

УДК 622.691.4:620.19:620.17

## ДІАГНОСТИКА ВОДНЕВОГО МАКРОРОЗШАРУВАННЯ В СТІНЦІ ГИНУ ТРУБИ СИСТЕМИ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ

Л. Є. ХАРЧЕНКО<sup>1</sup>, О. Є. КУНТА<sup>1</sup>, О. І. ЗВІРКО<sup>2</sup>,  
Р. С. САВУЛА<sup>3</sup>, З. А. ДУРЯГІНА<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний університет "Львівська політехніка";

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>3</sup> Управління магістральних газопроводів "Львівтрансгаз"

Досліджено обширне воднем ініційоване розшарування у стінці гину тривало експлуатованої відвідної від газокompресорної станції труби системи магістральних газопроводів. Проаналізовано чинники, що відіграли вирішальну роль у його утворенні. Встановлено, що його діагностичними ознаками є аномальні покази товщиноміра, різке зниження твердості та пластичності сталі. Виявлено вищий ступінь деградації сталі гину труби порівняно з її прямою ділянкою, причому незалежно від того, чи ділянка розтягнута, чи стиснута. Встановлені обмеження у використанні і відносного видовження, і відносного звуження для характеристики пластичності металу стінки труби з обширним розшаруванням.

**Ключові слова:** воднем ініційоване руйнування, розшарування, газопровід, деградація, діагностика, неруйнівні методи контролю.

Розшарування в сталях може бути і металургійного, і експлуатаційного походження. У першому випадку вже металургійному продукту властиві такі пошкодження, тоді як у другому вони формуються під час експлуатації під дією робочих напружень. Розшарування утворюється по слабших площинах паралельно площині вальцювання в сталі через різні аспекти, що спричиняють анізотропію мікроструктури (відмінності текстури, розташування включень по площині вальцювання, міжзеренне руйнування вздовж первинних меж аустеніту, виділення фосфору та сірки тощо) [1]. Типовим проявом цього явища є декогезія вздовж ланцюжків неметалевих включень, витягнутих у напрямі вальцювання листового прокату. Атомарний водень акумулюється в утворених порожнинах, знижує міцність когезивного зв'язку між атомами металу та рекомбінується до молекулярного стану, створюючи в них тиски, що полегшує воднем ініційоване руйнування [2, 3]. Розшарування може відбуватися і без зовнішнього навантаження, тобто в результаті тільки наводнювання металу, якщо спричинені воднем напруження сумірні з робочими. Це явище відоме як воднем ініційоване руйнування (hydrogen induced cracking).

Водневе розшарування типове для нафтогазопроводів, оскільки технологія виготовлення труб передбачає вальцювання металу і, відповідно, видовження неметалевих включень з ослабленням когезивного зв'язку з матрицею. З іншого боку, наводнювання стінки труби, яке можливе від її внутрішньої поверхні [4], призводить до акумулювання молекулярного водню в сформованих міжфазних дефектах "включення–матриця" та створення там високих тисків. Це сприяє розвитку розсіяної в об'ємі металу мікропошкоженості, погіршенню механічних властивостей, особливо пластичності та опору крихкому руйнуванню [5–7]. Характерним проявом особливо інтенсивної деградації трубних сталей уздовж воло-

кон вальцювання є переорієнтація площини руйнування на  $90^\circ$ , паралельно волокнам, за випроб поздовжніх зразків на ударну в'язкість [8].

За такого розшарування можливе порушення цілісності на великих площах, часто сумірних з характерними розмірами елемента конструкції [9]. У трубопроводах такі макродефекти виявляють, як правило, під час ультразвукового контролю [10] як її стоншення. Нижче за результатами діагностики тривало експлуатованого гину відвідної труби системи магістральних газопроводів проаналізовано прояв воднем спричиненого внутрішнього розшарування.

**Діагностування дефектності гину газопроводу.** Досліджували гин експлуатованої 40 років відвідної від газокомпресорної станції труби з зовнішнім діаметром 219 mm і номінальною товщиною стінки 18 mm. Гин розташований у надземній частині, максимальний робочий тиск в трубі 5,5 МПа, температура металу могла сягати  $80^\circ\text{C}$ . Гин труби на  $90^\circ$  виконано холодним способом без термообробки. Матеріал труби – сталь 20. Причиною діагностування стала поява на зовнішній поверхні труби в розтягнутій зоні гину протяжної тріщини. Зазначимо, що це не призвело до розгерметизації трубопроводу, він надалі витримував у цій ділянці робоче навантаження, тому постало питання можливості подальшої безпечної експлуатації цього гину.

Ультразвуковим товщиноміром з А/В сканом MVX (Dakota Ultrasonics) обстежили гин та прилеглі до нього прямі ділянки. Його покази вказували на нерівне стоншення розтягнутої частини гину. Для прикладу, заміри товщиноміра, mm: 4,5; 3,7; 2,5; 4,2; 5,2; 5,6; 7,0; 6,4; 7,7; 6,5; 6,8; 6,9; 7,2; 7,6; 7,7; 8,0; 8,2; 16,2; 16,6; 17,3; 18,0; 16,8; 16,4; 17,6; 17,8; 16,5; 16,8; 17,2; 17,6; 17,0; 17,4; 17,0; 17,7; 18,1. І якщо товщина  $t \geq 16,2$  mm могла відповідати дійсності, враховуючи деяке стоншення труби у розтягнутій частині гину та можливу корозію металу на внутрішній поверхні, то формально визначені значення  $t = 3,7 \dots 8,2$  mm свідчили про реакцію товщиноміра на макродефекти всередині стінки труби.

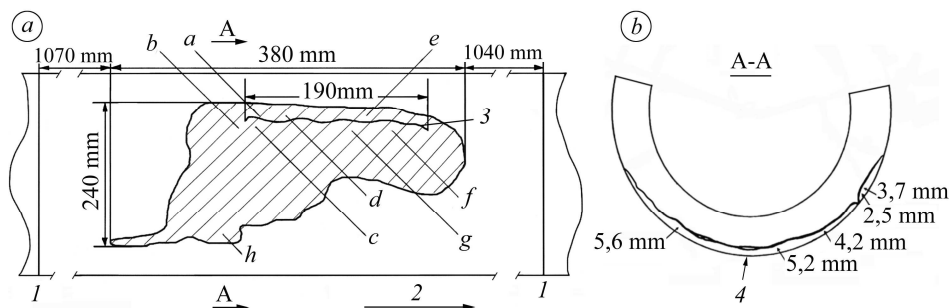


Рис. 1. Вигляд розшарування у стінці гину відвідної труби системи магістральних газопроводів (а) та переріз труби з дефектом (б): 1 – стик; 2 – напрям руху газу; 3 – тріщина; 4 – низ; твердість НВ: а – 141; б – 294; с – 135; д – 158; е – 122; ф – 158; г – 334; h – 158.

Fig. 1. View of delamination in the wall of lateral pipe elbow of a natural gas transmission pipeline system (a) and a pipe profile with a defect (b): 1 – weld; 2 – gas flow direction; 3 – crack; 4 – bottom; hardness HB: a – 141; b – 294; c – 135; d – 158; e – 122; f – 158; g – 334; h – 158.

Катастрофічне стоншення стінки труби виявили на великій площі її зовнішньої поверхні у сегменті між 4 та 8 h (загальна площа розшарування 380 mm уздовж осі та 240 mm – по колу труби, що приблизно третина довжини її окружності). Побудували карту ділянки розшарування (рис. 1) та позначили її на реальному гині (рис. 2). Розшарування всередині стінки труби ближче до зовнішньої поверхні вказує на головну роль у цьому процесі робочих напружень, які від тиску

газу в трубі максимальні на зовнішній поверхні та стимулюють корозійно-водневе руйнування.

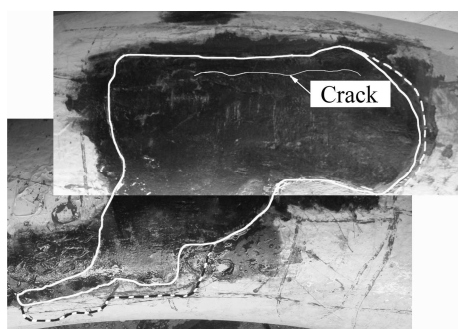


Рис. 2. Розшарування, спричинене воднем, у стінці гину відвідної труби системи магістральних газопроводів (суцільна лінія) та його поширення після гідроопресування (штрихова лінія).

Fig. 2. Hydrogen-induced delamination in the wall of a lateral pipe elbow of the main gas transmission pipeline system (solid line) and its extension after hydrostatic pressure testing (dotted line).

платуації. Звичайно, що менша товщина стінки між поверхнями розшарування і труби, то полегшений її розрив.

Зі зовнішньої поверхні труби переносним динамічним твердоміром ТД-32 заміряли твердість металу НВ за Брінелем у зоні розшарування (рис. 1). Максимальна твердість НВ 334 була дещо вищою, ніж на прямій ділянці труб, що можна пояснити деформаційним зміцненням, і відповідала тим локальним ділянкам, де розшарування відсутнє. А інтенсивне зниження показів твердості пов'язане з підповерхневим розшаруванням у зоні заміру і його можна трактувати як діагностичну ознаку прояву цього явища.

Наведені результати діагностичного обстеження гину труби стали основою для висновку про небезпеку його подальшої експлуатації. Тому його усунули з трубопроводу та використали для напівнатурних і лабораторних досліджень. Відомо [11], що абсорбований внутрішньою поверхнею водень може проникати крізь товщину стінки труби газопроводу і виходити з неї крізь зовнішню поверхню. Таким чином, аналізуючи експлуатаційну деградацію гину, зокрема втрату механічних властивостей металу і розвиток розшарування, слід брати до уваги не тільки структурно-металургійний чинник, але і водень. Зазначимо також, що підвищена (до 80°C) температура металу відвідної труби сприяє дифузії атомарного водню від внутрішньої поверхні до зовнішньої і, відповідно, акумулюванню його у мікрodefектах на міжфазних межах уздовж вальцьованих неметалевих включень. З подальшим розвитком такого дефекту зростатиме його об'єм, а отже, падатиме тиск водню, що мало би зупинити поширення тріщини. Однак за сталого джерела водню на внутрішній поверхні труби та активної його дифузії крізь її стінку тиск наростатиме, через що збільшиться дефектність з переходом мікро- у макророзшарування.

Спочатку методом гідроопресування проаналізували можливість поширення експлуатаційного розшарування на сусідні ділянки гину. Для цього гин заварили з двох боків для герметизації, вмонтували манометр тиску і підключили до водо-

Макродефект виходить на зовнішню поверхню гину не з контуру розшарування, тобто з вершини тріщини, а зсередини поверхні розшарування, на значній віддалі від його контуру (біля 60 mm). Це прямо підтверджує, що переорієнтація поверхні руйнування назовні спричинена внутрішнім тиском рекомбінованого водню у дефекті. Таким чином, під час експлуатації в результаті накопичення у дефекті водню та створення ним високих тисків не тільки поверхня розшарування зростає до розмірів, сумірних з діаметром труби, але і виникають умови для її розриву. Очевидно, що місце розриву вказує на максимальний напружено-деформований стан у стінці між поверхнею розшарування і зовнішньою поверхнею труби. А критичний стан досягається, з одного боку, через збільшення тиску водню у порожнині, а з іншого – через деградацію металу під час ек-

помпи. Гин піддали внутрішньому тиску, що у півтора рази перевищував робочий, тобто становив 8,25 МПа. Після гідропресування повторили ультразвуковий контроль товщини труби навколо зони розшарування та виявили її збільшення (див. рис. 2). Малоімовірно, щоб тріщина поширювалася під таким навантаженням за відсутності в порожнині розшарування тиску газу через вихід тріщини на зовнішню поверхню труби. Тому слід допустити, що у стінці труби сформувалося кілька внутрішніх сепаратних макропорожнин, а за гідропресування здатні поширюватися лише ті, що закриті в стінці гину.

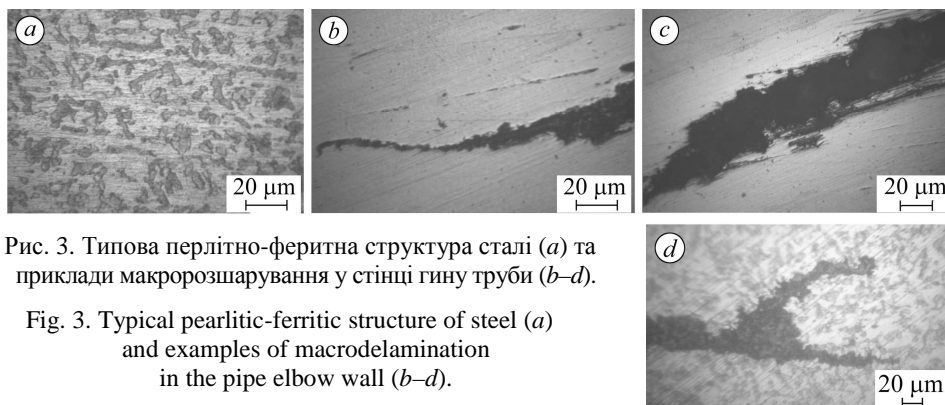


Рис. 3. Типова перлітно-феритна структура сталі (а) та приклади макророзшарування у стінці гину труби (b–d).

Fig. 3. Typical pearlitic-ferritic structure of steel (a) and examples of macrodelamination in the pipe elbow wall (b–d).

Вибірковий металографічний аналіз поперечних розрізів гину підтвердив феритно-перлітну структуру низьковуглецевої сталі 20 та дав можливість переконатися в макропошкоженості всередині стінки труби (рис. 3). Тріщини місцями були сильно розкриті, що вказує на тиски в них, достатні для пластичного деформування матеріалу у вершині тріщини. Спостерігали і розгалуження поверхонь розшарування по висоті стінки труби (рис. 3d), що пояснює різні покази товщини в зоні розшарування.

**Лабораторні оцінки механічних властивостей.** Порівнювали властивості металу на прямій ділянці трубопроводу поблизу гину та окремо – стиснутої і розтягнутої зон. Визначали характеристики міцності і пластичності з використанням циліндричних зразків на розтяг двох геометрій. Вирізані уздовж осі труби  $L_N$ -зразки мали робочу частину довжиною 25 mm та діаметром 5 mm, що відповідали нормативним вимогам. Радіальні  $R_S$ -зразки (рис. 4) не мали протяжної робочої частини, оскільки їх довжину обмежувала товщина стінки труби  $t$ . Робоча частина укорочених зразків 5 mm у діаметрі з радіусом закруглення 5 mm. Для порівняння властивостей у поздовжньому та радіальному напрямках виготовили також укорочені  $L_S$ -зразки і в поздовжньому напрямі.

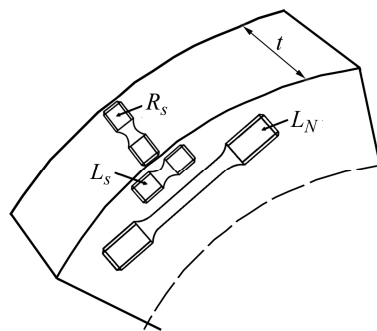


Рис. 4. Схема вирізання зразків з гину труби.

Fig. 4. Scheme of specimens cut from the pipe elbow.

Вища їх міцність проти звичайних (див. таблицю) була прогнозованою через геометрію. Що стосується впливу напрямку вирізання, то радіальним зразкам властива менша міцність, що теж передбачали, оскільки площина руйнування напрямлена вздовж волокон вальцювання. Однак незалежно від типу зразків та напрямку їх вирізання міцність металу гину порівняно з прямою ділянкою була для всіх випадків більшою для розтягнутої його частини і нижчою для стиснутої. Очевидно, тут треба брати до уваги різну товщину стінки труби в різних ділянках

гину, а отже, відповідно, більші та менші робочі напруження проти напруженого стану прямої частини труби. Це свідчить про те, що упродовж тривалої експлуатації матеріал деформаційно зміцнюється залежно від рівня робочих напружень у ньому, хоча вони суттєво менші за границю текучості, якщо враховувати внутрішній тиск у трубі 5,5 МПа. Разом з тим пульсація тиску газу на виході з газокompресорної станції та підвищена температура металу – це чинники, які сприятимуть його деформаційному зміцненню.

**Механічні властивості звичайних  $L_N$ - та укорочених  $L_S$ - і  $R_S$ -зразків**

Ділянка труби	Тип зразка	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\psi$ , %	$\psi_R$ $\psi_L$	$\delta$ , % / $\Delta$ , mm
		МПа				
Пряма	$L_N$	293	482	64,0	–	17,6 / –
	$L_S$	451	562	67,5	–	– / 1,56
	$R_S$	427	604	38,7	0,57	– / 0,66
Розтягнута	$L_N$	324	507	68,5	–	20,2 / –
	$L_S$	434	590	59,7	–	– / 1,20
	$R_S$	393	587	30,0	0,50	– / 0,4
Стиснена	$L_N$	283	468	62,2	–	18,8 / –
	$L_S$	416	568	63,5	–	– / 1,31
	$R_S$	386	557	34,8	0,55	– / 0,58

Порівняльні оцінки пластичності за відносним видовженням  $\delta$  можна отримати лише для звичайних  $L_N$ -зразків. Найменше значення  $\delta$  властиве металу прямої ділянки, максимальне – розтягнутої. Це неочікувані результати, оскільки найбільш зміцненій сталі притаманна максимальна пластичність. Однак така особливість є часто діагностичною ознакою експлуатаційної деградації конструкційних сталей [12], у тому числі магістральних газопроводів [7]. Вона пов'язана з розкриттям у зразках під навантаженням тріщин розсіяної пошкодженості, і тоді параметр  $\delta$  відтворює не тільки здатність металу пластично деформуватись, але і розкриття у ньому множинних дефектів. Тому найінтенсивніша пошкодженість характерна розтягнутій ділянці гину, а найменша – прямій.

Укорочені зразки без протяжної робочої частини (рис. 4), хоч і не дають можливості кількісно оцінити пластичність  $\delta$ , однак, локалізують деформацію практично в одному перерізі. Це перевага, оскільки мінімізується розкриття тріщин розсіяної пошкодженості в інших перерізах зразка через низькі в них напруження. Водночас за визначеними в експерименті переміщеннями активного тримача  $\Delta$  для різних ділянок труби можна достовірніше порівнювати пластичність металу. Зокрема, найнижчу пластичність за цим показником має сталь розтягнутої, а найвищу – прямої ділянок труби. Ця закономірність є протилежною виявленій для характеристики  $\delta$  і згідно з нею метал гину разом з його стиснутою частиною поступається за пластичністю сталі прямої ділянки.

Основні оцінки пластичності отримано за відносним звуженням  $\psi$ . Зазначимо, що значення  $\psi$ , одержані для звичайних  $L_N$ -зразків, подібно як і показника  $\delta$ , не узгоджуються з відповідними характеристиками міцності. Зокрема, металу розтягнутої ділянки гину властиві максимальні і міцність, і  $\psi$ . І, навпаки, мінімальні міцність і пластичність має метал стиснутої ділянки. Можливо, пояснення таких несподіваних ефектів слід шукати саме у прояві впливу розшарування на руйнування циліндричних поздовжніх зразків з протяжною робочою частиною. Зокрема, використовуючи поздовжні укорочені  $L_S$ -зразки, в яких деформація локалізована практично в одному перерізі, одержали оцінки відносного звуження  $\psi_L$ , що повністю узгоджуються з порівняльними оцінками показника  $\Delta$ : найвища пластичність притаманна сталі прямої ділянки труби, а найнижча – розтягнутої ділянки гину. Таким чином, якщо випробовувати вкорочені  $L_S$ -зразки, відсутні протиріччя у показниках пластичності.

Використовуючи укорочені радіальні  $R_S$ -зразки, виявили різкий спад пластичності  $\psi_R$  металу всіх досліджуваних ділянок, що вказує на слабку адгезію між поздовжніми волокнами структури. Тобто тривала експлуатація призвела до ін-

тенсивної деградації металу труби, яка проявилась саме в ослабленні когезивної міцності між витягнутими включеннями і матрицею, а водень сприяв цьому процесу. Водночас спостерігали і відмінності між пластичністю різних ділянок гину:  $\psi_R = 38,7; 30,0$  і  $34,8\%$  для прямої, розтягнутої і стисненої ділянок відповідно. Це означає, що за цією характеристикою метал не тільки розтягнутої, але і стиснутої ділянок деградував під час експлуатації інтенсивніше, ніж прямої ділянки труби. Що стосується порівняння різних зон гину, то саме розтягнута ділянка, на якій виявлено обширне розшарування, має мінімальну пластичність. І якщо при  $\psi_R \sim 35\%$  запас пластичності ще достатній, щоб не спричинити макророзшарування, то вже при  $\psi_R = 30\%$  його можна вважати граничним, причому не тільки для реалізації ініційованого воднем розшарування, але і виходу підповерхневого макродефекту на зовнішню поверхню.

Принципово вяснити причини сильнішої деградації за характеристиками пластичності металу стиснутої ділянки порівняно з прямою частиною труби. Адже у першому випадку товщина стінки труби більша і тому напруження від тиску газу менші. Очевидно, тут треба брати до уваги інші важливі експлуатаційні чинники, які впливають на цей процес. Тиск транспортованого зразу ж за компресорною станцією газу пульсівний. На гині труби ця пульсація повинна бути сильнішою, що означає відчутніший вплив циклічності навантаження, ніж на прямій ділянці. Крім того, не виняток, що з цієї причини і температура металу гину вища, що сприятиме деградації металу через інтенсифікацію дифузії водню. Зазначимо, що місце локалізації макророзшарування по товщині стінки труби вказує на конкурентність чинників робочих напружень і транспорту водню у формуванні макропошкодженості, адже напруження максимальні на зовнішній поверхні труби, а джерело наводнювання – на внутрішній. А факт розшарування ближче до зовнішньої поверхні, як у нашому випадку, свідчить, що швидкість транспорту водню через стінку труби достатня, тобто не дифузія водню, а робочі напруження лімітують деградацію.

### **ВИСНОВКИ**

Сорокарічна експлуатація відвідної від компресорної станції труби системи магістральних газопроводів призвела до інтенсивної деградації металу, в першу чергу, за пластичністю. Виявлено, що сталь гину деградує сильніше, ніж пряма ділянка труби, очевидно, через жорсткіші експлуатаційні умови за пульсацією тиску газу та температури металу. За зниження пластичності до критичного рівня під час тривалої сумісної дії робочих навантажень та абсорбованого металом водню з боку внутрішньої поверхні труби створюються умови для розвитку розшарування великої площі. Його діагностичними ознаками з неруйнівних методів є аномальні покази товщиноміра та твердоміра, а з руйнівних – різкий спад пластичності, яку доцільніше визначати на зразках із закругленим концентратором, коли деформація локалізується практично в одному перерізі. А доказом ролі водню в розвитку розшарування є металографічно виявлені розкриті від тиску рекомбінованого водню тріщини та руйнування перетинки між порожниною та зовнішньою поверхнею. У той же час локалізація розшарування по товщині стінки труби ближче до її зовнішньої поверхні вказує, що напруження, а не швидкість дифузії водню контролюють розшарування.

*РЕЗЮМЕ.* Исследовано обширное водородом инициированное расслоение в стенке колена длительно эксплуатируемой отводящей от газокompрессорной станции трубы системы магистральных газопроводов. Проанализированы факторы, которые сыграли решающую роль в его образовании. Установлено, что его диагностическими признаками являются аномальные показания толщиномера, резкое снижение твердости и пластичности стали. Вывявлено, что степень деградации стали колена трубы выше, нежели прямого участка, при этом независимо от того, растянут или сжат участок колена. Установлены

ограничения в использовании относительных удлинения и сужения для характеристики пластичности металла стенки трубы с обширным расслоением.

*SUMMARY.* Intensive hydrogen-induced delamination in the wall of the elbow of long-term exploited lateral pipe of a gas transmission pipeline system was investigated. The factors playing a key role in its formation were analyzed. It was established that its diagnostic features are abnormal thickness meter readings, a strong decrease in steel hardness and plasticity. It was detected that the degradation degree of the pipe elbow steel was higher than for a straight pipe one regardless of the tensioned or compressed section. The limitations in the use of elongation and reduction of area for characterisation of metal plasticity of pipe wall with vast delamination were established.

1. *Joo M. S., Suh D.-W., and Bhadeshia H. K. D. H.* Mechanical anisotropy in steels for pipelines // *ISIJ Int.* – 2013. – **53**. – P. 1305–1314.
2. *Lino M.* Hydrogen-induced blister cracking of linepipe steel / R. A. Oriani, J. P. Hirth, and M Smialowski // *Hydrogen degradation of ferrous alloys.* – Park Ridge, NJ: Noyes Publications, 1985. – P. 737–762.
3. *Domizzi G., Anteri G., and Ovejero-Garca J.* Influence of sulphur content and inclusion distribution on the hydrogen induced blister cracking in pressure vessel and pipeline steels // *Corr. Sci.* – 2001. – **43**, № 2. – P. 325–339.
4. *Вплив експлуатації сталі X52 на корозійні процеси у модельному розчині газового конденсату* / О. Т. Цирульник, З. В. Слободян, О. І. Звірко, М. І. Греділь, Г. М. Никифорчин, Д. Габетта // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2008. – **44**, № 5 – С. 29–37.  
(*Influence of operation of Kh52 steel on corrosion processes in a model solution of gas condensate* / О. Т. Tsyruľnyk, Z. V. Slobodyan, O. I. Zvirko, M. I. Hredil, H. M. Nykyforchyn, D. Gabetta // *Materials Science.* – 2008. – **44**, № 5. – P. 619–629.)
5. *Воднева деградація тривало експлуатованих сталей магістральних газопроводів* / О. Т. Цирульник, Г. М. Никифорчин, Д. Ю. Петрина, М. І. Греділь, І. М. Дзіоба // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2007. – **43**, № 5. – С. 97–104.  
(*Hydrogen degradation of steels in gas mains after long periods of operation* / О. Т. Tsyruľnyk, H. M. Nykyforchyn, D. Yu. Petryna, M. I. Hredil, I. M. Dzioba // *Materials Science.* – 2007. – **43**, № 5. – P. 708–717.)
6. *Nykyforchyn H. M., Kurzydowski K.-J., and Lunarska E.* Hydrogen degradation of steels under long-term in-service conditions / Eds.: S. A. Shipilov, R. H. Jones, J.-M. Olive, R. B. Rebak // *Environment-Induced Cracking of Materials. Prediction, Industrial Developments and Evaluations.* – Amsterdam: Elsevier, 2008. – **Vol. 2.** – P. 349–361.
7. *Деградація властивостей сталей магістральних газопроводів упродовж їх сорокарічної експлуатації* / Г. М. Никифорчин, О. Т. Цирульник, Д. Ю. Петрина, М. І. Греділь // *Проблеми прочності.* – 2009. – №5 (401). – С. 66–72.  
(*Degradation of steels used in gas main pipelines during their 40-year operation* / H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyruľnyk, D. Yu. Petryna, M. I. Hredil // *Strength of Materials.* – 2009. – **41**, № 5. – P. 501–505.)
8. *Експлуатаційне 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, H. M. Nykyforchyn, O. I. Zvirko, D. Yu. Petryna // *Materials Science.* – 2004. – **40**, № 2. – P. 302–304.)
9. *Polyakov V. N.* Catastrophes of large diameter pipelines: the role of hydrogen fields // *Hydrogen Effects in Materials.* – Moran, Wyoming, USA, 1996. – P. 991–1000.
10. *Mostert R. and Sharp W.* Low temperature hydrogen damage assessment in the gas and refining industries // *Proc. of the Middle East Nondestruct. Test. Conf. & Exhib., Bahrain, Manama, 27–30 November 2005.*
11. *Mishael S. J., Dean F. W. H., and Fowler C.* Practical applications of hydrogen permeation monitoring // *CORROSION 2004.* – NACE International, 2004. – Paper № 4476. – 12 p.
12. *Никифорчин Г. М., Студент О. З., Марков А. Д.* Феномен прояву високотемпературної деградації зварного шва оццнолегованої сталі // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2007. – **43**, № 1. – С. 73–79.  
(*Nykyforchyn H. M., Student O. Z., and Markov A. D.* Abnormal behavior of high-temperature degradation of the weld metal of low-alloy steel welded joints // *Materials Science.* – 2007. – **43**, № 1. – P. 77–84.)

Одержано 16.06.2015