

© **О.С. Тараєвський**  
канд. техн. наук  
ІФНТУНГ

## Дослідження несучої здатності магістральних трубопроводів за складних умов

УДК 622.692.4

*Представлено результати експериментальних досліджень, проаналізовано вплив тривалого терміну експлуатації магістральних газопроводів, а також природних концентраторів напружень на фізико-механічні властивості зварних з'єднань сталі 17Г1С. Розроблено методику та встановлено закономірності руйнування матеріалу зварних з'єднань газопроводів за статичного та низькочастотного навантаження під час довготривалої експлуатації, а також дії концентраторів напруження. Розглянуто деякі аспекти механізму руйнування зварних з'єднань трубопроводів, які знаходяться у довготривалій експлуатації, а також концентрацій напруження.*

**Ключові слова:** втома, наводнення, концентратор напружень, зварне з'єднання, зварний шов, газопровід, статичне навантаження, низькочастотні навантаження.

*Представлены результаты экспериментальных исследований, проанализировано влияние длительного срока эксплуатации магистральных газопроводов, а также природных концентраторов напряжений на физико-механические свойства сварных соединений стали 17Г1С. Разработана методика и установлены закономерности разрушения материала сварных соединений газопроводов при статической и низкочастотной нагрузке в ходе длительной эксплуатации, а также действия концентраторов напряжений. Рассмотрены некоторые аспекты механизма разрушения сварных соединений трубопроводов, которые находятся в долговременной эксплуатации, а также концентраций напряжений.*

**Ключевые слова:** усталость, наводооораживание, концентратор напряжений, сварной шов, газопровод, статическая нагрузка, низкочастотные нагрузки.

*The article presents the results of experimental studies and analyses of the influence of the long-term operation of main gas pipelines and the natural gas concentrators on the physical and mechanical properties of the 17Г1С steel welded joints. The methods are worked out and the regularities of welded joints fracture of gas pipelines under the static and low-frequency loading during long-term operation and stress concentrators are determined. Some aspects of the fracture mechanism of pipelines welded joints that are in long-term use and stress concentrators are described.*

**Key words:** fatigue, floods, stress concentrators, weld of unity, gas, static load, low-frequency loads.

Основну частину діючих магістральних трубопроводів експлуатують уже понад 30 років. За такий тривалий період часу в металі труб під впливом напружень, корозійного середовища і водню відбулися процеси, що призвели до зміни фізико-механічних властивостей металу, яка залежить не тільки від тривалості, але і від силових умов експлуатації, тобто від рівня робочого тиску і розмаху його коливань. Тому для аналізу стану магістральних трубопроводів, оцінки залишкового ресурсу і планування капітального ремонту вкрай важливо враховувати реальні властивості матеріалу труб [1–4].

Осередку руйнування у трубопроводах може виникати на кінцевих ділянках або в інших зонах труби (основний метал, зварне з'єднання), на кільцевому монтажному шві та в зоні перетину монтажного і заводського швів. Зазвичай в осередку руйнування є різного роду дефекти, які й ініціюють початок процесу локального деформування стінки з подальшим наскрізним утворенням тріщини або розкриття кромки з високошвидкісним розповсюдженням тріщини. За рідкісним винятком, в осередку руйнування може бути відсутнім який-небудь дефект.

Осередку руйнування завдовжки 100 мм виник у зварному поздовжньому шві трубопроводу розміром 1220x11 мм зі сталі 14Г2САФ у процесі передпускових випробувань газом

із тиском 6,1 МПа. В осередку руйнування сталося локальне випинання стінки труб, у зламі не виявлено ніяких видимих дефектів. До осередку руйнування з обох боків прилягає характерний шевронний злам, що показує напрямок поширення тріщини від осередку. Відмінною особливістю руйнувань цих трубопроводів є ще й те, що поряд із поширенням поздовжньої тріщини виникали тріщини, перпендикулярні поздовжній, тобто з поширенням в окружному напрямку. Довжина поперечних тріщин в окремих випадках сягала 300–500 мм. На цих трубопроводах під час передпускових випробувань сталося понад 10 випадків подібних руйнувань. Основна причина таких руйнувань, як показали спеціальні дослідження, – це відносно невисокий рівень тріщиностійкості основного металу і зварного з'єднання. Низьку якість труб прогнозовано на початковому етапі освоєння їх виробництва. Тоді ж видано рекомендації щодо недоцільності використання труб для магістральних газопроводів. Надалі промисловий випуск зварних труб зі сталі 14Г2САФ було припинено.

Процеси, що протікають у металі труб під час їх тривалої експлуатації, можуть впливати як на стандартні механічні властивості, так і на нестандартні, оцінювані за спеціально розробленими методиками. У зв'язку з цим для оцінки стану металу труб після їх тривалої експлуатації необхідно досліди-

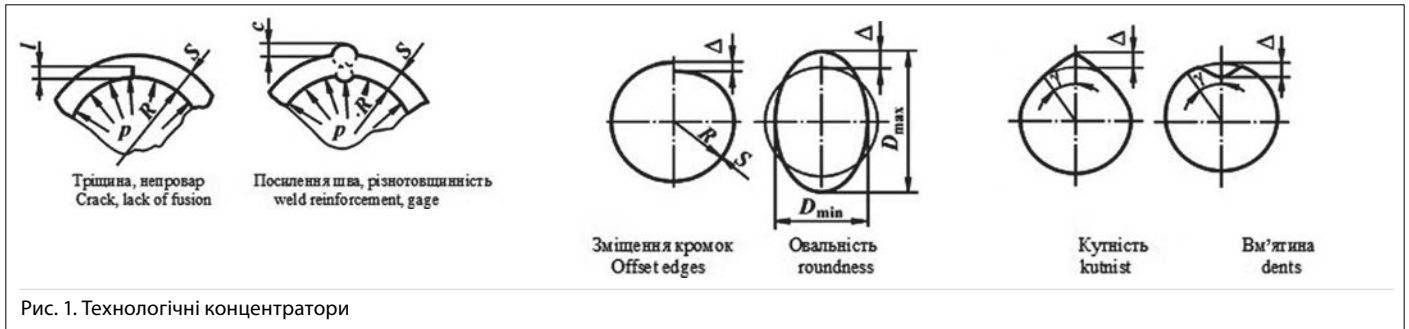


Рис. 1. Технологічні концентратори

ти комплекс фізико-механічних характеристик, що дають змогу оцінити опір руйнації металу в умовах, найбільш близьких до умов експлуатації.

Технологічні дефекти умовно поділено на дві групи (рис. 1).

Перша об'єднує характерні дефекти збирання: зміщення кромки, овальність, кутність тощо. Вони споріднені не тільки за походженням, але й за методами оцінки їх стану напруження. Дефекти форми викликають здебільшого загальну зміну стану напруження елемента обладнання.

Друга група – тріщиноподібні дефекти, які викликають локальне підвищення рівня напруженості металу.

Одним із поширених дефектів, що виникають під час виготовлення обладнання, є зміщення кромки. У подальшому під зміщенням кромки будемо розуміти співпадіння серединних поверхностей двох зварюваних елементів однакової товщини  $S$ , а його величину оцінюватимемо безрозмірним параметром  $\Delta$  ( $\Delta=c/S$ , де  $c$  – абсолютне зміщення кромки).

У практиці виробництва обладнання зміщення кромки часто перевищує допустимі значення ( $\Delta \leq 0,1$ ). Процес суміщення кромки, із одного боку, призводить до збільшення трудомісткості збірки зварюваних елементів, а з іншого – до зниження довговічності устаткування. Тому великий практичний інтерес представляє розробка способів забезпечення працездатності зварних з'єднань із розвиненим зміщенням кромки ( $\Delta > 0,1$ ).

Дефектами заводських зварених швів електрозварних труб (виявленими завдяки візуальному огляду), за якими можливе руйнування, є: подрізи, напливи, натікання, несплавки між зовнішніми і внутрішніми швами внаслідок їх зсуву; нерівномірність параметрів шва (висота й ширина) по його довжині; пори, шлакові включення, що виходять на поверхню зламу, ділянки ремонтної підварки (рис. 2). Зазначені дефекти характерні й для монтажних зварених швів.

Для прямошовних труб типовою є неякісна підготовка кінцевих ділянок труб під операцію експандування труби (неповне зняття зусилля внутрішнього шва) і утворення закатів, задривів, надривів під час установки конуса експандера (див. рис. 2, з).

Характерним видом руйнування по тілу труби є розрив по поверхневому дефекту у вигляді вм'ятин, ризок, подряпин.

У зоні епіцентра руйнування необхідно встановити вид концентратора напружень. Руйнування газопроводів по протяжності умовно поділяють на локальні (обмеженої довжини) і лавинні (необмеженої довжини). Однак чіткої класифікації за визначенням, що розуміти під локальним і лавинним руйнуванням, поки не існує. За твердженням деяких вчених [2,

4], під локальним руйнуванням розуміється руйнування газопроводу, що супроводжується в'язким характером зламу, а лавинним – руйнування з крихким зломом. Відзначається, що в'язке руйнування спостерігається в діапазоні швидкостей тріщини від 80 до 400 м/с, а лавинне поширення тріщини відбувається при швидкостях, що перевищують швидкість декомпресії газу (400 м/с). У цих умовах основним джерелом руйнації під час локальних руйнувань (в'язкого характеру зламу) є потенційна енергія стисненого газу, а під час лавинного – енергія пружної деформації, накопичена в стінці газопроводу.

За крихкого руйнування центр визначають із характерного для цього зламу рисунка, що нагадує «риб'ячий кістяк» або шеврони, причому вершина шеврона вказує на центр руйнування.

Ділянка зламу в центрі руйнування має, як правило, кристалічну структуру. Під час в'язкого (пластичного) руйнування шевронного візерунка практично не утворюється.

Як було встановлено вище, втрата пластичної стійкості труби відбувається раніше, ніж вичерпується несуча здатність матеріалу. Але це означає, що для рівномірності зварної труби зовсім не обов'язково, щоб міцність зварного з'єднання дорівнювала міцності основного металу. Для цього необхідно лише, щоб міцність зварного з'єднання  $\sigma_B^C$  була достатньою

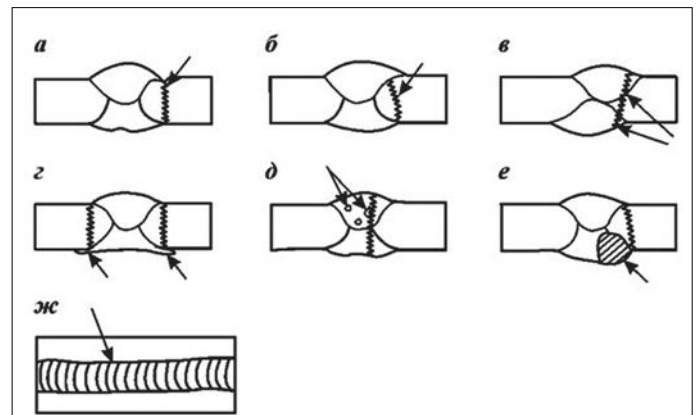


Рис. 2. Види дефектів зварних швів і можливий характер їх руйнування: а – подрізи; б – напливи, натіки; в – несплавка зовнішнього й внутрішнього швів через зсув; г – неповне зняття посилення внутрішнього шва з утворенням задривів, уступів; д – пори, шлакові включення на поверхні зламу; е – ділянки ремонтної поверхні заводських швів; ж – нерівномірність параметра зварного шва (ширина й висота посилення)

для реалізації в трубі  $p_{\max}$ . Виразимо величину, що відповідає розглянутій умові, як

$$\sigma_B^C = K_{кр}^C \sigma_B, \quad (1)$$

де  $\sigma_B^C$  і  $\sigma_B$  – відповідно тимчасові опори зварного з'єднання і основного металу; – допустиме значення ослаблення міцності зварного з'єднання.

Тут потрібно зробити застереження, що під  $\sigma_B^C$  розуміємо агрегатну міцність зварного з'єднання;  $\sigma_B^C$  не ототожнюється з міцністю металу шва.

Розглянемо випадок навантаження труби внутрішнім тиском при  $K_{\sigma} = 0,5$ .

Відповідно, можна записати:

$$\begin{aligned} F_{\max} &= S_0 \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i^C (\varepsilon_i^C)_{\varepsilon_i = \varepsilon_{im}} e^{3m^C} = \\ &= S_0 \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i (\varepsilon_i)_{\varepsilon_i = \varepsilon_{im}} e^{3m_{кр}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тут індекс  $c$  вказує на приналежність параметрів до зварного з'єднання. Впливом деформації зварного з'єднання нехтуємо.

Увівши ступеневу апроксимацію, одержимо:

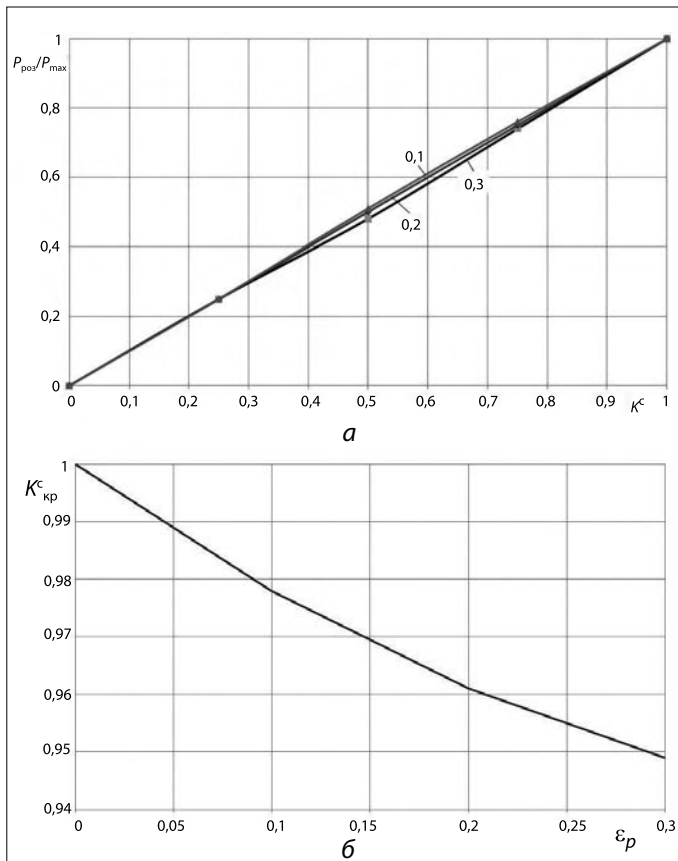


Рис. 3. Графічні залежності впливу: а – допустимого ослаблення міцності зварного з'єднання від пластичності металу; б – міцності поздовжнього зварного з'єднання на відносну міцність труби (шифр кривих  $\varepsilon_p$ )

$$\sigma^C \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right) \varepsilon_p = \frac{\sigma_B e^2}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

звідки

$$K_p^C = \left( \frac{e}{3} \right)^{\varepsilon_p/2} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right)^{\varepsilon_p}, \quad (4)$$

або при  $\varepsilon_p^C = \varepsilon_p$ , що може мати місце, наприклад, під час уточнення зварного з'єднання:

$$K_{кр}^C = \frac{e^{\varepsilon_p}}{2^{\sigma p}}. \quad (5)$$

Графічно вираз (5) представлено на рис. 3. Хоча значення  $K_{кр}^C$  і неістотно відрізняються від одиниці, проте вони цікаві тим, що в принципі дають змогу допускати деякі ослаблення окремих зон у трубі, не завдаючи шкоди міцності труби. Таке ослаблення може бути тим більшим, чим вища пластичність матеріалу.

Руйнування труби при цьому, що природно, відбудеться на ослабленій ділянці. Однак місце руйнування у цьому випадку не має принципового значення, оскільки із досягненням тиску  $p_{\max}$  труба все одно руйнуватиметься, незалежно від того, є в ній ослаблення чи ні.

Із подальшим ослабленням міцності зварного з'єднання  $K_{кр} \leq K_{кр}^C$  труба буде руйнуватися за зростаючою гілкою діаграми тиск–деформація.

Провівши ряд математичних операцій, отримаємо залежність відносної міцності зварних труб від коефіцієнта  $K^C$ :

$$\frac{p_{розр}}{p_{\max}} = \frac{K^C (2/\sqrt{3})^{\varepsilon_p} (\sqrt{3})^{\varepsilon_p}}{\exp(\sqrt{3}\varepsilon_i/2)}. \quad (6)$$

Як і очікували, відносна міцність зварних труб не прямо пропорційна ослабленню зварного з'єднання  $K^C$ . Графічно вираз (6) для різних  $\varepsilon_p^C = \varepsilon_p = 0,1; 0,2; 0,3$  представлено на рис. 3.

### Висновок

Отже, стан металу труб магістральних трубопроводів, особливо їх зварних з'єднань, залежить не тільки від терміну експлуатації, але і від силових параметрів, які змінюються залежно від віддалі труби від насосної станції. Більш високий рівень перепадів робочого тиску в трубопроводах посилює середній рівень напружень, що діють на стінки труб, і сприяє інтенсивнішому протіканню процесів старіння і накопичення дефектів.

Під час роботи труби відчуваються перепади тиску, температури, динамічні і статичні навантаження, що створює умови для протікання в металі деформаційного старіння, яке призводить до підвищення опору мікропластичної деформації і збільшення небезпеки появи в металі локальних піків напружень. Унаслідок цього в ході експлуатації труб зменшується можливість релаксації локальних напружень у вершині надрізу або тріщини, що сприяє підвищенню схильності сталі до руйнації.

Подані результати досліджень дають нам змогу зробити висновок, що для оцінки надійності металу труб після тривалої експлуатації недостатньо проведення стандартних досліджень механічних властивостей. Критеріями оцінки

надійності повинні бути характеристики опору руйнації як кільцевого зварного з'єднання, так і основного металу на зразках із гострим надрізом або тріщиною, наближені до локальних змін структурного стану сталі. Для зменшення небезпеки руйнації трубопроводів, експлуатованих понад 30 років, необхідно враховувати концентратори напружень металу труб у результаті деформаційного старіння.

#### Список літератури

1. **Похмурский В.И.** Коррозионная усталость металлов / В.И. Похмурский. – М.: Металлургия, 1985. – 207 с.
2. **Крижанівський Є.І.** Особливості корозійно-втомного руйнування зварного з'єднання тривалоексплуатованих магістральних трубопроводів / Є.І. Крижанівський, О.С. Тараєвський // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2012. – Спецвипуск № 9. – С. 653–661.
3. **Тараєвський О.С.** Вплив особливостей експлуатації магістральних трубопроводів на деформаційну стійкість зварних з'єднань /

О.С. Тараєвський // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2012. – № 3 (28). – С. 264–268.

4. **Goodfellow Ray.** Hot tap installed on operating sour – gas line / Ray Goodfellow, Rory Belanger // Oil and Gas Journal. – 2001. – Mar. 19. – P. 50–55.

#### Автор статті



#### Тараєвський Олег Степанович

Кандидат технічних наук, доцент кафедри транспорту і зберігання нафти і газу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, лауреат премії Президента України для молодих вчених. Напрям наукових досліджень: забезпечення безаварійної експлуатації магістральних трубопроводів за складних умов.

#### НОВИНИ

## Китай збільшує використання природного газу та капіталовкладення в розвиток його інфраструктури

За період 2003–2012 рр. Китай більше ніж утричі збільшив обсяг видобутку газу. 2012 р. він становив 134 млрд м<sup>3</sup>, а 2015 р. планується видобути 194 млрд м<sup>3</sup>. Прагнення Китаю використовувати для виробництва енергії більше природний газ, ніж вугілля і нафту, пояснюється намаганням зменшити забруднення повітря викидами вуглекислого газу, який у великій кількості утворюється внаслідок застосування двох останніх. Вкладаючи великі кошти у видобування власного газу та розвиток відповідної інфраструктури поряд зі зростанням імпорту, китайський уряд очікує збільшити частку газу в сумарному споживанні енергії до 8 % до кінця 2015 р. і до 10% – у 2020 р. У 2012 р. природний газ становив лише 4,9 % від сумарного споживання енергії в країні.

Основний обсяг видобутку газу очікується з родовищ західних і північно-центральної частини континентального Китаю, а також глибоководної частини Південно-Китайського моря.

Із 2007 р. споживання природного газу завдяки триразовому збільшенню імпорту газу по трубопроводах і ЗПГ перевищує його власний видобуток. За період 2003–2013 рр. використання газу щорічно зростало в середньому на 17 %, досягнувши майже 201 млрд м<sup>3</sup> у 2013 р. Щоб задовольнити потреби в газі, минулого року Китай імпортував 63,5 млрд м<sup>3</sup> ЗПГ і трубопроводного газу. Імпортований газ становив 32 % від потреб країни в газі, зрісши на 2 % порівняно з 2006 р.

Китай інтенсивно розбудовує свої потужності з приймання ЗПГ в урбанізованих прибережних регіонах і на сьогодні має 10 основних регазифікаційних терміналів річної потужністю 60 млрд м<sup>3</sup>. У 2012 р. Китай піднявся на третє місце серед світових імпортерів ЗПГ, поступившись тільки Японії та Південній Кореї. У 2013 р. імпорт ЗПГ сягав 30,7 млрд м<sup>3</sup>. За результатами першої половини 2014 р. можна зробити висновок, що імпорт ЗПГ зростає вищими темпами, ніж за попередні роки.

Інтенсивно розвивається і система магістральних газопроводів, яка зв'яже регіони видобування газу на заході і півночі країни з основними районами споживання на сході. Нові газопроводи дають можливість нарощувати імпорт газу з сусідніх країн. У 2013 р. постачання газу з Туркменістану, Узбекистану і Казахстану досягло 34,4 млрд м<sup>3</sup>. Нещодавно укладена угода з Росією дає можливість Китаю купувати і транспортувати газ зі східних регіонів Росії по запропонованому трубопроводу. За угодою, яка оцінюється в 400 млрд дол. США, щорічно, починаючи з 2018 р., 46 млрд м<sup>3</sup> надходитиме до Китаю.

За оцінками Американського енергетичного агентства, Китай має найбільші у світі видобувні запаси сланцевого газу, а також значні ресурси газу вугільних пластів та великий потенціал для отримання газу з вугілля.

За матеріалами сайту <http://www.ogj.com>