



ЕКСПЕРТНА ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБОПРОВОДІВ З ВОДНЕВОВМІСНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

В.О. СТРИЖАЛО, С.З. СТАСЮК

Ін-т проблем міцності НАНУ, 01014, Київ-14, вул. Тимірязєвська, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

Розглянуто методичні підходи до експертної оцінки технічного стану технологічних трубопроводів, по яких транспортується горючі і вибухонебезпечні середовища, що містять від 60 до 90 % об. водню в суміші з рідкими чи пароподібними вуглеводами, сірководнем та іншими компонентами. Показано, що довготривале напрацювання сталі 12CrMo19 5 (DIN 17176) в конструкції технологічних трубопроводів не призвело до змін структури і деградації механічних властивостей металу за термін служби від 180 000 до 245 000 год в умовах дії водневовмісного середовища високих параметрів. У той же час зі збільшенням строків експлуатації понад 245 000 год ініціюються процеси водневої корозії зварних швів. Бібліогр. 12, табл. 4, рис. 9.

Ключові слова: технологічні трубопроводи, водневовмісне середовище, механічні властивості металу трубопроводів

В умовах каталітичного риформінгу і гідрочищення технологічне обладнання працює у контакті з середовищем із вмістом водню за температурами 260...530 °С і тиску 2,5...6,6 МПа. Довготривала дія водню на метал в таких умовах призводить до водневої корозії, яка проявляється в зміні структури металу, погіршенні фізико-механічних властивостей. І це, у свою чергу, підвищує небезпеку виникнення руйнування.

Надійність роботи технологічних трубопроводів гарантується своєчасним контролем їх технічного стану, суворим виконанням технологічного режиму, а також дотриманням вимог нормативних документів щодо нагляду за безпечною експлуатацією. Експертиза промислової безпеки об'єктів підвищеної небезпеки на нафтопереробних заводах, що відпрацювали проектний строк служби, передбачає експертне обстеження (технічне діагностування), яке включає [1, 2]:

- неруйнівний контроль (НК) традиційними методами, який дозволяє своєчасно виявити початкову стадію руйнування елемента від дефектів металургійного чи експлуатаційного походження;
- оцінку залишкового ресурсу на основі розрахунків на міцність.

Залишковий ресурс технологічного трубопроводу визначається сумарним напрацюванням від моменту контролю його технічного стану до переходу в граничний стан [3], за яким його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна, або відновлення його роботоспроможності неможливе чи недоцільне. Оскільки трубопровід являє собою об'єкт, що складається з окремих елементів (труб, з'єднаних зварюванням, фасонних деталей, фланців, арматури тощо), граничний стан усіх його елементів не може бути досягнений одночасно.

До такого об'єкту застосовується поняття призначений ресурс (або призначений строк служби), який відраховується від моменту контролю його технічного стану і на протязі якого забезпечується роботоспроможність основних елементів – труб і зварних з'єднань.

З урахуванням особливості експлуатації гідрогенізаційного обладнання, коли можливе протікання деградаційних процесів під дією домінуючого фактору пошкодження – водневої корозії металу – ресурс (строк служби) подовжується поетапно. А саме подальший строк служби (або час до наступного технічного діагностування) встановлюється на основі отриманих під час експертного обстеження результатів, а також аналізу властивостей матеріалу, напрацювання якого відбувалося в умовах впливу водневовмісного середовища високих параметрів. Тому при експертному обстеженні такого обладнання проводяться лабораторні дослідження з метою виявлення змін фізико-механічних властивостей і структури металу, які могли виникнути внаслідок тривалої експлуатації або порушення нормального режиму роботи.

Періодичний контроль технічного стану технологічних трубопроводів гідрогенізаційних установок проводиться планово в процесі експлуатації і в терміни, встановлені нормативно-технічними документами [1, 2]. Контролю технічного стану з проведенням лабораторних досліджень властивостей металу піддають трубопроводи, які виготовлені з вуглецевих і низьколегованих марганцовистих сталей після їх напрацювання 120000 год, і з низьколегованих хромомолібденових сталей – 150000 год [1].

Наведемо результати контролю технічного стану технологічних трубопроводів реакторних бло-



ків трьох установок каталітичного риформінга ЛГ-35-11/300 нафтопереробних заводів. Під час експертного обстеження для лабораторних досліджень надійшли «котушки», вирізані з прямих ділянок трубопроводів. Виготовлювач усіх установок – Магдебурський завод важкого машинобудування (Німеччина). Матеріал трубопроводів за даними заводських сертифікатів – сталь марки 12CrMo19 5 DIN 17176 [4]. Вітчизняним аналогом труб з цієї сталі є труби зі сталі марки 15X5M ГОСТ 550–75 [5], хімічний склад яких відповідає вимогам ГОСТ 20072–74 [6].

На час обстеження фактичне напрацювання трубопроводів в умовах водневомісного середовища (водень з бензином) склало 180 000 год за тиском 3,8 МПа і температури 420 °С (трубопровід 1), 200 000 год за тиском 3,8 МПа і температури 400 °С (трубопровід 2) і 245 000 год за тиском 3,8 МПа і температури 425 °С (трубопровід 3). Зварні шви були виконані ручним дуговим зварюванням електродами типу Cr5MoV TGL 11776 з використанням технології термооброблення: попереднє нагрівання до 350...400 °С, відпалювання після зварювання за температури 700...725 °С на протязі 90 хв. і охолодження на повітрі.

Результати аналізу хімічного складу наведені в табл. 1. Приведені дані сертифікатів підприємства виробника труб, а також норми відповідності складу досліджуваних марок. За даними таблиці видно, що за складом вуглецю, карбідотворюючих елементів, а також домішків сірки і фосфору матеріал труб повністю відповідає вимогам стандарту на сталь марки 12CrMo19 5 DIN 17176 [4]. Крім того, виявлений вміст елементів в металі зварних швів труб 1, 2 та 3 вказує на те, що використані електроди вносять свою частку в утворення аустенітної структури шва.

Металографічний аналіз, проведений з метою вивчення можливих змін мікроструктури основного металу і зварних з'єднань труб внаслідок тривалої експлуатації, показав наступне.

Труба 1. Метал забруднений неметалеви ми включеннями, багато складних окисів типу шпинелей FeO·MnO. Спостерігаються одиничні карбонітриди титану, ланцюжки нітридів алюмінію, дисперсні частки сульфідів заліза й марганцю, на усіх перерізах труби присутні оксиди точкові. Метал зварного шва, як і основний метал труби, забруднений неметалеви ми включеннями. Структура основного металу характерна для хромомолібденових сталей – феритно-перлітна (рис. 1, а). Склад карбідів зернистого перліту (сорбіту) – карбіди типу $Me_{23}C_6$ {Cr,Mo(Fe)}₂₃C₆ (або {Cr,Mo}₂₃C₆) та Me_7C_4 {Cr,Mo}₇C₄ (або {Cr,Mo(Fe)}₇C₄) [7]. Характеристики мікроструктури наведені в табл. 2.

Зварний шов виконаний багат шаровим зварюванням (у п'ять проходів). Для макроструктури шва характерно чітке формування колоній кристалів дендритів з направленим зростанням від границі розділу з основним металом вглиб до центру шва (рис. 1, б). В зоні сплавлення сформувався перехідний прошарок, обумовлений міграцією

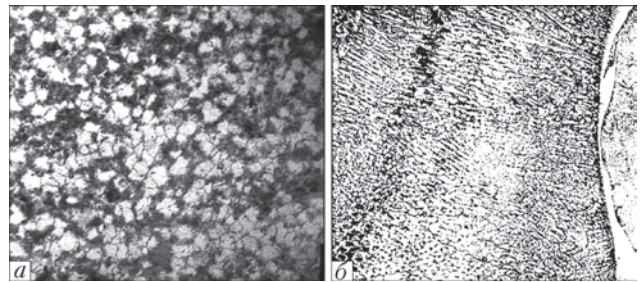


Рис. 1. Феритно-перлітна структура основного металу (а) і дендритна структура металу шва (б) трубопроводу 1 (напрацювання 180000 год), $\times 100$

Таблиця 1. Результати контрольного аналізу хімічного складу труб технологічних трубопроводів реакторних блоків установок ЛГ-35-11/300, мас. %

Джерело даних	C	Cr	Mo	Mn	Si	S	P	Ni	Cu	W	Ti	V
Результати дослідження:												
труба 1	0,15	5,04	0,54	0,390	0,355	<0,005	0,015	0,12	0,175	0,005	0,003	0,005
труба 2	0,09	5,10	0,56	0,406	0,39	0,025	<0,01	0,008	0,106	<0,01	0,005	0,003
труба 3	0,11	5,15	0,57	0,410	0,40	0,024	0,032	10,7	0,06	<0,01	0,025	<0,01
метал шва труби 1	0,11	23,2	9,52	1,98	0,33	<0,01	<0,01	56,2	<0,02	–	0,07	0,03
метал шва труби 2	0,09	14,8	0,259	0,875	0,70	0,012	0,017	5,65	0,106	<0,01	0,014	0,016
метал шва труби 3	0,10	15,3	0,161	0,989	0,38	<0,003	<0,005	6,98	0,095	–	<0,005	–
12CrMo20.5 TGL 6918	0,08...0,15	4,5...6,5	0,45...0,65	0,30...0,60	0,30...0,50	$\leq 0,035$	$\leq 0,035$	–	–	–	–	–
12CrMo19 5 DIN 17176	0,08...0,15	4,0...6,0	0,45...0,65	0,30...0,60	$\leq 0,50$	$\leq 0,02$	$\leq 0,025$	–	–	–	–	–
Сталь 15X5M ГОСТ 550	<0,15	4,5...6,0	0,45...0,60	<0,50	<0,50	<0,025	<0,03	<0,6	<0,20	<0,30	<0,03	<0,05
Електрод типа ЭА-1а марки ОЗЛ-8 ГОСТ 10052–75 (шов 3)	0,08	20,0	–	1,4	0,58	<0,02	<0,030	8,8	–	–	–	–
Електрод марки АНЖР-1 ГОСТ 10052–75 (шов 1)	До 0,10	23,0...26,0	8,50...11,0	1,50...2,50	До 0,05	0,015	0,020	Основа	–	–	До 0,05	–
<i>Примітка.</i> Склад елементів в металі зварного шва труб 1 і 3 вказує на використання при зварюванні електродів відповідно до типу Э-08Х25Н60М10Г2 марки АНЖР-1 ГОСТ 10052–75 [7], що формують аустенітну структуру шва												



вуглецю з менш легованої складової (основний метал труби) в складову, що збагачена карбидоформуючими елементами (метал шва). Виникнення такого дифузійного прошарку характерно в з'єднаннях перлітних (феритних) сталей з аустенітними швами.

Структура зони термічного впливу (ЗТВ) представлена на рис. 2, а характеристики структури окремих ділянок цієї зони – в табл. 2, в якій також приведені значення мікротвердості основного металу, металу шва та окремих ділянок ЗТВ. Видно, що мікротвердість зварного шва (3650...3745 МПа) перевищує в середньому на 50 % мікротвердість основного металу.

Труба 2. В основному металі присутня велика кількість мікропор. Мікроструктура металу являє собою феритно-карбідну суміш і бейніт відпуску (рис. 3). Зварне з'єднання виконано стиковим багатопрохідним одностороннім швом. При заварюванні кореня шва і наступним накладанням шарів використані різні електроди, що відобразилося в відмінностях мікроструктури, а також в різній кількості феритної складової в окремих ділянках зварного шва (рис. 3). В металі шва також присутні дефекти, що утворилися внаслідок забруднення шва шлаковими включеннями. Мікроструктура верхньої частини зварно-

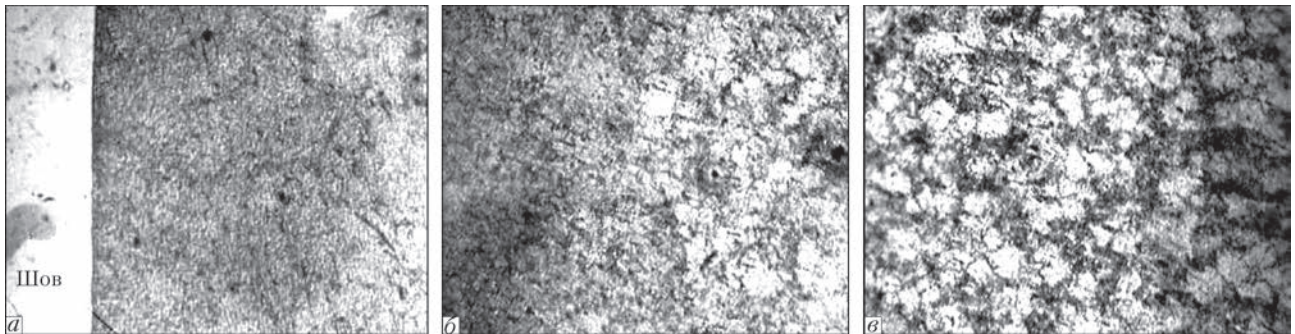


Рис. 2. Фрагменти мікроструктури металу ЗТВ трубопроводу 1: а – шов з ділянками неповного розплавлення і перегріву; б – ділянки нормалізації і неповної перекристалізації; в – ділянка рекристалізації

Таблиця 2. Характеристики структури основного металу і ЗТВ трубопроводів 1 і 3 із сталі марки 12CrMo195

Місце дослідження	Протяжність ділянок, мм	Розмір зерна, бали		Співвідношення фериту і перліту, %		Дисперсність перліту (сорбіту)		Мікротвердість HV, МПа		Неметалеві включення: тип, бал	
		ферит	перліт (сорбіт)	ферит	перліт (сорбіт)	бал	розмір карбідів, мкм	ферит	перліт (сорбіт)		
Труба 1 з напрацюванням 180 000 год											
Основний метал	–	8 (9)	9 (8)	40	60	1,2	до 20, 40	2010	2370	ОТ1а, С16, 2б, ОС 2а, НТ 1а, СП FeO·MnO·SiO(Cr ₂ O ₃), шлакові включення	
Зона сплавлення	0,01...0,015	–	10 (11)	–	100	1	до 25	–	–		
ЗТВ*	ділянка 1	0,12...0,15	–	6	–	100	1	до 25, 40	–		2710
	ділянка 2	~0,35...0,40	–	6–5	0 (~3)	100 (~97)	1	до 25	–		2520
	ділянка 3	~0,40...0,60	9 (10)	8 (9)	~10	~90	1	до 25	2210		2840
	ділянка 4	~0,80	10–11(8)	11–10(8)	~15	~85	1, 2	до 25, 40	2180	2370	
ділянка 5	~1,0	8 (9)	9 (8)	~20–25	~80–75	1, 2	до 25, 40	2080	2450		
Шов (центр)	–	–	–	–	–	Дендрити		верх: 3650	корінь 370	ОТ1а, ОТ4а, FeO·MnO·SiO ₂ , шлак	
Труба 3 з напрацюванням 245 000 год											
Основний метал	–	–	7, 8	–	100	1, 2	до 20, 40	–	1940...2240	FeO·MnO	
Зона сплавлення	0,01...0,015	–	13, 14	–	100	–	–	–	3440		
ЗТВ*	ділянка 1	0,05...0,08	–	7, 6 (12)	–	100	1	до 20	–		3150...3250
	ділянка 2	0,8...1,0	–	6 (7, 8)	–	100	1, 2	до 20, 40	–		3440...3650
	ділянка 3	0,8...0,9	–	11	–	100	1	до 20	–		3910...4180
	ділянка 4	0,6...0,7	–	11 (10)	40...50	60...50	2	до 20	–	2290...2350	
ділянка 5	1,0	–	9 (8)	–	–	2	до 20	–	2350		
Шов (центр)	–	–	8, 9 (7)	–	–	Дендрити		верх: 3440	корінь: 2900...3000		

*Ділянки ЗТВ: 1 – неповного розплавлення; 2 – перегріву; 3 – нормалізації; 4 – неповної перекристалізації; 5 – рекристалізації

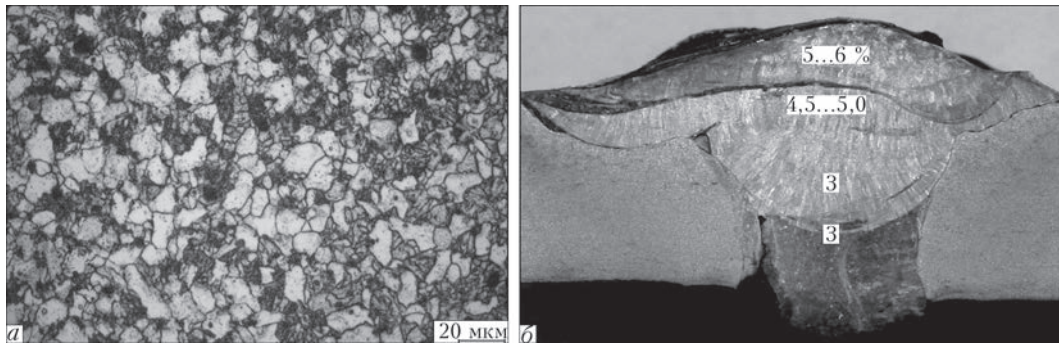


Рис. 3. Мікроструктура основного металу (а) і макроструктура зварного з'єднання (б) трубопроводу 2 (напрацювання 200 000 год) го шва і кореня шва представлені на рис. 4. Фрагменти мікроструктури ЗТВ – на рис. 5.

Труба 3. Основний метал і зварний шов по відношенню до наявності пор і неметалевих включень можна вважати чистим: пори поодинокі, неметалеві включення являють собою невеликі за розміром шпінелі типу FeO·MnO круглої форми діаметром 0,02...0,05 мм. В металі шва наявні поодинокі включення карбідів, розміром 10...15 мкм у діаметрі. Мікроструктура основного металу складається з 100 % дрібнозернистого перліту, який виник внаслідок високого відпуску (сорбіт відпуску). Склад карбідів подібний до таких труби 1. Зварний шов виконаний у три проходи. Мікроструктура металу шва і окремі фрагменти ЗТВ представлені на рис. 6. Мікротвердість структурних складових основного металу по товщі труби знаходиться у межах 1940...2129 МПа із зовнішнього боку і 2129...2240 МПа з внутрішнього. Мікротвердість металу шва перевищує мікротвердість основного металу в середньому на 50 %.

Таким чином, отримані при металографічних дослідженнях дані свідчать про те, що структура металу труб не зазнала змін внаслідок високотемпературного напрацювання 180000, 200000 та 245000 год в умовах дії воднево-

вмісного середовища. Ознаки водневої корозії відсутні.

Контроль механічних властивостей матеріалу досліджуваних труб виконували відповідно до вимог стандартів і нормативних документів (НД). Комплекс механічних характеристик отримано за кімнатної і робочої температур. Результати наведені в табл. 3. Як показали випробування, характеристики міцності і пластичності, а також показники твердості не зазнали змін внаслідок напрацювання труб і за своїми значеннями відповідають вимогам стандартів і НД. Відмітимо, що досліджені зварні шви трубопроводів рівноміцні основному металу за всіх температур випробування.

Вплив напрацювання на роботоспроможність матеріалу труб не може бути оцінений без додаткових даних про опір крихкому руйнуванню і, зокрема, про критичну температуру крихкості. Під критичною температурою крихкості розуміють температуру, за якої відбувається зміна характеру руйнування матеріалу від в'язкого до крихкого. У якості показника приймається ударна в'язкість, що залежить від енергії, витраченої на руйнування, а по виду зламу – доля в'язкої складової. Зразки основного металу і зварних з'єднань трубопро-

Таблиця 3. Механічні характеристики матеріалу труб с напрацюванням 180 000, 200 000 та 245 000 год

Температура випробувань, °С	Границя міцності σ_n , МПа	Границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне видовження δ , %	Відносне звуження ψ , %	Твердість HB
Труба 1 з напрацюванням 180 000 год					
20	592	420	27,8	77,8	191/216
420	445	318	20,8	74,3	
Труба 2 з напрацюванням 200 000 год					
20	587	420	31,8	77,0	
400	470	359	15,1	79,3	
Труба 3 з напрацюванням 245 000 год					
20	642	529	22,6	79,5	167/169
425	453	355	20,7	73,3	
525	400	370	21,2	79,9	
Стандарт DIN 17176 на сталь марки 12CrMo19 5 [4]					
20	590...740	390	17	62	175...220
450	480	385	15	76	
500	430	350	18	82	
ГОСТ 550-75 на сталь марки 15X5M-Y [5]					
20	600	420	16	65	Не більше 235

Примітки. 1. За вимогою ИТН-93[8] для зварного шва сталі 15X5M-Y величина HB не більше 270 од. 2. За коною наведені значення HB для зварних швів

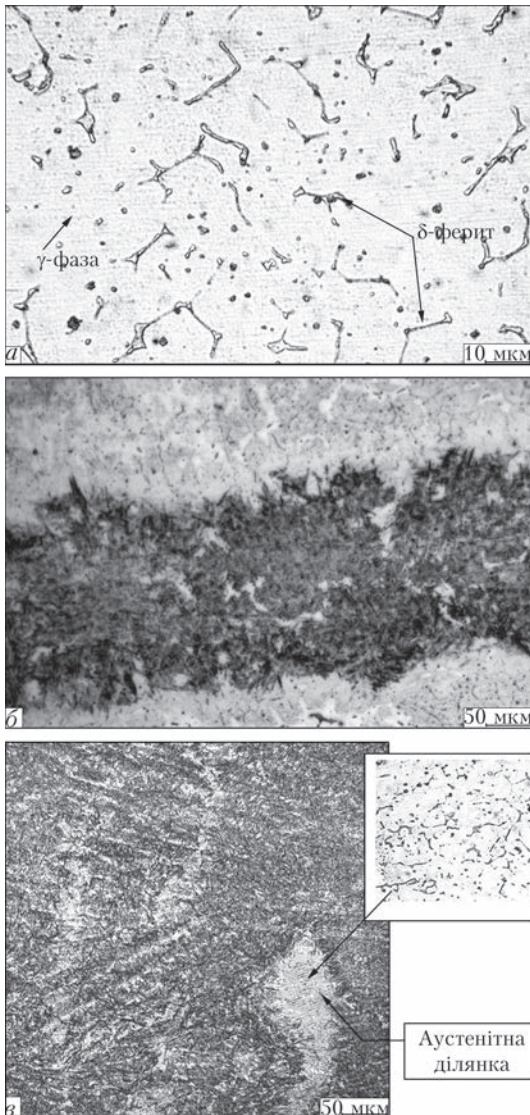


Рис. 4. Мікроструктура верхньої частини зварного шва (а) з мартенситно-бейнітними прошарками (б), кореня шва в трубопроводу 2 (напрацювання 200 000 год)

водів піддавали випробуванням на ударний згин у заданому низькотемпературному інтервалі. Випробування проводили відповідно до вимог стандартів ГОСТ 9454–78 [9], ГОСТ 6996–66 [10]. За отриманими даними будували графіки залежності ударної в'язкості і в'язкої складової в зламі від температури випробувань, з яких відповідно до заданих критеріальних значень (КЗ) ударної в'язкості ($KCV = 34 \text{ Дж/см}^2$) і в'язкої складової

Таблиця 4. Результати випробувань на ударний згин зразків труби 3 з напрацюванням 245 000 год

Температура випробувань, °С	Основний метал	
	Ударна в'язкість KCV , Дж/см ²	В'язка складова B , %
450	170/49	100/55
20	154/11	100/60
20	152/7	100/10
0	120/30	100/35
-10	100/28	90/30
-20	90/21	70/23
-20	80/18	60/18
-30	70/20	52/14
-30	62/22	54/12
-40	60/18	48/6
-40	53/16	40/8
-50	55/-	30/-
-60	38/-	12/-

Примітка. За косяно наведено дані для зварних швів

в зламі (50 %) визначали критичну температуру крихкості. Наведемо тільки результати випробувань зразків трубопроводу 3 (табл. 4) через те, що його напрацювання в умовах експлуатації складо найбільшу величину – 245 000 год.

Графіки залежності ударної в'язкості і в'язкої складової в зламі зразків від температури випробувань представлені на рис. 7.

Аналіз даних показав, що ударна в'язкість основного металу має достатньо високі показники і повністю відповідає вимогам ГОСТ 550–75 [5] і ПНАЕ Г-7-002–86 [11], за якими для матеріалу, границя плинності якого за температури 20 °С знаходиться в межах від 402 до 549 МПа, КЗ ударної в'язкості має бути не менше 74 Дж/см². Ударна в'язкість зварних з'єднань досліджуваного трубопроводу значно менше такої основного металу, проте знаходиться в межах вимог ПБ 03-576-03 [12], а саме для зварних з'єднань сталей мартенситного класу значення KCV не має бути нижчим 35 Дж/см² при 20 °С та 20 Дж/см² при –20 °С.

Вивчення впливу напрацювання на критичну температуру крихкості (T_k) показало, що за критеріальним значенням KCV і в'язким волокном в зламі 50 % значення T_k основного металу складає –72 °С і –32 °С відповідно, у той же час T_k звар-

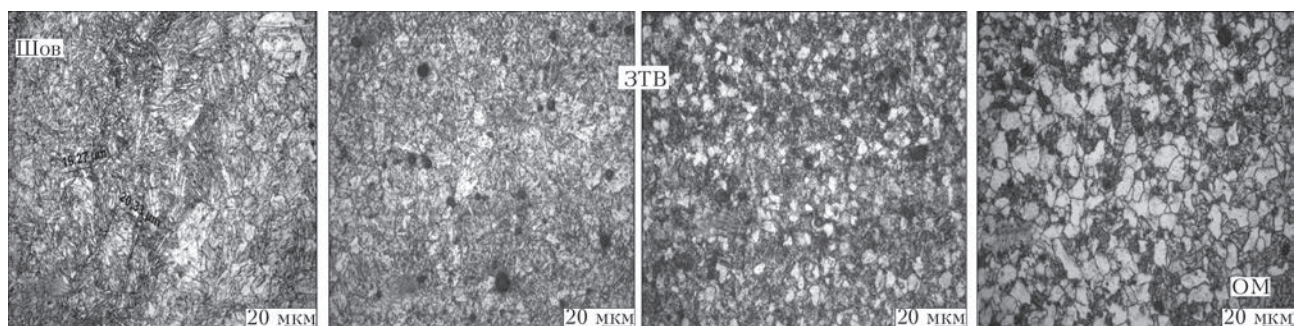


Рис. 5. Фрагменти мікроструктури металу ЗТВ трубопроводу 2 (напрацювання 200 000 год) (ОМ – основний метал)

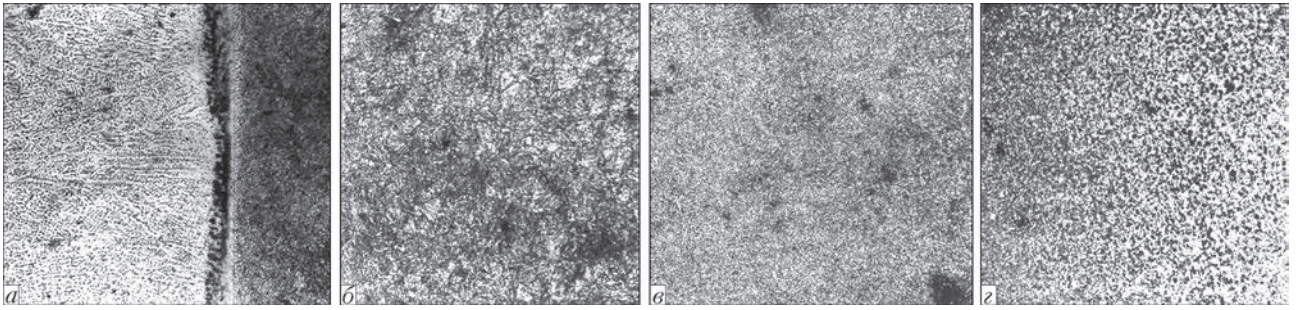


Рис. 6. Мікроструктура металу шва (а) і фрагменти мікроструктури ЗТВ (б-г) трубопроводу 3 (напрацювання 245 000 год), $\times 100$

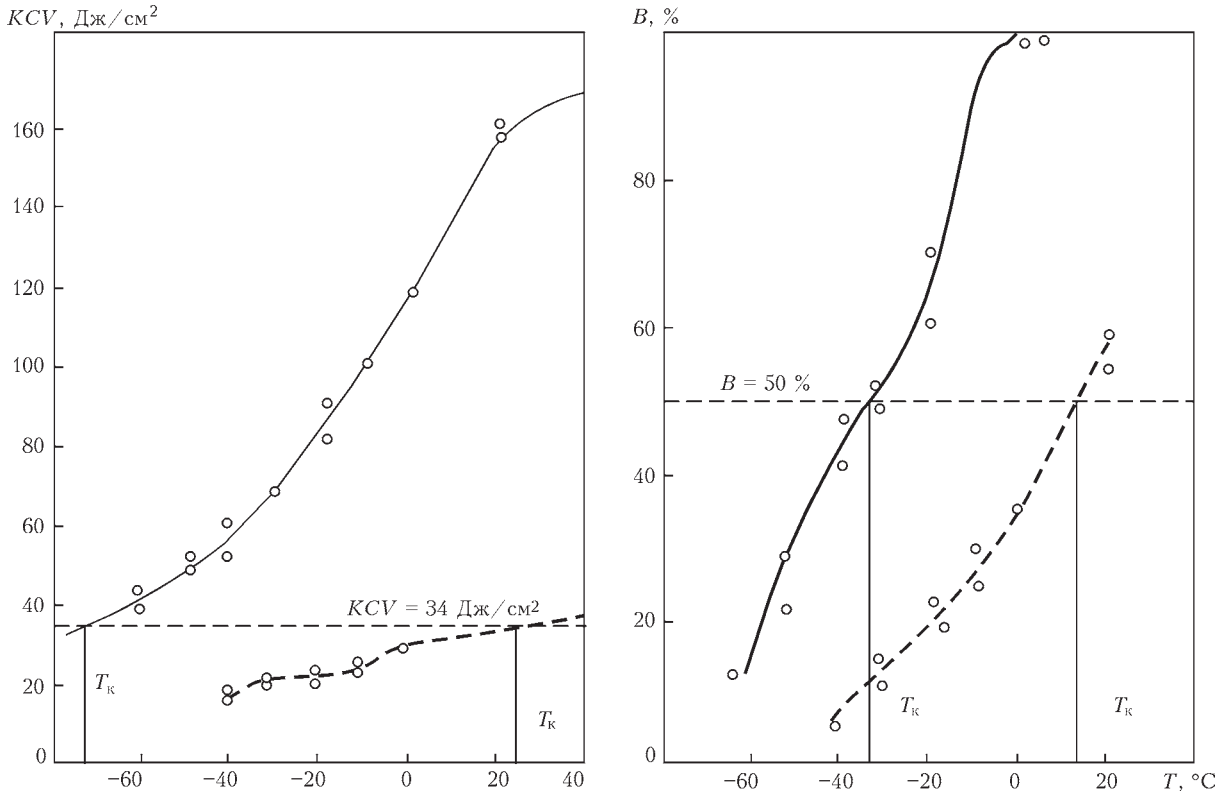


Рис. 7. Ударна в'язкість KCV (зліва) основного металу (суцільна лінія), зварного шва (штрихова лінія) і величина в'язкої складової B (справа) в зламі зразків в залежності від температури випробування трубопроводу 3 (напрацювання 245 000 год)

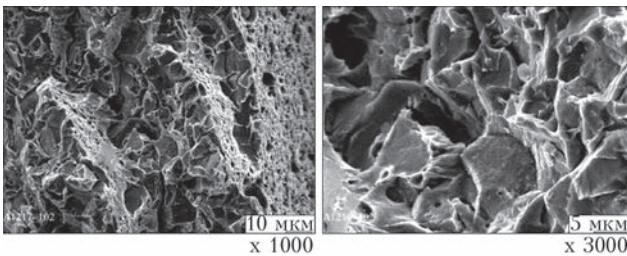


Рис. 8. Структура поверхні руйнування зразка основного металу трубопроводу 3 після випробувань на ударний згин при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зоні переходу від в'язкого руйнування до квазікрихкого

них з'єднань знаходиться в області позитивних температур і складає 25 і $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно.

Структура зламу зразків основного металу і зварного з'єднання, зруйнованих при температурах, близьких до T_k , представлена на рис. 8 і 9. Поверхня руйнування зразка основного металу (рис. 8) має волокнисту і кристалічну складові у співвідношенні одна до одної приблизно 50% . Видно, що руйнування відбувалося при розділенні металу по тілу зерна

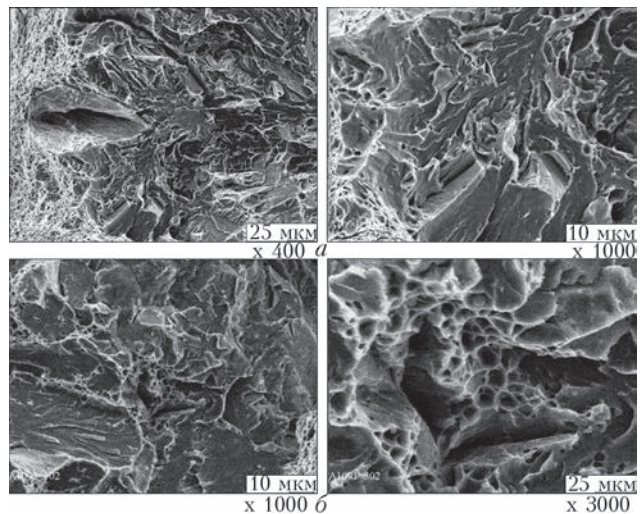


Рис. 9. Структура поверхні зламу зразка зварного з'єднання трубопроводу 3 після випробувань на ударний згин при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (з 50% в'язкової складової): а – зона зародження тріщини, сформованої при розділенні металу шляхом злиття мікропор і перехід від в'язкого руйнування до квазікрихкого; б – квазікрихке руйнування в зоні розповсюдження тріщини



шляхом квазісколу з характерними фасетками, розділеними між собою гребнями відриву. Руйнування поверхні такого виду характеризується як квазікрихке. Поверхня зламу зразка зварного з'єднання, зруйнованого за 20 °С, дуже неоднорідна (рис. 9). Спостерігаються ділянки різної морфології. В зоні зародження тріщини, у вістря надрізу, знаходяться ділянки в'язкого руйнування, утворені шляхом злиття мікропор. До них безпосередньо прилягає ділянка з рельєфом внутрішньозернистого руйнування квазісколом і гребнями відриву, на якому зустрічаються фасетки сколу з характерним рівчаковим визерунком. В зоні розповсюдження тріщини виникли такі самі ділянки квазікрихкого руйнування.

Висновки

Довготривале напрацювання сталі 12CrMo19 5 DIN 17176 в конструкції технологічних трубопроводів реакторного блоку установок каталітичного риформінгу ЛГ-35-11/300 не призвело до змін структури і деградації механічних властивостей металу за термін служби від 180 000 до 245 000 год в умовах дії водневомісного середовища високих параметрів. У той же час із збільшенням строків експлуатації до 245 000 год ініціюються процеси водневої корозії зварних швів, які проявляються у різкому зниженні ударної в'язкості і зміщенні критичної температури крихкості в область позитивних температур.

Незважаючи на те, що основний метал задовольняє усім вимогам НД, у зв'язку з підвищенням температури в'язко-крихкого переходу зварних швів за певних умов експлуатації може статися крихке руйнування ділянки трубопроводу. З метою запобігання виробничих інцидентів під час технічних наглядів чи експертних обстежень трубопроводів реакторного блоку установок каталітичного риформінгу ЛГ-35-11/300 гідравлічні чи пневматичні випробування на міцність повинні проводитись за температури не менше 15 °С. В штатних умовах експлуатації (відповідно до рег-

ламентних режимів) внаслідок високого рівня в'язких властивостей матеріалу небезпека руйнування за робочими температурами (від 400 до 425 °С) відсутня.

Крім цього, з метою розширення заходів по запобіганню раптових відмов обладнання доцільно під час планово-попереджувальних ремонтів здійснювати заміну зварних швів, з використанням зварювальних матеріалів і технологій зварювання відповідно до даної марки сталі.

1. *НПАОП 0.00-6.09-10.* Порядок проведення огляду, випробування та експертного обстеження обладнання установок гідрогенізаційних процесів у нафтопереробному, нафтохімічному і хімічному виробництвах. – Введ. 14.04.2010 (Державний реєстр Держгіпромнагляду України).
2. *ДСТУ 4046–2001.* Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних і хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги. – Введ. 27.07.2001
3. *ДСТУ 2389–94.* Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. – Введ. 01.01.1995
4. *Wegst C. W.* Verlag Stahlschlüssel GmbH, Dusseldorf, 1995.
5. *ГОСТ 550–75.* Трубы стальные бесшовные для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. – Введ. 01.01.1977.
6. *ГОСТ 20072–74.* Сталь теплоустойчивая. Технические условия. – Введ. 01.01.1976.
7. *ГОСТ 10052–75.* Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы. – Введ. 01.01.1977, актуализованый 01.03.2014 (Каталог державних стандартів).
8. *ИТН-93.* Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковки оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств: Утв. Госгортехнадзором 16.05.94, Волгоград. – 1993. – 153 с.
9. *ГОСТ 9454–78.* Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Введ. 01.01.1990, актуализованый 01.03.2014. – (Каталог державних стандартів).
10. *ГОСТ 6996–66.* Сварные соединения. Методы определения механических свойств. – Введ. 01.01.1967, актуализованый 01.01.2005 (Каталог державних стандартів).
11. *ПНАЭ Г-7-002–86.* Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
12. *РБ «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов».* Утверждено приказом Ростехнадзора от 27.12.2012 № 784.

The paper analyzes methodological approaches to expert evaluation of technical condition of process piping for transportation of hot and explosive media, containing from 60 up to 90 vol.% of hydrogen in a mixture with liquid or vapourized carbohydrates, hydrogen sulfide and other components. It is shown that long-term service of 12CrMo195 steel (DIN 17186) in process piping system did not lead to changes in structure or degradation of mechanical properties of metal during the service period from 180 000 up to 245 000 hours under the impact of high parameter hydrogen-containing medium. At the same time, processes of hydrogen corrosion of welds are initiated at extension of service period above 245 000 hours. 12 References, 4 Tables, 9 Figures.

Keywords: process piping, hydrogen-containing medium, mechanical properties of piping metal

Надійшла до редакції
28.10.2015