

**ОЦІНКА ДОПУСТИМОСТІ ДЕФЕКТІВ ТИПУ КІЛЬЦЕВИХ ТРІЩИН У ЗОНІ ЗВАРНИХ МОНТАЖНИХ ШВІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ**

*Розглянуто зварні з'єднання прямолінійних ділянок підземних або наземних в насипі трубопроводів з наявними гострокінцевими дефектами, що моделюються внутрішніми кільцевими поверхневими тріщинами. Визначено їх напружений стан, зумовлений дією внутрішнього тиску, температурного перепаду між температурами монтажу та експлуатації, а також технологічними залишковими напруженнями. На основі двопараметричного критерію механіки крихко-в'язкого руйнування з використанням діаграми оцінки руйнування обчислено коефіцієнти запасу міцності такої ділянки трубопроводу з тріщиною у зварному шві і допустимі розміри дефекту.*

Значна частина розгалуженої мережі магістральних трубопроводів України для транспортування природного газу перебуває в експлуатації більше 20 років. Зі збільшенням термінів їх експлуатації все актуальнішою стає проблема ефективної та безперервної роботи трубопроводного транспорту, яка забезпечується організацією періодичної технічної діагностики стану елементів трубопроводів і ремонту в місяць виявлених недопустимих дефектів. У кожному конкретному випадку допустимість виявленого дефекту вимагає комплексного підходу та відповідних обґрунтувань щодо проведення поновлювально-ремонтних заходів. Однією з важливих складових такого підходу є визначення напруженого стану трубопроводів у конкретних умовах експлуатації, особливо в зонах зварних з'єднань, в яких до напружень, зумовлених дією силових факторів, додаються ще й залишкові технологічні напруження, та оцінка його впливу на міцність ділянок труб із дефектами.

**1. Визначення напруженого стану ділянки трубопроводу зі зварним швом.** Розглянемо зварні з'єднання прямолінійних ділянок підземних або наземних в насипі трубопроводів з дефектами, що моделюються внутрішніми кільцевими поверхневими півеліптичними тріщинами, які перебувають під дією осьових розтягувальних напружень, зумовлених внутрішнім тиском  $p$ , температурним перепадом між температурами монтажу та експлуатації і осьовими залишковими напруженнями. Для визначення залишкових напружень у зоні зварного з'єднання застосуємо розрахунково-експериментальний метод, який ґрунтується на побудові математичної моделі механіки деформівних тіл з власними напруженнями і розв'язанні відповідних обернених задач з використанням експериментальної інформації, одержаної неруйнівними методами [2, 4]. Ділянку трубопроводу зі стиковим зварним з'єднанням двох труб однакової товщини моделюватимемо круговою циліндричною оболонкою, що знаходиться під дією локалізованих осесиметричних залишкових несумісних термопластичних деформацій  $e_{ij}^0$ .

Позначимо через  $R$  і  $2h$  відповідно радіус серединної поверхні труби і товщину її стінки (рис. 1). Положення довільної точки на середній поверхні оболонки визначатимемо координатами  $z$  і  $\beta$ , де  $z$  – відстань точки вздовж осі труби від початкового поперечного перерізу, який суміщатимемо з площиною, що проходить через середину зварного шва,  $\beta$  – кут, що утворює довільна площина, яка проходить через вісь обертання, з початковою. Надалі віднесемо оболонку до триортогональної системи координат  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , де  $\alpha = z/R$  – безрозмірна координата,  $\gamma$  – координата вздовж зовнішньої нормалі до серединної поверхні (рис. 1).

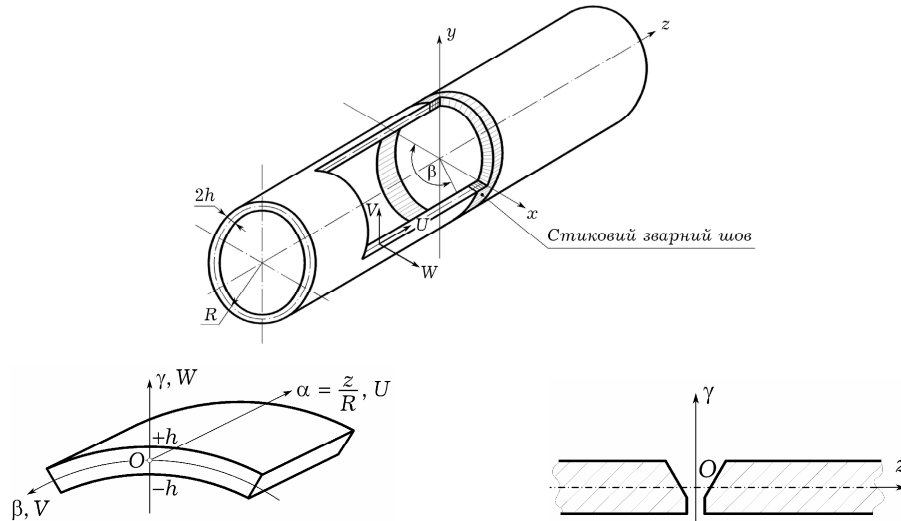


Рис. 1

На основі аналізу розподілів залишкових напружень і залишкових термопластичних деформацій, отриманих для кільцевих зварних з'єднань методом скінченних елементів, а також наведених результатів досліджень у літературних джерелах, зокрема в [1, 5–8], розподіл деформацій  $e_{ij}^0$  в зонах зварних швів апроксимуємо поліноміальними функціями від координат за довжиною і товщиною труби у вигляді

$$e_{\beta\beta}^0(\alpha, \gamma) = -\mathcal{E}_1^* f_1(\gamma) \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha), \quad e_{\alpha\alpha}^0(\alpha, \gamma) = -\mathcal{E}_2^* f_2(\gamma) \varphi_{23}(\alpha), \quad (1)$$

де

$$\varphi_{23}(\alpha) = \varphi_2(\alpha) S_2^0(\alpha) - \rho \varphi_3(\alpha) S_3^0(\alpha),$$

$$\varphi_i(\alpha) = 1 + s_i \frac{\alpha^2}{\alpha_i^2} - (3 + 2s_i) \frac{\alpha^4}{\alpha_i^4} + (2 + s_i) \frac{\alpha^6}{\alpha_i^6},$$

$$f_i(\gamma) = 1 + q_i \frac{\gamma}{h} - n_i \frac{\gamma^2}{h^2}, \quad n_0 = 1 - q_0, \quad q_0 > 1, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

$S_i^0(\alpha)$  – функції Гевісайда;  $S_i^0(\alpha) = 1$ ,  $|\alpha| \leq \alpha_i$ ;  $S_i^0(\alpha) = 0$ ,  $|\alpha| > \alpha_i$ ;  $\alpha_i = \frac{b_i}{R}$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;  $b_i$  – координати границь зон залишкових деформацій;  $\mathcal{E}_i^*$ ,  $\alpha_i$ ,  $\rho$ ,  $s_i$ ,  $q_i$ ,  $n_i$  – числові параметри. Функції  $f_i(\gamma)$  характеризують нерівномірність розподілу залишкових деформацій за товщиною труби, а  $\varphi_i(\alpha)$  – зміну цих деформацій уздовж осі труби. Графіки цих функцій для деяких значень числових параметрів наведено на рис. 2–4.

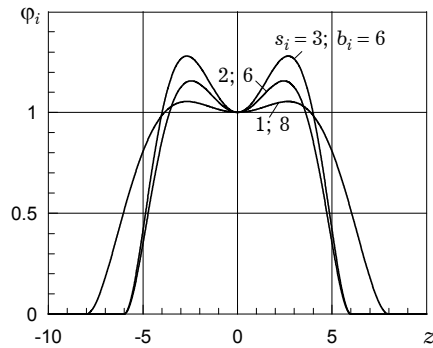


Рис. 2

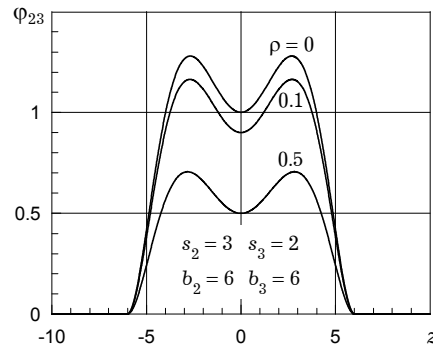


Рис. 3

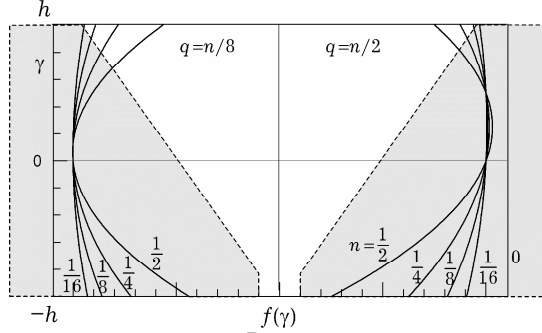


Рис. 4

Підставивши тепер вирази (1), (2) у загальні співвідношення теорії осесиметричних оболонок з залишковими напруженнями [9], ключові рівняння для визначення прогину серединної поверхні  $W$  запишемо у вигляді

$$\frac{d^4 W}{d\alpha^4} + 4\lambda^4 W = g(\alpha), \quad (3)$$

де

$$g(\alpha) = -4\lambda^4 R \mathcal{E}_1^* \left(1 - \frac{n_1}{3}\right) \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha) + \frac{d^2}{d\alpha^2} \left\{ \frac{\mathcal{E}_2^* R^2 q_2}{h} [\varphi_2(\alpha) S_2^0(\alpha) - \rho \varphi_3(\alpha) S_3^0(\alpha)] + \frac{\mathcal{E}_1^* \mu R^2 q_1}{h} \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha) \right\},$$

$\lambda^4 = 3R^2(1 - \mu^2)/(4h^2)$ ;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Використавши операцію згортки функцій  $g$  і фундаментального розв'язку рівняння (3) [12], розв'язок  $W(\alpha)$  подамо у формі

$$W(\alpha) = \mathcal{E}_1^* R \hat{W}(\alpha),$$

де

$$\hat{W}(\alpha) = -\frac{\lambda}{2} \left\langle \left(1 - \frac{n_1}{3}\right) F_{11}(\alpha) + \frac{\mu q_1 F_{21}(\alpha) + k^* q_2 [F_{22}(\alpha) - \rho F_{23}(\alpha)]}{\sqrt{3(1 - \mu^2)}} \right\rangle, \quad (4)$$

$$F_{ij}(\alpha) = \int_{-\alpha_j}^{\alpha_j} \varphi_j(\zeta) e^{-\lambda|\alpha - \zeta|} [\cos \lambda(\alpha - \zeta) + (-1)^{i-1} \sin \lambda|\alpha - \zeta|] d\zeta,$$

$$k^* = \frac{\mathcal{E}_2^*}{\mathcal{E}_1^*}, \quad i = 1, 2, \quad j = 1, 2, 3.$$

Тепер на основі вищенаведених формул і загальних співвідношень для напружень вирази для обчислення осьових  $\sigma_{\alpha\alpha}^r$  і колових  $\sigma_{\beta\beta}^r$  залишкових напружень в довільній точці зварного з'єднання зобразимо так:

$$\sigma_{\alpha\alpha}^r(\alpha, \gamma) = k_1 \sigma_T \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma), \quad \sigma_{\beta\beta}^r(\alpha, \gamma) = k_1 \sigma_T \hat{\sigma}_{\beta\beta}(\alpha, \gamma),$$

де

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) &= \frac{\lambda}{2(1 - \mu^2)} \frac{\gamma}{h} \left\{ -\sqrt{3(1 - \mu^2)} \left(1 - \frac{n_1}{3}\right) F_{21}(\alpha) + \mu q_1 F_{11}(\alpha) + \right. \\ &\quad \left. + k^* q_2 [F_{12}(\alpha) - \rho F_{13}(\alpha)] \right\} + \frac{1}{1 - \mu^2} \left( \frac{1}{3} - \frac{\gamma^2}{h^2} \right) \left\{ \mu n_1 \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha) + \right. \\ &\quad \left. + k^* n_2 [\varphi_2(\alpha) S_2^0(\alpha) - \rho \varphi_3(\alpha) S_3^0(\alpha)] \right\}, \\ \hat{\sigma}_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) &= \hat{W}(\alpha) + \mu \hat{\sigma}_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) + f_1(\gamma) \varphi_1(\alpha) S_1^0(\alpha), \end{aligned} \quad (5)$$

$k_1 = E \mathcal{E}_1^* / \sigma_T$ ;  $\sigma_T$  – границя текучості матеріалу.

У виразах (4), (5) числові параметри  $k_1, k^*, \alpha_i, s_i, q_i, n_i, \rho$ , що характеризують деформації  $e_{jj}^0, j = \alpha, \beta$ , є невідомими. Для їх визначення у випадку конкретного зварного з'єднання використовують експериментальні дані, які можна отримати за допомогою неруйнівних методів, і розв'язують обернену задачу теорії оболонок з власними технологічними напруженнями [3, 10].

Для кільцевого зварного з'єднання труб з діаметром 529 мм і товщиною  $2h = 8$  мм, виготовлених зі сталі 14ХГС ( $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $\mu = 0.3$ ), для числових значень параметрів  $k_1 = 0.8, k^* = 0.1, b_1 = 8, b_2 = 6, b_3 = 6, s_1 = 1, s_2 = 3, s_3 = 2, \rho = 0.1, n_1 = 0.25, n_2 = 0.5, q_1 = 0.125, q_2 = 0.25$  обчислено залишкові напруження, розподіли яких в зоні зварного шва графічно зображено на рис. 5 і рис. 6.

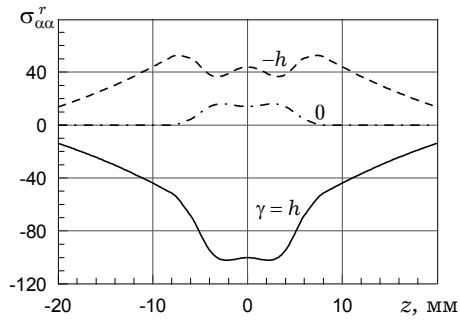


Рис. 5

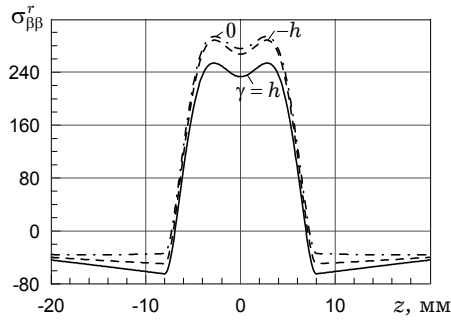


Рис. 6

**2. Оцінка статичної міцності ділянки трубопроводу з кільцевою тріщиною у зварному шві.** Розглянемо тепер прямолінійну підземну ділянку трубопроводу зі зварним з'єднанням з дефектом, який, згідно з методикою схематизації виявлених дефектів відповідними дефектами канонічної форми [6, 13], можна моделювати внутрішньою кільцевою поверхневою півеліптичною тріщиною з півосями  $a$  і  $c$  (рис. 7).

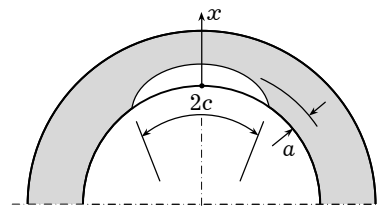


Рис. 7

Згідно з нормативними документами [13] у такій ділянці трубопроводу під внутрішнім тиском  $p$  поза зоною зварного з'єднання в поздовжньому напрямку діють осьові напруження

$$\sigma = -\alpha_T \Delta t E + \mu \frac{\bar{n} p D_{\text{int}}}{2h},$$

де  $\alpha_T$  – коефіцієнт теплового розширення металу труб;  $\Delta t$  – температурний перепад між температурою монтажу і температурою експлуатації;  $\bar{n}$  – коефіцієнт надійності за навантаженням, значення якого згідно з СНиП 2.05.06-85 («Строительные нормы и правила») для газопроводів приймається 1.1;  $D_{\text{int}}$  – внутрішній діаметр труби;  $2h$  – номінальна товщина стінки.

Розглянемо далі випадок, коли тріщина знаходиться у зварному шві ( $\alpha = 0$ ). У цьому випадку нормальні до берегів тріщини напруження будуть такими:

$$\sigma_{\alpha\alpha}(0, \gamma) = \sigma^0 + \sigma_{\alpha\alpha}^r(0, \gamma),$$

де  $\sigma^0 = \sigma + p$ ;  $\sigma_{\alpha\alpha}^r$  – осьові залишкові напруження.

Для оцінки міцності такої ділянки трубопроводу використаємо діаграму руйнування (ДОР або FAD), яка є граничною кривою, що визначає межу міцності між небезпечним та безпечним станом конструкції і дозволяє одно-

часно аналізувати два граничні стани – крихкий та в’язкий. Ця діаграма ґрунтується на двопараметричному критерії крихко-в’язкого руйнування  $Y = f(kL_r) - kK_r$ , де  $K_r = K_1/K_{1C}$  – безрозмірний коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН), що характеризує механізм крихкого руйнування у відповідній зоні вздовж контуру тріщини;  $K_{1C}$  – критичне значення КІН;  $L_r = \sigma_{\text{ref}}/\sigma_T$  – параметр, який визначає механізм в’язкого руйнування (пластична нестійкість) для цієї тріщини;  $k$  – допустимий коефіцієнт запасу міцності, який регламентується нормативними документами.

Функція  $f(kL_r)$  на основі численних експериментальних даних для різних матеріалів наведена в літературних джерелах, зокрема в [15, 16].

Нормативними документами, розробленими на основі аналізу літературних даних, наведених у вітчизняній і зарубіжній літературі, та проведених досліджень в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України під керівництвом д-ра техн. наук І. В. Ориняка, рекомендовано ДОР будувати також в координатах  $K_r$  і  $S_r = \sigma_{\text{ref}}/\sigma_B$  ( $\sigma_B$  – границя міцності матеріалу), а функцію  $K_r = f(S_r)$ , що характеризує граничну лінію, апроксимувати виразами:

$$K_r = \begin{cases} 1, & 0 \leq S_r < \frac{0.7\sigma_T}{\sigma_B}, \\ \frac{1}{1 - 0.7\sigma_T/\sigma_B} \left( 1 - \frac{0.21\sigma_T}{\sigma_B} - 0.7S_r \right), & \frac{0.7\sigma_T}{\sigma_B} \leq S_r < 1, \end{cases}$$

$$S_r = 1, \quad 0 \leq K_r < 0.3. \quad (6)$$

Цю діаграму та області категорійності дефектів зображено на рис. 8. Білим кольором на цьому рисунку виділено допустиму область, яка на основі критерію статичної міцності отримана шляхом зменшення граничної області в  $k$  разів. В залежності від рівня коефіцієнта запасу міцності дефекти відносяться до трьох умовних категорій: незначний, небезпечний (помірний, значний) і критичний.

Для рівня напружень  $\sigma_{\alpha\alpha}$  розраховуються КІН  $K_1$  та  $\sigma_{\text{ref}}$ , за якими обчислюють координати точки  $A$ , що визначає стан міцності трубопроводу з кільцевою тріщиною на двокритеріальній діаграмі:

$$K_r^A = \frac{K_1}{K_{1C}}, \quad S_r^A = \frac{\sigma_{\text{ref}}}{\sigma_B}.$$

Коефіцієнт запасу міцності (КЗМ)  $n$  для розрахункової точки  $A$  визначається графічно через відношення відрізків:

$$n = \frac{OA_2}{OA},$$

де  $A_2$  – точка перетину променя  $OA$  з граничною кривою ДОР. Коефіцієнт запасу міцності  $n$  можна також визначити аналітично за допомогою відношень

$$n = \frac{S_r^{A_2}}{S_r^A} \quad \text{або} \quad n = \frac{K_r^{A_2}}{K_r^A}. \quad (7)$$

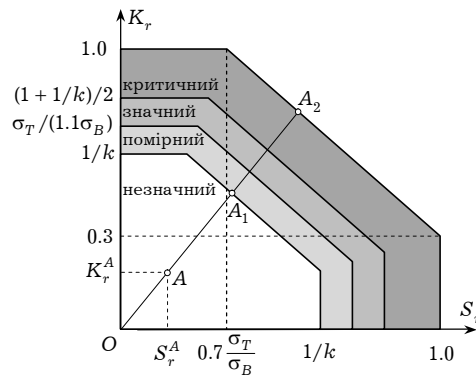


Рис. 8

На основі виразів (6), (7) для визначення коефіцієнта запасу міцності  $n$  отримуємо формули

$$n = \begin{cases} \frac{1}{K_r}, & 0 \leq S_r < \frac{0.7\sigma_T}{\sigma_B}, \\ \frac{1 - 0.21\sigma_T/\sigma_B}{(1 - 0.7\sigma_T/\sigma_B)K_r + 0.7S_r}, & \frac{0.7\sigma_T}{\sigma_B} \leq S_r < 1, \\ \frac{1}{S_r}, & 0 \leq K_r < 0.3. \end{cases}$$

Для розрахунку параметрів  $K_1$  і  $\sigma_{\text{ref}}$  використаємо співвідношення, наведені в [14]. При цьому зауважимо, що залишкові зварювальні напруження встигають майже повністю релаксувати до появи пластичної нестійкості і не впливають на величину  $\sigma_{\text{ref}}$ , тому при розрахунку параметра  $S_r$  залишкові технологічні напруження рекомендують не враховувати [15]. Тоді вираз для обчислення  $\sigma_{\text{ref}}$  подамо у вигляді

$$\sigma_{\text{ref}} = Z \sigma^0,$$

де

$$Z = \frac{1}{\frac{2}{\pi} \arccos(A \sin \theta) - \frac{\zeta \theta}{\pi} \left( \frac{2 - 2\tau + \zeta \tau}{2 - \tau} \right)},$$

$$A = \frac{\zeta (1 - \tau)(2 - 2\tau + \zeta \tau) + (1 - \tau + \zeta \tau)^2}{2(1 + (2 - \tau)(1 - \tau))},$$

$$z = \frac{a}{2h}, \quad \tau = \frac{2h}{R_0}, \quad \theta = \frac{\pi c}{4R_{\text{int}}},$$

$R_{\text{int}}$  – внутрішній радіус труби,  $R_0$  – її зовнішній радіус.

Для розрахунку КІН  $K_1$  розподіл залишкових напружень уздовж товщини труби апроксимуємо многочленом

$$\sigma_{\alpha\alpha}^r(0, x) = \sigma_0^r + \sigma_1 \frac{x}{2h} + \sigma_2 \left( \frac{x}{2h} \right)^2 + \sigma_3 \left( \frac{x}{2h} \right)^3 + \sigma_4 \left( \frac{x}{2h} \right)^4,$$

де  $x$  – координата вздовж нормалі стінки труби (рис. 7).

Тоді формулу для обчислення  $K_1$  можна подати у вигляді

$$K_1 = \left[ G_0(\sigma^0 + \sigma_0^r) + G_1\sigma_1 \frac{a}{2h} + G_2\sigma_2 \left( \frac{a}{2h} \right)^2 + G_3\sigma_3 \left( \frac{a}{2h} \right)^3 + G_4\sigma_4 \left( \frac{a}{2h} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}},$$

де  $G_i$ ,  $i = 0, \dots, 4$ , – коефіцієнти впливу [14],

$$Q = \begin{cases} 1.0 + 1.464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65}, & \frac{a}{c} \leq 1, \\ 1.0 + 1.464 \left( \frac{c}{a} \right)^{1.65}, & \frac{a}{c} > 1. \end{cases}$$

На основі апроксимації розв'язків задач про визначення КІН, отриманих у літературних джерелах методом скінченних елементів, у роботі [14] для значень геометричних параметрів  $R_{\text{int}}$ ,  $t$ ,  $a$ ,  $c$  в межах

$$0.2 \leq \frac{a}{2h} \leq 0.8, \quad 1.0 \leq \frac{c}{a} \leq 32.0, \quad 5 \leq \frac{R_{\text{int}}}{2h} \leq 1000 \quad (8)$$

з певним інтервалом у табличному вигляді наведено числові значення параметрів  $A_{ij}$ , за допомогою яких обчислюють величини  $G_i$ . На основі цих табличних даних у цій роботі, аналогічно як і в роботі [11] для осьових три-

щин, розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє обчислити коефіцієнти впливу  $G_i$  для довільних геометричних параметрів, що змінюються в межах (8), зокрема і для таких їхніх значень, які не наведені в таблицях у роботі [14]. Апроксимацію заданих таблично функцій здійснено на базі триваріантної квадратичної інтерполяції.

Залежно від рівня коефіцієнта запасу міцності  $n$  згідно з нормативними документами ділянка трубопроводу з дефектом за критерієм статичної міцності вважається:

- працездатною, а дефект безумовно допустимим, якщо  $n \geq k$ . Дефект відноситься до категорії незначних дефектів (світла область на рис. 8);
- умовно непрацездатною, а дефект умовно недопустимим, якщо коефіцієнт запасу міцності знаходиться в межах  $2k/(1+k) \leq n \leq k$ . Дефект відноситься до категорії небезпечних дефектів. Для прийняття рішення щодо термінів виконання ремонтних заходів ця категорія дефектів поділяється на дві: дефект помірний, якщо  $1.1 \cdot \sigma_B/\sigma_T \leq n \leq k$ , і дефект значний, якщо  $2k/(1+k) \leq n \leq 1.1 \cdot \sigma_B/\sigma_T$ ;
- непрацездатною, а дефект безумовно недопустимим, якщо  $n < 2k/(1+k)$ . Тоді дефект відноситься до категорії критичних дефектів.

Допустимий коефіцієнт запасу міцності за критерієм статичної міцності  $k$  обчислюється за формулою [13]

$$k = \frac{0.9 k_n k_p}{m},$$

де  $k_n$  – коефіцієнт надійності за матеріалом,  $k_p$  – за призначенням,  $m$  – за умовами роботи. Коефіцієнти безпеки для магістральних трубопроводів визначаються за СНиП 2.05.06-85. Для ділянки трубопроводу, що розглядається,  $m = 0.9$ ,  $k_n = 1.47$ ,  $k_p = 1$ ,  $\sigma_T = 400$  МПа,  $\sigma_B = 575$  МПа. Тоді відповідно отримуємо  $k = 1.63$ ,  $2k/(1+k) = 1.24$ ;  $1.1 \cdot \sigma_B/\sigma_T = 1.58$ , а з урахуванням тривалого терміну експлуатації трубопроводів цього типу на основі літературних даних прийнято, що  $K_{1C} = 93$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>.

Для такої ділянки трубопроводу під тиском  $p = 4.5$  МПа з кільцевою тріщиною у зварному шві для різних її геометричних розмірів проведено числовий аналіз задачі і обчислено коефіцієнти запасу міцності  $n$ . Розрахунок проведено для двох глибин тріщини:  $a = 2$  мм та  $a = 3$  мм і різних її відносних довжин  $c/a$ . При цьому згідно з нормативними документами [13] прийнято, що  $\Delta t = -20$  °С, і для вибраного матеріалу  $\alpha_t = 1.58 \cdot 10^{-5}$  °С<sup>-1</sup>. На внутрішній поверхні  $\gamma = -h$  рівень залишкових напружень  $\sigma_{\alpha\alpha}^r(0) = 43.8$  МПа (рис. 5).

На рис. 9 графічно зображено залежність рівнів коефіцієнтів запасу міцності  $n$  даного зварного з'єднання з дефектом від відносної довжини тріщини, що описується величиною  $c/a$ . Криві 1 і 2 графічно відображають цю залежність відповідно для глибин тріщин  $a = 2$  мм і  $a = 3$  мм з урахуванням дії на їх береги залишкових напружень  $\sigma_{\alpha\alpha}^r(0)$ , а штриховими лініями 1' та 2' зображено аналогічну залежність КЗМ  $n$  у випадку, коли дефект таких же розмірів знаходиться на відстані від зварного шва, на

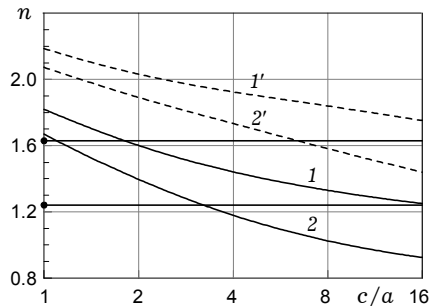


Рис. 9

якій залишковими напруженнями можна знехтувати і прийняти, що  $\sigma_{\alpha\alpha}^r = 0$ . Як видно з графіків, залишкові напруження можуть суттєво вплинути на рівень коефіцієнта запасу міцності  $n$ . Прямими лініями  $n = 1.24$  і  $n = 1.63$  зображено зону зміни КЗМ  $n$ , для якої дану ділянку труби можна вважати умовно непрацездатною, а дефект умовно недопустимим. Якщо рівень КЗМ  $n$  знаходиться вище від прямої  $n = 1.63$ , то дефект вважається допустимим, а ділянка трубопроводу працездатною. Коли рівень  $n$  знаходиться нижче від лінії  $n = 1.24$ , то дефект відноситься до категорії критичних, а ділянка трубопроводу вважається непрацездатною. У випадках умовної непрацездатності даної ділянки труби та її непрацездатності потрібно прийняти рішення про виконання відповідних ремонтних заходів.

1. *Винокуров В. А., Григорянц А. Г.* Теория сварочных деформаций и напряжений. – Москва: Машиностроение, 1984. – 280 с.
2. *Касаткин Б. С., Кудрин А. Б., Лобанов Л. М. и др.* Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справ. пос. – Киев: Техніка, 1981. – 415 с.
3. *Кир'ян В. І., Осадчук В. А., Николишин М. М.* Механіка руйнування зварних з'єднань металоконструкцій. – Львів: СПОЛОМ, 2007. – 320 с.
4. *Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкий В. В., Ткачук Г. И.* Методика определения остаточных напряжений в сварочных соединениях и элементах конструкций с использованием спекл-интерферометрии // Автомат. сварка. – 2006. – № 1. – С. 25–30.
5. *Махненко В. И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наук. думка, 1976. – 320 с.
6. *Махненко В. И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 618 с.
7. *Махненко В. И.* Совершенствование методов оценки остаточного ресурса сварных соединений конструкций длительного срока эксплуатации // Автомат. сварка. – 2003. – № 10-11. – С. 112–121.
8. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных соединений / Под ред. Б. Е. Патона. – Киев: ИНДПРОМ, 2001. – 815 с.
9. *Осадчук В. А.* Діагностування залишкових технологічних напружень в елементах конструкцій розрахунково-експериментальним методом // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2003. – **46**, № 1. – С. 88–104.
10. *Осадчук В. А., Банахевич Ю. В., Иванчук О. О.* Визначення напруженого стану магістральних трубопроводів в зоні кільцевих зварних швів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – **42**, № 2. – С. 99–104.  
 The same: *Osadchuk V. A., Banakhevych Yu. V., Ivanchuk O. O.* Determination of the stressed state of main pipelines in the zones of circular welds // Mater. Sci. – 2006. – **42**, No. 2. – P. 256–262.
11. *Осадчук В. А., Пороховський Ю. В., Иванчук О. О.* Діагностування залишкових напружень і оцінка їх впливу на статичну міцність зварних з'єднань різновисотних труб з дефектами типу тріщин // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2008. – **51**, № 2. – С. 133–146.  
 The same: *Osadchuk V. A., Porokhovs'kyi Yu. V., Ivanchuk O. O.* Diagnostics of residual stresses and estimation of their influence on the static strength of welding joints of pipes with different thicknesses with crack-type defects // J. Math. Sci. – 2009. – **162**, No. 2. – P. 161–179.
12. *Підстригач Я. С., Ярема С. Я.* Температурні напруження в оболонках. – Київ: Вид-во АН УРСР, 1961. – 212 с.
13. *Расчеты на прочность действующих магистральных трубопроводов с дефектами.* ВБН В.2.3–00018201.04–2000. – Киев: Госнефтегазпром, 2000. – 56 с.
14. *Fitness-for-Service.* – American Petroleum Institute. Recommended Practice 579. First edition. – 2000. – 625 p.
15. *Harrison R. P., Loosemore K., Milne J., Dowling A. R.* Assessment of the integrity of structures containing defects // CEBG R6, Revision 2, April 1980. – 193 p.
16. *Milne J.* Failure assessment diagrams and estimates: A comparison for ferritic and austenitic steels // Int. J. Pressure Vessels and Piping. – 1983. – **13**. – P. 107–125.



## **ОЦЕНКА ДОПУСТИМОСТИ ДЕФЕКТОВ ТИПА КОЛЬЦЕВЫХ ТРЕЩИН В ЗОНЕ СВАРНЫХ МОНТАЖНЫХ ШВОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

*Рассмотрены сварные соединения прямолинейных участков подземных или наземных в насыпи трубопроводов с имеющимися остроконечными дефектами, которые моделируются внутренними кольцевыми поверхностными трещинами. Определено их напряженное состояние, обусловленное действием внутреннего давления, температурного перепада между температурами монтажа и эксплуатации и технологическими остаточными напряжениями. На основе двухпараметрического критерия механики хрупко-вязкого разрушения с использованием диаграммы оценки разрушения вычислены коэффициенты запаса прочности такого участка трубопровода с трещиной в сварном шве и допустимые размеры дефекта.*

## **ESTIMATION OF ADMISSIBILITY OF RING CRACK-TYPE DEFECTS IN ZONE OF WELDED FIELD JOINTS OF MAIN PIPELINES**

*The welded joints of rectilinear regions of underground or overground pipelines in the embankment with pointed defects which are modeled by the internal ring surface cracks are considered. Their stressed state due to the internal pressure, temperature drop between the mounting and operation temperatures and technological residual stresses are defined. On the basis of two-parametric criterion of brittle-viscous failure mechanics, utilizing the diagram of failure estimation, the coefficient of safety margin of such a pipeline region with a crack in the weld and admissible defect sizes are calculated.*

<sup>1</sup> Нац. ун-т «Львів. політехніка», Львів,

<sup>3</sup> Нац. акціонерна компанія «Нафтогаз України»  
ДК «Укртрансгаз», Київ

Одержано  
09.06.09