

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ ЗВАРНИХ ОБОЛОНКОВИХ МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ОСЬОВИМИ ПОВЕРХНЕВИМИ ТРІЩИНАМИ У ЗОНІ ЗВАРНОГО ШВА

Розглянуто зварні з'єднання прямолінійних ділянок оболонкових машинобудівних конструкцій з гострокінцевими дефектами, які змодельовані осьовими поверхневими тріщинами. Визначено їх напружений стан, зумовлений дією внутрішнього тиску, температурного перепаду між температурами монтажу і експлуатації та технологічними залишковими напруженнями. На основі двопараметричного критерію механіки крижков'язкого руйнування з використанням діаграми оцінки руйнування обчислено коефіцієнти запасу міцності (КЗМ) такої ділянки оболонкової конструкції з тріщиною у зварному шві і допустимі розміри дефекту. Виявлено вплив залишкових напружень, обчислених за теорією оболонок Кірхгофа-Лява та за уточненою теорією оболонок, на КЗМ.

Вступ. Геометричні неоднорідності, особливо у вигляді гострокінцевих дефектів тріщиноподібного типу, можуть істотно впливати на міцність і довговічність металевих конструкцій. Тому одна з основних задач – виявити і виміряти такі дефекти, не порушуючи цілісності конструкції, ідентифікувати їх форму і розміри. Для її розв'язання на основі результатів досліджень, виконаних у різних країнах, створено відповідні засоби контролю. Серед них, зокрема, слід виділити комплекси програм для внутрішньотрубного діагностування дефектів у тілі труби фірми Rozen [9].

Важливою для використання результатів ідентифікації дефектів, щоб оцінити ресурс безпечної роботи оболонкових машинобудівних конструкцій, є методика схематизації виявлених дефектів канонічної форми, які зручно описувати у відповідних математичних моделях. Для гострокінцевих дефектів найбільш консервативною схематизацією є тріщини еліптичної форми, півеліптичні і наскрізні. В літературі розроблено відповідні правила та алгоритми такої схематизації залежно від розмірів та розміщення дефекту і його орієнтації відносно головних напружень [1, 3, 6, 7]. При цьому слід зауважити, що для ремонту конструкції зварюванням в експлуатаційних умовах найцікавіші поверхневі дефекти, змодельовані півеліптичними тріщинами [8].

Для оцінювання міцності ділянки зварного шва з дефектами типу тріщин використовуємо діаграму руйнування, яка є граничною кривою, що визначає границю міцності між небезпечним та безпечним станом конструкції і дає можливість одночасно аналізувати два граничні стани – крихкий та в'язкий.

Формулювання задачі. Розглянемо прямолінійну ділянку оболонки під дією внутрішнього тиску p зі зварним з'єднанням із зовнішнім поверхневим дефектом у кільцевому монтажному шві, який згідно з нормативними документами змодельовано поздовжньою поверхневою півеліптичною тріщиною з півосями a і c у круговому циліндрі (рис. 1).

Положення довільної точки на контурі тріщини задамо через кут $0 \leq \varphi \leq \pi$ (рис. 1). Якщо кут $\varphi = 0$, точка контуру тріщини знаходиться на поверхні, а якщо $\varphi = \pi/2$ – на контурі тріщини, що відповідає максимальній її глибині.

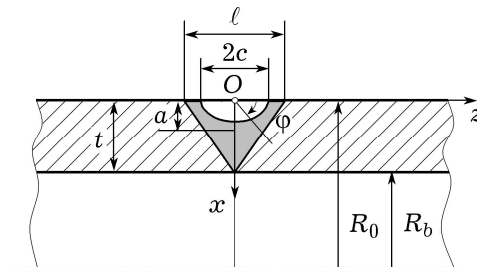


Рис. 1.

Якщо нормальні до берегів тріщини колові напруження $\sigma_{\beta\beta}$ апроксимувати поліноміальним многочленом

$$\sigma_{\beta\beta}(x) = \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{x}{t}\right) + \sigma_2 \left(\frac{x}{t}\right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{x}{t}\right)^3 + \sigma_4 \left(\frac{x}{t}\right)^4,$$

де x – координата вздовж нормалі до внутрішньої стінки труби, а t – її товщина ($t = 2h$), то для обчислення коефіцієнта інтенсивності напружень нормального відриву K_1 придатний вираз [1]

$$K_1 = \left[G_0 \sigma_0 + G_1 \sigma_1 \left(\frac{a}{t}\right) + G_2 \sigma_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + G_3 \sigma_3 \left(\frac{a}{t}\right)^3 + G_4 \sigma_4 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}. \quad (1)$$

Тут G_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) – коефіцієнти впливу,

$$Q = 1.0 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}, \quad \text{якщо} \quad \frac{a}{c} \leq 1;$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left(\frac{c}{a}\right)^{1.65}, \quad \text{якщо} \quad \frac{a}{c} > 1.$$

Коефіцієнти впливу G_0 і G_1 для поздовжньої тріщини обчислюємо за формулами

$$\begin{aligned} G_0 &= A_{00} + A_{10} \beta + A_{20} \beta^2 + A_{30} \beta^3 + A_{40} \beta^4 + A_{50} \beta^5 + A_{60} \beta^6, \\ G_1 &= A_{01} + A_{11} \beta + A_{21} \beta^2 + A_{31} \beta^3 + A_{41} \beta^4 + A_{51} \beta^5 + A_{61} \beta^6, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\beta = 2\varphi/\pi$ ($0 \leq \varphi \leq \pi/2$); A_{ij} – параметри, отримані на основі апроксимації розв'язків задачі методом скінченних елементів для широкого діапазону зміни геометрії труби і розмірів тріщини:

$$0,2 \leq \frac{a}{t} \leq 0,8; \quad 1,0 \leq \frac{c}{a} \leq 32,0; \quad 5 \leq \frac{R_b}{t} \leq 1000. \quad (3)$$

Їхні числові значення подано у вигляді таблиць [1].

Із виразів (2) отримуємо:

$$G_0 = A_{00}; \quad G_1 = A_{01}, \quad \text{якщо} \quad \varphi = 0;$$

$$G_0 = \sum_{n=0}^6 A_{n0}; \quad G_1 = \sum_{n=0}^6 A_{n1}, \quad \text{якщо} \quad \varphi = \frac{\pi}{2}.$$

Коефіцієнти впливу G_2, G_3, G_4 у точках на контурі тріщини, що задані кутами $\varphi = 0, \varphi = \pi/2$, виразимо через G_0, G_1 і обчислимо коефіцієнти вагових функцій M_i, N_i ($i = 1, 2, 3$):

якщо $\varphi = \pi/2$,

$$G_2 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left(\frac{16}{15} + \frac{1}{3} M_1 + \frac{16}{105} M_2 + \frac{1}{12} M_3 \right);$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left(\frac{32}{35} + \frac{1}{4} M_1 + \frac{32}{315} M_2 + \frac{1}{20} M_3 \right);$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left(\frac{256}{315} + \frac{1}{5} M_1 + \frac{256}{3465} M_2 + \frac{1}{30} M_3 \right);$$

$$M_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}} (3G_1 - G_0) - \frac{24}{5}; \quad M_2 = 3;$$

$$M_3 = \frac{6\pi}{\sqrt{2Q}}(G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5};$$

якщо $\varphi = 0$, то

$$G_2 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left(\frac{4}{5} + \frac{2}{3} N_1 + \frac{4}{7} N_2 + \frac{1}{2} N_3 \right); \quad G_3 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left(\frac{4}{7} + \frac{1}{2} N_1 + \frac{4}{9} N_2 + \frac{2}{5} N_3 \right);$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left(\frac{4}{9} + \frac{2}{5} N_1 + \frac{4}{11} N_2 + \frac{1}{3} N_3 \right);$$

$$N_1 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}}(2G_0 - 5G_1) - 8; \quad N_2 = \frac{15\pi}{\sqrt{Q}}(3G_1 - G_0) + 15;$$

$$N_3 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}}(3G_0 - 10G_1) - 8.$$

За наведеними у праці [1] таблицями для параметрів A_{ij} розроблено [6] програмне забезпечення, яке дає можливість обчислити коефіцієнти впливу G_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) для довільних геометричних параметрів труби та розмірів тріщин, що змінюються в межах (3), зокрема, і для тих значень, які не подано в цих таблицях. При цьому функції, значення яких наведені у вигляді таблиць, апроксимовані на основі триваріантної квадратичної інтерполяції.

Для обчислення напруження σ_{ref} , яке є уявною границею текучості жорстко-пластичного тіла з дефектом за умови, що це тіло знаходиться в граничному стані для заданої системи зовнішніх навантажень, використано відомі рекомендації [1]. Якщо ділянка труби з осью поверхневою півеліптичною тріщиною знаходиться під дією внутрішнього тиску p , то

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{g\sigma_b + [(g\sigma_b)^2 + 9(M_s\sigma_m)^2]^{0.5}}{3}. \quad (4)$$

Тут

$$g = 1 - 20 \left(\frac{a}{2c} \right)^{0.75} \alpha^3; \quad \alpha = \frac{a}{t} \cdot \frac{1}{1 + \frac{t}{c}}; \quad M_s = \frac{1}{1 - 0.85 \frac{a}{t}} \left[1 - 0.85 \frac{a}{t} \left(\frac{1}{M_t} \right) \right];$$

$$M_t = \left(\frac{1.02 + 0.4411\lambda^2 + 0.006124\lambda^4}{1.0 + 0.02642\lambda^2 + 1.533 \cdot 10^{-6} \lambda^4} \right)^{0.5}; \quad \lambda = \frac{1.818c}{\sqrt{R_b t}},$$

де R_b – внутрішній радіус труби; σ_m , σ_b – нормальні до берегів тріщини мембранні та згинальні напруження

$$\sigma_m = \frac{p R_b}{t}, \quad \sigma_b = \frac{p R_0^2}{R_0^2 - R_b^2} \left[\frac{t}{R_b} - \frac{3}{2} \left(\frac{t}{R_b} \right)^2 + \frac{9}{5} \left(\frac{t}{R_b} \right)^3 - 2 \left(\frac{t}{R_b} \right)^4 \right],$$

де R_0 – зовнішній радіус труби.

Числовий аналіз. Залишкові напруження у зварному з'єднанні розраховано для труби діаметром 219 мм з товщиною стінок 7 мм, виготовленої зі сталі X-70 ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0.3$; $\sigma_B = 588.7$ МПа; $\sigma_T = 441.3$ МПа).

На рис. 2 зображено розподіл залишкових напружень $\sigma_{\beta\beta}^r$ на зовнішній та внутрішній поверхнях труби, обчислених за уточненою теорією оболонок (суцільна лінія) та теорією оболонок Кірхгофа–Лява (штрихова лінія), а за товщиною труби в перерізах $z = 0$ і $z = 2.8$ – на рис. 3.

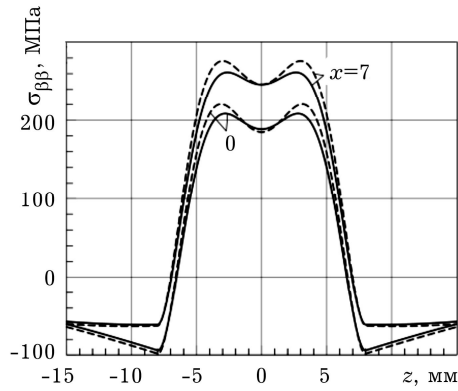


Рис. 2.

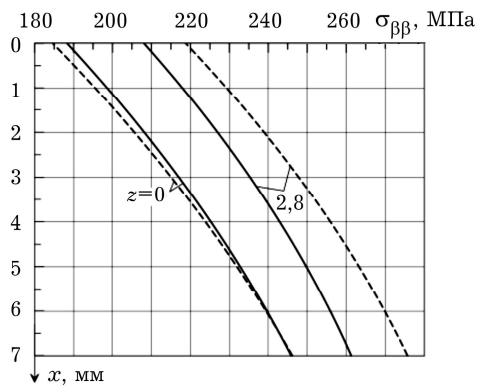


Рис. 3.

Вираз для обчислення усереднених по поверхні зовнішньої півеліптичної тріщини (див. рис. 1) напружень $\sigma_{\beta\beta}^{*r}$ подамо у вигляді

$$\sigma_{\beta\beta}^{*r} = \frac{4}{\pi\alpha_*^2} \int_0^{\alpha_*} \sqrt{\alpha_*^2 - \alpha^2} \left[\sigma_0^r(\alpha) + \frac{1}{2\alpha_*} \left(\frac{a}{t}\right) \sqrt{\alpha_*^2 - \alpha^2} \sigma_1^r(\alpha) + \frac{1}{3\alpha_*^2} \left(\frac{a}{t}\right)^2 (\alpha_*^2 - \alpha^2) \sigma_2^r(\alpha) \right] d\alpha,$$

де $\alpha_* = c/R$.

Для розподілу залишкових напружень (рис. 2) $\sigma_{\beta\beta}^{*r} = 194$ МПа – за уточненою теорією оболонок і 208 МПа – за теорією оболонок Кірхгофа–Лява.

Для вищевказаних значень напружень і співвідношень геометричних розмірів тріщини для різних її глибин за формулами (1), (4) обчислюємо величини K_1 та σ_{ref} , викликані дією сумарних напружень від внутрішнього тиску $\sigma_{\beta\beta}^p$ та залишкових напружень $\sigma_{\beta\beta}^{*r}$ ($\sigma_{\beta\beta} = \sigma_{\beta\beta}^p + \sigma_{\beta\beta}^{*r}$), і відповідно $K_r = K_1/K_{1C}$ та $S_r = \sigma_{\text{ref}}/\sigma_B$. Для матеріалу шва, згідно з наведеними [4] експериментальними даними, прийнято $K_{1C} = 48 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$. Далі розраховуємо КЗМ зварного з'єднання n , а також КЗМ n_p , які відповідають дії на ділянку труби з тріщиною в зварному шві тільки експлуатаційних напружень $\sigma_{\beta\beta}^H = p \frac{R_b}{t} (\sigma_{\beta\beta}^{*r} = 0)$ [5]:

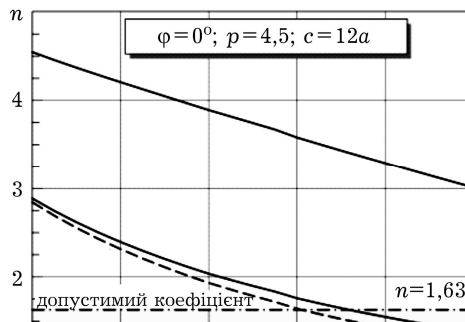
$$\begin{aligned} n &= \frac{1}{K_r}, & 0 \leq S_r < \frac{0.7\sigma_T}{\sigma_B}; \\ n &= \frac{1 - 0.21\sigma_T/\sigma_B}{(1 - 0.7\sigma_T/\sigma_B)K_r + 0.7S_r}, & \frac{0.7\sigma_T}{\sigma_B} \leq S_r < 1; \\ n &= \frac{1}{S_r}, & 0 \leq K_r < 0.3. \end{aligned}$$

На рис. 4 побудовано залежність КЗМ n і n_p від відносної глибини тріщини a/t . Пряма лінія $n = 1.63$ відповідає допустимому значенню КЗМ k за критерієм статичної міцності, який згідно з нормативними докумен-

тами [2] для заданої ділянки труби набуває значення $k = 1.63$. Лінія $n = 1.1$ відповідає межі, нижче якої КЗМ набувають значення, згідно з якими відповідні дефекти належать до категорії критичних. Крива 1 характеризує залежність КЗМ n_p від відносної

глибини тріщини, що відповідає рівню експлуатаційних напружень $\sigma_{\beta\beta}^H = 104.8$ МПа. Крива 2 описує залежність КЗМ n від глибини тріщини з урахуванням сумарної дії експлуатаційних $\sigma_{\beta\beta}^H$ і залишкових

$\sigma_{\beta\beta}^{*r} = 194$ МПа напружень, обчислених за уточненою теорією оболонок, які залишаються в зоні зварного шва навіть після високого відпуску. Крива 3 побудована з урахуванням експлуатаційних і усереднених залишкових напружень $\sigma_{\beta\beta}^{*r} = 208$ МПа, отриманих за теорією Кірхгофа-Лява.



Висновки. Встановлено, що з ростом глибини тріщини значення КЗМ n зварного з'єднання з дефектом суттєво зменшується. Крім цього, відхилення між значеннями КЗМ, для залишкових напружень, порахованими за двома теоріями, спадають, але за уточненою теорією оболонок КЗМ — повільніше. Допустиме значення КЗМ $n = 1.69$ з урахуванням залишкових напружень досягається за глибини дефекту $a/t = 0.51$ для залишкових напружень, отриманих за класичною теорією оболонок, і $a/t = 0.57$ — за уточненою, що на 12% більше, ніж за класичною теорією оболонок. Крім цього, залишкові напруження у зоні зварного з'єднання істотно знижують КЗМ.

1. Бакаев В. В. Технологии и оборудование компании «Розен» для диагностики объектов нефтегазовой отрасли // Материалы III науч.-техн. конф. «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта». — Минск, 2000. — С. 120–123.
2. Визначення залишкової міцності магистральних трубопроводів з дефектами. — К.: Мінрегіонбуд України, 2008. — 88 с.
3. Кушнір Р. М., Николишин М. М., Осадчук В. А. Пружний та пружно-пластичний граничний стан оболонок з дефектами. — Львів: СПОЛОМ, 2003. — 320 с.
4. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — К.: Наук. думка, 2006. — 618 с.
5. Осадчук В. А., Банахевич Ю. В. Оцінка допустимості дефектів типу кільцевих тріщин в зоні зварних монтажних швів магистральних трубопроводів // Мат. методи та фіз.-мех. поля. — 2010. — 53, № 2. — С. 37–45.
6. Осадчук В. А., Пороховський Ю. В., Іванчук О. О. Діагностування залишкових напружень і оцінка їх впливу на статичну міцність зварних з'єднань різновисотних труб з дефектами типу тріщин // Там само. — 2008. — 51, № 2. — С. 133–146.
7. Расчеты на прочность действующих магистральных трубопроводов с дефектами. — К.: Госнефтегазпром, 2000. — 56 с.
8. Ремонт магистральних трубопроводів під тиском / М. В. Бекер, В. С. Бут, Р. М. Говдяк та ін. — К.: Вид-во «Кий», 2008. — 240 с.
9. Shi Y. W., Chen B. Y., Zhang J. X. Effects of welding residual stress on fatigue crack growth behaviour in butt welds of a pipeline steel // Eng. Fract. Mech. — 1990. — 36, № 6. — P. 893–902.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ
ОБОЛОЧЕЧНЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ОСЕВЫМИ
ПОВЕРХНОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ В ЗОНЕ СВАРНОГО ШВА**

Рассмотрены сварные соединения прямолинейных участков оболочечных машиностроительных конструкций с остроконечными дефектами, которые смоделировано осевыми поверхностными трещинами. Определено их напряженное состояние, обусловленное внутренним давлением, перепадом температур 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 оболочечной конструкции с трещиной в сварном шве и допустимые размеры дефекта. Изучено влияние остаточных напряжений на коэффициент запаса прочности, рассчитанных по теории оболочек Кирхгофа-Лява и уточненной теории оболочек.

**DETERMINING OF THE INFLUENCE OF RESIDUAL STRESSES ON THE STRENGTH OF WELDED
SHELL MACHINE-BUILDING STRUCTURES WITH AXIAL SURFACE CRACKS IN THE WELD
ZONE**

The welded joints of linear parts of the shell machine-building structures with pointed defects, which are modeled by the axial surface cracks, are considered. Their stressed state, caused by the internal pressure, temperature difference between the mounting and operation temperatures and technological residual stresses, is determined. On the basis of a two-parametric criterion of mechanics brittle-ductile fracture, using the estimation diagram of fracture, the coefficient of margin of strength of such part of the shell structure with a crack in the weld and possible dimensions of the defect are evaluated. The influence of residual stresses of the coefficient of margin of strength evaluated by the Kirchhoff-Lave shell theory and by the refined shell theory, is shown.