

## ВПЛИВ ВОДНЮ НА РУЙНУВАННЯ ТРУБОПРОВОДУ ПІД ЧАС НЕРІВНОМІРНОГО ГАЗОСПОЖИВАННЯ

Є.І.Крижанівський, О.С.Тараєвський, С.Й.Тараєвський

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42464  
e-mail: rector@nung.edu.ua

*Учитывая особенности эксплуатации газопроводов, как сварной конструкции, во время разрушения которой рядом с коррозионным растрескиванием проявляются действия коррозионной усталости, в последнее время изучению влияния относительно небольшого количества циклов нагрузки на долговечность трубопроводов придается особое значение*

*Taking into consideration the peculiar exploitation mode of gas pipelines as a welded construction, during whose destruction failures, alongside with corrosive intensive cracking, the effects of corrosive fatigue manifest themselves, in recent years a particular importance has been given to the study of the influence of a relatively small number of loading cycles upon pipelines endurance capability.*

Більшість дослідників зазначає, що в умовах напруженого стану конструкцій вплив водню на працездатність сталей виражений найбільш яскраво. Цей аспект впливу водню на трубопровідні системи викликає значний інтерес, оскільки, якими б не були схеми навантаження трубопроводів, всі зварні з'єднання зазнають дії значних напруг. Враховуючи особливості експлуатації газопроводів, як зварної конструкції та їх катодного захисту створено умови для наводнення і, відповідно, небезпеку руйнування, спричинену явищем водневої крихкості.

Надійність газотранспортного комплексу України суттєво залежить від напруженого стану та середовища у якому експлуатується трубопровід.

Так за деякими даними [1], кількість відмов газопроводу через руйнування зварних з'єднань та на віддалі 500 мм від нього становить 50-60% від загальної кількості відмов. Якщо у газопроводах із низьковуглецевої сталі 17Г1С на початкових стадіях експлуатації руйнування визначається в основному складністю рельєфу, значною напруженістю зварного з'єднання (особливо монтажних стикових зварних з'єднань) недопустимими дефектами зварювання, то надалі руйнування набуває чітких ознак водневої крихкості [3]. Спільним для більшості руйнувань є те, що вони розпочинаються на внутрішній поверхні газопроводу у зоні сплавлення кореневого або підварного шва з основним металом труби, а потім поширюється металом шва або металом навколо шовної зони до зовнішньої поверхні труби.

Останнім часом спостерігаються ініціювання крихких тріщин як у зварному з'єднанні так і зовнішньої поверхні навколошовної зони. Причиною виникнення тріщин, враховуючи специфіку пошкоджень ними, у більшості випадків вважають наводнення зовнішньої поверхні макролокальних ділянок воднем, який може виділятися під час катодного захисту газопроводу.

Отже, виходячи із далеко неповного огляду щодо руйнування газопроводів, можна зробити

висновок, що вивчення механізму їх руйнування, особливо за нерівномірного газоспоживання та дії агресивного середовища, є важливою науковою проблемою.

На утворення тріщин, які є макро- і мікролокальними ділянками високої концентрації водню, впливають як металургійні, так і експлуатаційні чинники. До основних металургійних чинників, які сприяють утворенню таких тріщин, слід віднести:

- хімічний склад основного та присадкового металів;

- утворення залишкових внутрішніх напружень, в процесі виготовлення та під час спорудження газопроводу;

- вплив водню в процесі зварювання газопроводу електродами із різним покриттям.

До основних експлуатаційних чинників, які сприяють утворенню тріщин відносяться:

- корозія, яка розвивається як за напруженого, так і не напруженого станів газопроводу;

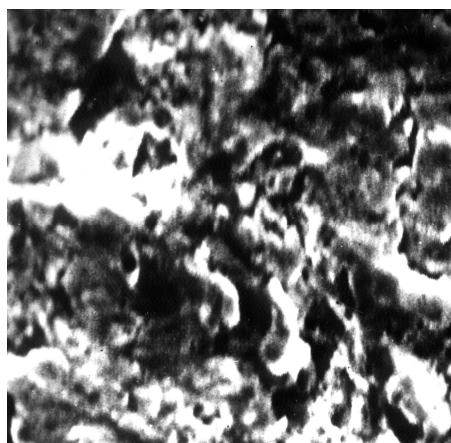
- зменшення перерізу труби до критичного розміру у результаті абразивного зношування;

- дефекти у листовому матеріалі у вигляді розшарування яке призводить до порушення цілісності труби;

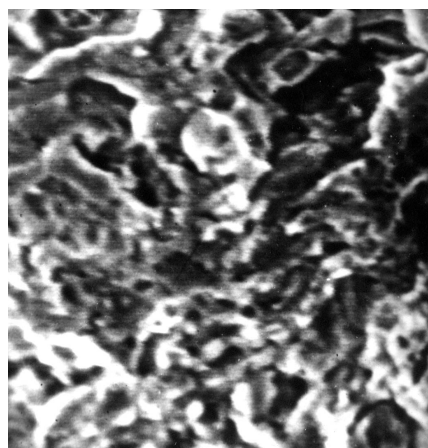
- залишкові внутрішні напруження після спорудження газопроводу;

- втомні та корозійно-втомні явища, які виникають у процесі експлуатації за нерівномірного газоспоживання.

Дослідження розвитку втомної тріщини, на зразках випробовуваних на повітрі, показали, що у мікрофрактограмах зламів є чітке відображення ферито-перлітної структури (рис. 1). Особливості будови мікрорельєфу відповідають проходженню тріщини через ділянки з структурою пластинчастого (рис. 1) і зернистого перліту (рис. 1, а, б), що проявляється у вигляді специфічних площин та ямкових мікроутворень. Під час руйнування феритних зерен внаслідок розповсюдження тріщини відбувається формування бороздкового мікрорельєфу, а також розшарування вздовж площин ковзання в'язких сколів (рис. 1). Проведенням мікрофрактографічним аналізом зламів взірців, що про-

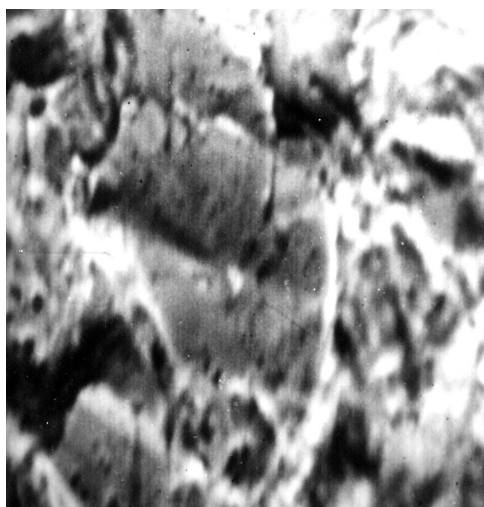


а)

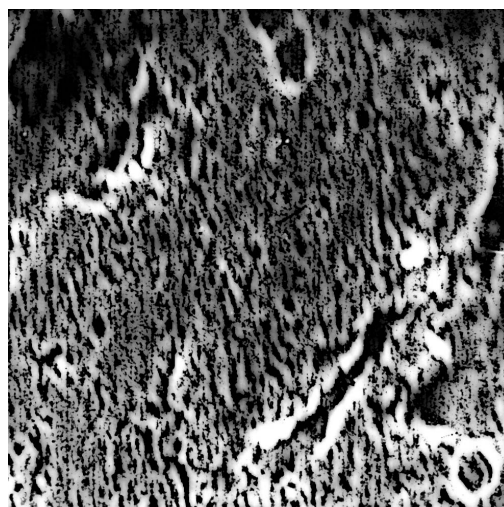


б)

**Рисунок 1 – Мікрофрактограми зламів зрізів із сталі 17Г1С після втомних випробувань на повітрі (x2000)**



а)



б)

**Рисунок 2 – Мікрофрактограми зламів зрізів із сталі 17Г1С після корозійно-втомних випробувань у наводнювальному середовищі (x2000)**

ходили випробування на повітрі, не виявлено суттєвих аномалій з точки зору мікромеханізму руйнування.

Суттєві зміни у мікробудові втомних зламів виявлено після корозійно-втомних випробувань зрізів у корозійно-наводнювальному середовищі. У процесі таких випробувань наводнювальне середовище сприяє суттєвому розшаруванню площин ковзання, що відповідає одному із низькоенергоємніших мікромеханізмів втомного руйнування, відомих у фактографічній практиці (рис. 2), що призводить до суттєвого зниження границі корозійної втоми. До числа особливих мікрофрактографічних досліджень корозійно-втомних зламів слід віднести виявлені ділянки міжзеренних сколів, що свідчить про низькоенергомісткі механізми руйнування, які сприяють окрихченню. У нашому випадку явище унікальне, оскільки у такому структурному ферито-перлітному стані дуже рідко проявляється міжзеренне розтріскування, а факт появи такого мікромеханізму руйнування може бути пов'язане із підвищеною схильністю газопроводу (а особливо його кільцевого

зварного з'єднання) до наводнення, яке у локальних об'ємах матеріалу ослаблює міжзеренні зв'язки (рис. 2, а, б).

Поряд із типовим втомним мікрорельєфом на поверхні зламів зразків, випробовуваних у корозійному наводнювальному середовищі, виявлено більшу кількість ділянок розшарувань вздовж площин ковзання (рис. 2, б), вторинних тріщин (рис. 2). Характерно, що мікроділянки розшарувань вздовж площин ковзання викликають кратероподібні мікроутворення (рис. 2, а, б), що є підставою стверджувати про виникнення мікроділянок декорованих слідами корозії, природа утворення яких поки що мало досліджена.

Аналіз характеру руйнування залежить від рівня напружень та бази низькочастотних випробувань. За вищих рівнів напружень на поверхні зламу кратероподібних включень проявляється значно більше, ніж за низьких. Крім того, навіть за низьких рівнів навантажень кількість кратероподібних включень значно більша, ніж у основному металі. Таке явище пояснюється впливом водню на формування та-

ких мікропор, які прискорюють реалізацію мікроремеханізму міжзеренних сколів у процесі корозійно-втомних руйнувань.

Наводнення газопроводу відбувається під час його спорудження внаслідок технологічних операцій ручного електродугового зварювання плавленням, що базується, в першу чергу, на різній розчинності водню у сталі залежно від температури. Високий температурний градієнт між розплавленим електродним металом та ще недостатньо прогрітим (холодним) основним металом труби, в умовах високої концентрації водню у атмосфері зварювальної дуги протікає концентраційний градієнт розчиненого водню. Атоми водню дифундують у кристалічну решітку, створюють надмірне насичення холодного металу воднем. З іншого боку, атоми водню, які виділяються із твердого розчину, миттєво асоціюються, утворюючи нерозчинний у металі молекулярний водень  $H_2$ . Це обумовлює створення надзвичайно високих напружень між зернами, які перевищують границю міцності, що сприяє утворенню локальних тріщин.

Концентрація водню в металі залежить в основному від типу покриття та його вологості. В процесі ручного електродугового зварювання електродами із целюлозним покриттям концентрація водню у металі може сягати  $25..30 \text{ см}^3/100\text{г}$  водню, а електродами з покриттям основного типу –  $4..8 \text{ см}^3/100\text{г}$ . За звичайних температурних умов гранична розчинність водню у металі складає приблизно  $1 \text{ см}^3/100\text{г}$ .

Відомо також, що водень є однією з основних причин сповільненого руйнування зварних конструкцій, в тому числі зварних з'єднань магистральних трубопроводів.

Процеси перерозподілу водню в напруженому стані відіграють особливу роль під час зварювання стиків труб целюлозними електродами. Проте, існує безліч аспектів впливу умов зварювання електродами різного типу на працездатність зварних з'єднань трубних сталей підвищеної міцності. Отже, виявлення впливу водню, особливо в умовах сповільненого руйнування, дало б можливість обґрунтувати застосування певного типу електродів для конкретних умов зварювання трубних сталей.

Оцінити поведінку водню, продифундованого з металу шва, який характеризується високим рівнем водню, в зону термічного впливу, можна на основі таких експериментальних досліджень:

- визначення характеристик механічних властивостей основного металу, насиченого воднем, в напруженому стані;

- визначення впливу водню на схильність зони термічного впливу до сповільненого руйнування.

Таким чином, в умовах підвищеного вмісту водню, характерного для сучасної технології зварки магистральних трубопроводів, за наявності напруг, що не перевищують межі текучості [3], може відбутися значне окрихчення металу. При цьому цілком можливе виникнення умов, що викликають необоротну крихкість трубних сталей. У зв'язку з цим в процесі зва-

рювання стиків труб високовуглецевими електродними, зважаючи на немінучі напруги в зварному з'єднанні як від залишкових, так і від зовнішніх навантажень, принципово можливий перехід зони термічного впливу в стан необоротної крихкості, як показано вище, для цього необхідне одночасне досягнення критичних рівнів  $[H]_{\text{зар}}$  і критичних напруг. Оскільки вплив водню на працездатність зварних конструкцій найрізкіше виявляється переважно в умовах сповільненого руйнування, слід оцінити максимально допустимий рівень водню і критичних напруг за цих умов.

Вплив водню на працездатність зварних з'єднань звичайно оцінюють за зміною властивостей зони термічного впливу (ЗТВ), яка, як відомо, є найбільш небезпечною ділянкою зварного з'єднання досліджуваних трубних сталей унаслідок утворення:

- несприятливих мікроструктур;

- підвищеної твердості;

- високого рівня концентрації водню;

- максимального вмісту мікролегуючих елементів, які одночасно є гідридоутворюючими елементами [5].

Реакція між воднем і цементитом відбувається, у першу чергу, в перлітових полях (з достатньо малодисперсним перлітом) і протікає за порівняно невисоких температур, наприклад, за  $220-320^\circ\text{C}$  [5]. У реакції може брати участь як атомарний водень (або протонний газ), так і молекулярний водень.

Отже, у разі зварювання целюлозними електродами (для яких характерна висока активність як водню, так і вуглецю) розрихлювання меж зерен і утворення мікротріщин в металі шва і ЗТВ основного металу може бути викликано процесами утворення метану.

Якщо в колекторах металу в процесі зварювання підвищиться вміст молекулярного водню, то в мікропустотах підвищиться парціальний тиск метану. Парціальний рівноважний тиск метану може перевищити критичні значення, і лімітуючою стадією водневого розтріскування сталі може виявитися швидкість утворення метану.

## Висновки

Вивчення впливу хімічного складу і мікроструктури металу шва на рухливість водню за кімнатних температур дає змогу найточніше встановити ефект кожного з легуючих і домішкових елементів.

Міжзеренне розшарування в результаті підвищення тиску може виявитись однією з причин руйнування внаслідок утворення під час зварювання висоководневими електродами холодних тріщин "водневого" походження.

Процеси наводнювання призводять до значного зниження в'язко-пластичних властивостей трубних сталей, причому ефект водню посилюється дією розтягуючих напруг.

Підвищений вміст водню за одночасної дії розтягуючих напружень може призвести до необоротної водневої крихкості деяких ділянок труб.

Таким чином, результати проведеного аналізу руйнування магістральних газопроводів (зокрема їх кільцевих зварних з'єднань) свідчать, що зменшення опору основного металу та зварного шва корозійно-втомному руйнуванню під дією циклічних низькочастотних навантажень та корозійно-наводнювального середовища пов'язане із інтенсифікацією проявів низькоенергоємних мікромеханізмів руйнування, які призводять до зменшення у поверхневих шарах схильності до пластичного деформування у мікрооб'ємах та їх міжзеренних зв'язках. Це у свою чергу призводить до міжзеренного розтріскування, а у кінцевому результаті – зменшення довговічності магістральних трубопроводів.

### Література

- 1 Похмурський В.І. Коррозионная усталость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 207 с.
- 2 Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде. – М.: Машгиз, 1963. – 188 с.

3 Крижанівський Є.І., Тараєвський О.С. Вплив нерівномірності газоспоживання на напружений стан трубопроводу // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – №3(12). – С.31-34.

4 Крижанівський Є.І., Тараєвський О.С., Петрина Д.Ю. Вплив наводнення на корозійно-механічні властивості зварних швів газопроводів // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – №1(14). – С.29-34.

5 Крижанівський Є.І., Тараєвський О.С. Дослідження корозійно-втомних характеристик сталі 17Г1С магістрального газопроводу // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – Спец випуск Том 1. – С.290-295.

6 Чутливість до водневої крихкості зварного з'єднання сталі 17Г1С магістрального газопроводу // О.Т. Цирульник, Є.І. Крижанівський, О.С. Тараєвський, Д.Ю. Петрина, М.І. Греділь // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – №6. – С.111-114.

7 Крижанівський Є.І., Тараєвський О.С. Вплив нерівномірності газоспоживання на напружений стан трубопроводу // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – №3(12). – С. 31-34.

УДК 622.692

## ЗАХИСТ ВІД КОРОЗІЇ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ ЕПОКСИДНО-БАКЕЛІТОВИМИ КОМПОЗИЦІЯМИ

*Р.Т.Мартинюк, О.Т.Чернова, Т.А.Мартинюк*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42157  
e-mail: public@nung.edu.ua*

*Описана технологія проведення работ по антикоррозионной защите металлических резервуаров эпоксидно-бакелитовыми композициями.*

*It was described technology of conducting works on protection of metallic reservoir by epoxy-bakelit compositions.*

Наявність резервуарних парків в нафтовій, нафтопереробній промисловості та системи нафтопродуктозабезпечення України вимагає їх надійної і ефективної роботи.

Довготривалість і специфічні умови експлуатації сталевих резервуарів призводять до їх корозійного зношування, втрати стійкості, зниження міцності, що потребує ремонтних робіт.

Ремонт резервуара – складна і трудомістка інженерно-технологічна операція, від якої залежить подальша експлуатація конструкції.

Процес ремонту резервуарів складається з:  
– організації і підготовки ремонтних робіт;  
– очищення резервуарів від відкладів і залишків нафтопродуктів;  
– проведення основних ремонтних операцій;  
– контролю якості робіт.

Відновлення і підвищення несучої здатності резервуарів тісно пов'язане із здійсненням заходів щодо запобігання корозійному зношуванню його елементів.

Існує ряд методів для боротьби з корозією резервуарів, а саме:

- посилення конструкції із врахуванням допуску на корозію;
- створення бар'єра між агресивним середовищем і конструкцією;
- використання корозійно стійких матеріалів;
- катодний і протекторний захист;
- зміна параметрів агресивного середовища.

До останнього відноситься застосування інгібіторів як одного із важливих антикорозійних заходів, спрямованих на збільшення терміну експлуатації резервуарів, забезпечення високої надійності, охорону навколишнього середовища.

Застосовуються антикорозійні покриття на основі епоксидно-бакелітових композицій. Ці композиції вирізняються дешевизною компонентів, із яких складаються, пройшли всебічні лабораторні випробування і можуть широко