

ДОСВІД ОЦІНКИ ДЕГРАДАЦІЇ МАТЕРІАЛУ ТРУБ АМІАКОПРОВОДУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЇХ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В. Д. МИНДЮК, наук. співр., **М. О. КАРПАШ**, **А. В. ЯВОРСЬКИЙ**,
І. В. РИБЦЬКИЙ, **С. Р. ДОЦЕНКО**, кандидати техн. наук (Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу)

Представлено методологію оцінки фактичного технічного стану матеріалу труб аміакопроводу та результати неруйнівного контролю механічних характеристик матеріалу труб з використанням методів, що базуються на різних фізичних принципах. За результатами даних вимірювань визначено величину і характер деградації матеріалу труб, проаналізовано причини деградації.

A methodology of assessment of actual technical condition of material of ammonia line pipes is presented. Results of nondestructive testing of mechanical characteristics of pipe material using methods based on different physical principles are described. These measurement results are used to determine the value and nature of degradation of pipe material, and causes for degradation are analyzed.

Питання оцінки фактичного технічного стану металоконструкцій різного призначення у промисловості стає особливо актуальним в умовах гострої потреби у продовженні терміну експлуатації об'єктів, що відпрацювали свій нормативний ресурс. Зі збільшенням віку трубопровідних систем, що мають високі експлуатаційні параметри (діаметри, тиск перекачуваного продукту, протяжність і т. п.), з'явилися нові науково-технічні проблеми, серед яких, перш за все, необхідно виділити проблему оцінки фактичного технічного стану трубопроводів і можливість їх подальшої експлуатації.

Вплив корозійно-активних середовищ, коливання температури, робочих навантажень та напружень, термоциклічні процеси теплонавантаження призводять з часом до зміни властивостей експлуатованого металу [1]. Ресурс безпечної експлуатації металоконструкцій залежить і від фактичного стану структури та фізико-механічних характеристик металу (ФМХ). З огляду на це забезпечення надійності та прогнозування технічного стану металоконструкцій має надзвичайно велике практичне значення. Забезпечення безаварійної експлуатації металоконструкцій можливе тільки на основі отримання й аналізу об'єктивних інструментальних даних про фактичний стан матеріалів і конструкцій, що підтверджується основними положеннями концепції Цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» на 2010–2012 рр.

Практичний досвід експлуатації трубопровідних металоконструкцій різного призначення показує, що у ході тривалої експлуатації відбуваються деградаційні зміни характеристик металу труб, у тому числі [2]: зниження пластичності, ви-

раженої в зближенні величин границі плинності σ_T і границі витривалості σ_B ; зниження тріщиностійкості, що супроводжується деградацією ударної в'язкості a_H (KCU).

Проблема забезпечення безаварійної роботи аміакопроводів як об'єктів підвищеної небезпеки ускладнена високою токсичністю транспортованого продукту, а також конструктивними особливостями прокладання трубопроводу — в зовнішньому металевому кожусі із газоподібним азотом у міжтрубному просторі (для підводних переходів).

При цьому внаслідок впливу зазначених вище чинників у сукупності з геодинамічним фактором оточуючого середовища особливої актуальності набуває питання моніторингу фактичних механічних характеристик металу трубопроводів для попередження аварійних ситуацій технічного характеру.

Авторами даної роботи проведені роботи по дослідженню фактичного технічного стану труб ділянок магістрального трубопроводу рідкого аміаку Тольятті—Одеса, що був прокладений у 1981 р., 1021 км якого проходить по території України. Роботи проводились на ділянках № 15, ГПС 13ЦЗ (Одеська обл., Березівський р-н, с. Донська Балка), без втручання в режим роботи трубопроводу. Аміак у трубах знаходиться у рідкому стані під тиском до 35 атм з температурою 4°C.

Діаметр труб аміакопроводу 355 мм, товщина стінок 8 і 12,7 мм. Трубопровід пролягає на глибині 1,4 м (порівняно з 0,8 м для нафтопроводів). В місцях переходів через водоймища та вологий ґрунт трубопровід має подвійну трубу товщиною 13 мм з прошарком азоту. Труби виготовлені з імпортованих сталей X42 та X46 (вітчизняний аналог сталі 17ГС відповідно до ГОСТ 5520 [3]).

Метою роботи було обстеження стану металу труб магістрального трубопроводу рідкого аміаку для визначення його механічних характеристик, зокрема ударної в'язкості та границі плинності, для отримання інформації про динаміку зміни цих характеристик, значення яких використовуються для розрахунку залишкового терміну служби трубопроводу. При цьому враховувався той факт, що більшість трубних сталей належить до категорії матеріалів із відношенням границі плинності до границі міцності в діапазоні 0,7...0,75. Для таких матеріалів характерне додаткове деформаційне зміцнення (максимум до 20 %) у зонах концентрації напружень за прикладеного циклічного навантаження.

Допустимі значення перерахованих критеріїв, приведених до температури 20°C, для труб з малоуглецевої сталі мають бути в межах [2, 4]:

$$\sigma_{тф}/\sigma_{вф} \leq 0,9; a_{нф}(KCU)_{20^{\circ}C} \geq 30 \text{ Дж/см}^2.$$

Згідно з нормативними документами, зокрема [5], указані механічні характеристики матеріалу труб рекомендується визначати неруйнівними методами контролю або, за необхідності, експериментальними випробуваннями вирізок матеріалу труб контрольованої ділянки трубопроводу. З метою збереження цілісності матеріалу трубопроводів доцільно використовувати неруйнівний контроль механічних характеристик з високою просторовою роздільною здатністю тих параметрів, які є найбільш чутливими до змін структури матеріалу. При цьому є можливість забезпечити широкий динамічний діапазон окремого методу, щоб виявляти малі зміни параметрів матеріалу.

Згідно з рекомендаціями [6], фактичні значення ФМХ металу повинні визначатися:

$\sigma_{тф}$, $\sigma_{вф}$ — згідно з [7], а також допускається визначення механічних характеристик металу неруйнівними методами через випробування на твердість за Брінелем НВ згідно з [8, 9] тощо із використанням твердомірів, що відповідають вимогам згідно з [10], та використанням кореляційних залежностей, що регламентуються чинними нормативними документами, або за методиками, передбаченими паспортом відповідного коерцитиметра;

$a_{нф}$ — приладовим неруйнівним методом або руйнівним методом згідно з [11].

За умови досягнення будь-якого з перерахованих критеріїв свого граничного значення ділянка трубопроводу призначається на переукладання [4, 6].

У ході обстеження для визначення фактичних значень механічних характеристик було проведено вимірювання твердості поверхневого шару; ударної в'язкості; коерцитивної сили; питомого електричного опору матеріалу трубопроводу [12].

Важливо відмітити, що для визначення ФМХ металу труб аміакопроводу використовувалися методи і засоби, які базуються на різних фізичних принципах [12].

Інструментальну оцінку фізико-механічних і геометричних характеристик металоконструкцій підвищеної небезпеки (аміакопроводу Тольяті—Одеса) проводили з використанням наступних технічних засобів: структуроскопу КРМ-Ц-К2М; твердоміру динамічного ТД-32; мікроомметра БС3-010-2; інформаційно-вимірювальної системи ІВС-І2 (власного виготовлення); дефектоскоп ДІО-562.

Дослідження проводили почергово на шести перерізах трубопроводу, у кожному з яких вимірювання згаданих параметрів здійснювали у восьми точках (рис. 1).

В якості вихідних нормативних параметрів механічних характеристик використовували дані з сертифікатів на трубні сталі. За сертифікатами середні значення границі плинності $\sigma_T = 331,4$ МПа та границі міцності $\sigma_B = 516,5$ МПа для сталі Х42, а для сталі Х46 ці значення складають: границя плинності $\sigma_T = 362,3$ МПа та межа міцності $\sigma_B = 466$ МПа.

За сертифікатами середні значення ударної в'язкості KCU дорівнюють 70,54 кДж/см² для сталі Х42, а для сталі Х46 це значення складає 139,20 кДж/см² при температурі -40°C.

Методика опрацювання результатів вимірювань. Визначення ударної в'язкості було здійснено



Рис. 1. Місце вимірювання (шурф) (а) і місця та порядок розташування точок перерізу 1–8, на яких проводили вимірювання (б)

за шкалою KCV при температурі 0°C . В сертифікатах на сталі регламентовано значення ударної в'язкості по Менаже (KCU) при -40°C , визначених на зразках типу 1 відповідно до ГОСТ 9454-78. Значення KCV і KCU неспівставні (немає перевідних таблиць). Перевід здійснюється за формулою:

$$KCU (\text{Дж/см}^2) = (9,81/7,847) KCV (\text{Дж}). \quad (1)$$

Загалом слід зазначити, що випробування на зразках з V -подібним надрізом більш жорсткі, ніж з U -подібним, тому чисельному значенню KCV можуть відповідати більші значення KCU .

Границя витривалості σ_B розраховувалась за значеннями твердості за шкалою Брінеля та за значеннями коерцитивної сили.

За значеннями твердості НВ:

$$\sigma_B = \text{НВ(МПа)}k, \quad (2)$$

де $\text{НВ(МПа)} = \text{НВ} \cdot 9,81$; $k = 0,345$ для $\text{НВ} < 1500$ та $0,36$ для $\text{НВ} > 1500$.

Оцінка границі об'ємної міцності за поверхневою твердістю не дає достатньо високу кореляцію внаслідок ортотропності властивостей матеріалу по товщині. Для інтегральної оцінки границі міцності в локальному об'ємі матеріалу додатково було використано метод коерцитивної сили.

За значеннями коерцитивної сили границя витривалості визначалась за табличними значеннями (рис. 2) [13].

Для сталі 17Г1С з достовірністю апроксимації $R_2 = 0,91$ (рис. 2) [13]:

$$H_c = 0,0237\sigma_{0,2} - 5,54, \quad (3)$$

$$H_c = 0,0183\sigma_B - 8,53. \quad (4)$$

Границя плинності σ_T була визначена за Методикою виконання вимірювань границі плинності конструкційних (трубопровідних) сталей [16].

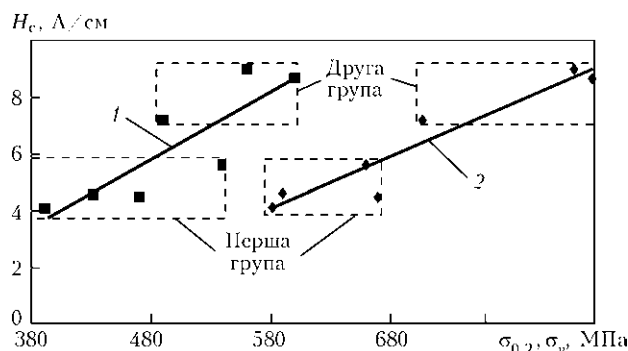


Рис. 2. Залежність коерцитивної сили від границі плинності (1) та міцності (2) для сталі марки 17Г1С

Таблиця 1. Значення механічних характеристик труб, що не були в експлуатації

| Сталь | Нормативна σ_B , МПа | Нормативна σ_T , МПа | σ_B (за НВ), МПа | σ_B (за коерцитивною силою), МПа | σ_T (за методикою), МПа | σ_T (за коерцитивною силою), МПа | Ударна в'язкість при температурі 0°C , кДж/см^2 |
|-------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|---|--------------------------------|---|--|
| X42 | 516,5 | 331,4 | 420,8 | 399,7 | 245,7 | 380 | 72,46 |
| X46 | 466 | 362,3 | 476,1 | 435,5 | 268,5 | 390 | 48,12 |

Напружений стан за значеннями коерцитивної сили встановлено за номограмами (рис. 3) [14].

Дійсні механічні характеристики визначались за результатами вимірювань відповідно до методик [15, 16].

Аналіз результатів вимірювань. На початковому етапі було проведено обстеження металу труб аварійного запасу підприємства Укрхімтрансміак. Труби аварійного запасу в експлуатації не були ($D_{\text{тр}} = 355,6$ мм).

Результати фактичних значень механічних характеристик труб аварійного запасу надані в табл. 1.

Як показують результати вимірювань, границя міцності та границя плинності незначно деградували (в межах 10 %), що не становить загрози за нормальних (незмінних) умов експлуатації ділянки трубопроводу. А відношення границі плинності до границі витривалості для сталі X46 зменшилось (від 0,777 за нормативними значеннями до 0,616 за вимірними) при одночасному зниженні границь плинності і витривалості. При цьому зменшується коефіцієнт запасу безпечної експлуатації з 1,7...2,3 до 1,4...1,6 (табл. 2).

Результати вимірювань ударної в'язкості показали, що за температури 0°C для сталі X42 удар-

Таблиця 2. Залежність значення коефіцієнта запасу міцності n від відношення σ_T/σ_B в розрахунках за границею плинності при дії статичних навантажень

| σ_T/σ_B | 0,45...0,55 | 0,55...0,7 | 0,7...0,9 |
|---------------------|-------------|------------|-----------|
| n | 1,2...1,5 | 1,4...1,8 | 1,7...2,3 |

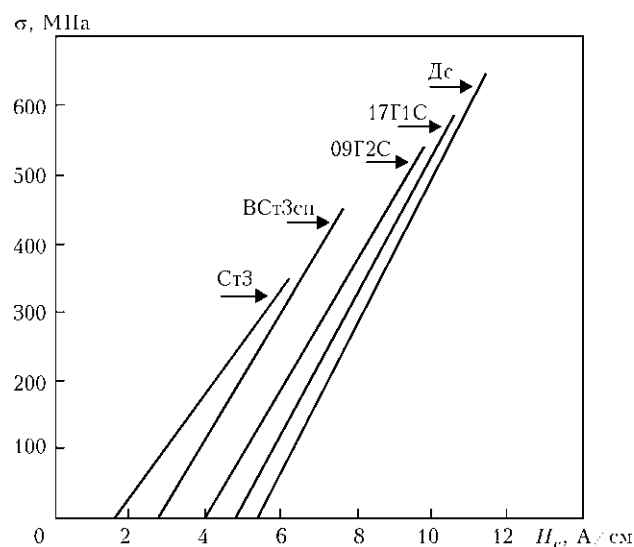


Рис. 3. Номограми для контролю напружень за коерцитивною силою при однобічному розтягванні плоских зразків із конструкційних сталей



Таблиця 3. Фактичні значення механічних характеристик труб за результатами вимірювань, МПА

| Сталь | Нормативне ($\sigma_{\text{в}}/\text{запас}$) | Нормативне ($\sigma_{\text{т}}/\text{запас}$) | $\sigma_{\text{в}}$ (за НВ) | $\sigma_{\text{в}}$ (за коерцитивною силою) | $\sigma_{\text{т}}$ (за методикою) | $\sigma_{\text{т}}$ (за коерцитивною силою) |
|---|---|---|-----------------------------|---|------------------------------------|---|
| Пост ГПС 13Ц3 | | | | | | |
| Точка вимірювання № 1 ($D_{\text{тр}} = 355,6$ мм; температура повітря $t_{\text{п}} = 8^{\circ}\text{C}$) | | | | | | |
| X42 | 516,5/399,7 | 331,4/245,7 | 476,5 | 438,3 | 276,6 | 380 |
| X46 | 466/435,5 | 362,3/268,5 | 456,1 | 425,5 | 269,4 | 395 |
| Точка вимірювання № 2 ($D_{\text{тр}} = 355,6$ мм; $t_{\text{п}} = 8^{\circ}\text{C}$) | | | | | | |
| X42 | 516,5/399,7 | 331,4/245,7 | 491,6 | 451 | 287,5 | 380 |
| Точка вимірювання № 4 ($D_{\text{тр}} = 355,6$ мм; $t_{\text{п}} = 8^{\circ}\text{C}$) | | | | | | |
| X42 | 516,5/399,7 | 331,4/245,7 | 505,1 | 460,1 | 294,1 | 380 |
| Пост СПС 13Б3 | | | | | | |
| Точка вимірювання № 7 ($D_{\text{тр}} = 355,6$ мм; $t_{\text{п}} = 10^{\circ}\text{C}$) | | | | | | |
| X46 | 466/435,5 | 362,3/268,5 | 432,4 | 407,9 | 253,1 | 400 |
| Точка вимірювання № 8 ($D_{\text{тр}} = 355,6$ мм; $t_{\text{п}} = 10^{\circ}\text{C}$) | | | | | | |
| X42 | 516,5/399,7 | 331,4/245,7 | 454,4 | 424,0 | 263,5 | 380 |
| Район посту СПС 13Г5 (1999 км) ($D_{\text{тр}} = 355,6$ мм; $t_{\text{п}} = 4^{\circ}\text{C}$) | | | | | | |
| X46 | 466/435,5 | 362,3/268,5 | 448,9 | 420,1 | 262,3 | 380 |

Таблиця 4. Значення ударної в'язкості KCV труб за результатами вимірювань

| Ділянка контролю | Матеріал труби | KCV при температурі 0°C, кДж/см ² | Величина зміни KCV у порівнянні із значенням KCV для труб запасу, % | |
|-----------------------|----------------|--|---|-----|
| Пост ГПС 13Ц3 | | | | |
| Точка вимірювання № 1 | Сталь X42 | 62,76 | -15 | |
| | Сталь X46 | 48,78 | 1 | |
| | № 2 | Сталь X42 | 46,65 | -30 |
| | № 4 | Сталь X42 | 53,33 | -27 |
| Пост СПС 13Б3 | | | | |
| Точка вимірювання № 7 | Сталь X46 | 37,76 | -22 | |
| | № 8 | Сталь X42 | 60,40 | -17 |
| Пост СПС 13Г5 | | | | |
| Ділянка переізоляції | Сталь X46 | 50,11 | 4 | |

Примітка. Значення зміни величини ударної в'язкості зі знаком «->» свідчать про зниження значень даної характеристики

Таблиця 5. Результати оброблення вимірювань границь міцності та плинності

| Ділянка вимірювань | Матеріал труби | Зміна відношення $\sigma_{\text{т}}/\sigma_{\text{в}}$ для нормативних і вимірних значень | Зміна коефіцієнта запасу безпечної експлуатації для нормативних і вимірних значень | |
|-------------------------|----------------|---|--|---------------------|
| Труби аварійного запасу | Сталь X46 | з 0,777 до 0,616 | з 1,7...2,3 до 1,4...1,8 | |
| Пост ГПС 13Ц3 | | | | |
| Точка вимірювання № 1 | Сталь X42 | з 0,642 до 0,631 | без змін; 1,4...1,8 | |
| | Сталь X46 | з 0,777 до 0,633 | з 1,7...2,3 до 1,4...1,8 | |
| | № 2 | Сталь X42 | з 0,642 до 0,631 | без змін; 1,4...1,8 |
| | № 4 | Сталь X42 | з 0,642 до 0,639 | без змін; 1,4...1,8 |
| Пост СПС 13Б3 | | | | |
| Точка вимірювання № 7 | Сталь X46 | з 0,677 до 0,620 | з 1,7...2,3 до 1,4...1,6 | |
| | № 8 | Сталь X42 | з 0,642 до 0,621 | без змін; 1,4...1,8 |
| Пост СПС 13Г5 | | | | |
| | Сталь X46 | з 0,777 до 0,624 | з 1,7...2,3 до 1,4...1,6 | |

на в'язкість є нижчою нормативного значення (78,5 кДж/см²).

Далі обстеженню піддавалися труби на ділянках районів постів СПС 13БЗ, СПС 13Г5 і ГПС 13ЦЗ. Результати обстежень надані в табл. 3 і 4.

Результати вимірювання ударної в'язкості труб надані у табл. 4.

Напружений стан визначався за значеннями коерцитивної сили. Визначені напруження за коерцитивною силою є незначними (<50 МПа) у всіх точках контролю, окрім поста ГПС 13Ц (для сталі Х46 в точці вимірювання 1) і поста 13 БЗ (в точці вимірювання 7) у точках вимірювання 6 і 7, де виміряні напруження склали 80...90 МПа.

Результати вимірювань ударної в'язкості при температурі 0°С на визначених ділянках трубопроводу дали змогу встановити, що значна деградація цієї характеристики відбулась на трьох з семи досліджуваних перерізах (точки 2, 4 та 7), що може свідчити про збільшення швидкості деградаційних процесів в даних точках.

Проведені вимірювання та розрахунки границі плинності, границі міцності та коефіцієнта запасу свідчать про низьку швидкість деградації згаданих характеристик (табл. 5).

З огляду на технологічні та експлуатаційні умови серед причин деградаційних процесів слід виділити:

- наводнення воднем, що міститься у воді та аміаку, яке призводить до суттєвого зниження ударної в'язкості, зниження пластичності;

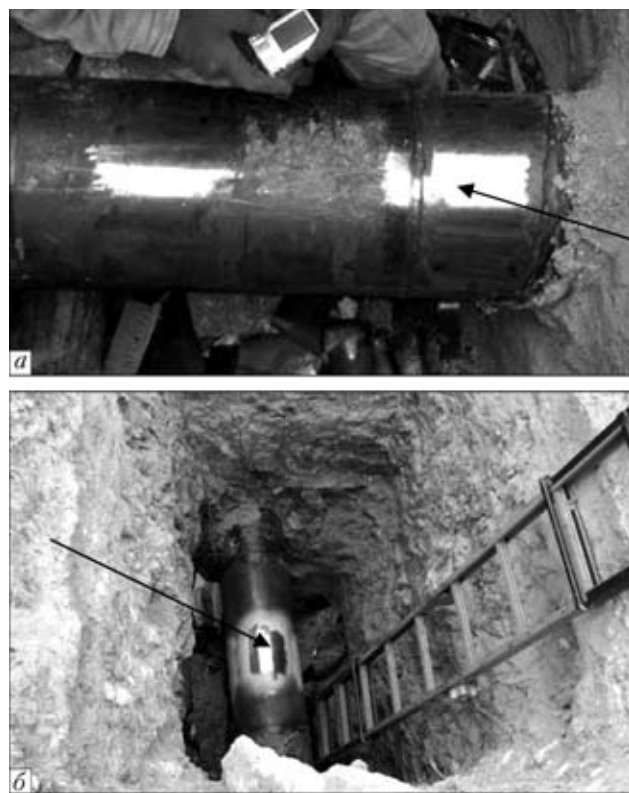


Рис. 4. Місця металографічного обстеження труби діаметром 355,6×12,7 (сталь Х42): а — на відстані 10 см від зварного шва приварювання до труби діаметром 355,6×7,92 (сталь Х46); б — на відстані 11 м 20 см від зворотнього клапана

– старіння матеріалу. Цей факт, в першу чергу, підтверджується зниженням межі плинності та межі міцності для труб, що перебувають в запасі.

Для підтвердження ознак і причин деградації матеріалу труб, про які свідчать результати неруйнівного контролю механічних характеристик матеріалу, додатково на ділянці ГПС 13ЦЗ на замовлення Укрхімтрансміак були проведені металографічні дослідження. Для дослідження були вибрані наступні місця зачищеної поверхні металу труби діаметром 355,6×12,7 (сталь Х42) на різній глибині залягання (рис. 4).

Дослідження мікроструктури металу проводили металографічним методом безпосередньо на трубі. За стандартною методикою виготовлено шліфи, поверхню яких піддавали травленню і вивченню під мікроскопом та фотографуванню при збільшеннях ×200. Для травлення використано 4%-ий розчин азотної кислоти в етиловому спирті.

У вихідному стані мікроструктура даної сталі феритно-перлітна, що відповідає нормалізованому стану, величина зерна за ГОСТ 5639 № 4-5

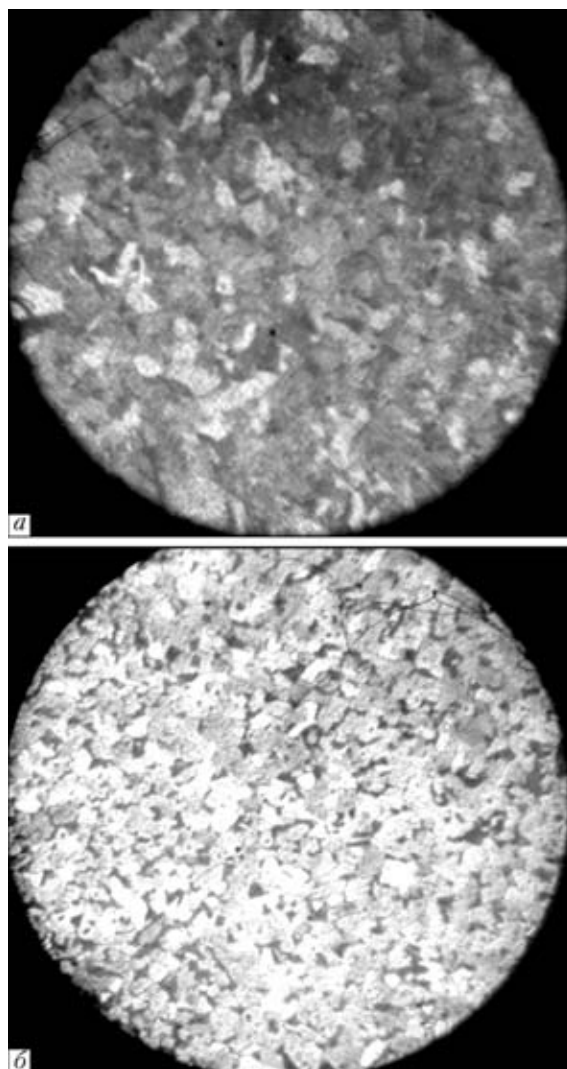


Рис. 5. Мікроструктура (×200) металу труби діаметром 355,6×12,7 (сталь Х42): а — матеріалу труби аварійного запасу; б — матеріалу труби, що відпрацювала 33 роки



[17] (рис. 5, а). Перліт має пластинчасту будову, що забезпечує хороше поєднання міцнісних і пластичних властивостей матеріалу.

У деградованій структурі (рис. 5, б) спостерігається розпад перліту, його сфероїдизація, карбідна складова перліту зміщується до границь зерен. Відбулася коагуляція карбідів, збільшилась товщина границь зерен і кінцева структура являє собою ферит плюс карбідна сітка, що свідчить про те, що процес старіння структури у цій сталі пройшов зі зниженням характеристик пластичності (результати вимірювань границі міцності, плинності і ударної в'язкості). Оскільки процеси руху та «розмноження» дислокацій в локальних об'ємах металу низьковуглецевих сталей протікають за напружень значно менших статичної границі плинності, то і процеси деформаційного старіння у трубних сталях протікають при експлуатаційних навантаженнях. Деформаційне зміцнення й старіння призводить також до зниження характеристик тріщиностійкості та ударної в'язкості [1].

Отже, загальний структурний стан матеріалу труби зі сталі Х42 після нормативного терміну експлуатації свідчить, що морфологія та співвідношення фазових складових не мають негативних особливостей і не містять структурних ознак, що свідчить про різке прискорення розвитку деградаційних процесів з продовженням терміну експлуатації трубопроводів.

Висновки

Узагальнюючи результати виконаної роботи слід підкреслити, що за наявності інструментарію для визначення фактичних механічних характеристик особливої актуальності набуває питання визначення дійсного напружено-деформованого стану (НДС) з метою управління надійністю трубопроводів, вибору найбільш безпечних режимів експлуатації. Ключова роль при цьому повинна відводитися тим, що знаходяться у непроєктному положенні, оскільки просторове положення трубопроводу змінюється в процесі експлуатації як внаслідок навантаження внутрішнім тиском, температурними діями, так і в результаті протікання геодинамічних процесів. Експериментальні дослідження НДС треба проводити у тих випадках, коли розрахунковим шляхом неможливо з потрібною точністю визначити характеристики, необхідні для перевірки конструкції на міцність відповідно до норм міцності.

В разі подальшої заміни певних ділянок труб рекомендується в умовах постачання труб регламентувати вимоги до ударної в'язкості матеріалу за шкалою KCV замість KCU, критичні значення

НДС труб, що узгоджується з міжнародною практикою оцінки безпечності трубопроводів.

Рассмотрена методология оценки фактического технического состояния материала труб аммиакопровода. Представлены результаты неразрушающего контроля механических характеристик материала труб с использованием методов, базирующихся на разных физических принципах. По результатам данных измерений определены величина и характер деградации материала труб, проанализированы ее причины.

1. Миндюк В. Д., Доценко С. Р., Карнаш М. О. Особенности деградации структуры материалов металлоконструкций долговечной эксплуатации та оцінка можливості її діагностування в нафтогазовому комплексі // Наук. вісник ІФНТУНГ. — 2011. — № 2 (28). — С. 91–97.
2. ДСТУ 4046–2001. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги.
3. ГОСТ 5520. Сталь листовая углеродистая низколегируванная и легированная для котлов и сосудов, работающих под давлением.
4. ВБН В.2.3-06544.319–2003. Споруди транспорту. Магістральні трубопроводи для транспортування рідкого аміаку (аміакопроводи).
5. ДСТУ-Н-Б-В23-21–2008. Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами.
6. РД 12-411-01. Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов.
7. ГОСТ 10006–80. Трубы металлические. Метод испытания на растяжение.
8. ГОСТ 22761–77. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия.
9. ГОСТ 18661–73. Сталь. Измерение твердости методом ударного отпечатка.
10. ГОСТ 8.062–85. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений твердости по шкалам Бринелля.
11. ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.
12. Карнаш М. О., Доценко С. Р., Карнаш М. О. Комплексный метод контролю фізико-механічних характеристик матеріалів металлоконструкцій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2011. — № 5. — С. 40–47.
13. Агинец Р. В., Теплинский Ю. А., Кузьбожев А. С. Применение коэрциметрического метода для оценки микроструктуры стали 17Г1С // Контроль. Диагностика. — 2005. — № 1. — С. 32–34.
14. Богданов Е. А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования: Уч. пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 2006. — 279 с.
15. Методика виконання вимірювань ударної в'язкості сталей трубопровідного сортаменту (розроблена Науково-дослідним інститутом нафтогазової енергетики і екології, 2011 р.; Затв. ІФНТУНГ, 2011 р.).
16. Методика виконання вимірювань границі плинності конструкційних (трубопровідних) сталей (розроблена Науково-дослідним інститутом нафтогазової енергетики і екології, 2011 р.; Затв. ІФНТУНГ, 2011 р.).
17. ГОСТ 5639–82. Сталь и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.

Надійшла до редакції
27.03.2012