

УДК 535.211:539.371

д.т.н., професор Добрянський І.М.,
к.т.н., доцент Боднар Ю.І., к. ф.-м. н.,
доцент Іваник Є.Г., к.т.н., доцент Шмиг Р.А.,
Львівський національний аграрний університет

ВПЛИВ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ ПЛАСТИНАХ З ПОВЕРХНЕВИМИ ТРІЩИНАМИ НА ЇХ ДОВГОВІЧНІСТЬ

Сформульовано математичну модель для визначення періоду докритичного росту півеліптичної втомної тріщини в пластині. Отримано рівняння, яке визначає кінетику росту втомної тріщини.

Ключові слова: зварні пластини, розрахункова модель, тріщина, міцність, довговічність, втомні пошкодження

Вступ. Зварні конструкції широко використовуються в багатьох інженерних спорудах, таких як бойлери, трубопроводи, кораблі тощо. За статистикою приблизно 80% пошкоджень зварних конструкцій пов'язані з руйнуванням зварних з'єднань. Тому вдосконалення методів розрахунку зварних з'єднань на міцність та довговічність є ключовим моментом у підвищенні якості зварних конструкцій. Тут слід відзначити, що зварні з'єднання є складним об'єктом для розрахунків. Вони часто містять металургійні або геометричні дефекти, що виникли в процесі зварювання. Окрім того, істотна механічна неоднорідність матеріалу поєднується тут з високими залишковими напруженнями.

Важливою проблемою сьогодення є втома зварних конструкцій. Частка втомних пошкоджень зварних конструкцій зростає і становить близько 40% загальної кількості їх передчасних пошкоджень та відмов. Стосовно окремих видів виробів та споруд цей відсоток є ще вищим. Втома стала основним фактором, що визначає довговічність зварних елементів мостів, морських стаціонарних платформ, антенно-мачтових споруд, кранів, залізничних локомотивів та вагонів, сільськогосподарських машин та інших конструкцій, які зазнають у процесі експлуатації дії змінних навантажень.

Аналіз досліджень і публікацій з даної проблеми. Вивченню проблем сповільненого руйнування зварних з'єднань присвячено багато робіт різних вчених, зокрема Б. Є. Патона, І. К. Походні, Г. П. Кудрявцева, Л. М. Лобанова, В. І. Махненка, В. Т. Тимофєєва, В. І. Труфякова, В. І. Кир`яна, В. А. Осадчука та інших. Але в аналітичних дослідженнях питанням впливу неоднорідності матеріалу зварного з'єднання на кінетику росту втомних тріщин та врахування цього феномена в розрахунках зварних конструкцій приділено недостатньо

уваги. Подамо результати побудови розрахункової моделі поширення втомних тріщин у неоднорідних матеріалах і визначення залишкового ресурсу зварних конструкцій.

Постановка задачі про визначення залишкових напруження в тонкостінних елементах конструкцій біля зварних швів. Щоб оцінити працездатність тонкостінних елементів і їх граничний стан, потрібний комплексний підхід, важливою складовою якого є визначення в них, особливо в зонах зварних з'єднань, залишкових напружень. Тут зварювальні напруження є знаковмінні, нерівномірно розподілені за товщиною елемента, що може істотно вплинути на рівень і характер розподілу сумарних робочих напружень. Існують різні розрахункові та неруйнівні експериментальні методи визначення залишкових напружень. Щоб застосувати перші, потрібно володіти інформацією про режими зварювання і способи зменшення рівня технологічних напружень у зварному з'єднанні, що утруднює, а то й не дає змоги використати ці методи для діагностування напружень в елементах тривалої експлуатації. Неруйнівні методи не завжди придатні для діагностування зварних з'єднань через неповну інформацію про розподіл у них напружень. Відзначено, наприклад, що на даний час жоден засіб неруйнівного визначення напружень у реальних умовах експлуатації тонкостінних елементів безпосередньо не забезпечує вірогідних даних про їх напружено-деформований стан.

Врахування неоднорідності характеристик тріщиностійкості матеріалу під час розв'язання задач механіки руйнування набуває тут великого значення. У процесі зварювання метал шва та основний метал виробу біля шва нагріваються до високої температури та розширюються. Вільному розширенню заважає холодний метал, що оточує зону зварювання. Завдяки пластичності нагрітий метал набуває нової форми. Охолоджуючись, метал стає пружним і прагне скоротитися, але довколишній холодний метал запобігає цьому. Внаслідок цього в матеріалі шва і зоні термічного впливу при вистиганні виникають зварні залишкові напруження. Основною причиною утворення залишкових напружень є місцеве нагрівання і подальше нерівномірне охолодження шва та основного металу в зоні зварювання за наявності зв'язків, що заважають вільній деформації під час вистигання.

У працях [1; 2] розроблений ефективний підхід для визначення залишкових напружень біля зварних швів у трубопроводах. У цьому підході експериментально запропоновано діагностування напруженого стану в зоні кільцевого багат шарового зварного шва магістрального трубопроводу. Результати опрацювання таких експериментальних даних відображені на рис. 1, де графічно показана залежність колових залишкових напружень на поверхні труби від відстані x_1 до осі зварного шва трубопроводу.

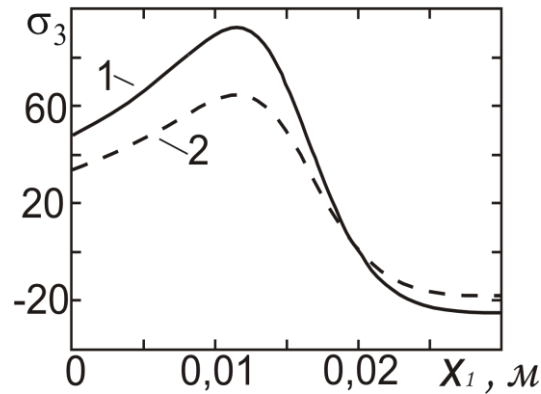


Рис. 1. Залежність залишкових напружень від віддалі x_1 до осі зварного шва: 1 – на зовнішній поверхні труби; 2 – на внутрішній поверхні.

Ці графічні залежності достатньо добре описуються такими рівняннями

$$\sigma_3^{(1)} = \frac{48,13 - 2408,68 x_1}{1 - 109,53 x_1 + 3639 x_1^2}, \quad \sigma_3^{(2)} = \frac{34,01 - 1691 x_1}{1 - 108,02 x_1 + 3541 x_1^2}. \quad (1)$$

Середні значення залишкових напружень $\sigma_3(x_1)$ у стінці труби будуть визначатися за формулою

$$\sigma_3(x_1) = 0,5(\sigma_3^{(1)} + \sigma_3^{(2)}). \quad (2)$$

Тоді сумарні напруження в стінці труби $\sigma(x_1)$ дорівнюватимуть сумі напружень $\sigma_3(x_1)$ і напружень σ від зовнішнього навантаження, тобто

$$\sigma(x_1) = \sigma_3(x_1) + \sigma. \quad (3)$$

Зварні тонкостінні елементи з поверхневими тріщинами найчастіше моделюються пластинами з поверхневими напівеліптичними тріщинами і прямолінійним зварним швом (рис. 2).

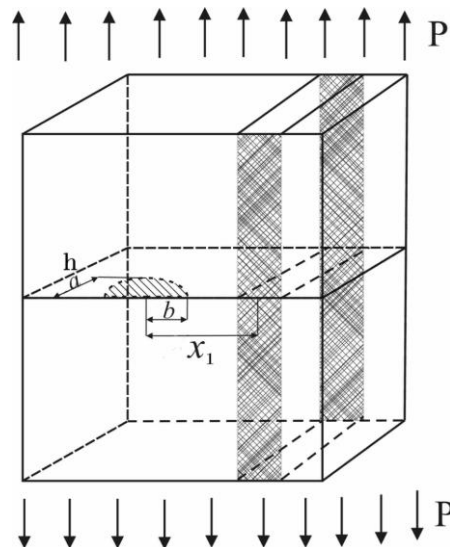


Рис. 2. Схема розтягу товстої пластини з поверхневою напівеліптичною тріщиною біля зварного шва.

Тому розглянемо пластину з напівеліптичною тріщиною і зварним швом, яка розтягується на нескінченності циклічним навантаженням з амплітудою p , які напрямлені перпендикулярно до площини розміщення тріщини. Задача полягає у визначенні періоду докритичного росту тріщини, тобто такої кількості циклів навантаження $N = N_*$, після досягнення якої втомна тріщина перетне всю товщину пластини. Щоб знайти період докритичного росту тріщини в пластині біля зварного шва, побудуємо розрахункову модель розвитку цього дефекту і визначимо час до його зростання наскрізь пластини. При цьому введемо такі позначення: a – піввісь еліптичної тріщини по глибині; b – піввісь еліптичної тріщини по поверхні; h – товщина пластини; x_1 – відстань від центра тріщини до осі зварного шва (див. рис. 2).

Для спрощення математичних викладок під час розв'язку задачі застосуємо відомий [3] метод еквівалентних площ, згідно з якими зміна площі втомної тріщини розглядуваної конфігурації наближено така, як для напівкругової тріщини радіуса a рівної площі, швидкість поширення якої у всіх точках її контуру однакова. Звідси запишемо наближене значення K_I як для пластини з поверхневою напівкруговою тріщиною, яка розтягується рівномірно розподіленими зусиллями $\sigma = p(t)$ [4; 5]:

$$K_I = S \cdot \sqrt{h\varepsilon\pi} \cdot \sigma(x_1) \cdot \left(\frac{1,04 + 0,23\varepsilon^2 - 0,106\varepsilon^4}{1,57} \right),$$

$$\Delta K_I = S \cdot \sqrt{h\varepsilon\pi} \cdot p \cdot \left(\frac{1,04 + 0,23\varepsilon^2 - 0,106\varepsilon^4}{1,57} \right), \quad (4)$$

де $\varepsilon = \frac{b}{h}$, $S = 1,1 + 0,35\varepsilon^2$, $\sigma(x_1)$ – сумарні залишкові напруження в пластині, які визначаються за залежністю (3).

У результаті застосування відомої розрахункової моделі докритичного росту тріщини та співвідношень (3), (4) отримаємо таку формулу:

$$\frac{d\varepsilon}{dN} = \frac{\alpha_0}{4E\sigma_T h} \frac{\left[S \cdot \sqrt{h\varepsilon\pi} \cdot p \cdot (0,66 + 0,15\varepsilon^2 - 0,068\varepsilon^4) \right]^4 - K_{th}^4}{K_{fc}^2 - \left[S \cdot \sqrt{h\varepsilon\pi} \cdot \sigma(x_1) \cdot (0,66 + 0,15\varepsilon^2 - 0,068\varepsilon^4) \right]^2}. \quad (5)$$

Таким чином, для визначення докритичного росту напівеліптичної втомної тріщини наскрізь пластини, отримано диференціальне рівняння (5). Це рівняння визначає тільки кінетику росту втомної тріщини, а для завершеної математичної моделі необхідні ще початкова і кінцева умови:

$$N = 0, \quad \varepsilon = \frac{b_0}{h}; \quad N = N_*, \quad \varepsilon = 1. \quad (6)$$

Отже, математичну модель для визначення періоду докритичного росту півеліптичної втомної тріщини в пластині складають математичні співвідношення (1)–(6). Константи матеріалу, що входять у це рівняння,

знаходять експериментальним способом [6; 7]. На основі результатів досліджень, викладених вище можна приступити до розрахунку залишкової довговічності пластини при заданих геометричних параметрах, а також даних навантажень. Для цього проінтегруємо диференціальне рівняння кінетики росту втомної тріщини (5) за початкової і кінцевої умов (6). У результаті цього отримаємо

$$N_* = \int_{\frac{b_0}{h}}^1 \left\{ \frac{\alpha_0}{4E\sigma_T h} \cdot \frac{[S \cdot \sqrt{h\varepsilon\pi} \cdot p \cdot (0,66 + 0,15\varepsilon^2 - 0,068\varepsilon^4)]^4 - K_{th}^4}{K_{fc}^2 - [S \cdot \sqrt{h\varepsilon\pi} \cdot \sigma(x_1) \cdot (0,66 + 0,15\varepsilon^2 - 0,068\varepsilon^4)]^2} \right\}^{-1} d\varepsilon. \quad (7)$$

Для підрахунків вважаємо, що товщина пластини $h = 0,012$ м, початковий розмір тріщини $b_0 = 0,0014$ м, навантаження $p = 190$ МПа, пластини виготовлена із сталі 17Т2С, для якої $K_{fc} = 86$ МПа; $\sigma_T = 420$ МПа; $K_{th} = 6,7$ МПа; $R = 0,01$. Підставляємо ці дані у формулу (7) і здійснюємо обчислення величини N_* з використанням стандартних процедур числового інтегрування для різних значень геометричного параметра x_1 . На основі цих розрахунків на рис. 3 зображено графічну залежність $N_* \sim x_1$.

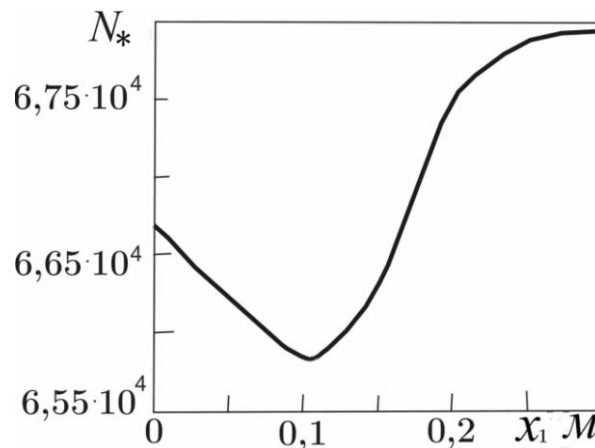


Рис. 3. Графічна залежність залишкової довговічності пластини N_* від відстані x_1 тріщини до зварного шва.

Як видно з рис. 3, значення залишкових напружень суттєво впливають на залишкову довговічність пластини.

Висновки. Таким чином, як впливає з числових розрахунків на основі сформульованих моделей, залишкові напруження від зварних швів знижують довговічність елементів конструкцій як за циклічного навантаження, так і при довготривалих статичних навантаженнях за високих температур. Це підтверджує той факт, що для забезпечення належного ресурсу зварних елементів конструкцій необхідно розробляти відповідні технології для зняття таких напружень.

Література

1. Діагностування залишкових напружень у нафтогазопроводах в околі кільцевих зварних швів розрахунково-експериментальним методом / [Осадчук В. А., Драгілев А. В., Банахевич Ю. В., Пороховський В. В.] // *Машинознавство*. – 2003. – № 11. – С. 23–27.
2. Оцінка довговічності труби нафтопроводу з поверхневою тріщиною під двохвісним блочним навантаженням / [Андрейків О. Є. Іваницький Я. Л., Терлецькі З. О., Кіт М. Б.] // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2004. – № 3. – С. 103–108.
3. Андрейків О. Є. Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості / О. Є. Андрейків, Н. Б. Сас // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2008. – № 2. – С. 19–26.
4. Ковчик С. Е. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения. Механика разрушения и прочность материалов : справ. пособие / С. Е. Ковчик, Е. М. Морозов. – К. : Наук. думка, 1988. – Т. 3. – 436 с.
5. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами / В. В. Панасюк. – К. : Наук. думка, 1968. – 246 с.
6. Андрейків О. Є. Визначення залишкової довговічності тонкостінних елементів конструкцій при двохосьовому навантаженні / О. Є. Андрейків, М. Б. Кіт // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2006. – № 1. – С. 11–16.
7. Андрейкив А. Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций / А. Е. Андрейкив, А. И. Дарчук. – К. : Наук. думка, 1992. – 184 с.

Аннотация

Сформулирована математическая модель для определения периода докритического роста полуэллиптической усталостной трещины в пластине. Получено уравнение, определяющее кинетику роста усталостной трещины.

Ключевые слова: сварные пластины, расчетная модель, трещина, прочность, долговечность, усталостные повреждения

Annotation

The mathematical model for determination period to critical growth halfelliptical tired crack in plate is formulated. Is given equation which determinates kinetic grow of the tired crack.

Key words: welding plates, calculation model, crack, strength, long-lived, tired defects