

УДК 620.193.81:620.197.6

**ВПЛИВ ТЕКСТУРИ ТА НАВОДНЮВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ І ХАРАКТЕР РУЙНУВАННЯ ТРУБНОЇ СТАЛІ***П. О. МАРУЩАК¹, Н. В. КРЕТ², Р. Т. БИЩАК³, І. М. КУРНАТ²*¹ Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя;² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;³ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Розтягом циліндричних зразків, вирізаних у різних напрямках відносно осі тривало експлуатованої труби магістрального газопроводу, встановлено відмінності у механічних властивостях сталі залежно від їх орієнтації. Важливим чинником впливу на механічну поведінку феритно-перлітної сталі є її схильність до розшарування вздовж напрямку вальцювання. Ця схильність максимально проявляється за сумісної дії попереднього пластичного деформування та наводнювання.

Ключові слова: магістральний газопровід, трубна сталь, крива розтягу, пластична деформація, наводнювання, розшарування.

Вступ. Експлуатаційна деградація сталей магістральних нафтогазопроводів відома, вона посилює ризик їх неконтрольованого руйнування [1, 2]. Наводнювання стінки труби через взаємодію корозивного середовища з металом інтенсифікує його пошкодження [3], що негативно відображається на його фізико-механічних характеристиках [4]. З іншого боку, такі труби виготовляють з вальцьованого прокату, якому властиві текстура та схильність до розшарування вздовж волокон вальцювання, яка зростає за умов наводнювання металу [5–8]. Відповідно дефекти і на мікро-, і на макрорівні впливають на конструктивну міцність труб [9–11]. Мета роботи – встановити особливості деформування та руйнування експлуатованих трубних сталей за розтягу циліндричних зразків з урахуванням текстури металу та його наводнювання.

Методика досліджень. Об'єкт досліджень – сталь 17Г1С магістрального газопроводу після 40 (сталь А) та 50 (сталь В) років експлуатації. Циліндричні зразки діаметром 5 mm та довжиною 25 mm робочої частини вирізали у поздовжньому (L) та поперечному (Т) напрямках стосовно осі труби. Швидкість навантаження зразків розтягом становила $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Сталь А випробовували за трьома схемами: I – звичайний розтяг; II – попереднє електролітичне наводнювання зразків з подальшим розтягом у повітрі; III – попереднє деформування до $\delta = 6\%$, наводнювання зразків та розтяг у повітрі. Дослідження сталі В обмежили схемою I.

Електролітичне наводнювання виконували в розчині H_2SO_4 (рН 4) з додаванням 2 g/l тіосечовини за густини струму 5 mA/cm^2 впродовж 25 h.

Результати експериментів. Механічна поведінка сталі В. Діаграмам поздовжніх зразків типу L притаманна чітка поличка плинності (рис. 1a), що властиво експлуатаційно деградованим сталям [12]. На відміну від зразків типу L, поперечним зразкам (Т) характерне деяке зменшення міцності та різке зниження відносного видовження δ (рис. 1b). Загалом пластичність поперечних зразків нижча, ніж поздовжніх, але двократну різницю слід пов'язувати саме з експлуа-

таційною деградацією металу [13]. Крім того, якщо для поздовжніх діаграми подібні, то зразки типу Т мали суттєві відмінності. Можливо, це зумовлено не тільки анізотропією мікропошкоджень, але і утворенням тріщин з розмірами, які відповідають переходу від мікронного до міліметрового діапазону. На це вказує діаграма на рис. 1с, яка виділяється критично низькими міцністю та пластичністю. Зазначимо тут більшу податливість такого зразка та відсутність полички плинності, що вказує на домінування у його механічній поведінці не так здатності металу до пластичного деформування, як експлуатаційного пошкодження.

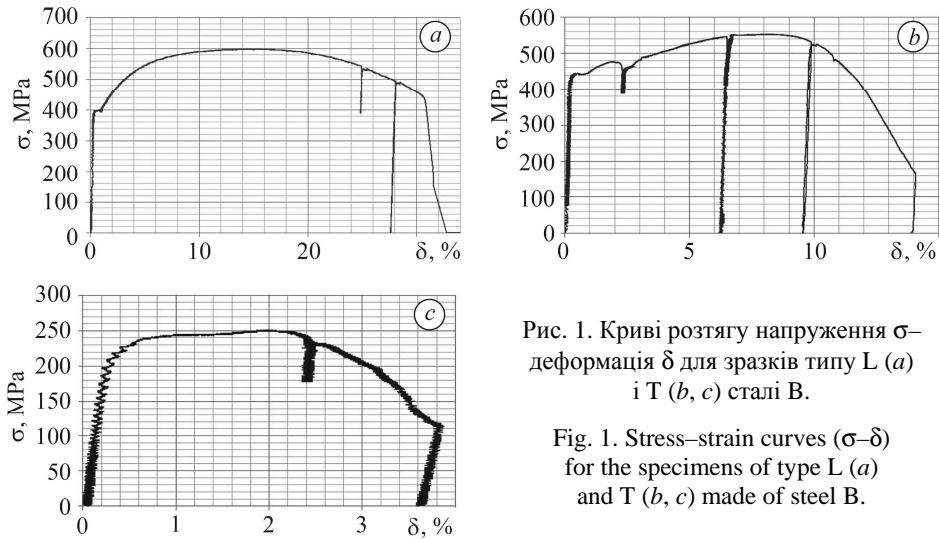


Рис. 1. Криві розтягу напруження σ –деформація δ для зразків типу L (a) і T (b, c) сталі B.

Fig. 1. Stress–strain curves (σ – δ) for the specimens of type L (a) and T (b, c) made of steel B.

Вплив попереднього пластичного деформування та наводнювання на механічну поведінку сталі А. Діаграми σ – δ для звичайного розтягу та з урахуванням лише попереднього наводнювання (рис. 2, криві 1 і 2) принципово не відрізняються, однак сумісна дія за схемою III деформаційного зміцнення та подальшого наводнювання металу призвела до радикального впливу (крива 3). І якщо зростання границі плинності пояснюється попереднім деформуванням, то кількарразове зменшення δ є результатом наводнювання пластично деформованого металу [14]. Тому вичерпання пластичності внаслідок експлуатаційної деградації, в тому числі вплив анізотропії, слід коректно оцінювати саме за зміною відносного звуження ψ .

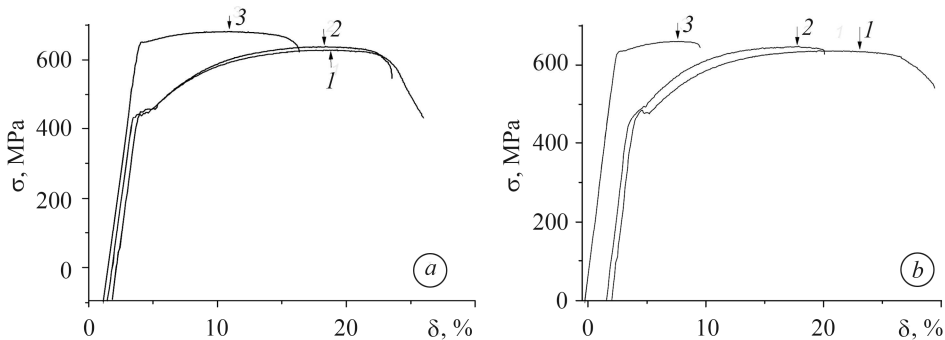


Рис. 2. Криві розтягу для зразків типу L (a) і T (b) сталі А, випробуваних за схемами I (1), II (2) і III (3).

Fig. 2. Stress–strain curves for the specimens of type L (a) and T (b) made of steel A, tested according to the modes I (1), II (2) and III (3).

За результатами звичайних випроб згідно зі схемою I (див. таблицю), спостерігаємо протилежні закономірності зміни характеристик пластичності δ та ψ за переходу від L- до T-орієнтації зразків: δ зросло, однак ψ зменшилося. Це особливість експлуатаційної деградації сталей, коли δ може неадекватно відображати їх пластичність через розкриття мікродфектів, розсіяних у металі [14, 15].

Механічні властивості зразків сталі А

Напря́м вирі́зання	Схема випроб	σ_{UTS}	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,2} / \sigma_{UTS}$	δ	ψ
		МПа			%	
L	I	626	429	0,69	22,8	75,1
	II	638	432	0,68	19,1	35,5
	III	670	639	–	13,8	24,0
T	I	637	467	0,73	25,2	51,0
	II	649	448	0,73	15,7	20,2
	III	659	633	–	6,7	18,3

Попереднє наводнювання зразків (схема II) практично не вплинуло на характеристики міцності сталі, однак зменшило показники їх пластичності, при цьому істотніше ψ , яке знизилось від 75,1% до 24% для напрямку L та з 51% до 20,2 % для T. Зазначимо також, що абсорбований водень в експлуатованому металі практично нівелює різницю між ψ зразків для різних напрямів вирізання. Водночас водень значно зменшує відносне видовження (з 25,2% до 15,7%) тільки для напрямку T, тоді як для L – лише від 22,8% до 19,1%. Очевидно, тут проявляється двояка дія водню: з одного боку, окрихчення металу, а з іншого – розвиток дефектів, який посилює вклад розкриття множинних мікротріщин у відносне видовження.

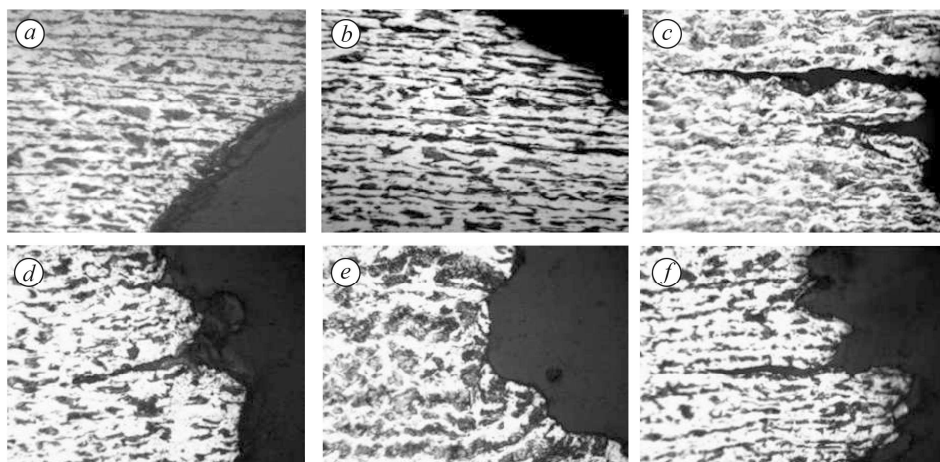


Рис. 3. Профілі зламів зразків типу L (a–c) і T (d–f) сталі А, випробуваних за схемами I (a, d), II (b, e) і III (c, f).

Fig. 3. Fracture profiles of the specimens of type L (a–c) and T (d–f) for steel A tested according to the modes I (a, d), II (b, e) and III (c, f).

Головна особливість сумісного впливу деформування і наводнювання (схема III) полягає у різкому зниженні пластичності зразків (див. таблицю). Швидке зростання характеристик міцності логічне, воно зумовлене деформаційним зміц-

ненням, однак лише воно б не спричинило такого кардинального зменшення пластичності металу. Це свідчить про істотний негативний вплив водню на механічну поведінку попередньо деформованого металу [14–17].

Металографічний аналіз профілів зламів виявив певні особливості, зумовлені як анізотропією феритно-перлітної структури, так і умовами випроб (рис. 3). Для поздовжніх зразків профіль порівняно гладкий (рис. 3a). Наводнювання збільшує шорсткість поверхні, що відображається на профілі зламу (рис. 3b). Однак він різко змінюється лише за сумісної дії пластичного деформування і наводнювання, вздовж волокон вальцювання з'являються вторинні тріщини (рис. 3c), що є ознакою високої схильності прокату до розшарування у напрямі вальцювання. Для поперечних зразків розшарування інтенсивніше незалежно від умов випроб (рис. 3d–f).

ВИСНОВКИ

Виявлені відмінності у механічній поведінці поздовжніх та поперечних зразків зумовлені не тільки текстурою феритно-перлітної сталі, але і розсіяними в об'ємі металу мікропошкодженнями. Це насамперед впливає на характеристики пластичності. За особливо інтенсивного пошкодження крива розтягу відображає вже не здатність металу до пластичного деформування, а опірність руйнуванню зразка з дефектами. Наводнювання металу знижує його пластичність, істотніше для поперечних зразків. Однак найсильніший ефект отримано за сумісної дії пластичного деформування та наводнювання.

РЕЗЮМЕ. Растяжением цилиндрических образцов, вырезанных в разных направлениях относительно оси длительно эксплуатируемой трубы магистрального трубопровода, установлены различия в механических свойствах стали в зависимости от ориентации образцов. Важным фактором влияния на механическое поведение ферритно-перлитной стали выступает ее склонность к расслоению вдоль направления проката. Эта склонность проявляется максимально при совместном воздействии предварительного пластического деформирования и наводороживания.

SUMMARY. The differences in the mechanical properties of steel obtained by cylindrical specimens tension in dependence on its orientation and cut out in the different directions with respect to the axis of the long-term operated pipe of main gas pipeline are established. Sensitivity to delamination along the rolling direction is an important factor of the influence on mechanical behavior of ferrite-perlite steel. This tendency reveals itself maximum under simultaneous action of preliminary plastic deformation and hydrogenation.

1. *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.
2. *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. of Civil Engng. and Management.* – 2014. – **20**, Is. 6. – P. 864–872.
3. *Hredil M. and Tsyruľnyk O. Inner corrosion as a factor of in-bulk steel degradation of transit gas pipelines //* 18th Europ. Conf. on Fracture: Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale (ECF-18) (Dresden, Germany, 30.08–03.09. 2010). – Manuscript № 483.
4. *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.
(Embrittlement of the steel of an oil-trunk pipeline / О. Т. Tsyruľnyk, Н. М. Nykyforchyn, О. І. Zvirko, D. Yu. Petryna // *Materials Science.* – 2004. – **40**, № 2. – P. 302–304.)
5. *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 macrolamination in the wall of a bent pipe in the system of gas mains / L. E. Kharchenko, O. E. Kunta, O. I. Zvirko, R. S. Savula, Z. A. Duryahina // Materials Science. – 2016. – 51, № 4. – P. 530–537.*)
6. *Analysis and mechanical properties characterization of operated gas main elbow with hydrogen assisted large-scale delamination / H. Nykyforchyn, O. Zvirko, O. Tsyurulnyk, N. Kret // Engng. Failure Analysis. – 2017. – 82. – P. 364–377.*
 7. *Вплив текстури експлуатованих сталей газопроводів на їх опір крихкому руйнуванню / О. І. Звірко, Н. В. Крет, О. Т. Цирульник, Т. П. Венгринюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – 54, № 3. – С. 101–106.*
(*Influence of textures of pipeline steels after operation on their brittle fracture resistance / O. I. Zvirko, N. V. Kret, O. T. Tsyurulnyk, T. P. Vengrynyuk // Materials Science. – 2018. – 54, № 3. – P. 400–405.*)
 8. *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.*)
 9. *Вплив водню на залишковий ресурс труби газопроводу за маневрового режиму експлуатації / О. С. Андрейків, І. Я. Долінська, В. З. Кухар, І. П. Штойко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – 54, № 5. – С. 33–39.*
 10. *Maruschak P., Prentkovskis O., and Bishchak R. Defectiveness of external and internal surfaces of the main oil and gas pipelines after long-term operation // J. of Civil Engng and Management. – 2016. – 22. – P. 279–286.*
 11. *Hredil M. I. Role of disseminated damages in operational degradation of steels of the main gas conduits // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2011. – 33, Spec. Iss. – P. 419–426.*
 12. *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. Tsyurulnyk, H. M. Nykyforchyn, D. Yu. Petryna, M. I. Hredil, I. M. Dzioba // Materials Science. – 2007. – 43, № 5. – P. 708–717.*)
 13. *Студент О. З., Кречковська Г. В. Анізотропія механічних властивостей деградованої сталі 15X1M1F після її експлуатації на парогонках ТЕС // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, № 5. – С. 19–26.*
(*Student O. Z. and Krechkovska H. V. Anisotropy of the mechanical properties of degraded 15Kh1M1F steel after its operation in steam pipelines of thermal power plants // Materials Science. – 2012. – 47, № 5. – P. 590–597.*)
 14. *Gredil M. I. Operating degradation of gas-main pipeline steels // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2008. – 30, Spec. Iss. – P. 397–406.*
 15. *Метод лабораторної деградації конструкційних сталей / О. Т. Цирульник, Н. В. Крет, В. А. Волошин, О. І. Звірко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – 53, № 5. – С. 85–93.*
(*A procedure of laboratory degradation of structural steels / O. T. Tsyurulnyk, N. V. Kret, V. A. Voloshyn, O. I. Zvirko // Materials Science. – 2018. – 53, № 5. – P. 674–683.*)
 16. *Condition evaluation of steel X65 in one of the sections of “Soyuz” gas main after long-term operation / P. Maruschak, R. Bishchak, O. Maruschak, D. Draganovská, A. Pylypenko // Koroze a ochrana materiálu. – 2018. – 62, № 3. – P. 78–82.*
 17. *Effect of long term operation on degradation of material of main gas pipelines / P. Maruschak, R. Bishchak, I. Konovalenko, A. Menou, J. Brezinová // Mater. Sci. Forum. – 2014. – 782. – P. 279–283.*

Одержано 24.01.2019