

КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ЗА ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ У ВОДНЕВОВМІСНОМУ РОБОЧОМУ СЕРЕДОВИЩІ

С. З. СТАСЮК

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, 01014, м. Київ, вул. Тимирязевська, 2.
E-mail: stasiuk-ipp@list.ru

Розглянуто методичні підходи до експертної оцінки технічного стану технологічних трубопроводів, по яких транспортуються горючі і вибухонебезпечні середовища, що містять від 60 до 90 % об. водню в суміші з рідкими чи пароподібними вуглеводами, сірководнем та іншими компонентами. Бібліогр. 14, табл. 7, рис. 9.

Ключові слова: технологічні трубопроводи, каталітичний риформінг, воднева корозія, металографічні дослідження, механічні випробування, механічні властивості, ресурс безпечної експлуатації

Гідрогенізаційні процеси при каталітичному риформінгу відносяться до основних технологічних процесів у нафтопереробних і нафтохімічних виробництвах, при яких внаслідок циклів реакції здійснюється приєднання водню до різних речовин в умовах високих температур 420...550 °С та тиску 0,1 до 70 МПа. В умовах довготривалого контакту металу з водневовмісним середовищем за температур 260...550 °С та тиску 2,1...6,6 МПа метал насичується воднем і, внаслідок цього виникає воднева корозія – знеуглецювання сталі або воднева крихкість – втрата металом пластичності, що викликана утворенням і розвитком тріщин внаслідок скопичення водню на різних дефектах (дислокаціях, вакансіях, міжзеренних границях тощо). Дані досліджень впливу водню на механічні властивості конструкційних сталей [1–3] показують, що дія водню не проявляється на механічних характеристиках, не пов'язаних з руйнуванням: опір пластичній деформації, модуль пружності, рівномірна деформація, але різко проявляється на зниженні граничних характеристик, пов'язаних з руйнуванням, таких як міцність, відносне видовження і відносне звуження, а також твердість і ударна в'язкість.

Хромомолібденові сталі, що широко використовуються в конструкціях обладнання нафтопереробних виробництв, відрізняються незалежністю границі плинності за кімнатної і робочих температур від тривалості експлуатації при 420...525 °С, а характеристики пластичності, які за кімнатної температури також не залежать від тривалості експлуатації, за робочої температури підвищуються з часом, при чому підвищення відносного видовження відбувається швидше, ніж збільшення відносного звуження. З урахуванням цих обставин в якості показника зміни механічних

властивостей металу після тривалої експлуатації доцільно розглядати відношення границі міцності сталі при робочій температурі до такої за температури 20 °С і оцінювати тим самим експлуатаційну надійність напрацьованого металу [4].

В установках каталітичного риформінгу особливою відповідальність мають трубопроводи реакторних блоків, по яких транспортуються горючі і вибухонебезпечні середовища, що містять від 60 до 90 % об. водню в суміші з рідкими чи пароподібними вуглеводами, сірководнем та іншими компонентами. Вони знаходяться під дією високих температур і значних тисків, піддаються корозії і внаслідок регенеративного режиму роботи установок зазнають періодичних охолоджень і нагрівів, що призводить до розладу фланцевих з'єднань, порушень герметичності, а при недостатньому експлуатаційному контролі за станом – і до руйнування трубопроводів [2], тому до їх надійності, міцності і безпечності в експлуатації висувають високі вимоги.

Надійність роботи технологічних трубопроводів гарантується своєчасним контролем їх технічного стану, суворим дотриманням 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) [5, 6], метою якого є контроль технічного стану з використанням традиційних методів неруйнівного контролю для виявлення експлуатаційних дефектів і оцінка залишкового ресурсу. Для технологічних трубопроводів необхідно уточнення поняття залишкового ресурсу, яке прийнято визначати сумарним напрацюванням від моменту контролю технічного

стану до переходу в граничний стан [5]. 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 роботоздатність основних елементів – труб і зварних з'єднань. Ресурс (строк служби) подовжується поетапно і термін наступного технічного діагностування встановлюється на основі отриманих під час експертного обстеження результатів, а також аналізу властивостей матеріалу, напрацювання якого відбувалося в умовах впливу водневомісного середовища високих параметрів.

Нормативно-правовим документом НПАОП 0.00-6-09-10 [5] встановлено порядок проведення експертного обстеження технологічних трубопроводів гідрогенізаційних установок, за вимогами якого контролю технічного стану з обов'язковим проведенням лабораторних досліджень властивостей металу піддають трубопроводи, які виготовлені з низьколегованих хромо молібденових сталей після їх напрацювання 150000 год.

Якщо зміна механічних властивостей відбувалась за рахунок старіння металу під дією високої температури в період тривалої експлуатації, термічним обробленням шляхом високотемпературного нагрівання в області температур аустенітного стану можна відновити властивості металу, наблизивши їх до первісних [7]. Таке відновлювальне термічне оброблення має назву ВТО. Але, якщо незворотні процеси водневої корозії розпочаті, то вказаним ВТО властивості сталі не відновлюються. Вплив водню на механічні властивості сталі оцінений шляхом порівняння характеристик металу в стані напрацювання (в умовах експлуатації), з такими металу, що пройшов ВТО, подається як відношення [7]:

$$\left(\frac{\sigma_{\text{вод}}}{\sigma_{\text{вод}}^{\text{то}}}\right) 100 \% \text{ і } \left(\frac{\psi_{\text{вод}}}{\psi_{\text{вод}}^{\text{то}}}\right) 100 \%,$$

де $\sigma_{\text{вод}}$ і $\psi_{\text{вод}}$ – границя міцності і відносне звуження металу в стані напрацювання у водневомісному середовищі; $\sigma_{\text{вод}}^{\text{то}}$ і $\psi_{\text{вод}}^{\text{то}}$ – границя міцності і відносне звуження металу, що пройшов ВТО.

Таким чином, воднева стійкість металу і збереження його службових властивостей після тривалої експлуатації може бути оцінена за такими показниками:

– вмістом вуглецю в металі, визначеному за результатами контрольного хімічного аналізу, що має відповідати діючим стандартам на марку сталі. При цьому поверхневе і приповерхневе

зневуглецювання треба оцінювати за показниками мікротвердості;

– вмістом водневостійких карбідів по всій товщі металу як до, так і після ВТО за результатами металографічного аналізу;

– за порівняльною характеристикою механічних властивостей матеріалу до і після ВТО.

Оцінка, яка здійснюється за такими показниками, має визначити працездатність металу в заданих умовах експлуатації і встановлювати можливість його подальшої безпечної експлуатації.

Такі підходи були використані при контролі технічного стану технологічних трубопроводів реакторних блоків установок каталітичного риформінгу ЛГ-35-11/300 двох нафтопереробних виробництв. Під час проведення експертного обстеження згідно з вимогами [5] для лабораторних досліджень поступили «котушки» із зварними швами, що були вирізані з технологічних трубопроводів риформінгу (рис. 1).

Матеріал трубопроводів, структурні особливості. Виготовлювач установок – Магдебурський завод важкого машинобудування (Німеччина). Матеріал трубопроводів за даними заводських сертифікатів – сталь марки 10CrMo9.10 (DIN 17176) [8]. Вітчизняним аналогом таких труб є труби зі сталі марки 1Х2М1 ТУ 14-3-517-76. На час експертних обстежень фактичне напрацювання трубопроводів за робочими параметрами, обумовленими циклом реакції – тиском 5,0 МПа і температурою 525 °С в умовах водневомісного середовища (газ із вмістом водню до 85 % об., сірководню до 0,005 % об.), склало 204500 год (трубопровід 1) і 245800 год (трубопровід 2). Зварні шви були виконані ручним дуговим зварюванням електродами типу Cr2Mo1 TGL 24-13.7 [8] з використанням технології термооброблення: попереднє нагрівання до 250...300 °С, відпалювання після зварювання за температури 730...780 °С на протязі 90 хв і охолодження на повітрі.

Для зіставлення властивостей металу трубопроводів ВТО проводилось за наступним режимом [7]: нормалізація при 950 °С (нагрівання металу понад температури $A_{\text{с3}}$, при якій відбувається



Рис. 1. Загальний вигляд зразка, вирізаного з трубопроводу риформінгу

повне перетворювання в аустеніт, на протязі 20 хв і відпуск при 720 °С на протязі 1 год (для зняття структурних напруг і утворення водневостійких карбідів).

Отриманими результатами аналізу хімічного складу підтверджена відповідність вмісту хімічних елементів сертифікатам виробника (табл. 1). Як видно з таблиці, за складом вуглецю, карбидоутворюючих елементів, а також домішків сірки і фосфору матеріал труб повністю відповідає вимогам стандарту на сталь марки 10CrMo9.10 DIN 17176 [8] (TGL 9012 – державний стандарт НДР, за яким здійснювалося постачання труб під час виготовлення і монтажу установок каталітичного риформінгу у 1971 році) і може бути ідентифікований як вітчизняний аналог цієї сталі – сталь марки 1Х2М1 ТУ 14-3-517-76 [9], а електрод, яким виконано зварний шов, повністю відповідає вітчизняному аналогу – електроду типу Э-09Х2М1 за ГОСТ 9467-75 [10].

Металографічний аналіз, проведений з метою вивчення можливих змін мікроструктури основного металу і зварних з’єднань труб внаслідок тривалої експлуатації (табл. 2), показав наступне.

Труба 1. В основному металі присутні у великій кількості неметалеві включення типу шпінелі FeO·MnO (до 5 %) довжиною 0,05...0,06 мм і завширшки 0,01...0,02 мм. Наявні також оксиди точкові; дуже дрібні і дещо більші пори (до 0,02 мм). Макроструктура металу зварного з’єднання представлена на рис. 2, а. В металі зварного шва спостерігаються, головним чином, оксиди точкові. Зварне з’єднання виконано стиковим багатопрхідним одностороннім швом з V-подібним розкриттям кромки. В металі кореня шва виявлено дефект д1, що являє собою угнутість кореня шва з усадочною раковиною (дефект д2), розміром приблизно 0,70...0,52 мм. В верхній частині дефекту д2 після травлення (з метою виявлення мікроструктури за великими збільшеннями) виявлені мікротріщини, утворення яких, вірогідно, пов’язане з пітинговою корозією. Схема дослідження мікроструктури різних зон зварного з’єднання представлена на рис. 2, б.

Структура металу труби зі сталі 10CrMo9.10, що відноситься до хромистих сталей мартенситного класу, являє собою феритно-карбідну суміш (з незначною кількістю бейніту відпуску) і дрібнозернистий перліт (сорбіт відпуску). Вона ха-

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

Об’єкт дослідження	Склад елементів, %								
	C	Cr	Mo	Mn	Si	S	P	Ni	Cu
Результати дослідження:									
метал труби									
1	0,134	2,00	1,10	0,487	0,024	<0,005	<0,01	0,018	0,102
2	0,140	2,05	1,12	0,500	<0,01	0,025	<0,01	0,11	0,140
метал шва труби									
1	0,12	5,14	0,57	0,57	0,34	<0,005	<0,01	0,08	0,090
2	0,08	2,24	9,52	1,09	0,38	0,003	<0,005	0,095	0,168
10CrMo9.10 TGL9012 (DIN 17176)	0,08...0,14	2,0...2,5	0,90...1,10	0,40...0,80	≤0,50	≤0,025	≤0,030	–	≤0,30
Сталь 1Х2М1 (ТУ 14-3-517-76)	0,08...0,13	2,0...2,5	0,90...1,10	0,30...0,60	0,17...0,37	<0,035	<0,035	<0,50	<0,30
Електрод типу Э-09Х2М1 ГОСТ 9467-75	0,06...0,12	1,9...2,5	0,80...1,10	0,5...1,0	0,15...0,45	<0,025	<0,035	–	–

Таблиця 2. Характеристики структури основного металу і зони термічного впливу трубопроводу 2 зі сталі марки 10CrMo9.10 з напрацюванням 245800 год

Місце дослідження	Протяжність ділянок ЗТВ*, мм	Номер зерна перліту, бали	Співвідношення фериту і перліту, %		Дисперсність перліту (сорбіту)	
			Ферит	Перліт	Бал	Розмір карбідів, мкм
Основний метал		9,10 (8)	5	95 (100)	1, 2	≤20,40
Зона сплавлення		10, 11 (8, 9)	–	100	–	–
*Ділянка 1		7 (8)	–	100	1, 2	≤20,40
2		7 (8, 9)	–	100	2	40
3		10, 11 (9, 10)	–	100	1, 2	≤20,40
4		8, 9 (9, 10)	–	100	1, 2	≤20,40
Метал шва		верх – 9,10 (6, 7) низ – 11,12 (9) центр – 14 (6,7)	–	100	центр 2, 3	центр 0,40...0,60

Примітки: 1. *Ділянки ЗТВ: 1 – неповного розплавлення; 2 – перегріву; 3 – нормалізації; 4 – неповної перекристалізації.
2. У дужках наведені дані показників, що змінилися після ВТО.

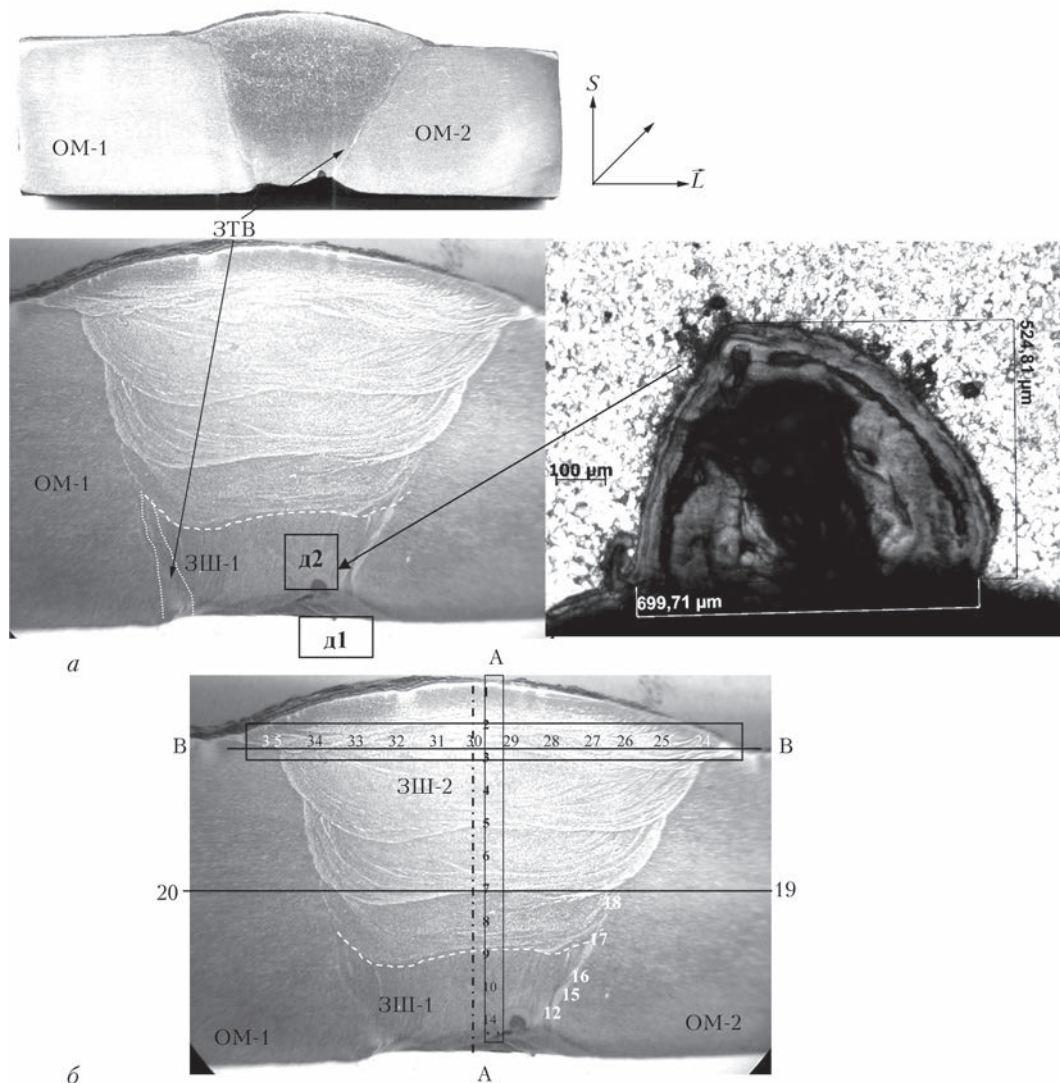


Рис. 2. Темплет для досліджень зварного з'днання труби із сталі 10CrMo9.10 в площині шліфу (L - S) в стані напрацювання 204500 год: а – макроструктура; б – схема досліджень мікроструктури різних зон зварного з'днання; OM-1, OM-2 – основний метал, ЗТВ – зона термічного впливу; ЗШ – зварний шов; ЗШ-1 – корінь шва; д1 і д2 – дефекти в металі зварного шва

рактизується рядковістю (рис. 3, а). Середній розмір феритних зерен знаходиться у межах 10...20 мкм. В металі наявні пори і витягнуті сульфідні виділення. Мікротвердість HV дорівнює 1600...1800 МПа. Після ВТО збільшився вміст бейніту відпуску, відбулося подрібнення структурних складових майже у 1,5...2 рази (рис. 3, б). При цьому рядковість структури збереглась, проте збільшилася пористість. Мікротвердість практично не змінилася.

Мікроструктура металу шва характеризується неоднорідністю і змінюється по його товщині. Ілюстрацією цього слугує рис. 4, на якому показано зміни структури уздовж середньої лінії А-А (див. схему рис. 2, б). Так, у верхній частині зварного шва (рис. 4, а) переважає суміш крупного поліедричного фериту з перлітом, бейнітом відпуску і карбідами (різнозеренність фериту в межах 20...60 мкм і його середній розмір приблизно 40 мкм). Мікротвердість HV металу шва у верх-

ній частині, складає 1900...2100 МПа, при цьому мікротвердість окремих структурно вільних зерен фериту дорівнює 1500 МПа. В напрямку до кореня шва мікроструктура стає більш дрібнозернистою (рис. 4, б). Тут середній розмір зерна фериту становить 30 мкм при різнозеренності у 20...40 мкм; мікротвердість металу шва цієї області знаходиться у межах 1600...1900 МПа. Мікроструктура кореня шва (див. ЗШ-І на рис. 2, б) – феритно-карбідна суміш (рис. 4, в) з невеликою кількістю зернистого перліту. В нижній частині кореня шва середній розмір фериту становить 20 мкм; мікротвердість металу шва HV в межах 1600...1800 МПа. Після ВТО спостерігалось значне подрібнення структурних складових – в 1,5...2 рази (рис. 4, а, б, в). При цьому мікротвердість HV зменшилась від 2020 МПа у верхній частині шва до 1600...1700 МПа у нижній частині.

Зона термічного впливу (ЗТВ) практично відсутня у верхній частині шва і ледве іден-

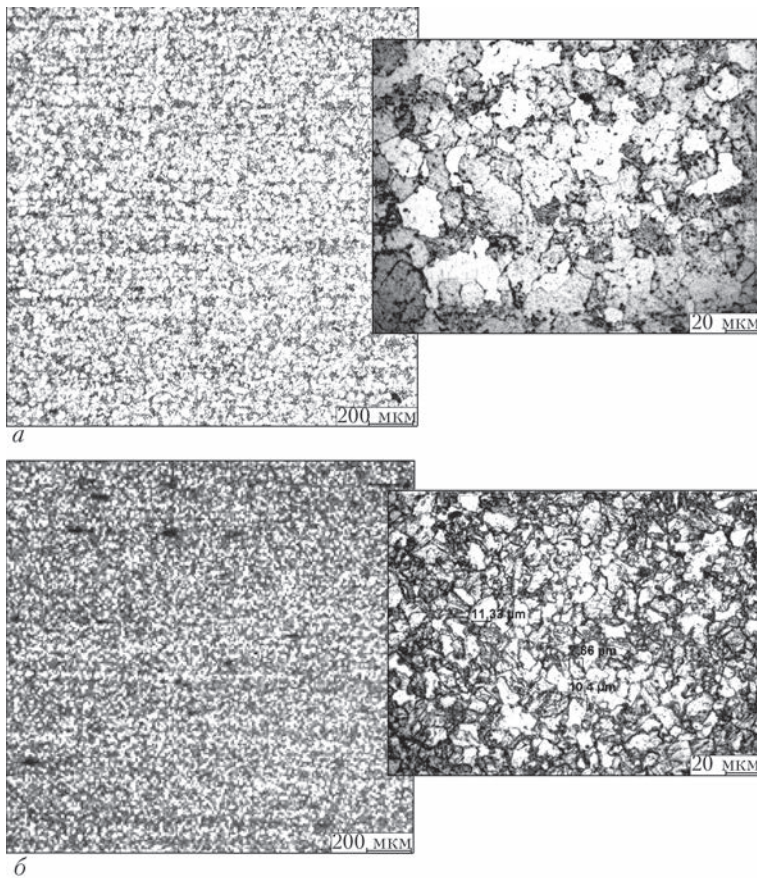


Рис. 3. Мікроструктура основного металу труби: а – в стані напрацювання 204500 год; б- після ВТО

тифікується в нижній за шириною 200...300 мкм з боку ОМ-2 і приблизно 500 мкм з боку ОМ-1 (рис. 5). Мікроструктура ЗТВ – це суміш фериту, зернистого перліту, бейніту відпуску та карбідів. Мікротвердість металу у межах 1600...1700 МПа; середній розмір феритних зерен порядку 10 мкм. Після ВТО мікроструктура майже не змінилась, тільки виріс розмір феритних зерен на 40...50 % (рис. 6).; мікротвердість практично не змінилась.

Труба 2. Характеристики структури основного металу і ЗТВ приведені в табл. 2. Мікроструктура металу являє собою дрібнозернистий перліт (сорбіт відпуску) 1, 2 бали дисперсності з розміром частинок капбідів типу $Me_{23}C_6$ і Me_7C_4 в межах 20...40 мкм. Феритна складова в металевій матриці не більше 5 %, величина зерен перліту 9, 10 розміру (рис. 7, а). Мікротвердість *HV* структурних складових по товщині труби становить 2032...2232 МПа (табл. 3).

Мікроструктура металу шва представлена на рис. 8. Мікротвердість металу шва з боку зовнішньої поверхні труби дорівнює 1986 МПа, з боку внутрішньої поверхні – 2129 МПа, в корені шва – 1938 МПа (табл. 3). Мікроструктура ЗТВ зварного з'єднання представлена на рис. 9. Зона сплавлення не має чітких границь і шов плавно переходить в ділянку неповного розплавлення навколошовної зони, яка має протяжність

0,05...0,07 мм; величина зерна перліту на цій ділянці відповідає 7, 8 номерам; дисперсність зернистого перліту складає 1, 2 бали. Ділянка перегріву має протяжність 0,40...0,50 мм із зернами перліту 7 номеру; дисперсність перліту (сорбіт) – 2 бали. Ділянка нормалізації протяжністю 0,7...0,8 мм з номером зерна перліту 10, 11 і дисперсністю – 1, 2 бали. Ділянка неповної перекристалізації протяжністю до 1,0 мм має зерна перліту величиною 8, 9 номерів; дисперсність зернистого перліту складає 1, 2 бали. Мікротвердість *HV* різних ділянок зони термічного впливу відрізняється несуттєво і знаходиться в межах 1938...2129 МПа.

Дослідження показали, що структура металу і зварних з'єднань трубопроводу 2, як і трубопроводу 1, також не зазнала змін внаслідок довготривалої експлуатації в робочих умовах. Після ВТО в мікроструктурі основного металу зник вільний ферит і його структура почала повністю складатися з сорбіту відпуску. В порівнянні з металом в стані напрацювання величина зерна не змінилась у зовнішній поверхні і в центральній частині перерізу, проте у внутрішній поверхні труби збільшилася на 1, 2 номери.

Дисперсність карбідів в основному металі майже не змінилась, але їх розподіл став менш рівномірний. Внаслідок ВТО підвищилася схильність до коагуляції карбідів як в основному металі, так і в ЗТВ зварного шва, при цьому щільність карбідної фази зменшилась; спостерігався вирівнюючий вплив термооброблення на мікроструктуру ЗТВ, особливо на ділянки навколошовної зони. Мікротвердість основного металу підвищилася на 200...400 одини-

Таблиця 3. Мікротвердість окремих зон металу зварного з'єднання труби з напрацюванням 245800 год

Місце дослідження		Мікротвердість <i>HV</i> , МПа	
		Напрацювання	Після ВТО
Метал шва	верх	1986	2620
	виз	2129	2580
	корінь	1938	2460
Зона сплавлення		1733	2820
Зона неповного розплавлення		2129	2445
Зона перегріву		2032	2410
Зона нормалізації		1938	2470
Зона неповної перекристалізації		1938	2390
Основний метал	зовн. поверхність	2032...2231	2460...2580
	внутр. поверхність	2032...2232	2240...2420

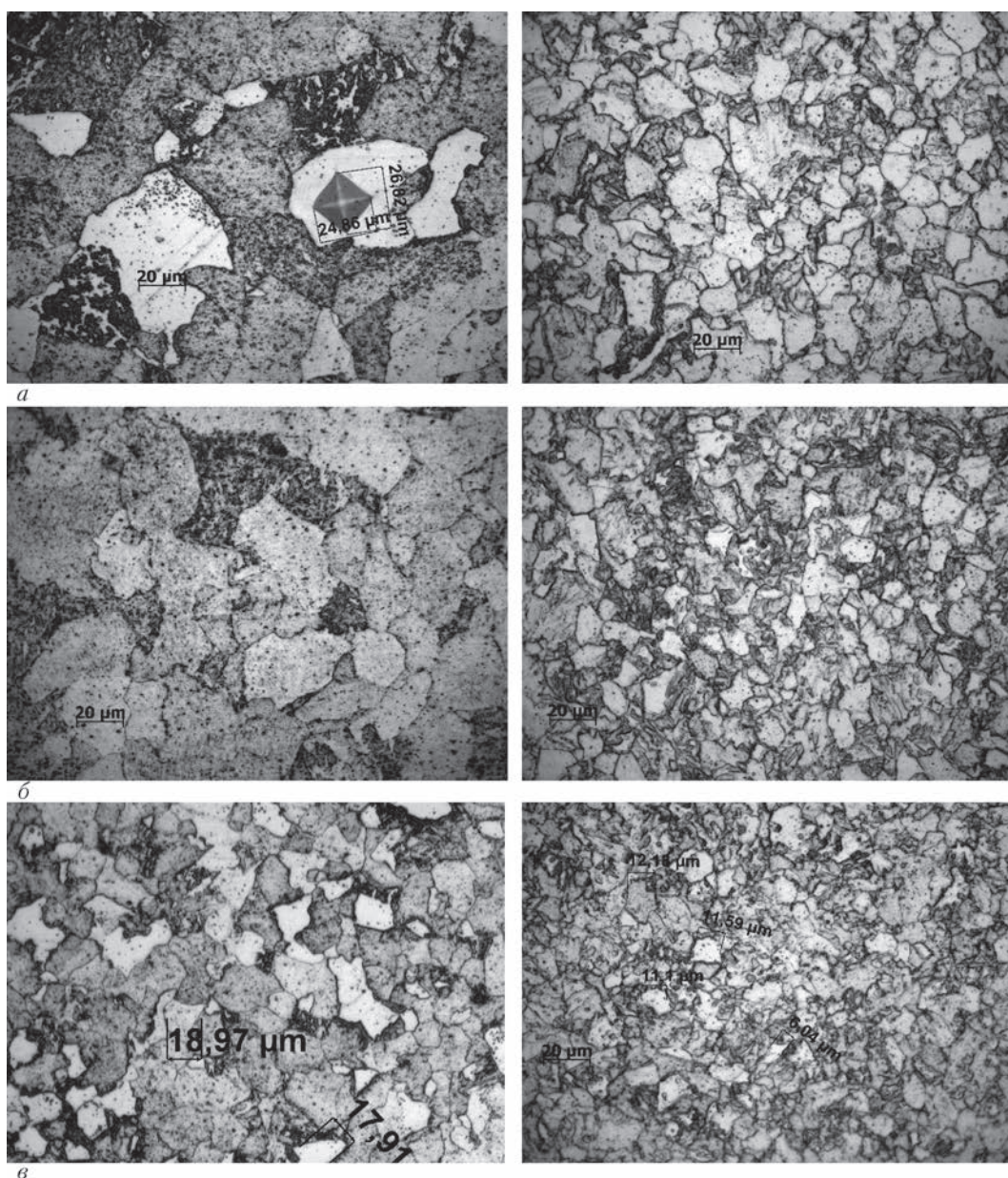


Рис. 4. Порівняльні фрагменти зміни мікроструктури металу зварного шва в стані напрацювання 204500 год і після ВТО: а – верхня частина шва; б – центр шва; в – корінь шва

Таблиця 4. Механічні характеристики основного металу труб з напрацюванням/після ВТО

Температура випробувань, °С	Границя міцності σ_b , МПа	Границя текучості $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне видовження, δ , %	Відносне звуження ψ , %	Твердість <i>НВ</i>
Труба 1 з напрацюванням 204500 год					
20	493,4/619,8	265,0/515,7	36,0/24,8	67,9/68,0	191/216
525	269,2/464,9	160,1/385,8	27,1/21,4	62,2/65,3	-
Труба 2 з напрацюванням 245800 годин					
20	500,0/649,0	275,0/539,0	33,1/22,7	75,1/76,4	-
525	470,0/484,0	188,0/397,0	31,8/22,0	73,5/79,8	-
550	276,0/462,0	185,0/395,0	41,5/24,0	77,1/82,5	-
Стандарт TGL 9012 (DIN 17176) на сталь марки 10CrMo9.10 [8]					
20	480...630	290	18	55	130...175/-
500	-	180	-	-	-
ТУ 14-3-517-76 на сталь марки 1Х2М1 [9]					
20	450	270	20	45	>235/-

Примітка. За вимогою [14] для основного металу сталі 1Х2М допустимі межі твердості *НВ* 161...227.

ць, металу шва на 400..500 одиниць, металу ЗТВ на 300...500 одиниць. Мікротвердість зони сплавлення збільшилась на 1100 одиниць.

Результати механічних випробувань. Для контролю механічних властивостей матеріалу досліджуваних труб проводили механічні випробування відповідно до вимог стандартів і нормативних документів (НД): на розтяг, ударну в'язкість і твердість. Комплекс механічних характеристик, які отримано за кімнатної і робочої температур як у стані напрацювання, так і після відновлювального термічного оброблення, наведено в табл. 4–6.

Труба 1. За результатами оцінки випробувань на розтяг основний метал в стані напрацювання (після тривалої експлуатації 204500 год) за температури випробувань 525 °С показав різке зниження σ_B і σ_T (в середньому в 1,7 рази) в порівнянні з кімнатною температурою (табл. 4.). Проте отримані характеристики міцності і пластичності відповідають вимогам нормативних документів щодо цієї марки сталі. Внаслідок ВТО спостерігається збільшення границі міцності σ_B основного металу за температури 20 °С на 25 %, а умовної границі плинності – майже у два рази; при цьому δ зменшилось на 30 %, а ψ практично не змінилось. За температури 525 °С тенденція до змін механічних характеристик збереглася.

З урахуванням вимог до властивостей металу при оцінці його якості, за якими для легованих сталей відношення межі текучості до границі міцності $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ за кімнатної температури не повинно перевищувати 0,8, можна стверджувати, що це відношення для матеріалу в стані напрацювання за результатами наших досліджень становить 0,55 і відносне видовження після розриву δ знаходиться на рівні 36 %, що майже у два рази перебільшує вимоги [8] (18 %) і [9] (20 %). Після ВТО відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ дорівнює 0,83, а δ – на рівні 23 %. Це є свідченням того, що довготривала дія експлуатаційних факторів (температури, тиску, середовища) не призвела до змін властивостей основного металу трубопроводу. Критеріальна оцінка роботоздатності напрацьованого при високих температурах матеріалу, визначена за відношенням σ_B'/σ_B^{20} [11], показала, що за експериментальними даними $\sigma_B^{525}/\sigma_B^{20}$ становить 0,60, а для матеріалу після ВТО – 0,70. Це практично не дуже відрізняється від значень, що можна отримати для матеріалу труб в стані постачання (вихідний стан) за нормативними даними, по яких цей показник становить 0,60. Таким чином, одержані дані показують високу

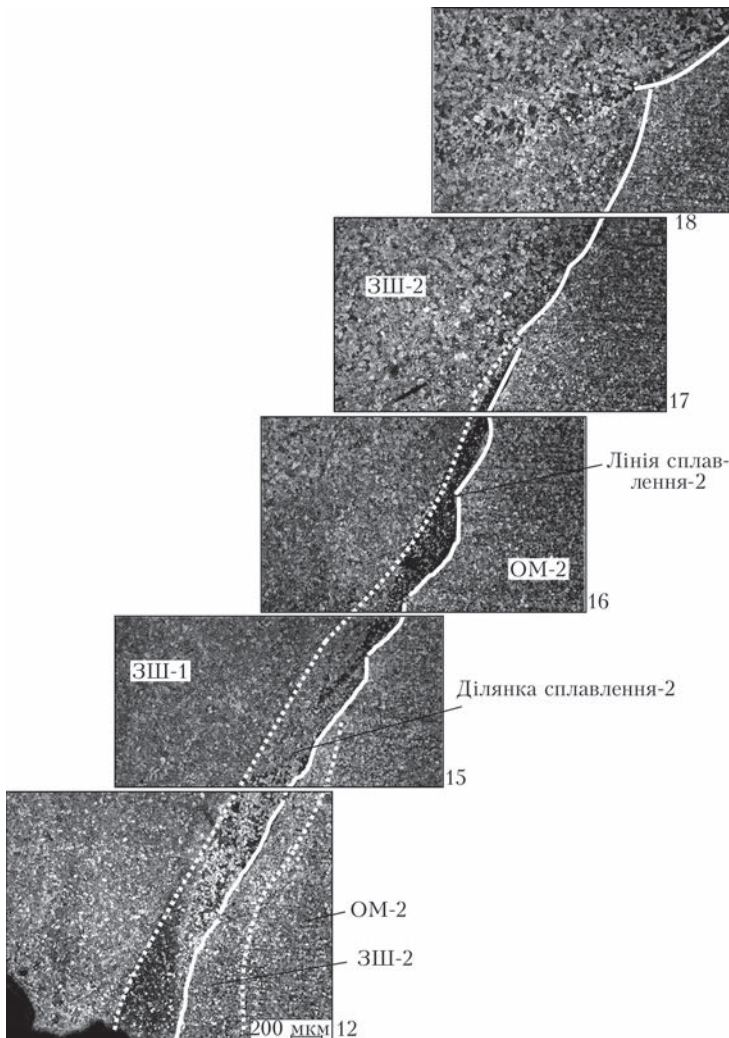


Рис. 5. Панорама мікροструктури зварного з'єднання уздовж лінії сплавлення в стані напрацювання 204500 год згідно схеми рис. 2 а

Таблиця 5. Механічні характеристики зварного з'єднання труб з напрацюванням/після ВТО

Температура випробувань, °С	Границя міцності σ_B , МПа	Границя текучості $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне видовження δ , %	Відносне звуження ψ , %
Труба 1 з напрацюванням 204500 год				
20	510,9/613,6	260,0/520,0	24,7/24,5	68,8/73,9
525	319,3/479,4	211,4/391,0	23,6/19,2	68,1/73,2
Труба 2 з напрацюванням 245800 годин				
20	498,0/624	264,0/526	24,5/22,2	73,1/77,0
525	313,0/488,0	216,0/398,0	23,5/17,5	73,5/76,6
550	285,0/456,0	206,0/383,0	22,7/18,4	75,4/81,7

роботоздатність металу труб і відсутність впливу тривалої експлуатації на механічні властивості,

що також підтверджується даними металографічних досліджень, за якими зміни мікроструктури не спостерігаються. Критерії водневостійкості матеріалу трубопроводу, оцінені за відношеннями $\sigma_B^{вод} / \sigma_B^{то}$ і $\psi^{вод} / \psi^{то}$, які дорівнюють 0,8 і 0,99 відповідно, свідчать про відсутність ознак водневої крихкості металу після тривалого напруження в умовах експлуатації.

Зварні з'єднання в цілому рівномірні основному металу при температурі 20 і 525 °С (табл. 5). Після ВТО спостерігається така сама тенденція змін механічних характеристик, що і для основного металу. Так, σ_B збільшується на 20 %, $\sigma_{0,2}$ – у два рази, ψ – на 7 %. Таким чином, отримані результати підтверджують позитивну критеріальну оцінку водневостійкості дослідженого матеріалу.

Результати випробування на ударний згин за температури –20, 20 і 525 °С надані в табл. 6. Основний метал труби в стані напруження має високі показники ударної в'язкості, середня величина яких становить за температури 20 °С 141 Дж/см², а за 525 °С – 233,5 Дж/см². За температури –20 °С значення *KCV* наближаються до нормованих величин. Між тим ВТО привело до значного збільшення *KCV* в умовах випробувань –20 і 20 °С (в 4,5 і 1,7 рази відповідно), проте при 525 °С ударна в'язкість знижується в 1,7 рази. Слід зазначити, що отримані показники ударної в'язкості основного металу повністю відповідають вимогам нормативних документів щодо сталі цієї марки [9]. У свою чергу при випробуванні зварного шва за температур –20 і 20 °С отримані незадовільні результати. Так, у серії випробувань за –20 °С отримано мінімальну величину *KCV*, а саме 5,0 Дж/см², і це майже у 6 разів нижче критеріального

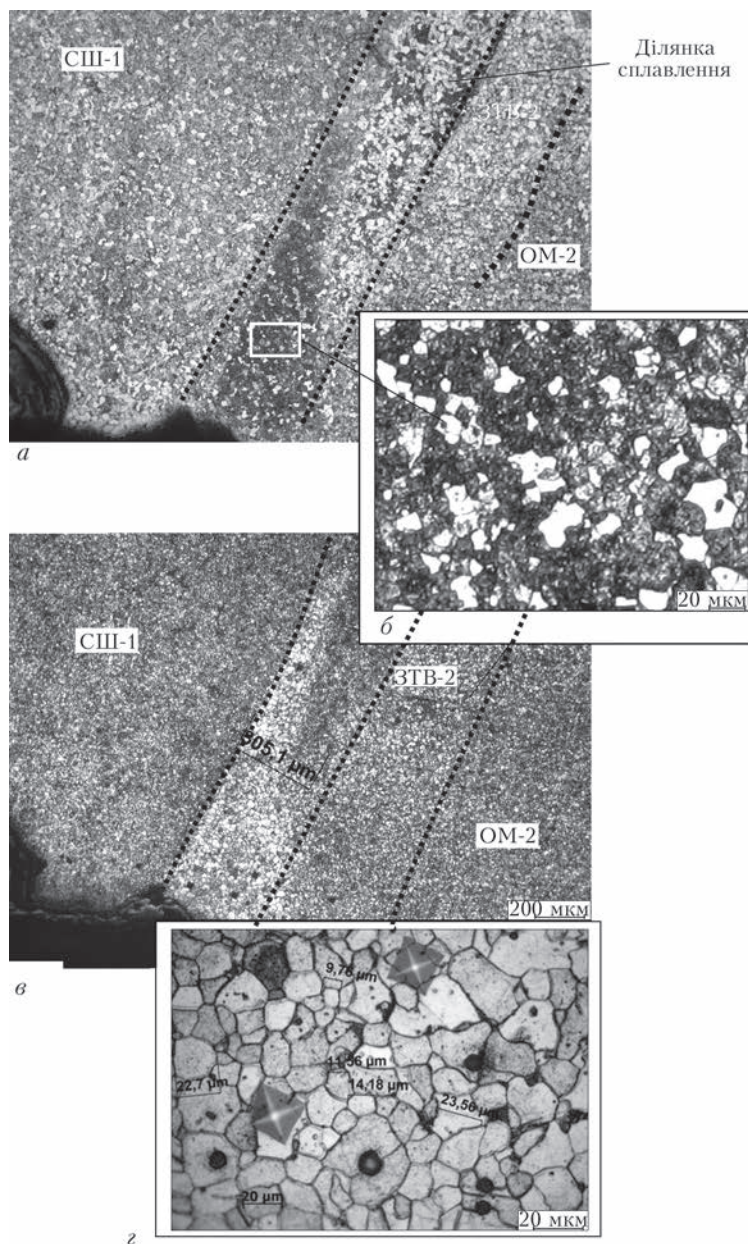


Рис. 6. Фрагменти ділянки сплавлення і зони термічного впливу (ЗТВ-2): а, б – в стані напруження 204500 год; в, г – після ВТО

Таблиця 6. Результати випробувань на ударний згин зразків труб з напруженням/після ВТО

Температура випробувань, °С	Ударна в'язкість <i>KCV</i> , Дж/см ²	
	Основний метал	Зварне з'єднання
Труба 1 з напруженням 204500 год		
–20	52,0/242,0	19,5/72,4
20	141,0/240,8	42,1/126,0
525	233,0/140,5	188,5/157,4
Труба 2 з напруженням 245800 годин		
–20	48,0/247,0	21,4/69,5
20	105,0/274,0	25,9/169,5
525	311,0/202,3	184,3/172,7
550	297,7/271,0	202,7/150,7

Примітки. 1. Для основного металу за нормами ТУ 14-3-517-79 [9] для сталі 1Х2М1 величина *KCU* не менше 98 Дж/см². 2. За нормами [12]: при 20 °С мінімальні значення *KCU* і *KCV* становлять 50 і 35 Дж/см² відповідно.

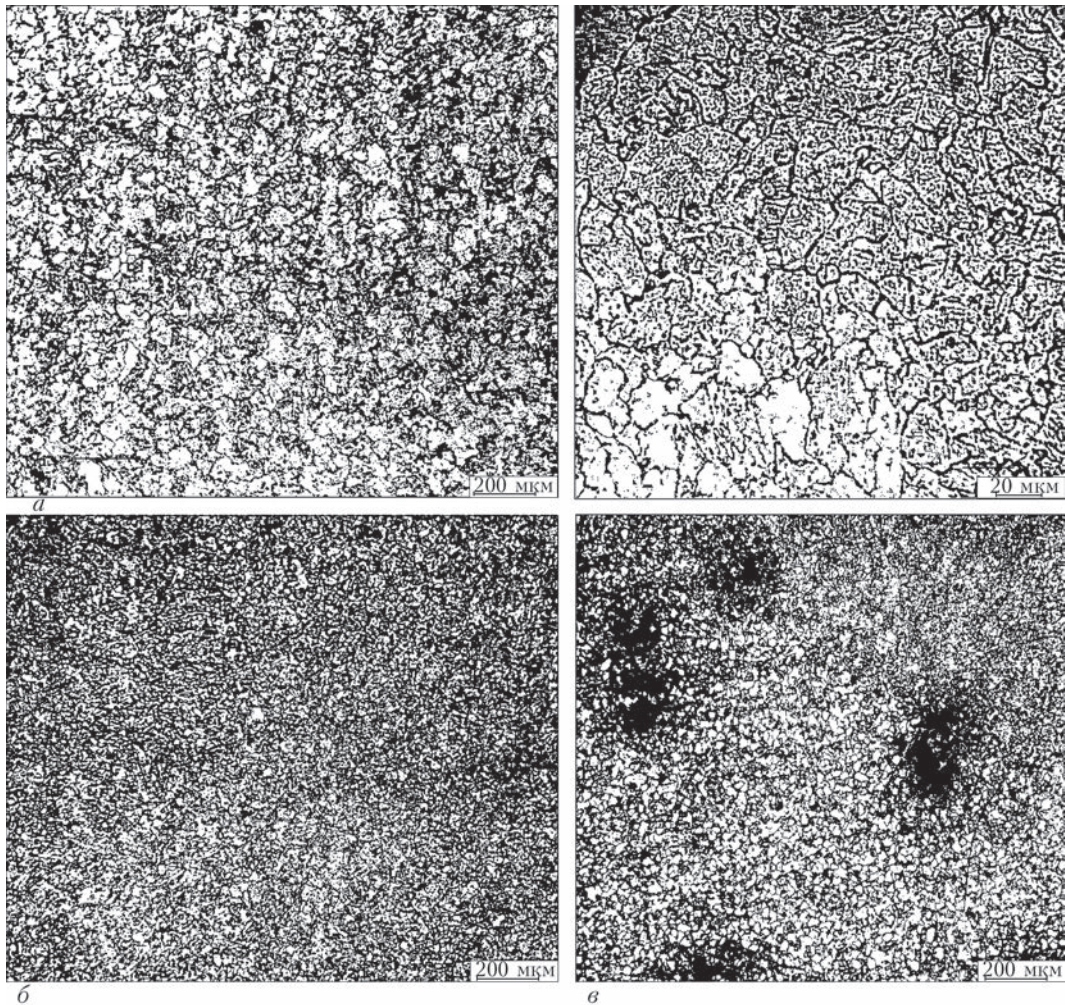


Рис. 7. Мікроструктура основного металу трубопроводу в стані напрацювання 245800 год – *a*; після ВТО: з боку зовнішньої поверхні труби – *б*; у внутрішній поверхні труби – *в*

значення за НПАОП 0.00-1.59-87 [11] (30 Дж/см²). При випробуваннях за 20 °С мінімальне значення *KCV* становить 31,3 Дж/см², що в 1,6 рази нижче нормованої величини (50 Дж/см²) [12]. Слід зазначити, що за робочої температури 525 °С показники ударної в'язкості мають високі значення у межах 177,2...193,5 Дж/см². ВТО привело до суттєвого підвищення ударної в'язкості при 20 °С (із 42,1 до 126,5 Дж/см²). У той же час за температури 525 °С ударна в'язкість дещо знизилась (на 16 %), проте в цілому вона значно перебільшує нормовані величини для досліджуваної марки сталі.

Труба 2. Випробування зразків основного металу і зварних з'єднань труби у стані напрацювання (після тривалої експлуатації 245800 год) і після ВТО проводили за температур 20 і 525 °С з використанням не менше п'яти зразків на кожну температуру. Додатково з метою визначення резерву роботоздатності матеріалу, температура випробування була збільшена на 25 °С відповідно до робочої і становила 550 °С. Результати випробування на розтяг надано в табл. 5. Для матеріалу в стані напрацювання після тривалої експлуатації за температури випробувань 525 °С спостерігається

різке зниження σ_b і σ_T основного металу (в середньому в 1,6 рази) в порівнянні з кімнатною температурою; при цьому характеристики пластичності практично не змінюються. Між тим, для зварних з'єднань при температурі 525 °С зменшення границі міцності відбувається лише на 37 %, а границі плинності – на 18 %; характеристики пластичності, як і в основному металі, також мають сталі значення. В цілому зварні з'єднання рівномірні основному металу при температурі 20 °С, а за температури 525 °С границя плинності зварних з'єднань перевищує таку основного металу в середньому на 15 %, проте відносне видовження δ зменшується майже на 25 %; при цьому значення σ_b і ψ для основного металу і зварних з'єднань практично співпадають. Подібні переміни відбуваються і за температури 550 °С.

Відновлювальне термічне оброблення привело до підвищення границі міцності σ_b основного металу за температури 20 °С на 30 %, а умовної границі плинності – майже у два рази; при цьому δ знизилось на 30 %, а ψ практично не змінилось. За температури 525 °С і 550 °С спостерігається подальше збільшення σ_b до 60 % відносно своїх

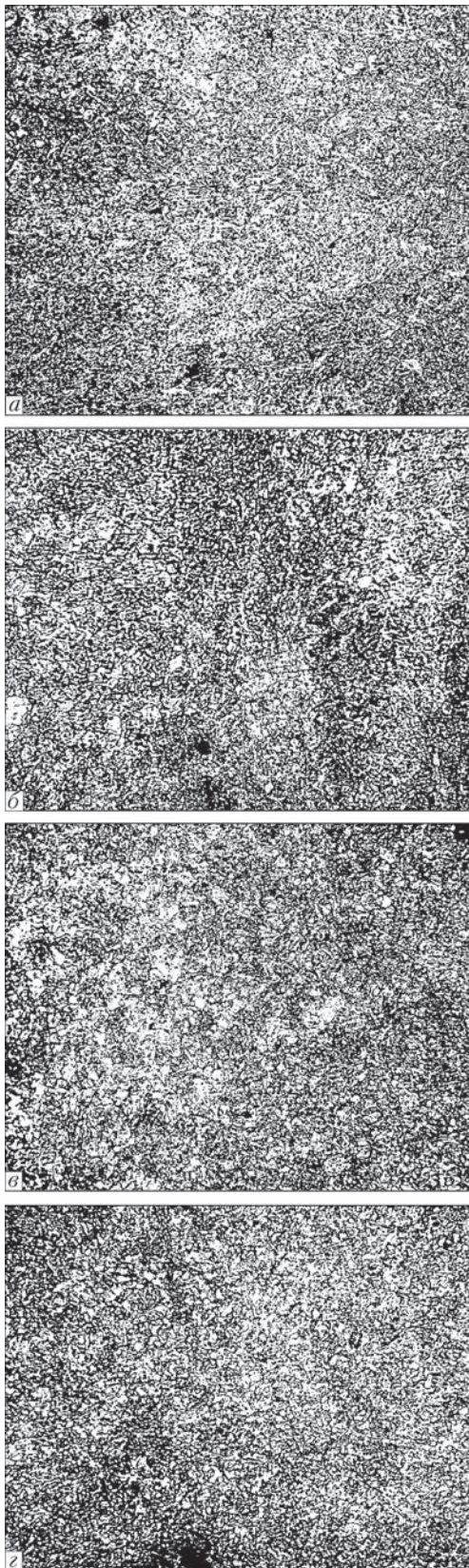


Рис. 8. Мікроструктура ($\times 100$) металу зварного шва трубопроводу в стані напрацювання 245800 год (а) і після ВТО: б – вершина шва; в – центральна частина шва; г – корінь шва значень у стані напрацювання; переміни інших механічних характеристик відбуваються подібно до таких за 20 °С. Для зварних з'єднань після ВТО спостерігається така сама тенденція змін ме-

ханічних характеристик, що і для основного металу. Так, за 20 °С σ_B підвищується на 25 %, σ_T – у два рази, а δ зменшується на 9 %; за 525 °С σ_B і σ_T збільшуються в середньому на 50 %, δ вже знижується на 25 %. За температури 550 °С σ_B підвищується на 60 %, σ_T – в 1,9 рази, а δ зменшується на 19 %, при цьому ψ збільшується на 8 %.

З урахуванням вимог до властивостей металу при оцінці його якості [11], по яких для легованих сталей відношення границі плинності до границі міцності $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ за кімнатної температури не повинно перевищувати 0,8, можна констатувати, що це відношення для матеріалу в стані напрацювання за результатами наших досліджень становить 0,55 і відносно видовження після розриву δ знаходиться на високому рівні – 33 %, що майже в два рази перебільшує вимоги стандарту [12] (16 %). Після ВТО відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ дорівнює 0,83, а δ становить 23 %. Це є свідченням того, що довготривала дія експлуатаційних факторів (температури, тиску, середовища) не призвела до змін властивостей основного металу трубопроводу.

Критеріальна оцінка роботоздатності напрацьованого при високих температурах матеріалу по відношенню σ_B'/σ_B^{20} [4] показала, що за експериментальними даними $\sigma_B^{525}/\sigma_B^{20}$ і $\sigma_B^{550}/\sigma_B^{20}$ становить 0,60 і 0,94 відповідно, а для матеріалу після ВТО (див. табл. 3–6) – 0,74. Таким чином, отримані дані свідчать про високу працездатність металу труб і відсутність впливу тривалої експлуатації на механічні властивості, що також підтверджується даними металографічних досліджень, за якими зміни мікроструктури не спостерігаються.

Критерії водневостійкості матеріалу трубопроводу, оцінені за відношеннями $\sigma_B^{вод}/\sigma_B^{то}$ і $\psi^{вод}/\psi^{то}$, які дорівнюють 0,77 і 0,92 відповідно, свідчать про відсутність ознак водневої крихкості металу після тривалого напрацювання в умовах експлуатації.

Результати оцінки ударної в'язкості KCV основного металу і зварних з'єднань надані у табл. 6. Випробування проводили за температурами –20, 20, 525 та 550 °С з використанням не менше п'яти зразків на кожну температуру. Отримані при цьому дані показали, що основний метал труби в стані напрацювання мав мінімальні значення ударної в'язкості при –20 °С, які становили 36 Дж/см² (при середніх значеннях 48,0 Дж/см²). За 20 °С мінімальне значення KCV складало 84 Дж/см²; між тим за робочими температурами 525 і 550 °С показники ударної в'язкості знаходилися на достатньо високому рівні 311 і 297 Дж/см² відповідно. Слід зазначити, що за вимогами ПНАЭ Г-7-002-86 [13] критеріальні значення ударної в'язкості для матеріалу, границя плинності якого за температури 20 °С має значення до 304 МПа включно, становлять 29 Дж/см², а за вимогами РД 10-577-03 [12] мають бути не менше 25 Дж/см². Метал зварних з'єднань за температури

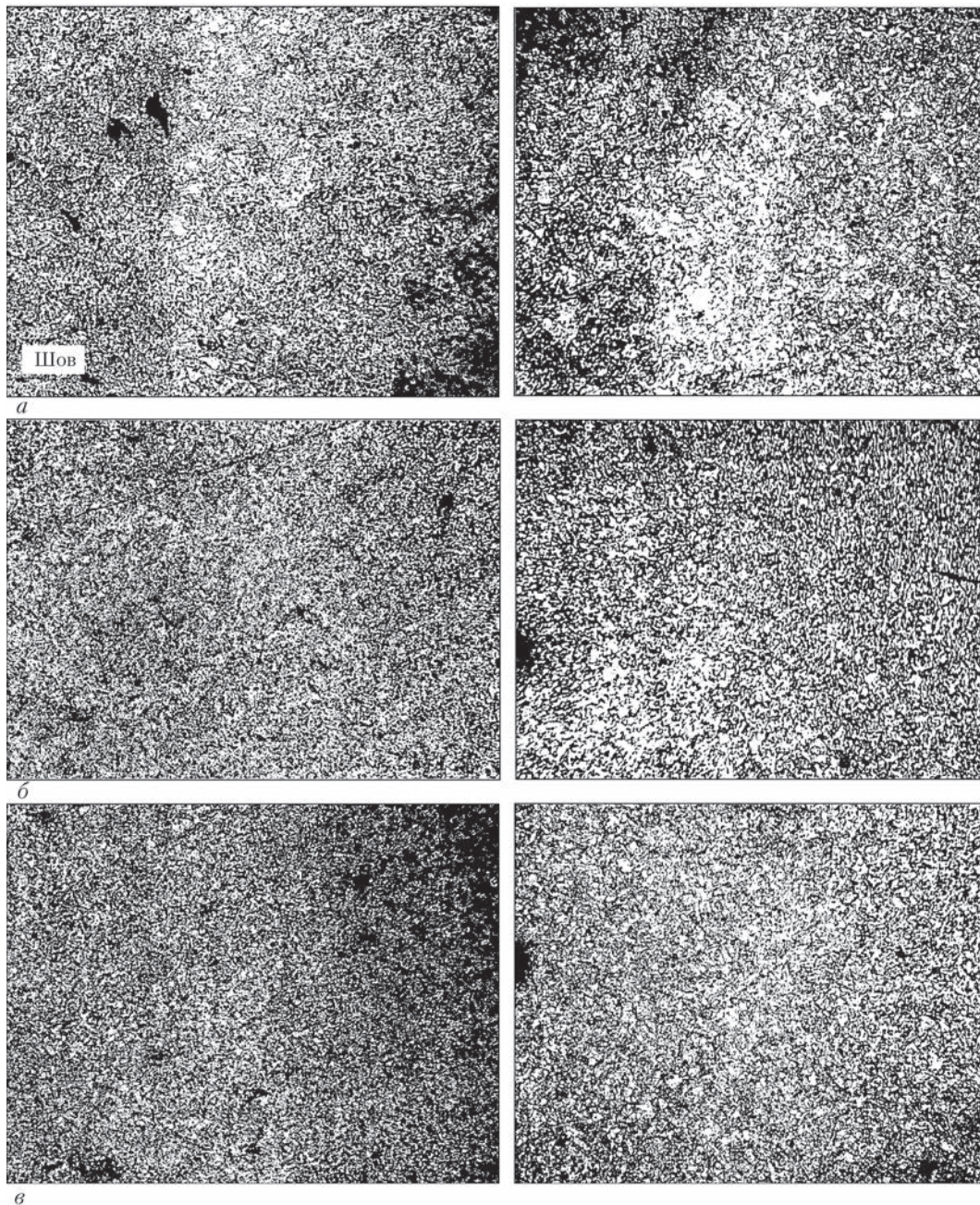


Рис. 9. Порівняльні фрагменти зміни мікроструктури ($\times 100$) ЗТВ зварного шва трубопроводу в стані напрацювання 245800 год і після ВТО: *a* – шов з ділянками неповного розплавлення і перегріву; *б* – ділянка нормалізації; *в* – ділянка неповної перекристалізації,

20 °С показав незадовільні результати: мінімальна величина *KCV*, що дорівнювала 12,8 Дж/см², майже в 2,5 рази нижча за критеріальне значення згідно з НПАОП 0.00-1.59-87 [12] (35 Дж/см²). Таку саму мінімальну величину *KCV* отримано і при –20 °С (за вимогами [12] вона має бути не менше 20 Дж/см²). Між тим, за температур 525 і 550 °С отримали високі показники ударної в'язкості, які становили 184 і 203 Дж/см² відповідно.

Особливий ефект відновлювального термічного оброблення проявився на показниках ударної в'язкості, на що вказує суттєве підвищення *KCV* як основного металу, так і металу шва за температур –20 і 20 °С. Так, мінімальні значення *KCV* ос-

новного металу збільшилися у 6 разів при –20 °С і у 3 рази при 20 °С, а зварного шва – у 4 рази і у 13 разів відповідно. У той же час за робочих температур (525 і 550 °С) показники ударної в'язкості дещо зменшилися в порівнянні з вихідним станом, але в усякому разі вони збереглися на високому рівні.

Результати вимірювання твердості основного металу, металу шва і ділянок зварного з'єднання надані в табл. 7. Твердість *HB* основного металу труби в стані напрацювання становить 132, що в цілому відповідає нормованим значенням для сталі 1Х2М1 за нормативним документом [14], ТУ 14-3-517-76 [9] і вимогам [4] для сталі

Таблиця 7. Результати вимірювань твердості зразків труби з напрацюванням 245800 год і після ВТО

Місце вимірів за товщею металу	Напрацювання			Після ВТО		
	Точки	Твердість		Точки	Твердість	
		HRB	HB		HRB	HB
Центр шва	0-1	84,0	156,0	0-1	100,0	229,0
	0-2	82,0	149,0	0-2	101,0	235,0
	0-3	83,5	154,0	0-3	101,0	235,0
	0-4	81,0	146,0	0-4	101,0	235,0
Середнє значення		82,6	151,3		100,8	233,5
Зона сплавлення	5-1	83,0	152,0	5-1	98,0	217,0
	5-2	83,0	152,0	5-2	101,0	235,0
	5-3	96,5	209,0	5-3	101,0	235,0
	5-4	81,0	146,0	5-4	97,4	214,0
Середнє значення		85,9	164,8		99,4	225,3
ЗТВ	6-1	83,0	152,0	7-1	99,0	223,0
	6-2	81,0	146,0	7-2	99,5	237,0
	6-3	82,0	149,0	7-3	100,0	229,0
	6-4	82,0	149,0	7-4	98,0	217,0
Середнє значення		82,0	149,0		99,1	226,5
Основний метал	8-1	76,0	131,0	9-1	99,0	223,0
	8-2	77,5	135,5	9-2	99,4	225,4
	8-3	77,5	135,5	9-3	99,2	224,2
	8-4	74,0	126,0	9-4	98,0	217,0
Середнє значення		76,3	132,0		98,9	222,4

Примітки: 1. За вимогою [14]: для основного металу сталі 1X2M1 допустимі межі твердості HB 161...227, для металу шва і ЗТВ – не більше 240.
2. За даними [8] для сталі марки 10CrMo9.10 твердість HB в межах 130...175.
3. За вимогами ТУ 14-3-517-76 [9] твердість HB металу труби із сталі 1X2M1 в межах 227...131.

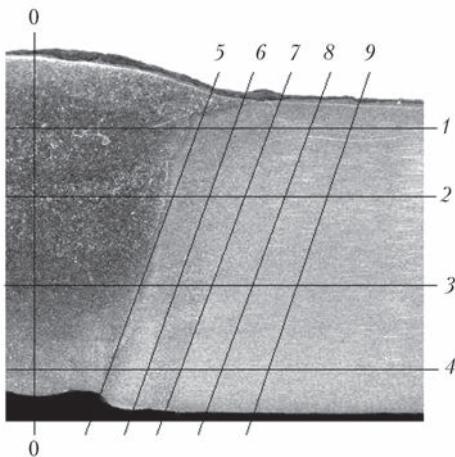


Рис. 10. Схема вимірювання твердості металу

10CrMo9.10. Середні значення твердості металу шва і ЗТВ також знаходяться в межах нормованих. ВТО призвело до підвищення твердості основного металу і металу ЗТВ (в середньому на 70 %), а також металу шва (на 50 %). Таким чином, усі отримані показники твердості знаходяться в межах нормованих стандартами значень, а їх збільшення після ВТО вказують на резерв роботоздатності металу.

Висновки

Довготривале напрацювання сталі 10CrMo9.10 (DIN 17176) в конструкції трубопроводів реакторного блоку установок каталітичного риформінгу ЛГ-35-11/300 не призвело до змін структури і деградації механічних властивостей металу за термін служби 204500 і 245800 год в умовах дії водневовміс-

ного середовища високих параметрів. У той же час ініціюються процеси водневої корозії зварних швів, які проявляються у різкому зниженні ударної в'язкості, що призводить до зміщення критичної температури крихкості в область позитивних температур.

Незважаючи на те, що основний метал досліджених трубопроводів 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 регламентних режимів) внаслідок високого рівня в'язких властивостей матеріалу і механічних характеристик небезпека руйнування за робочими температурами (від 525 до 550 °С) відсутня.

Список літератури

1. Арчаков Ю. И. (1985) *Водородная коррозия стали*. Москва, Металлургия.
2. Шрейбер Г. К., Перлин С. М., Шебрюев Б. Ф. (1969) *Конструкционные материалы в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности*. Москва, Машиностроение.
3. Средин В. В., Тарасенков П. М. (1963) *Оборудование и трубопроводы установок каталитического риформинга и гидроочистки*. Ленинград, Гостоптехиздат.
4. Антикайн П. А. (1990) *Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов*. Москва, Энергоатомиздат.
5. (2010) НПАОП 0.00-6.09-10 *Порядок проведения осмотра, випробування та експертного обстеження обладнання*

- установок гідрогенізаційних процесів у нафтопереробному, нафтохімічному і хімічному виробництвах.
6. (2001) ДСТУ 4046-2001 *Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних і хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги.*
 7. Ланская К. А. (1980) *Теплоустойчивые стали. Итоги науки и техники. Серия металловедения и термическая обработка.* Москва, ВИНТИ, Т. 14, сс. 54–99.
 8. Wegst C. W. (1995) *Verlag Stahlschlüssel GmbH, Dusseldorf.*
 9. (1976) ТУ 14-3-517-76 *Трубы бесшовные горячекатаные из стали марки 1Х2М1. Технические условия.*
 10. (1975) ГОСТ 9467-75 *Электроды покрытые металлическими для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы.*
 11. (2003) РД 10-577-03 *Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций.*
 12. (1989) НПАОП 0.00-1.59-87 *Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.* Москва, Недра.
 13. (1989) ПНАЭ Г-7-002-86 *Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.* Москва, Энергоатомиздат.
 14. (1977) ИТН-77 *Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковке оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (нормат. док.).* Волгоград, Волгоградская правда.

References

1. Archakov, Yu.I. (1985) *Hydrogen corrosion of steel.* Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Shrejber, G.K., Perlin, S.M., Shebryaev, B.F. (1969) *Structural materials in oil, petrochemical and gas industry.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Sredin, V.V., Tarasenkov, P.M. (1963) *Equipment and piping of catalytic reforming and hydrofining.* Leningrad, Gostoptekhizdat [in Russian].
4. Antikajin, P.A. (1990) *Metals and strength calculation of boilers and piping.* Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
5. (2010) НПАОП 0.00-6.09.10: *Procedure of inspection, testing and expert examination of equipment of hydrogenation process units in oil-refining, petrochemical and chemical industry* [in Ukrainian].
6. (2001) ДСТУ 4046-2001: *Technological equipment of oil-refining, petrochemical and chemical industry. Technical diagnostics. General technical requirements* [in Ukrainian].
7. Lanskaya, K.A. (1980) *Heat-resistant steels. Results of science and technique. Seriya Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka.* Moscow, VINITI, Vol.14, 54-99 [in Russian].
8. Wegst, C.W. (1995) *Verlag Stahlschlüssel GmbH, Dusseldorf.*
9. (1976) ТУ 14-3-517-76: *Seamless hot-rolled pipes from 1Kh2M1 grade steel. Technical requirements* [in Russian].
10. (1975) ГОСТ 9467-75: *Metal coated electrodes for manual arc welding of structural and heat-resistant steels. Types* [in Russian].
11. (2003) РД 10-577-03: *Standard instruction on control of metal and prolongation of service life of main components of boilers, turbines and piping of thermal power stations* [in Russian].

12. (1989) НПАОП 0.00-1.59-87: *Regulations of construction and safety service of pressure vessels.* Moscow, Nedra [in Russian].
13. (1989) ПНАЭ Г-7-002-86: *Regulations and norms in nuclear power plants. Norms of strength calculation of equipment and piping of nuclear power plants.* Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
14. (1977) ИТН-77: *Instruction on engineering supervision, methods of inspection examination and decommissioning of equipment of oil-refining and petrochemical industry* (stand. doc.). Volgograd, Volgogradskaya Pravda [in Russian].

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ РАБОЧЕЙ СРЕДЕ

С. З. СТАСЮК

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко
НАН Украины. 01014, г. Киев, ул. Тимирязевская, 2.
E-mail: stasiuk-ipp@list.ru

Рассмотрены методические подходы к экспертной оценке технического состояния технологических трубопроводов, транспортирующих горючие пожароопасные среды, содержащие от 60 до 90 % об. водорода в смеси с жидкими или парообразными углеводами, сероводородом и другими компонентами. Библиогр. 14, табл. 7, рис. 10.

Ключевые слова: технологические трубопроводы, каталитический риформинг, водородная коррозия, металлографические исследования, механические испытания, механические свойства, ресурс безопасной эксплуатации

MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF PROCESS PIPING AT LONG-TERM OPERATION IN HYDROGEN-CONTAINING WORKING MEDIUM

S. Z. STASYUK

G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, 2 Timiryazevskaya str., 01014, Kyiv, Ukraine
E-mail: stasiuk-ipp@list.ru

The paper deals with procedural approaches to expert evaluation of the technical condition of process piping, transporting flammable and explosive media that contain from 60 up to 90 vol. % hydrogen in a mixture with liquid or vaporous carbohydrates, hydrogen sulphide and other components. 14 References, 7 Tables, 9 Figures.

Keywords: process piping, catalytic reforming, hydrogen corrosion, mechanical testing, mechanical properties, safe service life

Надійшла до редакції
23.02.2018



Национальная академия наук Украины | Институт электросварки им. Е.О.Патона НАНУ
Международная Ассоциация «Сварка»



IX Международная конференция
«Математическое моделирование и информационные технологии
в сварке и родственных процессах»

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины
Одесса, Украина, Аркадия, отель «Курортный»

10–14 сентября 2018

<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2018>