

УДК 621:62-21

Тимофій Рибак, Микола Сташків

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ТРІЩИНОЮ

*В роботі досліджено ресурс тонкостінного стержня прямокутного поперечного перетину при дії депланації. Розроблено математичну модель кінетики втомної тріщини, вітки якої розвиваються у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Запропоновано заходи з підвищення ресурсу роботи тонкостінного стержня прямокутного поперечного перетину.*

**Ключові слова:** тонкостінний стержень, депланація поперечних перетинів, механіка руйнування, коефіцієнт інтенсивності напружень, залишковий ресурс.

Ресурс зварних металоконструкцій, як правило, визначається міцністю їх елементів. Руйнування зварних металоконструкцій починається біля різних концентраторів напружень та дефектів, які виникають при їх виготовленні чи експлуатації. При цьому тріщини спочатку зароджуються як поверхневі, потім переходять в наскрізні й розвиваються далі до досягнення критичних розмірів.

Базовим елементом будь-якої зварної конструкції є тонкостінні стержні стандартного металопрокату відкритого (кутники, швелери, двотаври) та замкнутого поперечного перетину.

При крученні тонкостінних стержнів їх поперечні перетини не залишаються плоскими, а депланують, тобто окремі точки перерізу виходять зі своєї площини. Але, оскільки елементи зварних конструкцій з'єднані жорстко, це перешкоджає вільному переміщенню (закручуванню) поперечних перетинів елементів тонкостінного профілю. В поперечних перетинах профілю у такому випадку виникають нормальні напруження, які зумовлені дією кручення (стиснене кручення).

За таких умов для тонкостінних стержневих конструкцій домі-

нуючим буде руйнування від дії нормальних напружень. Основним розрахунковим параметром при цьому є коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) нормального відриву  $K_I$ . Однак для тонкостінних елементів замкнутого профілю ефект стисненого кручення при оцінці КІН  $K_I$  або не враховується взагалі [1], або ж розглядається тільки для випадків відкритих тонкостінних профілів [2].

Проведемо дослідження впливу депланації на ресурс тонкостінного елемента коробчастого поперечного перетину з тріщиною.

За розрахункову модель для оцінки ресурсу вибрано кутову наскрізну втомну тріщину, яка проростає з поверхневої і розвивається у тонкостінному коробчастому перерізі балки у двох взаємно перпендикулярних напрямках по довжинах горизонтальної та вертикальної стінок.

Залежності КІН для плоскої кутової тріщини у формі чверті еліпса, яка поширюється у напівнескінченному шарі, наведено у [3].

Для побудови математичної моделі росту наскрізної кутової тріщини розглянуто тонкостінний стержень замкнутого прямокутного профілю навантажений бімоментом  $B_\omega$ . Епюри лінійних та секторіальних координат такого елемента подано на рисунку 1.

Напружений стан, що виникає в стінках прямокутного профілю з тріщиною, з певним наближенням можна моделювати, якщо розглядати кожну стінку як окрему пластину тієї ж товщини і ширини з боковою тріщиною при аналогічному силовому навантаженні. Нормальні напруження в стінках стержня від дії бімоменту розподілені за лінійним законом, тому їх можна подати як комбінацію розтягу та згину.

Відповідні розв'язки задач для визначення КІН у вершині втомної тріщини нормального відриву можна отримати за аналогією із залежностями, поданими у [3]:

– для розтягу

$$K_1^{(p)} = \sigma_{\text{ном}}^{(p)} \cdot (1 - \varepsilon) \sqrt{L \cdot \pi} \cdot [1.12 - 0.23\varepsilon + 10.55\varepsilon^2 - 21.72\varepsilon^3 + 30.39\varepsilon^4] \quad (1)$$

– для згину

$$K_1^{(3z)} = \sigma_{ном}^{(3z)} \cdot (1 - \epsilon)^2 \sqrt{L \cdot \pi} \cdot [1.122 - 1.4\epsilon + 7.33\epsilon^2 - 13.08\epsilon^3 + 14\epsilon^4] \quad (2)$$

де  $\epsilon$  — відношення довжини тріщини до ширини стінки прямокутного профілю;

$\sigma_{ном}^{(p)}$  і  $\sigma_{ном}^{(3z)}$  — номінальні напруження, відповідно від розтягу і згину.

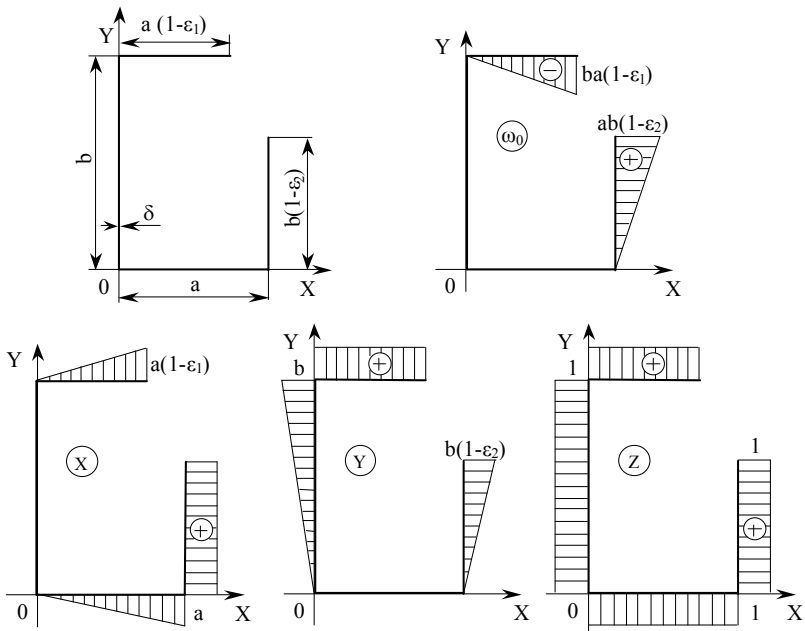


Рисунок 1. Епюри лінійних та секторіальних координат точок поперечного перетину тонкостінного прямокутного профілю з тріщиною

При навантаженні тонкостінного стержня згинально-крутним бімоментом нормальні напруження змінюються за законом секторіальних площ і описуються залежностями [4]:

$$\sigma_{\omega} = \frac{B_{\omega} \cdot \omega}{I_{\omega}},$$

$$I_{\omega} = \alpha_Y \int_F x \omega_0 dF - \alpha_X \int_F y \omega_0 dF + \beta \int_F z \omega_0 dF + \int_F \omega_0^2 dF,$$

$$\omega = \alpha_Y \cdot x - \alpha_X \cdot y + \beta \cdot z + \omega_0, \quad (3)$$

де  $B_{\omega}$  — згинально-крутний бімомент,  $\text{H} \cdot \text{м}^2$ ;

$I_{\omega}$  — секторіальний момент інерції перерізу,  $\text{м}^6$ ;

$\omega$  — секторіальна координата даної точки при розміщенні полюса в центрі згину, а початкової точки (початок відліку) — в головній секторіальній точці,  $\text{м}^2$ .

$\alpha_Y$  та  $\alpha_X$  — координати центра згину тонкостінного профілю,  $\text{м}$ .

Напружений стан тонкостінного стержня описуємо системою рівнянь [4]:

$$\begin{cases} \alpha_X \cdot \int_F y x dF - \alpha_Y \cdot \int_F x^2 dF - \beta \cdot \int_F z x dF = \int_F \omega_0 x dF, \\ \alpha_X \cdot \int_F y^2 dF - \alpha_Y \cdot \int_F x y dF - \beta \cdot \int_F z y dF = \int_F \omega_0 y dF, \\ \alpha_X \cdot \int_F y z dF - \alpha_Y \cdot \int_F x z dF - \beta \cdot \int_F z^2 dF = \int_F \omega_0 z dF, \end{cases} \quad (4)$$

де  $\beta$  — коефіцієнт, що визначає положення точки відліку секторіальних координат.

Розв'язуючи систему (4) з урахуванням залежностей (3) та рис. 1 і розкладаючи секторіальні напруження на складові, які відповідають розтягу та чистому згину, і підставляючи їх значення у (1) та (2), отримуємо залежності для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень для наскрізної кутової тріщини у тонкостінному прямокутному профілі при дії стисненого кручення:

$$\begin{cases} K_{I(1)} = \frac{B_{\omega}}{W_{\omega}} \sqrt{L_1} F_1(\epsilon_1, \epsilon_2), \\ K_{I(2)} = \frac{B_{\omega}}{W_{\omega}} \sqrt{L_2} F_2(\epsilon_1, \epsilon_2), \end{cases} \quad (5)$$

де  $W_{\omega}$  — секторіальний момент опору бездефектного тонкостінного замкнутого прямокутного профілю,  $\text{м}^4$ ;  $F_1(\epsilon_1, \epsilon_2)$ ,  $F_2(\epsilon_1, \epsilon_2)$  —

поправкові функції, які враховують зміну геометрії тонкостінного профілю при поширенні у ньому втомної тріщини (аналітичні вирази функцій не наводимо через їх громіздкість).

Використовуючи рівняння Вільсона в детерміністичній постановці, яке визначає кількість циклів до досягнення тріщиною критичної величини і отримується інтегруванням рівняння Періса ( $dL/dN = C(\Delta K_I)^n$ ), приводимо функції двох змінних  $F_1(\epsilon_1, \epsilon_2)$  та  $F_2(\epsilon_1, \epsilon_2)$  до функцій однієї змінної і, після заміни та спрощень, отримуємо:

$$\begin{cases} K_{I(1)} = \sigma_\omega \sqrt{L_1} F_1(\epsilon_1), \\ K_{I(2)} = \sigma_\omega \sqrt{L_2} F_2(\epsilon_2), \end{cases} \quad (6)$$

$$F_1(\epsilon_1) = \frac{(b-a)(S_1 + S_2)}{(a+b)S_2} \left( 1.058 + 4.684\epsilon_1 + 9.126\epsilon_1^2 - \right. \\ \left. - 25,254\epsilon_1^3 + 40,602\epsilon_1^4 \right),$$

$$F_2(\epsilon_2) = \frac{(b-a)(S_1 + S_2)}{(a+b)S_1} \left( 1.193 + 9.099\epsilon_2 + 126.653\epsilon_2^2 - 704.649\epsilon_2^3 + \right. \\ \left. + 1864.595\epsilon_2^4 - 2234.832\epsilon_2^5 + 1019.341\epsilon_2^6 \right),$$

де  $S_1 = a \cdot \delta_1$ ;  $S_2 = b \cdot \delta_2$ .

Виведені залежності уточнюють методику розрахунку напружено-деформованого стану тонкостінних елементів прямокутного профілю на стадії розвитку кутової наскрізної тріщини, що зумовлений дією бімоменту при стисненому крученні.

Ресурс роботи конструкцій такого елемента визначається залежністю

$$\tau = \frac{N_p}{\omega}, \quad (7)$$

де  $\omega$  — середня частота навантаження, цикл/с.

Кількість циклів навантаження  $N_p$  тонкостінного елемента при розвитку наскрізної тріщини до критичної довжини визначаємо за формулою:

$$N_p = \int_{L_o}^{L_k} \frac{dL}{C(K_I)^n}, \quad (8)$$

де  $L_o, L_k$  — початковий і граничний розміри наскрізної тріщини відповідно, м. Граничний розмір наскрізної тріщини, що поши-

рюється в елементі багаторазово статично невизначеної системи, приймають рівним 40% площі поперечного перетину елемента або з умови  $K_l < K_{fc}$  ( $K_{fc}$  — циклічна в'язкість руйнування).

$K_l$  — коефіцієнт інтенсивності напружень у вершині наскрізної тріщини з довжиною  $L$ , МПа $\sqrt{м}$ . Ця величина визначається залежностями (6).

$C, n$  — коефіцієнти кінетичної діаграми втомного руйнування матеріалу стержня.

На основі проведених досліджень розроблено рекомендації з оптимізації геометричних параметрів поперечного перетину тонкостінного прямокутного стержня з точки зору підвищення його тріщиностійкості: запропоновано змінити рівностінний коробчастий перетин балки на різностінний прямокутний профіль із співвідношенням товщин стінок  $\delta_2 = \frac{b}{a} \cdot \delta_1$  [5]. Така оптимізація поперечного перетину тонкостінного прямокутного стержня дозволяє значно знизити рівень напружень стисненого кручення і підвищити ресурс роботи елемента практично вдвічі (рис. 2).

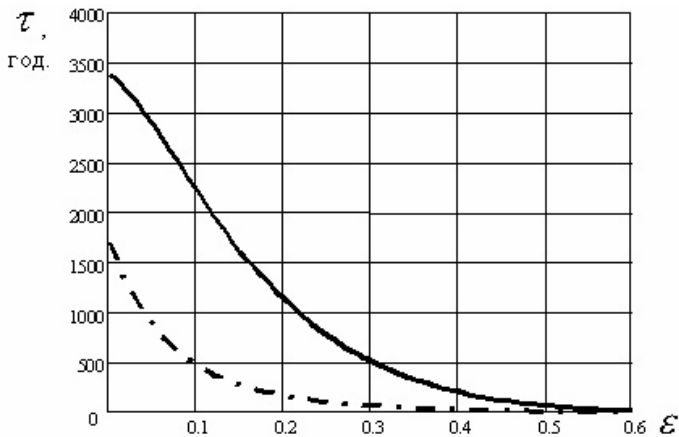


Рисунок 2. Залишковий ресурс роботи тонкостінного елемента прямокутного перетину:

- · - · - ресурс тонкостінного прямокутного елемента 180x75x5 мм,
- ресурс коробчастого елемента пропонованого перетину.

**Висновок.** Отримані залежності (6) дозволяють оцінити напружений стан (КІН) у вершинах віток складної за конфігурацією тріщини у прямокутному поперечному перетині тонкостінного стержня і прогнозувати його залишковий ресурс за рівняннями (7) та (8). Отримані результати не враховують специфіку роботи зварних швів в умовах складного напружено-деформованого стану статично невизначених стержневих конструкцій і вимагають окремого дослідження.

### Література

1. Андрейкив А. Е., Дарчук А. И. Усталостное разрушение и долговечность конструкций. — К.: Наук. думка, 1992. — 184 с.
2. Рибак Т. І. Пошукове конструювання на базі оптимізації ресурсу мобільних сільськогосподарських машин. — Тернопіль: Збруч, 2002. — 330 с.
3. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. / Под общ. ред. Панасюка В. В. — К.: Наук. думка, 1988.
4. Бычков Д. В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. — М.: Госстройиздат, 1962. — 472 с.
5. Рибак Т., Сташків М. Специфіка розрахунку деяких тонкостінних елементів тримких конструкцій машин. // Вісник ТДТУ, 2003. — Т. 8. — № 2. — с. 34 — 39.

Тymofiy Rybak, Mykola Stashkiv

### STUDY OF RESIDUAL LIFE OF THIN-WALLED ELEMENTS WITH A CRACK

*The residual life of a thin-walled shank with square cross-section under deplanation is studied. A mathematical model for kinetics of the fatigue crack with oppositely directed branch lines is elaborated. Measures to increase the rupture life of a thin-slab shank with square cross-section are suggested.*

**Keywords:** *thin-walled shank, deplanation of transverse cross-sections, tension intensity coefficient, residual life.*