

УДК 621.791:669

¹Ю. І. Парайко, канд. техн. наук, доц.,

²В. Д. Макаренко, д-р техн. наук, проф.,

³К. А. Муравйов, канд. техн. наук, доц.

МЕТОДИ ОЦІНКИ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ЗВАРНИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

²Національний університет біоресурсів і природокористування України

³Сургутський інститут нафти і газу (Російська федерація)

В статті приведені відомості про результати досліджень, присвячених пошуку методів оцінки тріщиностійкості зварних металевих конструкцій.

Стан проблеми. Щорічно під час спорудження трубопроводів на території України зварюються десятки тисяч стиків. Як відомо, аварії під час експлуатації трубопроводів через руйнування монтажних зварних стиків займають друге місце після аварій, спричинених корозією.

Незважаючи на загальний прогрес зварювального виробництва, ще є випадки браку у зварюванні, зокрема у зварних з'єднаннях зустрічаються такі дефекти: непровари, шлакові включення, тріщини і пори.

У процесі виготовлення труб і спорудження трубопроводів використовуються такі види зварювання: ручне електродугове покритими електродами; під флюсом; у середовищі захисних газів; порошковим дротом; електроконтактне.

Зварні з'єднання мають задовольняти дві основні вимоги:

1. Відсутність внутрішніх дефектів, здебільшого тріщин, довжина яких перевищує критичну, що залежить від розрахункових характеристик трубопроводу (діаметр, робочий тиск) і в'язкопластичних властивостей матеріалу;

2. Відсутність у металі осередків зародження тріщин типу розшарувань і т. д. За наявності допустимих чинними нормами концентраторів напружень (непровари, пори, шлакові включення) метал повинен мати відповідні характеристики в'язкості. Чутливість трубних сталей до термічного циклу зварювання, тобто схильність до тріщиноутворення, зростає з підвищенням їх міцності. Тому для

забезпечення працездатності кільцевих зварних швів, особливо у трубах, призначених для виготовлення нафтопроводів, слід обмежувати верхнє значення границі міцності трубних сталей і прагнути до можливо меншого інтервалу розкиду по межі міцності.

Повздовжній зварний шов – найімовірніше джерело дефектів, і тріщина, що в ньому утворилася, легко набуває критичної довжини, яка спричинить початок руйнування.

Ударна в'язкість зварного шва унормовується [1] на зразках типу Менаже до температур мінус 10 і мінус 60 °С (для північного виконання). Найбільші напруження на метал труб діють під час роботи і випробування трубопроводу. Саме в ці періоди можливі лавинні руйнування. Тому в'язкість основного металу, заводських зварних швів і металу зони термічного впливу (ЗТВ) необхідно контролювати при робочих температурах на зразках типу Шарпі і визначати, використовуючи рівняння лінійної механіки руйнування. Нормування ударної в'язкості при низьких температурах спорудження (мінус 40°С) на зразках типу Менаже має забезпечувати стійкість сталі труб до виникнення тріщин під час транспортування і зберігання труб. При виборі методики випробувань слід виходити з основного положення: метал тіла труби має чинити опір поширенню тріщини, а метал ЗТВ і зварного шва – виникненню тріщин.

В'язкопластичні властивості зварного з'єднання не є єдиним критерієм його працездатності; необхідно враховувати й неоднорідність механічних властивостей різних зон з'єднання. Зокрема, в'язкість ЗТВ залежить від хімічного складу і структури основного металу, меншою мірою від хімічного складу присадного матеріалу, технології та параметрів зварювання, умов випробування.

Дуже небезпечні вертикальні тріщини в ЗТВ можуть спричинюватися дефектами на краях листів під час зварювання труб – розшаруваннями і включеннями силікатів, оксидів алюмінію, сульфідів марганцю, розташованими паралельно до поверхні листа. Ці дефекти не виявляються рентгенівським методом, а фіксуються під час ультразвукової дефектоскопії краю листа.

Повздовжній (заводський) зварний шов визначає працездатність труб як з точки зору в'язкості, так і внаслідок підвищеної концентрації напружень через наявність пор, включень, непроварів, тріщин.

Для трубопроводів характерні два типи навантажень: стати-

чне (однократне) і малоциклове (повторно-статичне). Умовно число циклів приймається таким, що дорівнює $5 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$. Руйнування під час малоциклового навантаження починається в зонах концентрації напружень з утворенням тріщин утомленості. Руйнування від утомленості, звичайно, відбувається при знижених напруженнях порівняно зі статичним, особливо у разі використання сталі, розкисненої FeMn і FeSi. Дослідження зразків труб 217×6 мм довжиною 0,5 м зі сталі 20 при пульсуючому (число циклів $5 \cdot 10^3 - 9 \cdot 10^3$) навантаженні водою показали, що руйнівні колові напруження корпусу труби становили близько 80 % таких при статичному навантаженні. Руйнування під час малоциклового навантаження відбувається уздовж лінії розташування дефектів (по зварних швах труб і в пришовній зоні). При цьому особливо часто може проявлятися більша чутливість сталі труб до концентрації напружень і виникнення зварювальних (холодних і гарячих) тріщин, що слід враховувати, вибираючи сталь для виготовлення труб нафтопроводів. Тому важливим є прогнозування можливості виникнення тріщин у зварних швах, зокрема аналітичними методами.

Визначення еквівалентного вмісту вуглецю. Для сталей з границею міцності 600 МПа досягнуто добру кореляцію між загартованістю при зварюванні, що характеризується еквівалентним вмістом вуглецю:

$$C_{екв} = C + \frac{M_n}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (1)$$

і схильністю сталі до тріщиноутворення [2].

Ця формула рекомендується для оцінювання чутливості сталей з таким рівнем міцності до утворення холодних тріщин, що виникають при температурі нижче ніж 200°C , особливо коли для зварювання у польових умовах використовуються целюлозні електроди з підвищеним вмістом водню.

При вищому рівні міцності сталей з низьким вмістом вуглецю для оцінювання їх схильності до холодних тріщин під час зварювання необхідно враховувати не тільки еквівалент по вуглецю, а й вміст водню в металі ЗТВ, а також жорсткість з'єднання. Водневе розтріскування залежить і від морфології включень у сталі, що також не відбивається в параметрі $C_{екв}$.

Канадський стандарт CSAZ 184 [2] визначає чотири класи

трубних сталей згідно з еквівалентом вуглецю (до 0,41; 0,41–0,44; 0,44–0,47; 0,47–0,5), що обчислюється за формулою (1). Ця формула не використовується для сталей, що дисперсійно твердіють, а вплив Mn, Nb і V компенсується зниженим вмістом вуглецю. Для металу зварного шва таких сталей запропоновано формулу

$$C_{екв} = C + \frac{Si}{7} + \frac{Mn + Mo}{5}; \quad (2)$$

Існують й інші вирази для еквівалента вуглецю. Для порівнюваного розрахунку еквівалента по вуглецю сталей типу X52-X65 і сталей типу X70 найприйнятнішим є вираз:

$$C_{екв} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni + Cu}{40} + \frac{Cr}{20} + \frac{V}{10} + \frac{Mo}{50} \quad (3)$$

Оцінка міцності зварних з'єднань. Після зварювання в зоні зварного з'єднання виникають залишкові напруження. В спіралешовних трубах, де стиковий шов рулонної смуги перетинається зі спіральним, границя витривалості зварного з'єднання може бути нижче, ніж аналогічний показник спірального шва. Термічна обробка (нормалізація) зменшує несприятливий вплив. Міцність від утомленості зварного з'єднання залежить і від стану поверхні труби. Нанесення захисного покриття на поверхню трубопроводу дає можливість усунути концентратори напружень, і покриття повинно мати високу характеристику адгезії до сталі, пластичність і міцність, не руйнуватися раніше сталі. На практиці для підвищення границі витривалості матеріалу використовують покриття з епоксидних і поліефірних смол з наповнювачами.

Корозійне середовище при малоциклового навантаженні помітно впливає на зниження конструктивної міцності зварних з'єднань труб (корозійна втома). При корозійній утомі, на відміну від механічної, відсутня горизонтальна ділянка на кривій втоми і визначається границя втоми на базі заданого числа циклів. Дослідження показують, що зниження міцності від утомленості при корозійному впливі тим різкіше, чим міцніша сталь. Це не стосується методів поверхневого зміцнення за рахунок залишкових стискувальних напружень (наклеп, цементация, азотування і т. д.), які підвищують корозійно-утомну міцність.

Під час розрахунку конструктивної міцності трубопроводу, особливо нафтопроводу, тобто при визначенні допустимих напру-

жень, необхідно також враховувати частоту навантажень. З пониженням частоти до деякого рівня збільшується час дії корозії в межах циклу навантаження, що може призвести до більшого корозійного розтріскування за однієї і тієї самої бази циклів.

У нормативно-технічній документації працездатність зварних труб оцінюється, зважаючи на умови однакової міцності з основним металом і визначених значень ударної в'язкості металу зварного шва і ЗТВ. Як вітчизняні, так і зарубіжні розробки показують, що цього недостатньо для забезпечення надійності трубопроводів при розрахунковому терміні їх експлуатації до 50 років. Необхідно обґрунтувати додаткові вимоги, що враховують вплив характеру навантаження і середовища, яке транспортується, на міцність від утомленості і тріщиностійкість зварних з'єднань промислових трубопроводів.

В умовах експлуатації трубопроводного транспорту, що склалися, важливим завданням є розроблення плану поетапної реконструкції лінійної частини трубопроводів для підвищення її надійності та експлуатаційної довговічності. Плани реконструкції її черговості ремонту тих чи інших ділянок мають формуватися тільки після детального діагностування лінійної частини і визначення ресурсу трубопроводів. Внутрішньотрубне діагностування виконується з використанням сучасних технологій і технічних засобів неруйнівного контролю.

Багаторічні спостереження показують, що в найвищому ступені на працездатність і надійність зварних трубопроводів зі сталі підвищеної міцності, особливо при експлуатації в умовах низьких температур, впливають холодні тріщини, які утворюються, як правило, в ЗТВ зварних з'єднань. Найнебезпечнішим місцем щодо зародження холодних тріщин є кореневий шов.

Про вплив від'ємних температур повітря під час зварювання трубопроводів на збільшення кількості утворених тріщин і пор відомо з багатьох публікацій [3–7]. Підвищення ймовірності утворення тріщин при цьому спричинюється зростанням залишкових напружень і збільшенням вмісту водню в металі.

Отже, узагальнення причин руйнувань зварних трубопроводів дало змогу виділити головну з них – утворення холодних тріщин в ЗТВ у зв'язку з підвищеною схильністю її до крихкого руйнування.

Схильність сталей до утворення холодних тріщин звичайно оцінюють непрямыми методами: еквівалентом вуглецю і

максимальною твердістю в ЗТВ. Вважається, якщо $[HV_{max}] \leq 240 \dots 480$, то холодні тріщини відсутні.

Допустимі значення еквівалента вуглецю основного металу, за яких сталі не схильні до утворення холодних тріщин, становить $C_{екв} < 0,25$; за більших значень $C_{екв}$ сталі потенційно схильні до тріщин у визначених технологічних умовах.

Існує понад десяток виразів $C_{екв}$, що істотно відрізняються тільки коефіцієнтами легуючих елементів, але найчастіше використовують формули (1)–(3).

Між $C_{екв}$ і критичною швидкістю охолодження $W_{кр}$ вище якої максимальна твердість перевищує задані значення, існує емпірична залежність, котру використовують для вибору допустимої швидкості охолодження (рис. 1) [8].

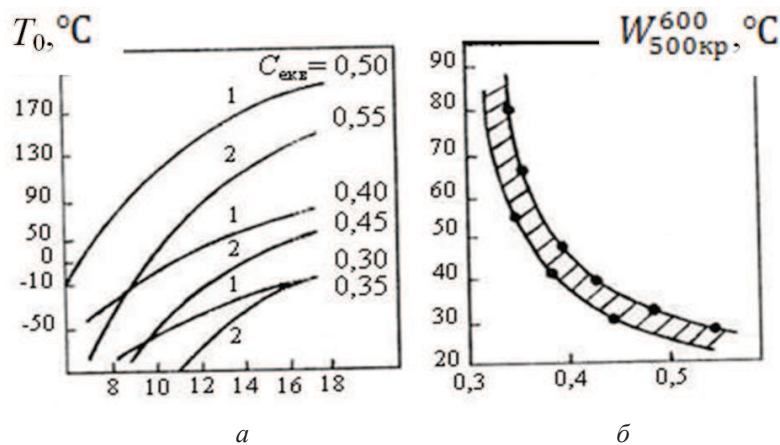


Рис. 1. Залежність мінімально допустимої початкової температури T_0 від товщини металу $\delta(a)$ і еквівалента вуглецю $C_{екв}(b)$: 1 – $q_{пог}=0,65$ МДж/м; 2 – $q_{пог}=1,2$ МДж/м.

Численні статистичні результати випробувань жорстких проб на утворення холодних тріщин дали змогу запропонувати параметри тріщиноутворення P_w і P_c , які за структурою запису є аналогічними еквіваленту вуглецю [6]:

$$P_w = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cr+Cu}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{Ni}{60} + \frac{V}{10} + 5B + \frac{[H]}{60} + \frac{K}{40 \cdot 10^4}; \quad (4)$$

$$P_c + P_{cm} + \frac{\delta}{600} + \frac{[H]}{60}, \quad (5)$$

де P_{cm} – показник, що враховує вплив хімічного складу основного металу; $[H]$ – вміст дифузійного водню в металі шва, мл/100г; K – ступінь жорсткості з’єднання; δ – товщина стінки труби, мм.

$$P_{cm} + C + \frac{Mn}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + \frac{Cu}{10} + 5B; \quad (6)$$

Параметр P_w або P_c є основою для вибору режиму підігріву, що виключає утворення тріщин під час зварювання низьколегованих сталей. Режим підігріву вибирають, регулюючи низькотемпературні параметри термічного циклу зварювання підбором потрібної швидкості охолодження від 300 до 100 °С. Крім того, величину P_c використовують під час розрахунку температури попереднього підігріву T_n (°С), необхідного для запобігання розвитку холодних тріщин. Згідно з роботою [9], $T_n = 1440 P_c - 392$ для випадку $0,25 < P_c < 0,40$ при $q_{\text{пог}} = 1,38$ МДж/м і $T_n = 350 \{1 - \exp[-5(P_c - 0,27)]\}$ при $0,27 < P_c < 0,50$.

Автори досліджень [5; 10] запропонували узагальнювальний параметр тріщиноутворення:

$$P_n = P_{cm} + A \lg[H] + R_{FY} / (40 \cdot 10^4) \quad (7)$$

До цього показника внесено дві істотні зміни параметра P_n :

– перша – замість величини K введено еквівалентний ступінь жорсткості проби Теккена R_{FY} при погонній енергії 1,7 МДж/м

$$R_{FY} = \frac{\alpha k R_F (1 + B_1)}{4(1 + C_1^2)}, \quad (8)$$

де $\alpha = 23,8m$; $m = (0,9 q_{\text{пог}} + 27, 1) \cdot 10^3$; k – коефіцієнт концентрації напружень; R_F – ступінь жорсткості; $j = y / (\delta/2)$ – показник, відбиваючий ексцентричність шва; δ – товщина стінки труби; B і C – коефіцієнти, що враховують зміни концентрації напружень під час Теккен-, TRC- і RRC- випробувань;

– друга – в новому параметрі водень є функцією жорсткості $A = (R_{FY})$. Вплив водню враховується при підвищених рівнях напружень.

За допомогою параметра P_n визначають необхідну температуру підігріву $T_n = 1600 P_n - 408$. Параметр P_n розроблено під час випробування низьколегованих сталей з $\sigma_T = 500 - 700$ МПа для оцінювання утворення холодних тріщин в ЗТВ кореневої частини шва за допомогою жорстких проб.

На сьогодні робляться спроби кореляції критичних умов виникнення тріщин у пробі Теккен і в подібних умовах у пробах інших типів зварних з'єднань.

Експериментальні методи оцінювання опору сталей до утворення холодних тріщин описано в роботах [11; 14]. Найширше використовуються методи кількісного оцінювання, які ґрунтуються на випробуванні зварних зразків на тривале розтягання одразу після зварювання. Критерієм тріщиностійкості є значення мінімальних розтягувальних напружень σ_{pmin} , при якому в зварному з'єднанні починають утворюватися тріщини [11; 12]. Однак сьогодні немає надійних способів оцінювання стійкості зварних трубопроводів до утворення холодних тріщин, тому розроблення аналітичних методів розрахунку тріщиностійкості зварних швів, особливо при експлуатації в умовах низьких температур повітря, має важливе значення.

Висновки. Згідно з аналізом літературних даних і результатів власних досліджень авторів, основною причиною низької тріщиностійкості зварних з'єднань промислових трубопроводів з вуглецевих і низьколегованих сталей, що експлуатуються в умовах низьких температур оточуючого середовища (до мінус 60 °C), є високий вміст водню в наплавленому металі та ЗТВ. Питання активності рухомого водню і його розподіл у різних зонах зварного з'єднання за умови дії на нього мінусових температур вивчено недостатньо, результати отримано на різних зварювальних матеріалах з використанням різних методів і критеріїв оцінки, тому їх важко порівнювати, інколи вони суперечливі й не завжди піддаються логічному аналізу і порівнянню.

Потрібно проводити додаткові експерименти з метою вивчення впливу від'ємних температур на процес дифузії та перерозподілу водню з часом у зварних з'єднаннях монтажних стиків неповоротних трубопроводів. З урахуванням того, що експериментальні методи не дають можливості вимірювати концентрацію водню в різних зонах зварного з'єднання, необхідно розробити експериментально-аналітичні методи розрахунку і оцінювання кінетики дифузії водню зі зварного шва в ЗТВ і його перерозподіл з часом.

Актуальним є також вивчення впливу вмісту водню на зародження і поширення тріщини в зварному трубопроводі. Висловлюються різні точки зору на механізм водневої крихкості сталі й

зварних з'єднань. Однак той факт, що водень, потрапляючи в метал шва і ЗТВ, спричинює його тимчасову крихкість, іноді значну, і що призводить до утворення тріщин, є загальноприйнятим. Тобто, основним способом зменшення водневої крихкості є зниження рівня дифузії рухомого водню в металі шва різними конструкторсько-технологічними способами.

Список літератури

1. СНиП 2.05.06-86. Строительные нормы и правила. Магистральные трубопроводы.— М.: Изд-во стандартов, 1985. Утв. Гос. Ком. СССР по делам стр-ва, 1985.
2. Suzuki H. Cold cracking and its prevention in steel welding // Doc. 11W. — №IX. — 1074. — 78. — P.10
3. Анучкин М.П. Сварка резервуаров и трубопроводов в зимних условиях / М.П. Анучкин // — М.: ВНИИСТ, 1958.— 18 с.
4. Анучкин М. П. Прочность сварных магистральных трубопроводов / М.П. Анучкин // — М.: Гостоптехиздат, 1963.— 196 с.
5. Велков К. Современное состояние проблемы холодных трещин в сварных соединениях // Трещины в сварных соединениях сталей.— Братислава, 1981.—С. 1–32.
6. Ларионов В. П. О критериях оценки склонности к образованию холодных трещин низколегированных сталей при сварке в условиях низких температур / В.П. Ларионов, О.И. Слепцов // Сварка и хрупкое разрушение. — Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1980. —С. 3–9.
7. Ларионов В.П. Природа образования холодных трещин и обеспечение технологической прочности сварных соединений при низких температурах / В.П. Ларионов, О.И. Слепцов. //— Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1983.— С. 40–68.
8. Мазель А.Г. Определение необходимости предварительного прогрева и его температуры при сварке стыков магистральных трубопроводов / А.Г. Мазель, Ж.А. Полуэян, А.С. Рахманов // Строительство трубопроводов.— 1971—№7.—С. 36–37.
9. Влияние подогрева на распределение водорода в сварных соединениях высокопрочной стали / Б.С. Касаткин, В. Ф. Мусияченко, О. Д. Смиян и др. // Автоматическая сварка.— 1977.— № 10.— С. 1–5.
10. Waszhink J.H. Thermal Processes in Covered Electrodes / J.H. Waszhink, M.J. Piena // Weld J. — 1985. — № 10. — С. 1–5.
11. Болотин В.В. Надежность обнаружения трещин и трещиноподобных дефектов / В.В. Болотин // Машиноведение.— 1984.— № 2.— С. 65–70.
12. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под. ред. акад. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение.— 1981.— 767 с.

13. Касаткин Б.С. Низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций / Б.С. Касаткин, В.Ф. Мусияченко //.– К.: Техника.– 1970.– 186с.

14. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей / Э.Л. Макаров //.– М.: Машиностроение.– 1981.– 247с.

Парайко Ю.И., Макаренко В.Д., Муравйов К.А. Методы оценки трещиностойкости сварных металлических конструкций
// Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 57. – С. 66–75.

В статье приведены сведения о результатах исследований, посвящённых поиску методов оценки трещиностойкости сварных металлических конструкций

Рис. 1, список лит.: 14 наим.

Parajko J.I., Makarenko V.L., Muravjov K.A. Methods of welded metall structures crack resistance evaluation

Article gives data about results of investigations devoted to searching for methods of fracture strength evaluation of metal welded structures.

Ключові слова: трубопроводи, тріщиностійкість, залишковий вуглець, сталь, водень, зварні шви, металеві конструкції.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2012