орієнтована пошкоджуваність понижує енергоємність руйнування радіальних зразків, а з іншого – її підвищує за випробувань осьових та тангенціальних зразків через перетин площиною руйнування таких тріщин. Макрофрактографічним аналізом поверхонь руйнування, паралельних площині вальцювання, показано, що гранично низький опір крихкому руйнуванню не супроводжується типовим кристалічним зломом, а має плоску матову структуру.

РЕЗЮМЕ. Испытаниями на ударную вязкость образцов Шарпи, вырезанных в разных направлениях относительно оси трубы, установлены различия в сопротивлении хрупкому разрушению феррито-перлитных сталей в исходном и эксплуатированном состоянии в зависимости от ориентации образцов. Наиболее высокий уровень ударной вязкости присущий осевым образцам, немного меньший – тангенциальным, а наиболее низкий – радиальным образцам, в которых плоскость разрушения параллельна плоскости проката. Длительная эксплуатация сталей существенно уменьшает их сопротивление хрупкому разрушению, при этом уровень ударной вязкости радиальных образцов обычно ниже регламентированного в отрасли.

SUMMARY. Differences in the brittle fracture resistance of ferrite-pearlite steels in as-received and operated states depending on specimens orientation were determined by impact strength tests of Charpy specimens cut out in the different directions relative to the pipe axis. Longitudinal specimens had the highest level of impact strength, transverse specimens had somewhat lower level, and radial specimens with the fracture plane parallel to rolling plane, – the lowest one. Long-term operation of steels significantly reduces their resistance to brittle fracture, and the impact strength level of radial specimens was usually lower than that regulated in the industry.

Acknowledgment. The research has been partially supported by the NATO in the Science for Peace and Security Programme under the Project G5055.

1. *Чутливість до водневої крихкості зварного з'єднання сталі 17Г1С магістрального трубопроводу /* О. Т. Цирульник, Є. І. Крижанівський, Д. Ю. Петрина, О. С. Тараєвський, М. І. Греділь // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2004. – **40**, № 6. – С. 111–114.
(*Susceptibility of a welded joint of 17G1S steel in a gas main to hydrogen embrittlement /* О. Т. Tsyruľnyk, E. I. Kryzhaniv's'kyi, D. Yu. Petryna, O. S. Taraevs'kyi, M. I. Hredil' // *Materials Science.* – 2004. – **40**, № 6. – P. 844–849.)
2. *Degradation of steels used in gas main pipelines during their 40-year operation /* Н. М. Nykyforchyn, О. Т. Tsyruľnyk, D. Yu. Petryna, M. I. Hredil' // *Strength of Materials.* – 2009. – **41**, № 5. – P. 501–505.
3. *Деградація властивостей металу зварного з'єднання експлуатованого магістрального газопроводу /* О. Т. Цирульник, В. А. Волошин, Д. Ю. Петрина, М. І. Греділь, О. І. Звірко // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2010. – **46**, № 5. – С. 55–58.
(*Degradation of properties of the metal of welded joints in operating gas mains /* О. Т. Tsyruľnyk, V. A. Voloshyn, D. Yu. Petryna, M. I. Hredil, O. I. Zvirko // *Materials Science.* – 2011. – **46**, № 5. – P. 628–632.)
4. *Крижанівський Є. І., Грабовський Р. С., Мандрик О. М. Оцінювання робоздатності нафтогазопроводів тривалої експлуатації за параметрами їх дефектності //* *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2013. – **49**, № 1. – С. 105–110.

- (*Kryzhaniv's'kyi E. I., Hrabovs'kyi R. S., Mandryk O. M.* Estimation of the serviceability of oil and gas pipelines after long-term operation according to the parameters of their defectiveness // *Materials Science*. – 2013. – **49**, № 1. – P. 117–123.)
5. *Degradation of the main gas pipeline material and mechanisms of its fracture* / P. Maruschak, I. Danyliuk, O. Prentkovskis, R. Bishchak, A. Pylypenko, A. Sorochak // *J. Civil Eng. and Management*. – 2014. – **20**, № 6. – P. 864–872.
 6. *Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: Довідн. пос.* / Під заг. ред. З. Т. Назарчука. Т. 1: Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів / Є. І. Крижанівський, О. П. Остап, Г. М. Никифорчин, О. З. Студент, П. В. Ясній. – Львів: Простір-М, 2016. – 360 с.
 7. *Воднева деградація тривало експлуатованих сталей магістральних газопроводів* / О. Т. Цирульник, Г. М. Никифорчин, Д. Ю. Петрина, М. І. Греділь, І. М. Дзьоба // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2007. – **43**, № 5. – С. 97–104.
(*Hydrogen degradation of steels in gas mains after long periods of operation* / O. T. Tsyurul'nyk, H. M. Nykyforchyn, D. Yu. Petryna, M. I. Hredil', I. M. Dz'oba // *Materials Science*. – **43**, № 5. – P. 708–717.)
 8. *Харченко Є. В., Студент О. З., Чумало Г. В.* Вплив деградації сталі 17Г1С на її властивості після експлуатації на магістральному газогоні // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2017. – **53**, № 2. – С. 72–79.
(*Kharchenko E. V., Student O. Z., Chumalo H. V.* Influence of the degradation of 17G1S steel on its properties after operation in the gas main // *Materials Science*. – 2017. – **53**, № 2. – P. 207–215.)
 9. *Кречковська Г. В., Студент О. З.* Оцінювання деградації сталей парогонів за ударною в'язкістю на зразках з різною геометрією надрізу // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2016. – **52**, № 4. – С. 106–110.
(*Krechkovs'ka H. V., Student O. Z.* Determination of the degree of degradation of steels of steam pipelines according to their impact toughness on specimens with different geometries of notches // *Materials Science*. – 2017. – **52**, № 4. – P. 566–571.)
 10. *Діагностика водневого макророзшарування в стінці гину труби системи магістральних газопроводів* / Л. Є. Харченко, О. Є. Кунта, О. І. Звірко, Р. С. Савула, З. А. Дурягіна // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2015. – **51**, № 4. – С. 84–90.
(*Diagnostics of hydrogen macrodelamination in the wall of a bent pipe in the system of gas mains* / L. E. Kharchenko, O. E. Kunta, O. I. Zvirko, and R. S. Savula // *Materials Science*. – 2016. – **51**, № 4. – P. 530–537.)
 11. *Corrosion degradation of steel of long-term operated gas pipeline elbow with large-scale delamination* / O. I. Zvirko, A. B. Mytsyk, O. T. Tsyurulnyk, G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2016. – **52**, № 6. – С. 104–108.
(*Corrosion degradation of steel of an elbow of gas pipeline with large-scale delamination after long-term operation* / O. I. Zvirko, A. B. Mytsyk, O. T. Tsyurulnyk, G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn // *Materials Science*. – 2017. – **52**, № 6. – P. 861–865.)
 12. *Analysis and mechanical properties characterization of operated gas main elbow with hydrogen assisted large-scale delamination* / H. Nykyforchyn, O. Zvirko, O. Tsyurulnyk, N. Kret // *Eng. Failure Analysis*. – 2017. – **Vol. 82**. – P. 364–377.

Одержано 05.04.2018