

УДК 620.191.33

Сиротюк А.М., к.т.н., Дмитрах І.М., д.т.н., проф., чл.-кор. НАН України
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна

ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ТА РИЗИКУ РУЙНУВАННЯ ТРУБОПРОВОДУ ЗА ДІЇ ВОДЕНЬВМІСНИХ СЕРЕДОВИЩ

Syrotyuk A., Dmyrakh I.
Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine
(syrotyuk@ipm.lviv.ua)

EVALUATION OF STRENGTH AND FRACTURE RISK OF PIPELINE UNDER ACTION OF HYDROGEN-CONTAINED ENVIRONMENTS

Поєднанням експериментальних методів фізичної хімії, механіки матеріалів та матеріалознавства досліджувалась низьколегована сталь X52 з домінуючою перлітно-феритною структурою, яка застосовується для виготовлення трубопровідних систем у газотранспортній індустрії і на даний момент є найбільш застосовною в існуючих газопроводах. Встановлено, що для сталі X52 існує деякий критичний час наводнювання, при якому досягається відповідна критична концентрація водню в металі C_H^ , за якої відбувається суттєве зниження опору руйнуванню матеріалу. Показано, що величина C_H^* може бути рекомендована як один з важливих інженерних параметрів для оцінювання надійності та довговічності трубопроводів, що використовуються транспортування воденьвмісних продуктів та виготовлених зі сталі X52. Ключові слова: низьколегована трубопровідна сталь, воденьвмісні середовища, наводнюваність металу, концентрація водню, концентратори напружень.*

Вступ

Трубопроводи для транспортування нафти та газу є надзвичайно важливими компонентами як національних, так і глобальних економічних інфраструктур. Трубопровідний транспорт бурхливо розвивається, і окрім цього існують грандіозні плани побудови нових трансконтинентальних трубопроводів. Тому проблемам, що відносяться до безпеки, надійності та цілісності газотранспортних мереж приділяється значна увага, оскільки існує ймовірність наводнювання металу в процесі експлуатації.

На сьогоднішній день загальновідомим є факт впливу воденьвмісних продуктів (під воденьвмісними продуктами в першу чергу розуміється, газоподібний водень, а також потенційно воденьвмісні середовища, тобто такі, які за певних умов при взаємодії з деформованим металом можуть виділяти водень, як продукт відповідних фізико-хімічних реакцій (наприклад, водні середовища, нафтопродукти тощо)) на механічні властивості конструктивних елементів трубопроводів. Однак відомо також, що залежно від умов взаємодії у системі „матеріал – воденьвмісне середовище” цей вплив може реалізуватись через цілий спектр різноманітних за фізико-хімічною природою явищ, які в кінцевому випадку і призводять до втрати матеріалом своїх службових характеристик. Тому наукова література визначає сучасний стан проблеми, як недостатньо вивчений, особливо у розумінні конкретних механізмів дії водню на процеси руйнування залежно від специфіки системи „матеріал – середовище” (див. [1–5]).

Окрім цього, наводнювання металу в процесі тривалої експлуатації трубопроводів є важливою проблемою з наступних причин.

Першою причиною, яка підвищує увагу до цієї проблеми є те, що водень буде відігравати визначальну роль в енергетичній системі майбутнього, коли запаси природних енергоносіїв будуть вичерпуватись або їх використання стане неприйнятним з екологічних причин. Різноманітні технічні й економічні аспекти розвитку водневої енергетичної структури обговорювалися у літературі впродовж останніх десятиліть [6, 7]. Можливість використання існуючих трубопровідних мереж для транспортування сумішей натурального газу та водню [3, 7, 8] відкриває унікальні можливості включення водню як енергоносія у загальну енергетичну інфраструктуру.

По-друге, специфічні умови довготривалої експлуатації трубопроводів сприяють процесам наводнювання сталей. Перш за все, трубопровідні сталі контактують з воднем при транспортуванні вуглеводнів [9]. Окрім цього зовнішні експлуатаційні умови середовища спричиняють вільну корозію металу, коли водень може утворюватися на поверхні металу як результат катодної реакції, спряженої з анодним розчиненням металу. Цей

факт був доведений у роботах [10–12]. Також доведено [12, 13], що наводнювання металу є можливим у випадку катодного захисту трубопроводів. Наслідком цього є проблема цілісності підземних трубопроводів з катодним захистом впродовж тривалої експлуатації [13].

У зв'язку з цим, оцінювання міцності та ризику руйнування конструктивних елементів трубопровідних систем в умовах дії транспортованих, потенційно воденьвмісних середовищ, із урахуванням експлуатаційних чинників є актуальною фундаментальною та прикладною задачею.

Постановка задачі – формулювання мети статті.

Метою цієї роботи було встановлення впливу водню на локальну міцність та ризик руйнування трубопровідних сталей біля концентраторів напружень.

Об'єкт дослідження: процес наводнення конструкційних сталей трубопроводів, що використовуються для транспортування воденьвмісних продуктів, під якими розуміється, в першу чергу, газоподібний водень, а також потенційно воденьвмісні середовища, тобто такі, які за певних умов при взаємодії з деформованим металом можуть виділяти водень, як продукт відповідних фізико-хімічних реакцій (наприклад, водні середовища, нафтопродукти тощо).

Предмет дослідження: параметри наводнюваності конструкційних трубопровідних сталей.

Методи дослідження – поєднання експериментальних методів фізичної хімії, механіки матеріалів та матеріалознавства.

Методика досліджень. Досліджувалась низьколегована сталь X52 з домінантною перлітно-феритною структурою, яка застосовується для виготовлення трубопровідних систем у газотранспортній індустрії і на даний момент є найбільш застосовною в існуючих газопроводах. Її хімічний склад та механічні характеристики наведено відповідно у табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі X52

Вміст елементів, %													
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Ti	Nb	S	P	Al	Fe
0,20	1,65	0,60	0,80	0,30	0,30	0,10	—	—	—	0,035	0,033	—	баланс
0,22	1,22	0,24	0,16	0,14	0,19	—	0,06	0,04	<0,05	0,036	—	0,032	баланс

Таблиця 2

Механічні характеристики сталі X52

σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
510	353	20,0

Зразки для випробувань вирізались безпосередньо з труб ($D = 610$ мм, $t = 11$ мм), що дало змогу максимально врахувати стан матеріалу в реальному трубопроводі.

Експерименти виконані за методикою наведеною у роботі [14]. Досліджувалось наводнювання як ненавантажених, так і навантажених зразків, що відповідало рівню розтягальних напружень σ_{exp} , які виникають в стінках труб зі сталі X52 за їх експлуатації під дією внутрішнього тиску $p_{exp} = 70$ бар (див. табл. 3).

Таблиця 3

Величини прикладених розтягальних напружень σ_{exp}

Марка сталі	p , бар	D , мм	t , мм	σ_{exp} , МПа
X52	70	610	11,0	194,09

Процес наводнювання трубопровідних сталей при заданих умовах катодної поляризації ($E_{cath} = -1000$ мВ) характеризували наступними параметрами:

i_c – середнє значення густини катодного струму;

Q_{ev} – загальна кількість утвореного водню на поверхні зразка;

Q_{abs} – загальна кількість абсорбованого металом водню;

$k = Q_{abs}/Q_{ev}$ – коефіцієнт ефективності проникнення водню в метал;

C_H – концентрація водню у металі.

Вплив водню на локальну міцність та руйнування трубопровідних сталей біля концентраторів напружень досліджено за методикою описаною у роботі [15]. Зразки з концентраторами напружень (рис. 1) попередньо наводнювали в напруженому стані (див. табл. 3). Після заданого часу витримки у наводнюючих умовах кожен зразок випробовувався до руйнування при зростаючому статичному навантаженні за схемою три точкового згину. Впродовж випробувань на персональному комп'ютері одночасно реєструвались діаграми „навантаження – переміщення” та сигнали акустичної емісії. Початок (старт) процесу руйнування матеріалу біля концентратора напружень фіксувався методом акустичної емісії.

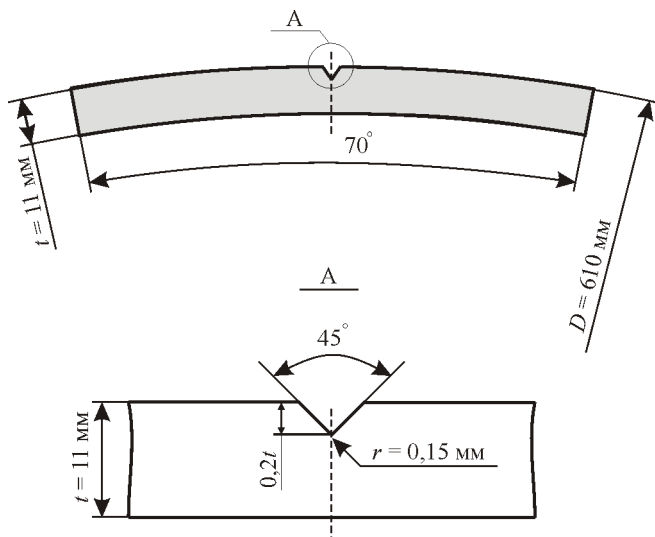


Рис. 1. Геометрія зразка

Вплив водню на локальну міцність та руйнування трубопровідної сталі X52 визначався за наступними параметрами:

- робота початку локального руйнування матеріалу біля концентратора напружень U_i ;
- загальна робота руйнування зразка з концентратором напружень U_f .

Параметри U_i та U_f визначались на підставі одержаних діаграм „навантаження – переміщення” згідно схеми наведеної на рис. 2 за співвідношеннями (1) та (2) відповідно:

$$U_i = \int_0^{\Delta_i} P(\Delta) \cdot d\Delta, \quad (1)$$

$$U_f = \int_0^{\Delta_f} P(\Delta) \cdot d\Delta. \quad (2)$$

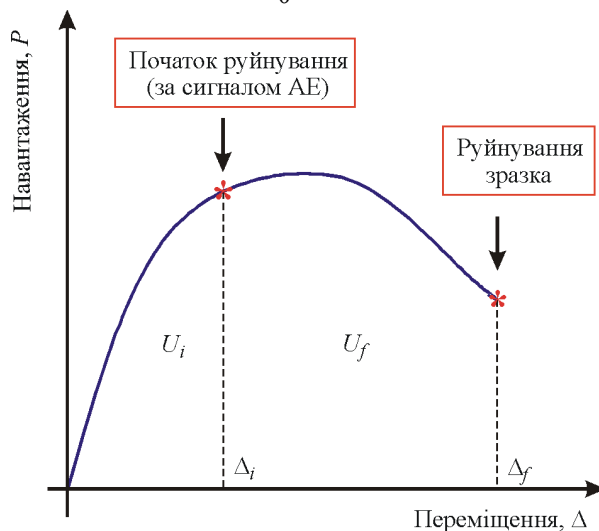


Рис. 2. Схема визначення параметрів U_i та U_f

Приклад визначення параметрів U_i та U_f для сталі X52 залежно від часу наводнювання зразка наведено на рис. 3.

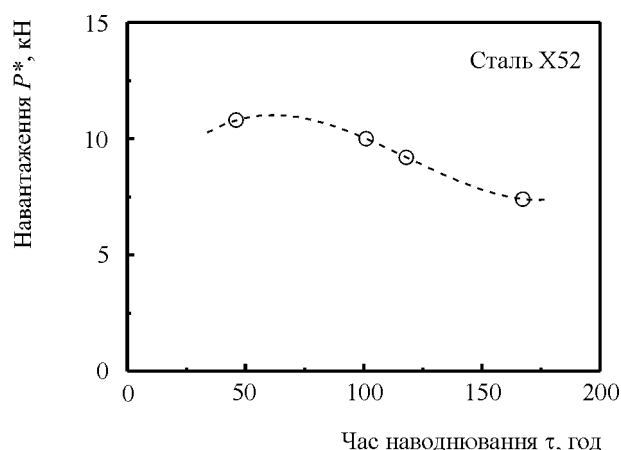


Рис. 3. Залежність величини навантаження P^* за якого розпочинається процес руйнування від часу наводнювання зразка

Виклад основного матеріалу дослідження. Визначення середньої об'ємної концентрації водню в матеріалі залежно від часу дії середовища та прикладених механічних навантажень має принципово важливе значення для подальшого оцінювання його міцності та довговічності в умовах тривалої експлуатації у воденьвмісних середовищах.

Встановлення особливостей локального руйнування трубопровідних сталей біля надрізів залежно від тривалості їх наводнювання. Значення параметрів U_i та U_f для сталі X52 за умов наводнювання впродовж різного часу τ наведено у табл. 5. Тут величину концентрації водню в металі C_H визначали на підставі формули (3).

Для великих часів витримки, тобто для діапазону $\tau \geq \tau_{C_H(\max)}$, зростання концентрації водню у металі залежно від часу експозиції зразків в умовах наводнювання може бути описане наступною степеневою залежністю [14, 15]:

$$C_H = A \cdot 10^{-6} \cdot \tau^m \left[\text{моль/см}^3 \right], \quad (3)$$

де A і m – константи системи „матеріал – середовище” (табл. 4).

Таблиця 4

Значення констант у залежності (3)

Марка сталі	Ненавантажений метал ($\sigma = 0$)		Напружений метал ($\sigma = \sigma_{exp}$)	
	A	m	A	m
X52	0,253	0,24	0,30	0,57

Таблиця 5

Значення параметрів U_i та U_f для сталі X52 за умов наводнювання впродовж часу τ

τ , год	U_i , Н·м	U_f , Н·м	C_H , 10^6 моль/см ³ (формула (3))
0 (повітря)	27,23	226,47	0
46	32,12	170,84	2,660
101	26,57	126,33	4,165
118	15,53	132,98	4,551
167,3	10,47	124,90	5,553

Основний висновок, який випливає з одержаних результатів (рис. 4) є те, що для дослідженої сталі існує деякий критичний час наводнювання, при якому досягається відповідна критична концентрація водню в металі, за якої відбувається суттєве зниження опору руйнуванню матеріалу.

Визначення діаграм „робота локального руйнування – концентрація водню” та „критичної” концентрації водню. Залежності роботи початку локального руйнування матеріалу біля концентратора напружень U_i та загальної роботи руйнування зразка з концентратором напружень U_f від концентрації водню в металі C_H

наведено відповідно на рис. 5 та 6. На підставі цих даних була визначена критична концентрація водню в металі C_H^* , яка спричиняє відчутне зниження опірності матеріалу до руйнування.

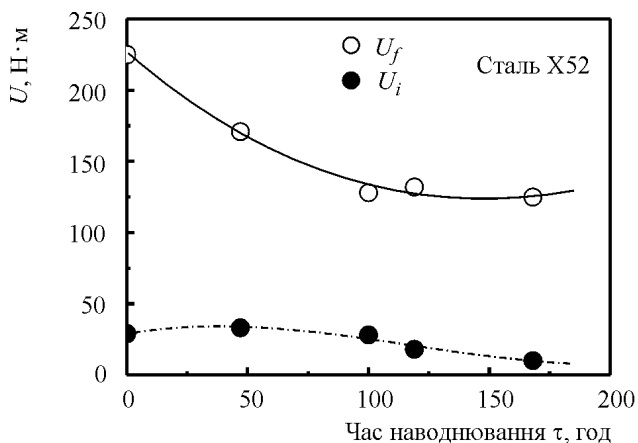


Рис. 4. Залежність параметрів U_i та U_f від часу наводнювання зразків

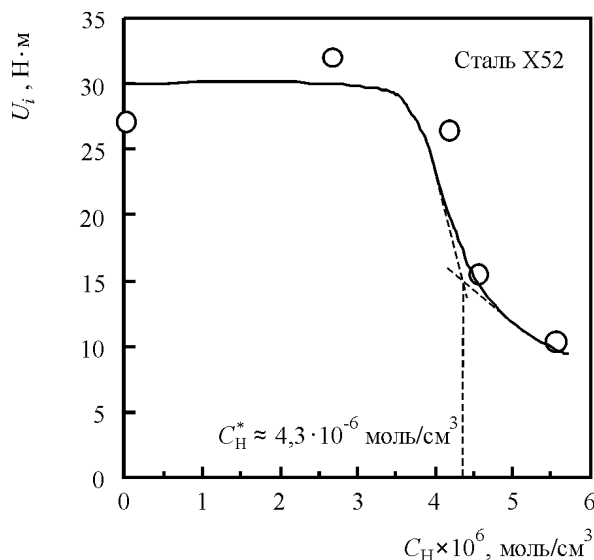


Рис. 5. Визначення критичної концентрації водню C_H^* у металі на підставі залежностей $U_i = f(C_H)$

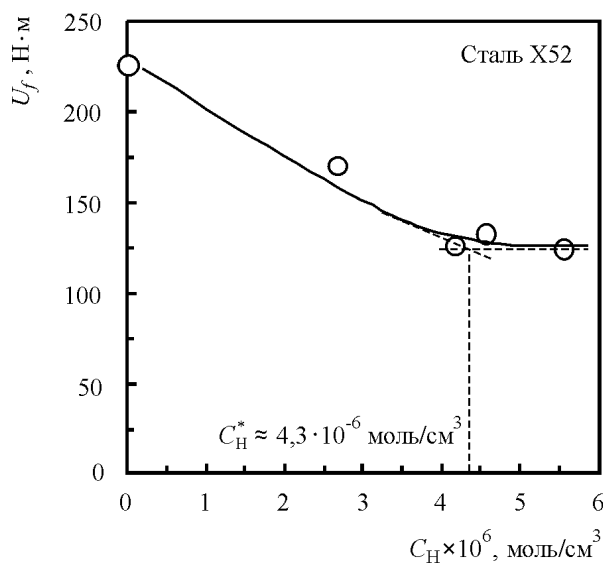


Рис. 6. Визначення критичної концентрації водню C_H^* у металі на підставі залежностей $U_f = f(C_H)$

Значення параметру C_H^* визначеного на підставі залежностей $U_i = f(C_H)$ та $U_f = f(C_H)$ співпадають (див. табл. 6), що дає підстави вважати його характеристичним [15] для даного класу сталей при розглянутих фізико-хімічних умовах наводнювання.

Таблиця 6

Оцінка критичної концентрації водню C_H^* для трубопровідних сталей

Сталь	C_H^* , моль/см ³	
	На основі даних U_i	На основі даних U_f
X52	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$

Таким чином величина C_H^* може бути рекомендована як один з важливих інженерних параметрів для оцінки надійності та довговічності трубопроводів транспортування водню виготовлених зі сталі X52.

Висновки

Встановлено, що для сталі X52 існує деякий критичний час наводнювання, при якому досягається відповідна критична концентрація водню в металі C_H^* , за якої відбувається суттєве зниження опору руйнуванню матеріалу.

Величина C_H^* може бути рекомендована як один з важливих інженерних параметрів для оцінки надійності та довговічності трубопроводів транспортування водню виготовлених зі сталі X52.

Результати дослідження можуть бути застосованими в інженерно-технічних підрозділах підприємств, що займаються транспортування воденьвмісних продуктів або водню та його використанням як енергоносія чи технологічного середовища.

Аннотація. Сочетанием экспериментальных методов физической химии, механики материалов и материаловедения исследовалась низколегированная сталь X52 доминантной перлитно-ферритной структурой, которая применяется для изготовления трубопроводных систем в газотранспортной индустрии и на данный момент является наиболее применимой в существующих газопроводах. Установлено, что для стали X52 существует некоторое критическое время наводороживания, при котором достигается соответствующая критическая концентрация водорода в металле C_H^* , при которой происходит существенное снижение сопротивления разрушению материала. Показано, что величина C_H^* может быть рекомендована как один из важных инженерных параметров для оценки надежности и долговечности трубопроводов, что используются для транспортировки водородсодержащих продуктов и изготовленных из стали X52.
Ключевые слова: низколегированная трубопроводная сталь, водородсодержащие среды, наводороживание металла, концентрация водорода, концентраторы напряжений.

Abstract. The work is dedicated to the evaluation of strength and risk of fracture of pipeline under action of gaseous hydrogen or potentially hydrogen-contained environments.

Purpose. Determining of the hydrogen effect on local strength and fracture risk of pipe with stress concentrators.

Design/methodology/approach. The low-alloyed steel X52 with the dominant pearlite-ferrite structure, which is the most usable in the existed gas pipelines, was studied by the combination of methods of mechanics of materials, physical chemistry and materials science.

Findings. The dependencies of the work for local fracture initiation from stress concentrator as well as the total work for notched specimen fracture were determined as the function of the hydrogen concentration in the bulk of metal.

Originality/value. The existence of some critical hydrogen concentration C_H^* , at which the essential decreasing of steel fracture resistance occurs, has been shown. This value can be considered as an important engineering parameter for strength and fracture assessment of materials and structural components in hydrogenous environments.

Keywords: low alloyed pipeline steel, hydrogen-contained environments, hydrogen charging of metal, hydrogen concentration, stress concentrators.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Dey S. Study on hydrogen absorption of pipeline steel under cathodic charging / S. Dey, A.K. Mandhyan, S.K. Sondhi [and all] // Corrosion Science. – 2006. – Vol. 48. – P. 2676–2688.
2. Hardie D. Effect of hydrogen and strain rate upon the ductility of mill-annealed Ti5Al3V / D. Hardie, S. Ouyang // Corrosion Science. – 1999. – Vol. 41, № 1. – P. 155–177.
3. Ibeh B. Separation of hydrogen from a hydrogen/methane mixture using a PEM fuel cell / Blessing Ibeh, Chris Gardner, Marten Ternan // International Journal of Hydrogen Energy. – 2007. – V. 32, Is. 7. – P. 908–914.
4. Katz Y. Nanomechanical probes as new approaches to hydrogen/deformation interaction studies / Y. Katz, N. Tymiak, W.W. Gerberich // Engineering Fracture Mechanics. – 2001. – Vol. 68. – P. 619–646.
5. Murakami Y. The effect of hydrogen on fatigue properties of steels used for fuel cell system / Y. Murakami, H. Matsunaga // International Journal of Fatigue. – 2006, Vol. 28. – P. 1509–1520.
6. Hanneken J.W. Hydrogen in metals and other materials: a comprehensive reference to books, bibliographies, workshops and conferences / John W. Hanneken // International Journal of Hydrogen Energy. – 1999. – V. 24, Is. 10. – P. 1005–1026.
7. Hydrogen Energy Systems: Production and Utilization of Hydrogen and Future Aspects: [Proceedings of the NATO Advanced Study Institute / Ed. Yuda Yürüm]. – London (UK): Kluwer Academic Publisher, 1995. – 341 p. – (NATO Science Series E: Applied Science – Vol. 295).
8. Capelle J. Using the Existing Natural Gas Network to Transport Hydrogen / J. Capelle, I. Dmytrakh, J. Gilgert G. Pluvinage // Le climat en question: séminaire EMMA, 10 May 2007: proceedings. – Nancy (France): University of Nancy, 2007. – P. 14.
9. Azevedo C.R.F. Failure analysis of a crude oil pipeline / Cesar R.F. Azevedo // Engineering Failure Analysis. – 2007. – V. 14, Is. 6. – P. 978–994.
10. Cheng Y.F. Fundamentals of hydrogen evolution reaction and its implications on near-neutral pH stress corrosion cracking of pipelines / Y.F. Cheng // Electrochimica Acta. – 2007. – V. 52, Is. 7. – P. 2661–2667.
11. Cheng Y.F. Mechanism for hydrogen evolution reaction on pipeline steel in near-neutral pH solution / Y.F. Cheng, L. Niu //

- Electrochemistry Communications. – 2007. – V. 9, Is. 4. – P. 558–562.
12. *Dey S.* Hydrogen entry into pipeline steel under freely corroding conditions in two corroding media / S. Dey, A.K. Mandhyan, S.K. Sondhi, I. Chattoraj // *Corrosion Science*. – 2006. – V. 48, Is. 9. – P. 2676–2688.
 13. *Shipilov S.A.* Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection / Sergei A. Shipilov, Iain Le May // *Engineering Failure Analysis*. – 2006. – V. 13, Is. 7. – P. 1159–1176.
 14. *Capelle J.* Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement / J. Capelle, J. Gilgert, I. Dmytrakh, G. Pluvinage // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2008. – V. 33, Is. 24. – P. 7630–7641.
 15. *Capelle J.* The effect of hydrogen concentration on fracture of pipeline steels in presence of a notch / J. Capelle, J. Gilgert, I. Dmytrakh, G. Pluvinage // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2011. – V. 78, Is. 2. – P. 364–373.

References

1. *Dey S., Mandhyan A.K., Sondhi S.K., and all,* Study on hydrogen absorption of pipeline steel under cathodic charging, *Corrosion Science*, 2006, Vol. 48, pp. 2676–2688.
2. *Hardie D., Ouyang S.,* Effect of hydrogen and strain rate upon the ductility of mill-annealed Ti5Al3V, *Corrosion Science*, 1999, Vol. 41, No 1, pp. 155–177.
3. *Ibeh B., Gardner C., Ternan M.,* Separation of hydrogen from a hydrogen/methane mixture using a PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, V. 32, Is. 7, pp. 908–914.
4. *Katz Y., Tymiak N., Gerberich W.W.,* Nanomechanical probes as new approaches to hydrogen/deformation interaction studies, *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, Vol. 68, pp. 619–646.
5. *Murakami Y., Matsunaga H.,* The effect of hydrogen on fatigue properties of steels used for fuel cell system, *International Journal of Fatigue*, 2006, Vol. 28, pp. 1509–1520.
6. *Hanneken J.W.,* Hydrogen in metals and other materials: a comprehensive reference to books, bibliographies, workshops and conferences, *International Journal of Hydrogen Energy*, 1999, V. 24, Is. 10, pp. 1005–1026.
7. *Hydrogen Energy Systems: Production and Utilization of Hydrogen and Future Aspects: [Proceedings of the NATO Advanced Study Institute / Ed. Yuda Yürüm],* London (UK): Kluwer Academic Publisher, 1995, 341 p. – (NATO Science Series E: Applied Science, Vol. 295).
8. *Capelle J., Dmytrakh I., Gilgert J., and all,* Using the Existing Natural Gas Network to Transport Hydrogen, *Le climat en question: séminaire EMMA*, 10 May 2007: proceedings, Nancy (France): University of Nancy, 2007, pp. 14.
9. *Azevedo C.R.F.,* Failure analysis of a crude oil pipeline, *Engineering Failure Analysis*, 2007, V. 14, Is. 6, pp. 978–994.
10. *Cheng Y.F.,* Fundamentals of hydrogen evolution reaction and its implications on near-neutral pH stress corrosion cracking of pipelines, *Electrochimica Acta*, 2007, V. 52, Is. 7, pp. 2661–2667.
11. *Cheng Y.F., Niu L.* Mechanism for hydrogen evolution reaction on pipeline steel in near-neutral pH solution, *Electrochemistry Communications*, 2007, V. 9, Is. 4, pp. 558–562.
12. *Dey S., Mandhyan A.K., Sondhi S.K., and all,* Hydrogen entry into pipeline steel under freely corroding conditions in two corroding media, *Corrosion Science*, 2006, V. 48, Is. 9, pp. 2676–2688.
13. *Shipilov S.A., May I.L.,* Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection, *Engineering Failure Analysis*, 2006, V. 13, Is. 7, pp. 1159–1176.
14. *Capelle J., Gilgert J., Dmytrakh I., and all,* Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, V. 33, Is. 24, pp. 7630–7641.
15. *Capelle J., Gilgert J., Dmytrakh I., and all,* The effect of hydrogen concentration on fracture of pipeline steels in presence of a notch, *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, V. 78, Is. 2, pp. 364–373.

Подана до редакції 10.02.2014