

ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВІСНОГО РОЗПОДІЛУ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ПРЯМОЛІНІЙНИМИ ШВАМИ І ОЦІНКА ЇХ ВПЛИВУ НА МІЦНІСТЬ З'ЄДНАНЬ ЗА НАЯВНОСТІ ДЕФЕКТІВ ТИПУ ТРІЩИН

На основі тривимірної теорії розглянуто математичну модель зварного з'єднання плоских елементів конструкцій прямолінійними швами. Такі з'єднання моделюються плоским шаром з прямолінійним швом з залишковими напруженнями. Методом безпосереднього інтегрування ключових рівнянь без використання потенціальних функцій отримано в замкнутій формі вирази для визначення компонент тензора напружень для множини заданих локалізованих в зоні шва несумісних залишкових деформацій. Досліджено вплив залишкових напружень на статичну міцність такого зварного з'єднання з гострокінцевими дефектами, що моделюються зовнішніми поверхневими тріщинами. З використанням двопараметричного критерію крихко-в'язкого руйнування обчислено коефіцієнти запасу міцності зварного з'єднання з тріщиною у зварному шві.

Зварні з'єднання з прямолінійними швами широко використовуються в різноманітних елементах зварних конструкцій. Це можуть бути пластинчасті елементи конструкцій, а також трубчасті, зокрема магістральні трубопроводи тощо. Негативний вплив незрелаксованих залишкових напружень на міцність і несучу здатність зварних конструкцій, особливо за наявності гострих концентраторів, добре відомий. Локальність залишкових пластичних деформацій зумовлює в елементах конструкцій в зоні зварного шва в загальному випадку тривісний напружений стан і для його оцінки потрібно розв'язувати тривимірну задачу. В процесі тривалого терміну експлуатації, а також при виготовленні конструкцій в зонах зварних з'єднань можуть виникати різноманітні гострокінцеві дефекти, які, зазвичай, моделюються тріщинами. Аналіз результатів досліджень, наведених в літературних джерелах (див., наприклад, [4]), показує, що в зонах осевих (поздовжніх) швів у циліндричних трубах (магістральних трубопроводах) розподіл зварювальних напружень мало чим відрізняється від аналогічного розподілу в пластинах, тобто ефект кривини труби в цьому випадку є незначним. У загальному випадку такий розподіл є тривісним, тому для його аналізу в зонах швів використаємо математичну модель плоского шару з прямолінійним швом. Для конструкції з тривалим терміном експлуатації використовують розрахунково-експериментальний метод, який базується на математичних моделях тіл із залишковими напруженнями і обернених задачах з використанням експериментальної інформації. Суть методу викладено, зокрема, в роботах [3, 5, 8, 9]. У роботі [7] на базі такого підходу розглянуто міцність ділянки трубопроводу з кільцевою тріщиною у зварному шві. У випадку, коли кільцева тріщина знаходиться поза зварним швом, а ділянка трубопроводу піддана дії крутних моментів, у роботі [14] на основі скінченно-елементного аналізу досліджено процес розвитку геометричних розмірів тріщини в лінійній та нелінійній постановці задачі.

1. Розрахунково-експериментальне визначення залишкових напружень у з'єднаннях зі зварним швом. Розглянемо нескінченний плоский шар товщини $2h$, віднесений до декартової системи координат X_1, X_2, X_3 . Введемо безрозмірну систему координат $x = X_1/h$, $y = X_2/h$, $z = X_3/h$, спрямувавши вісь y уздовж осі шва, а вісь z – уздовж нормалі до серединної поверхні шару (рис. 1). Нехай шар перебуває під дією зумовлених зварюванням пластичних деформацій e_{ij}^0 і подамо компоненти тензора ма-

лої деформації у вигляді суми $e_{ij} = e_{ij}^e + e_{ij}^0$, де e_{ij}^e – компоненти тензора пружної деформації.

Приймаємо, що шар перебуває в умовах плоскої деформації ($e_{yy} = 0$, $\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = 0$, де σ_{ij} – компоненти тензора дотичних напружень) і його поверхні $z = \pm 1$ вільні від навантаження, а поле деформацій e_{ij}^0 описується функціями

$$\begin{aligned} e_{xx}^0 &= e_{xx}^0(x, z), & e_{yy}^0 &= e_{yy}^0(x, z), & e_{zz}^0 &= e_{zz}^0(x, z), \\ e_{xz}^0 &= e_{xz}^0(x, z), & e_{yz}^0 &= e_{yz}^0 = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Тоді, використавши запропонований В. М. Вігаком [2] метод безпосереднього інтегрування рівнянь рівноваги і суцільності у напруженнях без використання допоміжних потенціальних функцій, визначальні рівняння про напружений стан такого шару запишемо у вигляді

$$\nabla^2 \sigma = \theta(x, z), \quad \nabla^2 \sigma_{zz} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \sigma, \quad (2)$$

де

$$\theta(x, z) = -\frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2 e_{zz}^0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 e_{xx}^0}{\partial z^2} - 2 \frac{\partial^2 e_{xz}^0}{\partial x \partial z} + \mu \nabla^2 e_{yy}^0 \right), \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

$\sigma = \sigma_{xx} + \sigma_{zz}$; σ_{ii} , $i = x, y, z$, – нормальні компоненти тензора залишкових напружень; E – модуль Юнга; μ – коефіцієнт Пуассона. Дотичні σ_{xz} , а також нормальні σ_{xx} та осьові σ_{yy} напруження визначаються через розв'язувальні функції σ та σ_{zz} за формулами

$$2\sigma_{xz} = - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial \sigma_{zz}(\eta, z)}{\partial z} \operatorname{sgn}(x - \eta) d\eta, \quad (3)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma - \sigma_{zz}, \quad \sigma_{yy} = -Ee_{yy}^0 + \mu\sigma. \quad (4)$$

Граничні умови на поверхнях шару на основі рівняння рівноваги виразимо через розв'язувальну функцію σ_{zz} так:

$$\sigma_{zz} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0, \quad z = \pm 1. \quad (5)$$

Застосувавши до рівнянь (2) і граничних умов (5) інтегральне перетворення Фур'є за координатою x , у просторі зображень отримаємо

$$\bar{\nabla}^2 \bar{\sigma} = \bar{\theta}(s, z), \quad \bar{\nabla}^2 \bar{\sigma}_{zz} = -s^2 \bar{\sigma}, \quad (6)$$

$$\bar{\theta}(s, z) = -\frac{E}{1-\mu^2} \left(-s^2 \bar{e}_{xx}^0 + \frac{\partial^2 \bar{e}_{xx}^0}{\partial z^2} - 2is \frac{\partial \bar{e}_{xz}^0}{\partial z} + \mu \bar{\nabla}^2 \bar{e}_{yy}^0 \right),$$

$$\bar{\sigma}_{zz} = 0, \quad \frac{\partial \bar{\sigma}_{zz}}{\partial z} = 0, \quad z = \pm 1. \quad (7)$$

Тут $\bar{\nabla}^2 = \frac{\partial^2}{\partial z^2} - s^2$; s – параметр інтегрального перетворення; $i = \sqrt{-1}$; символами з рисками позначено відповідні величини у просторі зображень.

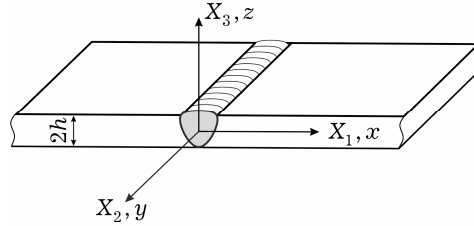


Рис. 1

Для побудови розв'язків цих рівнянь використаємо фундаментальний розв'язок рівняння $\bar{\nabla}^2 \varphi^* = \delta(z - \eta)$ (тут $\delta(\cdot)$ – дельта-функція Дірака), який можна записати у вигляді

$$\varphi^*(z, s, \eta) = \frac{1}{2s} \operatorname{sh} s |z - \eta|, \quad (8)$$

і операцію згортки.

Тоді розв'язки диференціальних рівнянь (6), що задовольняють граничні умови (7), можна подати у формі

$$\bar{\sigma}_{zz}(s, z) = -\frac{s}{2} \int_{-1}^1 \bar{\sigma}(s, \eta) \operatorname{sh} s |z - \eta| d\eta, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}(s, z) = & \frac{\operatorname{sh} sz}{s(2s - \operatorname{sh} 2s)} \int_{-1}^1 \bar{\theta}(s, \eta) (s\eta \operatorname{ch} s\eta - \operatorname{ch}^2 s \operatorname{sh} s\eta) d\eta - \\ & - \frac{\operatorname{ch} sz}{s(2s + \operatorname{sh} 2s)} \int_{-1}^1 \bar{\theta}(s, \eta) (s\eta \operatorname{sh} s\eta + \operatorname{sh}^2 s \operatorname{ch} s\eta) d\eta + \\ & + \frac{1}{2s} \int_{-1}^1 \bar{\theta}(s, \eta) \operatorname{sh} s |z - \eta| d\eta. \end{aligned} \quad (10)$$

Застосувавши тепер обернене перетворення Фур'є, отримаємо вирази для обчислення $\sigma(x, z)$, $\sigma_{zz}(x, z)$ і $\sigma_{xz}(x, z)$ в довільній точці нормального до осі шва перерізу шару

$$\begin{aligned} \sigma(x, z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\sigma}(s, z) \exp(isx) ds, \\ \sigma_{zz}(x, z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\sigma}_{zz}(s, z) \exp(isx) ds, \\ \sigma_{xz}(x, z) &= \frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{s} \frac{d\bar{\sigma}(s, z)}{dz} \exp(isx) ds. \end{aligned} \quad (11)$$

Якщо поле умовних пластичних деформацій подати у вигляді

$$e_{xx}^0 = \varepsilon_{xx}^0(x) f(z), \quad e_{yy}^0 = \varepsilon_{yy}^0(x) f(z), \quad e_{zz}^0 = \varepsilon_{zz}^0(x) f(z), \quad (12)$$

де

$$f(z) = 1 - m(1 - z)^2,$$

то для визначення напружень у безмежному плоскому шарі з прямолінійним швом отримуємо формули

$$\begin{aligned} \sigma(x, z) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left\{ \Omega(s) [1 - 2\psi(s) \operatorname{ch} sz] - \right. \\ & \quad - m\bar{\sigma}_0(s) \left[1 - z^2 + \frac{2}{s^2} - \frac{4}{s} \psi(s) \operatorname{cth} s \cdot \operatorname{ch} sz \right] - \\ & \quad \left. - 2m\bar{\sigma}_0(s) \left[z + 2R(s) \left(\frac{1}{s} - \operatorname{cth} s \right) \operatorname{ch} sz \right] \right\} \cos sx ds, \\ \sigma_{zz}(x, z) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left\{ \Omega(s) [1 + \psi(s) (sz \operatorname{sh} sz - (1 + s \operatorname{cth} s) \operatorname{ch} sz)] - \right. \\ & \quad - m\bar{\sigma}_0(s) [1 - z^2 + 2\psi(s) (z \operatorname{cth} s \operatorname{sh} sz - \operatorname{ch} sz)] - \\ & \quad \left. - 2m\bar{\sigma}_0(s) [z - R(s) ((1 - s \operatorname{cth} s) z \operatorname{ch} sz + s \operatorname{sh} sz)] \right\} \cos sx ds, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xz}(x, z) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left\{ s \Omega(s) \psi(s) (z \operatorname{ch} sz - \operatorname{cth} s \operatorname{sh} sz) + 2m \bar{\sigma}_0(s) \left[\frac{z}{s} - \right. \right. \\ \left. \left. - \psi(s) \left(\left(\frac{1}{s} \operatorname{cth} s - 1 \right) \operatorname{sh} sz + z \operatorname{cth} s \operatorname{ch} sz \right) \right] - 2m \bar{\sigma}_0(s) \left[\frac{1}{s} - \right. \right. \\ \left. \left. - R(s) \left(\left(\frac{1}{s} - \operatorname{cth} s \right) (\operatorname{ch} sz + sz \operatorname{sh} sz) + s \operatorname{ch} sz \right) \right] \right\} \sin sx \, ds. \end{aligned} \quad (13)$$

Тут

$$\begin{aligned} \Omega(s) &= -\bar{\sigma}_0(s) \left[1 - 2m - \frac{2m}{s^2} \right] + \frac{2m}{s^2} \bar{\sigma}_2(s), \\ \psi(s) &= \frac{2 \operatorname{sh} s}{2s + \operatorname{sh} 2s}, & R(s) &= \frac{2 \operatorname{sh} s}{\operatorname{sh} 2s - 2s}, \\ \bar{\sigma}_0(s) &= \frac{E}{1 - \mu^2} [\bar{\varepsilon}_{zz}^0(s) + \mu \bar{\varepsilon}_{yy}^0(s)], & \bar{\sigma}_2(s) &= \frac{E}{1 - \mu^2} [\bar{\varepsilon}_{zz}^0(s) + \bar{\varepsilon}_{xx}^0(s)]. \end{aligned} \quad (14)$$

При цьому формули для обчислення напружень σ_{xx} і σ_{zz} можна подати у вигляді

$$\sigma_{xx}(x, z) = \sigma(x, z) - \sigma_{zz}(x, z), \quad \sigma_{yy}(x, z) = -E e_{yy}^0(x, z) + \mu \sigma(x, z). \quad (15)$$

Якщо пластина виготовлена з матеріалу, в якому структурні перетворення проходять за високих температур, то залишкові напруження зумовлені тільки термопластичними деформаціями, і тоді

$$e_{xx}^0 + e_{yy}^0 + e_{zz}^0 = 0. \quad (16)$$

На основі цього співвідношення можна записати

$$e_{zz}^0 = -(e_{xx}^0 + e_{yy}^0). \quad (17)$$

Тоді вирази для $\bar{\sigma}_0(s)$ і $\bar{\sigma}_2(s)$ мають вигляд

$$\bar{\sigma}_0(s) = -\frac{E}{1 - \mu^2} [\varepsilon_{xx}^0(s) + (1 - \mu) \varepsilon_{yy}^0(s)], \quad \bar{\sigma}_2(s) = -\frac{E}{1 - \mu^2} \varepsilon_{yy}^0(s). \quad (18)$$

У випадку, коли деформації e_{ij}^0 апроксимовано поліноміальними функціями, аналогічними, наприклад, як у роботі [10], отримаємо формули для обчислення залишкових напружень σ_{ij} , в які входять довільні параметри, що описують і характеризують поля залишкових деформацій. На основі цих формул досліджено тривісний розподіл компонент тензора напружень, які зображено у вигляді

$$\sigma_{ij} = k_1 \sigma_T \tilde{\sigma}_{ij}, \quad i, j = x, y, z, \quad (19)$$

де σ_T – границя текучості і k_1 – числовий параметр, а також досліджено розподіл безрозмірних напружень $\tilde{\sigma}_{ij}$ в координатах x, y, z для різних значень числових параметрів функцій, що описують поля залишкових деформацій.

2. Оцінка статичної міцності пластини з поздовжньою тріщиною у зварному шві. Розглянемо тепер пластину зі зварним з'єднанням з дефектом, який згідно з методикою схематизації наявних дефектів дефектами канонічними формами [1, 4, 11] можна моделювати поверхневою півеліптичною тріщиною з півосями a і c (рис. 2). Таку розрахункову модель можна застосувати також для дослідження міцності ділянки труби магістрального трубо-

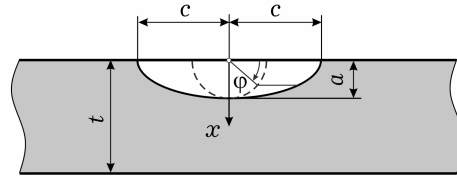


Рис. 2

проводу з зовнішнім поверхневим дефектом в прямолінійному зварному шві, а також у кільцевому багат шаровому шві труби великого діаметра і товщини, де оболонковий ефект є порівняно малим [4].

Розглянемо далі випадок, коли тріщина знаходиться в перерізі зварного шва $x = 0$. У цьому випадку нормальні до берегів тріщини напруження будуть такими:

$$\sigma_{xx}(0, \gamma) = \sigma^{\text{ext}} + \sigma_{xx}^{\text{res}}(0, \gamma),$$

де σ^{ext} – напруження, зумовлені зовнішнім навантаженням; σ_{xx}^{res} – поперечні відносно лінії шва залишкові напруження.

Для визначення коефіцієнтів запасу міцності такої пластини використано діаграму руйнування (ДОР або FAD), яка є граничною кривою, що визначає границю міцності між безпечним та небезпечним станом елемента конструкції і дозволяє одночасно аналізувати два граничні стани: крихкий і в'язкий [6, 12, 13]. Функція, яка описує граничну лінію цієї діаграми, побудована на основі численних експериментальних даних і наведена в літературних джерелах, зокрема в [1, 6, 13]. Зображення цієї функції у формі, поданій у [12], використано в [7] для визначення залишкової статичної міцності зварних з'єднань труб неоднакової товщини. Для опису граничної кривої надалі будемо використовувати зображення, наведене в роботі [1]:

$$K_r = f(S_r),$$

де

$$K_r = \begin{cases} 1, & 0 \leq S_r < \frac{0.7\sigma_T}{\sigma_B}, \\ \frac{1}{1 - 0.7\sigma_T/\sigma_B} \left(1 - \frac{0.21\sigma_T}{\sigma_B} - 0.7S_r \right), & \frac{0.7\sigma_T}{\sigma_B} \leq S_r < 1, \\ S_r = 1, & 0 \leq K_r < 0.3. \end{cases} \quad (20)$$

Тут $K_r = K_1/K_{1c}$ – безрозмірний коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН), що характеризує механізм крихкого руйнування у відповідній зоні уздовж контуру тріщини; K_{1c} – критичне значення КІН; σ_B – границя міцності матеріалу; $S_r = \sigma_{\text{ref}}/\sigma_B$ – параметр, який визначає механізм в'язкого руйнування (пластична нестійкість) для цієї тріщини [12, 13].

Графічні зображення такої діаграми наведено в роботах [1, 6]. Там також наведено області категорійності дефектів, які відносять дефекти до трьох умовних категорій: незначний, небезпечний (помірний, значний) і критичний, в залежності від величини коефіцієнта запасу міцності (КЗМ).

У випадку, коли тріщина знаходиться в зоні дії залишкових напружень, коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) подамо у вигляді суми

$$K_1 = K_1^{\text{ext}} + K_1^{\text{res}}, \quad (21)$$

де K_1^{ext} відповідає дії зовнішнього навантаження, а K_1^{res} – залишкових напружень. Тоді відповідно

$$K_r = K_r^{\text{ext}} + K_r^{\text{res}}. \quad (22)$$

Відмітимо також, що залишкові зварювальні напруження до появи пластичної нестійкості майже повністю встигають релаксувати і не впливають на величину σ_{ref} , тому при розрахунку S_r їх рекомендують не враховувати [5, 13].

На основі аналізу ДОР у вигляді [7] співвідношень (20) отримано формули для визначення коефіцієнтів запасу міцності n для зварного з'єднання труби, які подано у вигляді

$$n = \begin{cases} \frac{1}{(1 + \zeta_r)K_r^{\text{ext}}}, & 0 \leq S_r < \frac{0.7\sigma_T}{\sigma_B}, \\ \frac{1 - 0.21\sigma_T/\sigma_B}{(1 - 0.7\sigma_T/\sigma_B)(1 + \zeta_r)K_r^{\text{ext}} + 0.7S_r}, & \frac{0.7\sigma_T}{\sigma_B} \leq S_r < 1, \\ \frac{1}{S_r}, & 0 \leq K_r < 0.3, \end{cases} \quad (23)$$

де $\zeta_r = K_r^{\text{res}}/K_r^{\text{ext}}$.

Для розрахунку параметрів K_1 і σ_{ref} використаємо співвідношення, наведені в [12]. Ці співвідношення дозволяють обчислити вказані величини K_1 і σ_{ref} у випадку, коли нормальні до берегів тріщини напруження σ можна подати у вигляді полінома четвертої степені по товщині пластини:

$$\sigma(x) = \sigma_0 + \sigma_1 \cdot \frac{X}{t} + \sigma_2 \left(\frac{X}{t}\right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{X}{t}\right)^3 + \sigma_4 \left(\frac{X}{t}\right)^4, \quad (24)$$

де t – товщина пластини. Тут, на відміну від позначення безрозмірної координати x для пластини, при визначенні залишкових напружень використано величину X .

Вираз для обчислення σ_{ref} запишемо так:

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{g\sigma_b + [(g\sigma_b)^2 + 9\sigma_m^2(1-\alpha)^2]^{1/2}}{3(1-\alpha)^2}, \quad g = 1 - 20\left(\frac{a}{2c}\right)^{3/4} \cdot \alpha^3, \quad \alpha = \frac{a/t}{1+t/c}, \quad (25)$$

де мембранні напруження

$$\sigma_m = \sigma_0 + \frac{\sigma_1}{2} + \frac{\sigma_2}{3} + \frac{\sigma_4}{5}, \quad (26)$$

а згинальні

$$\sigma_b = -\frac{\sigma_1}{2} - \frac{\sigma_2}{2} - \frac{9\sigma_3}{20} - \frac{6\sigma_4}{15}. \quad (27)$$

Коефіцієнт інтенсивності напружень K_1^{ext} від дії зовнішнього навантаження розраховуємо за формулою

$$K_1^{\text{ext}} = \left[G_0\sigma_0^{\text{ext}} + G_1\sigma_1^{\text{ext}} \cdot \frac{a}{t} + G_2\sigma_2^{\text{ext}} \left(\frac{a}{t}\right)^2 + G_3\sigma_3^{\text{ext}} \left(\frac{a}{t}\right)^3 + G_4\sigma_4^{\text{ext}} \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}. \quad (28)$$

Тут $Q = 1.0 + 1.464(a/c)^{1.65}$, $a/c \leq 1$.

Для обчислення коефіцієнтів впливу G_i в діапазоні $0.1 \leq a/c \leq 1$ з похибкою, що не перевищує 3%, отримано апроксимаційні вирази

– для $\varphi = 0^\circ$:

$$G_i = \frac{C_0 + C_2 \cdot \frac{a}{t} + C_4 \cdot \frac{a}{2c} + C_6 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + C_8 \left(\frac{a}{2c}\right)^2 + C_{10} \cdot \frac{a}{t} \cdot \frac{a}{2c}}{1 + C_1 \cdot \frac{a}{t} + C_3 \cdot \frac{a}{2c} + C_5 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + C_7 \left(\frac{a}{2c}\right)^2 + C_9 \cdot \frac{a}{t} \cdot \frac{a}{2c}},$$

– для $\varphi = 90^\circ$:

$$G_i = C_0 + C_1 \cdot \frac{a}{t} + C_2 \ln\left(\frac{a}{2c}\right) + C_3 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + C_4 \left[\ln\left(\frac{a}{t}\right)\right]^2 + C_5 \cdot \frac{a}{t} \cdot \ln\left(\frac{a}{2c}\right) + C_6 \left(\frac{a}{t}\right)^3 + C_7 \left(\ln\frac{a}{2c}\right)^3 + C_8 \cdot \frac{a}{t} \cdot \left(\ln\frac{a}{2c}\right)^2 + C_9 \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot \ln\left(\frac{a}{2c}\right). \quad (29)$$

Значення числових параметрів C_j для G_i наведено в табл. 1.

Таблиця 1

$\varphi = 0^\circ$					
$C_j \backslash G_i$	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4
C_0	0.27389	0.028002	0.012675	0.0073602	0.0049892
C_1	-0.79900	-1.1022	-1.1481	-1.1544	-1.2132
C_2	-0.26714	-0.033521	-0.015221	-0.0065361	-0.0043696
C_3	1.4761	0.22057	-0.082355	-0.36173	-0.46223
C_4	3.7226	0.52258	0.13759	0.049133	0.020326
C_5	0.16033	0.10846	0.041064	0.044540	0.068641
C_6	0.64383	0.065941	0.019569	0.0089574	0.0041052
C_7	-1.7330	-3.1077	-1.9848	-1.4999	-1.1912
C_8	-2.5867	-0.93098	-0.22151	-0.081464	-0.033493
C_9	0.55987	2.4443	2.9522	3.0826	3.2003
C_{10}	-0.54503	0.18878	0.16896	0.10436	0.074990
$\varphi = 90^\circ$					
$C_i \backslash G_0$	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4
C_0	0.79807	0.82407	0.75607	0.68582	0.63097
C_1	0.041621	0.023018	0.0018397	-0.0016499	0.0084876
C_2	-0.55195	0.14705	0.28788	0.30738	0.30584
C_3	0.94721	0.15481	0.023688	-0.033522	-0.067862
C_4	-0.33668	0.048556	0.12715	0.13604	0.13547
C_5	0.52973	0.16795	0.066900	0.029992	0.025147
C_6	-0.93391	-0.12109	0.012227	0.072309	0.092532
C_7	-0.064536	0.0072007	0.021628	0.022755	0.022520
C_8	0.28786	0.093079	0.041800	0.022788	0.015831
C_9	-0.22806	-0.094413	-0.051236	-0.030355	-0.029806
C_{10}	—	—	—	—	—

Зауважимо, що наведені вирази можуть бути з певною похибкою використані для обчислення КІН в циліндрах, якщо у формулі (28) коефіцієнт впливу G_0 замінити виразом $M_s G_0$, у якому

$$M_s = \frac{1}{1 - 0.85 \frac{a}{t}} \left[1 - 0.85 \frac{a}{t} \left(\frac{1}{M_t} \right) \right],$$

$$M_t = \begin{cases} (1 + 0.3797\lambda^2 - 0.001236\lambda^4)^{1/2}, & \lambda \leq 9.1, \\ 0.01936\lambda^2 + 3.3, & \lambda > 9.1, \end{cases}$$

де $\lambda = \frac{1.818c}{\sqrt{R_{\text{int}} t}}$, R_{int} – внутрішній радіус труби.

Для розрахунку КІН від дії залишкових напружень K_1^{res} у формулах для обчислення нормальних до берегів тріщини залишкових напружень σ_{xx}^{res} потрібно здійснити заміну змінних $z = 1 - \frac{2X}{t}$, $0 \leq X \leq t$, потім провес-

ти відповідні перетворення гіперболічних функцій $\text{sh } sz$, $\text{ch } sz$ і в перерізі, в якому розташована тріщина (в розглядуваному випадку – в перерізі $X = 0$), розподіл напружень $\sigma_{xx}^{\text{res}}(0, X)$ апроксимувати по товщині пластини поліномом четвертої степені за $\frac{X}{t}$ та зобразити його у вигляді

$$\sigma_{xx}^{\text{res}}(0, X) = \sigma_0^{\text{res}} + \sigma_1^{\text{res}} \cdot \frac{X}{t} + \sigma_2^{\text{res}} \left(\frac{X}{t}\right)^2 + \sigma_3^{\text{res}} \left(\frac{X}{t}\right)^3 + \sigma_4^{\text{res}} \left(\frac{X}{t}\right)^4. \quad (30)$$

Тоді на основі виразу (30) формули для обчислення K_1^{res} запишемо в формі, аналогічній для обчислення K_1^{ext} :

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

У цій формулі коефіцієнти впливу G_i обчислюються за формулами, подібними до (29).

Якщо напруження σ_{xx}^{res} (30) усереднити по поверхні тріщини і отримати величину позначити через $\sigma^{\text{res}*}$, то для обчислення K_1^{res} отримуємо вираз

$$K_1^{\text{res}} = G_0 \sigma^{\text{res}*} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}. \quad (31)$$

На основі вищенаведених співвідношень проведено числовий аналіз задачі для пластини, виготовленої зі сталі марки X60 ($E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0.3$, $\sigma_B = 588$ МПа, $\sigma_T = 588$ МПа), товщини 21 мм, яка розтягується нормальними до берегів тріщини зовнішніми напруженнями σ_0^{ext} . Обчислення проведено для різних глибин тріщини a з відношенням півосей еліпса $c = 1.2a$. При цьому напруження σ_0^{ext} задані такими, як і в трубі з діаметром $D = 1020$ мм і товщиною стінки $t = 21$ мм, яка знаходиться під дією внутрішнього тиску $p = 4.5$ МПа, тобто $\sigma_0^{\text{ext}} = p \frac{R_{\text{int}}}{t} = 104.8$ МПа. Значення критичного коефіцієнта інтенсивності для зварного шва прийнято $K_{1c}^{\text{weld}} = 48$ МПа $\cdot \text{м}^{1/2}$.

У випадку, що розглянуто у формулі (25) для обчислення напруження σ_{ref} , величина $\sigma_b = 0$, а формула для обчислення K_1^{ext} має вигляд

$$K_1^{\text{ext}} = G_0 \sigma_0^{\text{ext}} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}. \quad (32)$$

Обчислення проведено для двох значень залишкових напружень $\sigma_{xx}^{\text{res}} = 60$ МПа і $\sigma_{xx}^{\text{res}} = 90$ МПа, які знаходяться в межах зміни незрелаксованих залишкових напружень в зоні зварного шва (50 ÷ 120 МПа), що залишаються навіть після високого відпуску зварного з'єднання [5, 12, 13].

Коефіцієнт інтенсивності напружень K_1^{res} , зумовлений дією залишкових напружень, розраховано за формулою (31).

На рис. 3 зображено залежність від відносної глибини тріщини a/t коефіцієнтів запасу міцності n і n_{ext} . Прямая лінія для значення $n = 1.63$ відповідає рівню допустимого коефіцієнта запасу міцності k за критерієм статичної міцності, який згідно з нормативними документами [1, 11] для ви-

браної ділянки трубопроводу приймає значення $k = 1.63$. Прямая лінія для $n = 1.1$ відповідає межі, нижче якої коефіцієнти запасу міцності приймають значення, згідно з якими відповідні дефекти відносять до категорії критичних. Крива 1 характеризує залежність коефіцієнта запасу міцності n_{ext} , що відповідає рівню експлуатаційних напружень $\sigma^{\text{ext}} = 104.8$ МПа. Кривою 2 зображено залежність коефіцієнта запасу міцності n від глибини тріщини з урахуванням сумарної дії експлуатаційних напружень σ^{ext} і залишкових напружень $\sigma_{xx}^{\text{res}} = 60$ МПа. Крива 3 побудована з урахуванням експлуатаційних і залишкових напружень $\sigma_{xx}^{\text{res}} = 90$ МПа.

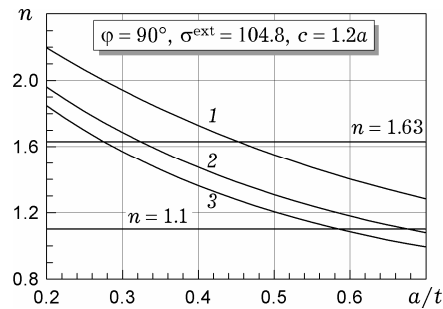


Рис. 3

Як видно з графіків, з ростом глибини тріщини величина коефіцієнта запасу міцності n зварного з'єднання з дефектом значно зменшується. При цьому суттєвий вплив відіграють залишкові напруження, особливо в елементах зварних конструкцій тривалої експлуатації, в яких рівень експлуатаційних напружень, як правило, знижують.

1. *Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами.* ДСТУ-НБВ.2.3-21:2008. - Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. - 88 с.
2. *Вігак В. М.* Прямий метод інтегрування рівнянь плоских задач пружності й термомпружності // Доп. НАН України. - 1998. - № 12. - С. 62-67.
3. *Кир'ян В. І., Осадчук В. А., Николішин М. М.* Механіка руйнування зварних з'єднань металоконструкцій. - Львів: СПОЛОМ, 2007. - 320 с.
4. *Махненко В. І.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. - Киев: Наук. думка, 2006. - 620 с.
5. *Махненко В. І.* Совершенствование методов оценки остаточного ресурса сварных соединений конструкций длительного срока эксплуатации // Сб. основных публикаций сотрудников отдела «Мат. методов исследования физ.-хим. процессов при сварке и спецэлектрометаллургии» Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (Киев). - 2004. - С. 3-12.
6. *Никифорчин Г. М., Поляков С. Г., Черватюк В. А., Ориняк І. В., Слободян З. В., Джала Р. М.* Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів // Механіка руйнування та міцність матеріалів: Дов. посібник / Під заг. ред. В. В. Панасюка. - Львів: Сполум, 2009. - Т. 11. - С. 374-392.
7. *Осадчук В. А., Банахевич Ю. В.* Оцінка допустимості дефектів типу кільцевих тріщин у зоні зварних монтажних швів магістральних трубопроводів // Мат. методи та фіз.-мех. поля. - 2010. - **53**, № 2. - С. 37-45.
8. *Осадчук В. А., Банахевич Ю. В., Іванчук 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., Banakhevyuch 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.
9. *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 // Мат. методи та фіз.-мех. поля. - 2008. - **51**, № 2. - С. 133-146.

Te 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 welded joints of pipes with different thicknesses with crack-type defects // J. Math. Sci. – 2009. – **162**, No. 2. – P. 161–179.

10. Osadchuk V., Banaheвич Ю., Цимбалюк Л. Вплив ширини зони пластичних деформацій на розподіл тривісних залишкових напружень у плиті з багат шаровим прямолинійним зварним швом // Машинознавство. – 2008. – № 2. – С. 3–7.
11. Расчеты на прочность действующих магистральных трубопроводов с дефектами. ВБН В.2.3–00018201.04–2000. – Киев: Госнефтегазпром, 2000. – 56 с.
12. Fitness-for-Service. American Petroleum Institute. Recommended Practice 579. First edition. – 2000. – 625 p.
13. 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.
14. Mechab B., Serier B., Bachir Bouiadjra B., Kaddouri K., Feaugas X. Linear and non-linear analyses for semi-elliptical surface cracks in pipes under bending // Int. J. Pressure Vessels and Piping. – 2011. – **88**. – P. 57–63.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕХОСНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРЯМОЛИНЕЙНЫМИ ШВАМИ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ ТИПА ТРЕЩИН

На основании трехмерной теории рассмотрена математическая модель сварного соединения плоских элементов конструкций прямолинейными швами. Такие соединения моделируются плоским слоем с прямолинейным швом с остаточными напряжениями. Методом непосредственного интегрирования разрешающих уравнений без использования потенциальных функций в замкнутой форме получено выражение для определения компонент тензора напряжений для множества заданных локализованных в зоне шва несовместимых остаточных деформаций. Исследовано влияние остаточных напряжений на статическую прочность такого сварного соединения с остроконечными дефектами, которые моделируются внешними поверхностными трещинами. С использованием двухпараметрического критерия хрупко-вязкого разрушения определены коэффициенты запаса прочности сварного соединения с трещиной в сварном шве.

DETERMINATION OF TRIAXIAL DISTRIBUTION OF RESIDUAL STRESSES IN WELD JOINTS OF STRUCTURAL ELEMENTS WITH RECTANGULAR SEAMS AND ESTIMATION OF THEIR INFLUENCE ON JOINT STRENGTH TAKING INTO ACCOUNT CRACK-TYPE DEFECTS

A mathematical model of weld joint of plane structural elements with rectangular seams is considered using 3D theory. As a model for these joints a plane layer with rectangular seam with residual stresses is taken. The expressions to determine the stress tensor components for a set of given localized in the seam zone inconsistent residual strains are obtained in the closed form using direct integration of key equations without additional potential functions. The influence of residual stresses on static strength of such weld joint with sharp-end defects (the corresponding model is a model of external surface cracks) is investigated. Using two-parameter criterion of brittle-plastic fracture the load factors for weld joint with a crack in the seam are calculated.

¹ Нац. ун-т «Львів. політехніка», Львів,

² Тернопільськ. нац. техн. ун-т
ім. І. Пулюя, Тернопіль

Одержано
25.12.10