

# СПОРУДЖЕННЯ, ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТ ГАЗОНАФТОПРОВОДІВ

---

УДК 622.692.4

## ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОЇ МІЦНОСТІ ДІЛЯНОК МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ З ДЕФЕКТАМИ

Р. С. Савула<sup>1</sup>, Є. В. Харченко<sup>2</sup>, А. О. Кичма<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Філія УМГ «Львівтрансгаз» ДК «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України»,  
79026, Львів, вул. Рубчака, 3, e-mail: [rsavula@mail.ru](mailto:rsavula@mail.ru)

<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка»,  
79013, Львів, вул. С. Бандери, 12, e-mail: [kharchen@polynet.lviv.ua](mailto:kharchen@polynet.lviv.ua)

Із застосуванням двопараметричного критерію крихко-в'язкого руйнування розроблено алгоритм оцінки залишкової міцності матеріалу і з'ясовано вплив температури експлуатації жорстко зацемлених надземних ділянок магістральних газопроводів на статичну міцність зварних з'єднань з тріщиноподібними дефектами.

Ключові слова: магістральний газопровід, зварне з'єднання, крихко-в'язке руйнування, залишкова міцність.

При использовании двухпараметрического критерия хрупко-вязкого разрушения разработан алгоритм оценки остаточной прочности материала и определено влияние температуры эксплуатации жестко зацементированных надземных участков магистральных газопроводов на статическую прочность сварных соединений с трещиноподобными дефектами.

Ключевые слова: магистральный газопровод, сварное соединение, хрупко-вязкое разрушение, остаточная прочность.

With the use of two-parameter criterion of brittle-viscous destruction the software for estimation of the residual strength of the material was developed and the effect of temperature operation tightly jammed aboveground portions of pipelines on static strength of welded joints with crack-like defects was found.

Keywords: gas pipeline, welded, brittle-ductile fracture, the residual strength.

**Аналіз відомих досліджень та постановка задачі.** В процесі тривалої експлуатації магістральних газопроводів (МГ) під дією механічних навантажень і корозійного середовища в сталях труб проходять процеси старіння, кінетика яких залежить від хімічного складу і структури матеріалу, температури експлуатації, рівня напружень у стінці труби та хімічного складу транспортованого газу. Як відомо, процес деградації матеріалу труб приводить до зниження його тріщиностійкості і корозійної стійкості [1, 2].

В процесі тривалої експлуатації трубопроводів відбувається наводнення, що є причиною локального окрихчення металу тіла труби. Це обумовлює зниження ударної в'язкості і в'язкості руйнування. Результати експериментальних досліджень [3] показують, що ударна в'язкість (КСУ)

в локальній зоні окрихчення в основному металі може зменшитися у 6 разів, а в металі шва – у 9 разів. Суттєво змінюється й критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН)  $K_{1c}$ .

У зоні зварних з'єднань створюються ще більш сприятливі умови для деградації матеріалу. Складне розроблення торців труб для багатшарових кільцевих зварних з'єднань обумовлює суттєву концентрацію напружень та нерівномірність розподілу залишкових напружень у зоні шва. Згідно з настановою [4], для оцінки технічного стану трубопроводів, що мають термін експлуатації більше 20 років, обов'язковим є експериментальне визначення критичного КІН або ударної в'язкості  $KCV$ , твердості  $HB$  за Брінеллем, границі міцності  $\sigma_B$  і границі плинності  $\sigma_T$  металу труби.

Оскільки матеріальні і часові затрати на експериментальне визначення ударної в'язкості  $KCV$  є набагато меншими від затрат на знаходження критичного КІН, то для зон зварних з'єднань доцільно визначати коефіцієнт  $K_{1c}$ , застосовуючи емпіричну залежність

$$K_{1c} = 0,1 \sqrt{0,1 \frac{E}{1-\mu^2} \cdot KCV}, \text{ МПа м}^{0,5}, \quad (1)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу, МПа;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $KCV$  – ударна в'язкість за Шарпі, Дж/см<sup>2</sup>.

Дефекти зварювання, такі як непровар, несплавлення, шлакові включення, пори, підрізи, схематизуються кільцевими або осьовими тріщинами. Їх допустимі розміри, що впливають на міцність конструкції, розраховуються за методами лінійної механіки руйнування.

**Постановка задачі.** Метою роботи є обґрунтування методології і розроблення алгоритму оцінки залишкової міцності ділянок трубопроводів з тріщиноподібними дефектами.

**Основний матеріал.** Для розрахунку коефіцієнтів запасу міцності ділянок МГ з дефектами під дією статичного навантаження застосовуємо діаграму оцінки руйнування (ДОР), що окреслює межу між безпечним та небезпечним станами ділянок трубопроводів. ДОР ґрунтується на двокритеріальному підході щодо оцінки міцності матеріалу і дає можливість одночасно аналізувати два граничні стани – крихкий та в'язкий [4, 5],

$$Y = f(S_r, K_r), \quad (2)$$

де  $K_r = K_1/K_{1c}$  – коефіцієнт, що характеризує ступінь наближення стану матеріалу до крихкого руйнування в деякій точці зони тріщиноподібного дефекту;  $K_1$  – розрахунковий КІН;  $S_r = \sigma_{ref}/\sigma_B$  – параметр, що виражає ступінь наближення стану матеріалу до в'язкого руйнування,  $\sigma_B$  – границя міцності,  $\sigma_{ref}$  – довідкове напруження. Існують різні подання функції (2), що головним чином ґрунтуються на узагальненні експериментальних даних. Зокрема, в нормативному документі [4] рекомендовано будувати ДОР в координатах  $K_r - S_r$ .

Параметри  $K_r$  і  $S_r$  комплексно враховують характеристики напружено-деформованого стану, форму і розміри дефектів, а також властивості матеріалу, що визначають опір відповідно крихкому та в'язкому руйнуванню.

Гранична крива статичної міцності за двокритеріальним підходом є лінією, яка описується залежностями:

$$\begin{cases} K_r = 1, & 0 \leq S_r < 0,7\sigma_T/\sigma_B; \\ K_r = \frac{1}{1-0,7\sigma_T/\sigma_B} \left( 1 - \frac{0,21\sigma_T}{\sigma_B} - 0,7S_r \right), & \frac{0,7\sigma_T}{\sigma_B} \leq S_r < 1; \\ S_r = 1, & 0 \leq K_r < 0,3. \end{cases} \quad (3)$$

За співвідношеннями (3) шляхом зменшення граничної області в  $k$  разів отримуємо ДОР (рис. 1). Згідно з [4], допустимий інтегральний коефіцієнт надійності визначаємо з урахуванням його зменшення на 10 %,

$$k = \frac{0,9K_1K_H}{m}, \tag{4}$$

де  $K_1$  – коефіцієнт надійності за матеріалом,  $K_H$  – коефіцієнт надійності за призначенням і  $m$  – коефіцієнт умов роботи [6].

Коефіцієнт запасу міцності ( $K_{3M}$ ) точки Б трубопроводу з дефектом, стан якої обумовлений параметрами  $S_r^B$  і  $K_r^B$ , визначається графічно як відношення  $K_{3M} = OB_1/OB$ , де  $OB_1$  – точка перетину продовження прямої  $OB$  з граничною кривою ДОР. Аналітично  $K_{3M}$  визначають за формулами  $K_{3M} = S_r^{B1} / S_r^B$  або  $K_{3M} = K_r^{B1} / K_r^B$ .

Ділянку МГ з пошкодженням вважаємо працездатною, а дефект – безумовно допустимим, якщо коефіцієнт запасу міцності є більшим від допустимого інтегрального коефіцієнта надійності  $k$ , тобто, якщо  $K_{3M} > k$ . Коефіцієнт категорійності, значення якого обумовлює категорійність пошкодження, визначаємо за співвідношенням  $K_{кат} = K_{3M}/k$ .

На основі описаного підходу розроблені алгоритм і програма для визначення коефіцієнта запасу міцності  $K_{3M}$  і коефіцієнта категорійності  $K_{кат}$  ділянок МГ з дефектами у зварному шві з урахуванням зміни параметрів тріщиностійкості ( $KCV$  і  $K_{1c}$ ) і релаксованих залишкових напружень.

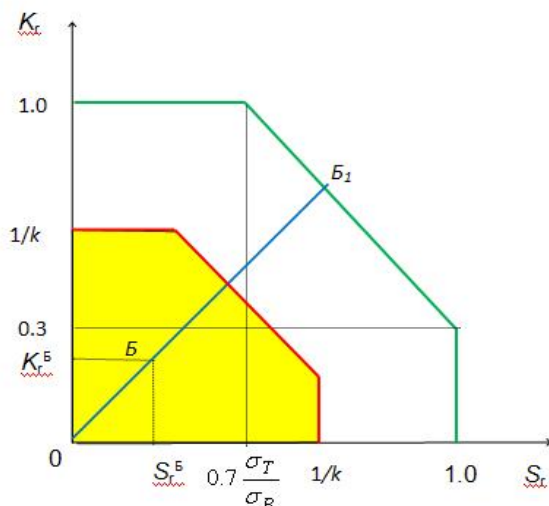


Рисунок 1 – Діаграма оцінки руйнування

Дослідимо вплив експлуатаційних чинників МГ на коефіцієнт категорійності ділянок з дефектами на такому прикладі. Розглянемо балковий надземний перехід МГ (рис. 2), змонтований з труб 820x9 мм, що мають мінімальну залишкову товщину стінки 7,5 мм. Матеріал труб – сталь 17Г1С з такими механічними властивостями відповідно до сертифікату: границя міцності  $\sigma_B = 540$  МПа; границя плинності  $\sigma_T = 370$  МПа; відносне видовження  $\delta_B = 29\%$ , ударна в’язкість  $KCV = 71,4$  Дж/см<sup>2</sup>. У кільцевому зварному шві виявлений непровар. Допустимі розміри його не повинні перевищувати: довжина дефекту  $l_d \leq 2\delta_n = 18$  мм і глибина дефекту  $\Delta \leq 0,1 \delta_n = 0,9$  мм [7]. Температура, за якої зварювали замикаючий кільцевий стик, становила +15°C, а температура експлуатації ділянок МГ знаходиться в межах від -35°C до +35°C. Отже, температурний перепад знаходиться в діапазоні  $\Delta t = -50^\circ\text{C} \dots +20^\circ\text{C}$ . Розрахункова модель таких ділянок МГ становить статично невизначну систему з жорстким защемленням країв. За таких умов в трубопроводі виникають суттєві поздовжні напруження, які визначаємо за формулою

$$\sigma_{поз} = -\alpha_t \Delta t E + \frac{\mu p D_{вн}}{2\delta_n}, \tag{5}$$

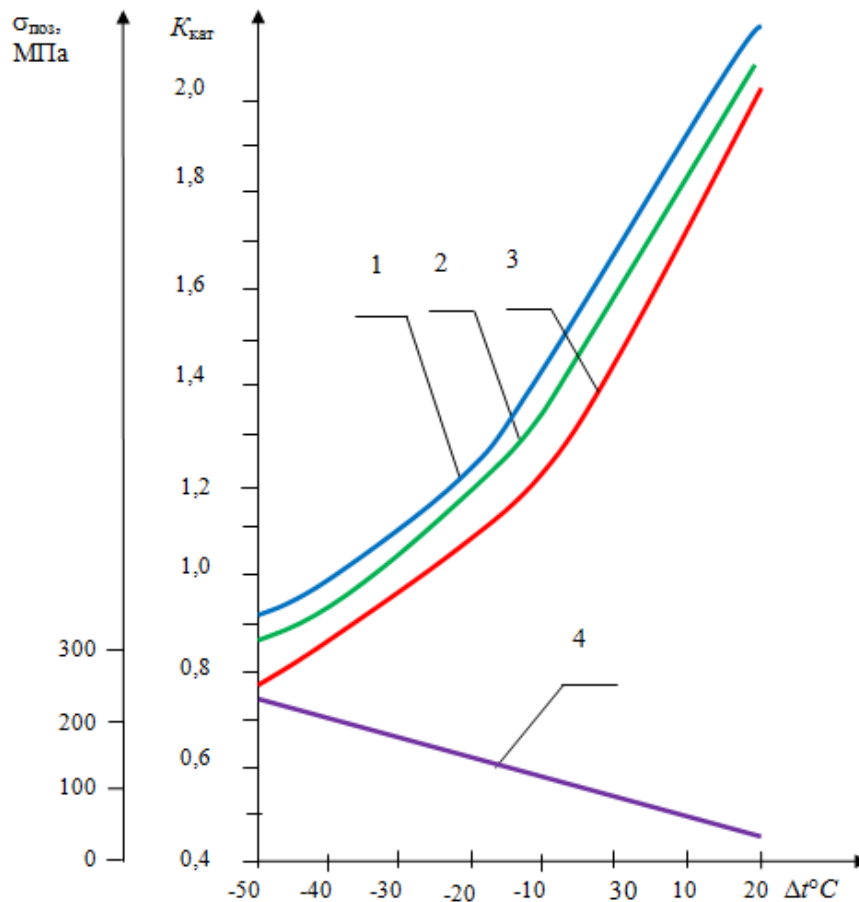
де  $\alpha_t$  – коефіцієнт лінійного теплового розширення металу труб, град<sup>-1</sup>,  $\Delta t$  – температурний перепад між температурою, за якої зварювали замикаючий стик і температурою експлуатації розглянутої ділянки МГ, °C;  $E$  – модуль пружності, МПа;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $p$  – тиск газу,

МПа;  $D_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр труби, мм;  $\delta_n$  – товщина стінки труби, мм;  $n$  – коефіцієнт надійності за навантаженням.



Рисунок 2 – Однопрогінні балкові надземні переходи МГ

За результатами розрахунків на рис. 3 побудовані графічні залежності коефіцієнта категорійності  $K_{\text{кат}}$  (криві 1-3) і поздовжнього напруження  $\sigma_{\text{поз}}$  (крива 4) від температурного перепаду  $\Delta t$ . Крива 1 отримана у випадку непровару, що моделюється півеліптичною тріщиною довжиною  $2l = 18$  мм, глибиною дефекту  $\Delta = 0,9$  мм і значенням  $KCV = 71,4$  Дж/см<sup>2</sup>; криві 2 і 3 – для випадку аналогічного непровару і значень  $KCV = 29,4$  Дж/см<sup>2</sup> та  $KCV = 11,4$  Дж/см<sup>2</sup> відповідно. Тиск газу у трубі становив  $p = 5,5$  МПа.



**Рисунок 3 – Залежності коефіцієнта категорійності  $K_{кат}$  (1-3) і поздовжнього напруження  $\sigma_{поз}$ (4) від температурного перепаду  $\Delta t$**

**Висновки.** Перепад температури експлуатації ділянок МГ  $\Delta t$  в діапазоні від  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+20^{\circ}\text{C}$  приводить до зміни поздовжнього напруження в трубах в межах від 35 МПа до 230 МПа (рис. 3, крива 4). Це суттєво впливає на значення коефіцієнта категорійності, який змінюється в межах  $0,75 \leq K_{кат} \leq 2,1$ .

За наявності у зварному шві дефекту з максимально допустимими розмірами  $l$  і  $\Delta$  та за значень ударної в'язкості  $KCV$  71,4 Дж/см<sup>2</sup>; 29,4 Дж/см<sup>2</sup> і 11,4 Дж/см<sup>2</sup> коефіцієнт категорійності  $K_{кат}$  стає меншим від одиниці при досягненні температурного перепаду  $\Delta t$  значень  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$  і  $25^{\circ}\text{C}$  відповідно. При цьому дефекти переходять з категорії “дефект незначний” в категорію “пошкодження середнє”, що вимагає проведення певних заходів для переведення їх у більш безпечну категорію.

Для зменшення впливу температурного перепаду  $\Delta t$  на коефіцієнт категорійності необхідно зварювати замикаючий кільцевий стик при температурі навколишнього середовища в діапазоні від  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $+10^{\circ}\text{C}$ .

### Література

1. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посібник; під заг. ред. В. В. Панасюка. / Г. М. Никифорчин, С. Г. Поляков, В. А. Черватюк, та інші. Під ред. Г. М. Никифорчина. – Львів: «Сполом», 2009. – 504 с. Том 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів.
2. Чувильдеев В. Н. Влияние старения на эксплуатационные свойства сталей магистральных газопроводов: сборник трудов научно-практического семинара [“Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов”], (Нижний Новгород, 23-25 января 2006 р.) / НИФТИ ННГУ им.Н.И. Лобачевского. Новгород: “ФФПК МЕЛАКС”, 2006. – С. 18 – 68.
3. Патон Б. Е. Обоснование методов обследования и выбор мест шурфовки магистральных газопроводов / Б. Е. Патон, А. Я. Недосека, С. К. Фомичев, М. А. Яременко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1999, № 1. – С. 3 – 11.
4. Визначення залишкової міцності магістальних трубопроводів з дефектами. ДСТУ–НБВ.2.3–21:2008. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. – 88 с.
5. API 579. Fitness-For-Service, API Recommended Practice 579, First Edition, American Petroleum Institute. – 2000. – 625 p.
6. Строительные нормы и правила: Нормы проектирования магистральных трубопроводов: СНиП–2.05.06-85. – М.: Стройиздат, 1985. – 62 с.
7. Строительство магистральных промышленных трубопроводов. Контроль качества и приемка работ. ч.1: ВСН 012-88.– М.: Миннефтегазстрой, 1989. – 104с.