



ОЦІНЮВАННЯ РЕСУРСУ ТОВСТОСТІННИХ ТРУБ І ТРУБЧАСТИХ ЗВАРНИХ ВУЗЛІВ НА СТАДІЇ РОСТУ ВТОМНОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ПІВЕЛІПТИЧНОЇ ТРІЩИНИ

Трубчасті елементи конструкцій мають досить широке застосування у сучасній техніці. Однак у процесі їх виготовлення або експлуатації в них можуть виникати тріщиноподібні дефекти. Ці дефекти під дією циклічного навантаження розвиваються і через деякий час стають критичними, що призводить до руйнування конструкції. Оцінювання міцності та ресурсу роботи трубчастих елементів конструкцій досить часто базується на методах лінійної механіки руйнування, в основу якої покладено концепцію коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН), за допомогою яких можна визначити напруження і деформації в малому околі вершини тріщини. Оскільки трубчасті елементи відповідальних конструкцій, зокрема товстостінні труби, зварні вузли морських стаціонарних платформ, на яких кріпляться устаткування для видобутку нафти із дна океану, працюють під високими рівнями циклічних напружень, то для їх виготовлення використовують сталі низької та середньої міцності з границею текучості $\sigma_T = 200-1300$ МПа, руйнування яких супроводжується значними пластичними деформаціями. Тому застосування лінійної механіки руйнування, результати якої синтезовані у багатьох роботах і довідникових посібниках, є не досить коректним для визначення напружено-деформованого стану і розрахунку залишкового ресурсу в таких випадках. Тому розрахунок ресурсу трубчастих елементів конструкцій на основі вивчення процесу поширення в них втомних тріщин із застосуванням підходів нелінійної механіки руйнування, зокрема узагальненої δ_c -моделі (Andreikiv et al., 1998), є актуальною науково-технічною проблемою. У цьому дослідженні порушено проблему встановлення ресурсу товстостінних труб і трубчастих зварних вузлів елементів конструкцій на стадії розвитку втомних поверхневих неавтономельних тріщин з урахуванням впливу асиметрії циклічного навантаження і залишкових напружень.

Ключові слова: залишкова довговічність; втомна тріщина; циклічне навантаження; ефективний розмах розкриття вершини тріщини; характеристика втомної тріщиностійкості; коефіцієнт асиметрії; діаграма втомного руйнування; товстостінна труба; трубчастий зварний вузол.

Вступ. З огляду на наявність у товстостінних трубах і трубчастих зварних вузлах великих пластичних деформацій пропонуємо взяти відповідальним параметром за ріст тріщини δ – розкриття її вершини, а за критерій руйнування – критерій критичного розкриття тріщини. Для дослідження росту втомної тріщини, контур якої задається полярним радіусом $r(\alpha)$, зокрема поверхневої півеліптичної тріщини (рис. 1), у пружно-пластичному тілі під циклічним навантаженням $p(t)$.

У роботі запропоновано диференціальне рівняння в частинних похідних, отримане на основі відомих в літературі результатів (Panasiuk, 1968), у якому швидкість V є однозначною функцією максимального розкриття її вершини $\delta_{\max} = \delta_{p=p_{\max}}$ на стадії навантаження для заданої асиметрії $R = p_{\min} / p_{\max}$:

$$\frac{\partial r}{\partial N} \left[1 + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial r}{\partial \alpha} \right)^2 \right]^{-1/2} = V(\lambda, A, m, \lambda_0), \quad r(\alpha, N)|_{N=0} = r_0(\alpha), \quad (1)$$

де:
$$V(\lambda, A, m, \lambda_0) = \frac{1}{A(R)} \left[(\lambda_0(R) / (\lambda_0(R) - \lambda))^{m(R)} - 1 \right]^{-1},$$

$\lambda = 1 - \sqrt{\delta_{\max} / \delta_{fc}}$, $\lambda_0 = 1 - \sqrt{\delta_{th} / \delta_{fc}}$; N – кількість циклів; A, m – константи матеріалу, які визначають на основі даних експерименту і є різними (рис. 2,а) для кожної асиметрії циклічного навантаження; δ_{th} – константа матеріалу для заданої асиметрії навантаження, порогове значення розкриття вершини втомної тріщини, нижче якого вона не росте; δ_{fc} – константа матеріалу, критичне значення розкриття вершини втомної тріщини, інваріант відносно асиметрії навантаження.

Для того, щоб адекватніше описати процеси пластичного деформування, що відбуваються у вершині фізичної тріщини під час дії на тіло циклічного навантаження, перейдемо в диференціальному рівнянні (1) від координат $V \sim \delta_{\max}$ до координат $V \sim \Delta\delta_{ef}$ за формулою

$$\delta_{\max} = \Delta\delta_{ef} / (U_1^2 / 2), \quad (2)$$

де: $\Delta\delta_{ef} = \delta_{\max} - \delta_{\min}$ – розмах розкриття вершини тріщини з урахуванням пластичних витяжок, що формуються на її берегах, внаслідок виникнення залишкових деформацій при проходженні через пластичну зону;

Інформація про авторів:

Стадник Мирон Михайлович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри математики. **Email:** matematyka@i.ua

Дідух Іван Володимирович, канд. техн. наук, доцент кафедри математики. **Email:** ivdaid@gmail.com

Цитування за ДСТУ: Стадник М. М., Дідух І. В. Оцінювання ресурсу товстостінних труб і трубчастих зварних вузлів на стадії росту втомної поверхневої півеліптичної тріщини. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Вип. 27(9). С. 73–77.

Citation APA: Stadnyk, M. M., & Didukh, I. V. (2017). The Estimation of Lifetime of the Thick-Wall Tubes and the Tubular Welded Joints at the Stage of Fatigue Surface Semielliptical Crack Propagation. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(9), 73–77.

<https://doi.org/10.15421/40270916>

$\delta_{\min} = \delta_{p=p_{\min}}$ на стадії розвантаження; U_1 – відома в літературі функція, що визначають шляхом розв'язання відповідних граничних задач теорії тріщин або з експерименту і є функцією асиметрії для автотомельної тріщини та асиметрії і рівня зовнішнього навантаження для неавтотомельної тріщини.

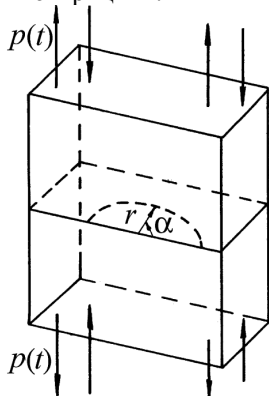


Рис. 1. Втомна поверхнева півеліптична тріщина у тривимірному тілі

Використовуючи формули (1) і (2), маємо

$$\frac{\partial r}{\partial N} \left[1 + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial r}{\partial \alpha} \right)^2 \right]^{-1/2} = \frac{1}{A_1} \left[\left(\frac{\sqrt{\Delta \delta(R)} - \sqrt{\Delta \delta_{thef}}}{\sqrt{\Delta \delta_{ef}} - \sqrt{\Delta \delta_{thef}}} \right)^{m_1} - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

Тут швидкість росту тріщини є однозначною функцією ефективного розмаху розкриття її вершини $\Delta \delta_{ef}$ ($\Delta \delta_{thef} \leq \Delta \delta_{ef} < \Delta \delta^*(R)$) і не залежить від асиметрії навантаження на першій і другій ділянках діаграми втомного руйнування (див. рис. 2, б), $\Delta \delta_{thef} = \Delta K_{thef}^2 / (2\sigma_0 E)$ – константа матеріалу, інваріант відносно асиметрії навантаження, порогове значення ефективного розмаху розкриття вершини втомної тріщини, нижче якого тріщина не росте, $\Delta \delta^*(R) = \delta_{fc} U_1^2 / 2$, константи A_1, m_1 є інваріантними відносно асиметрії навантаження і тому для їх визначення достатньо побудувати лише одну діаграму втомного руйнування.

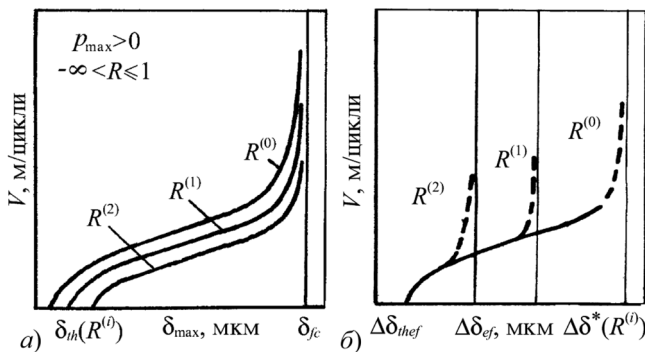


Рис. 2. Схематичне зображення діаграм росту втомної тріщини в осях $V \sim \delta_{\max}$ (а) і $V \sim \Delta \delta_{ef}$ (б)

У частковому випадку, для дослідження росту втомної тріщини за малоциклової втоми, формулу (3) можна замінити наближено еквівалентною формулою

$$\frac{\partial r}{\partial N} \left[1 + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial r}{\partial \alpha} \right)^2 \right]^{-1/2} = C_0 \Delta \delta_{ef}^{n_0} \quad (4)$$

де: C_0, n_0 – константи матеріалу інваріантні відносно асиметрії навантаження.

Якщо швидкість росту втомної тріщини описується диференціальними рівняннями (1) або (3), то для обчис-

лення констант матеріалу A, m (A_1, m_1) за допомогою методу найменших квадратів отримаємо такі формули:

$$a_1(m) a_2(m) - n_1 a_3(m) = 0, \quad A = 10^{-a_1(m)/m_1},$$

$$\text{де: } a_1(m) = \sum_{i=1}^{n_1} \lg(x_i^m - 1) V_i^e, \quad a_2(m) = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{x_i^m \lg x_i}{x_i^m - 1},$$

$$a_3(m) = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{x_i^m \lg x_i}{x_i^m - 1} \lg((x_i^m - 1) V_i^e), \quad x_i = \lambda_0 / (\lambda_0 - \lambda_i),$$

$\lambda_i = 1 - \sqrt{\delta_{\max}^{(i)} / \delta_{fc}}$, $V_i^e, \delta_{\max}^{(i)}$ – координати експериментальних точок відповідно швидкості росту тріщини і максимального розкриття вершини, n_1 – кількість точок експерименту, $\lambda_0 = 1 - \sqrt{\delta_{th} / \delta_{fc}}$ – визначено експериментально.

У випадку, якщо швидкість поширення втомної тріщини описується диференціальним рівнянням (4), то для знаходження констант матеріалу C_0, n_0 маємо:

$$C_0 = C_1 (2\sigma_0 E)^2, \quad n_0 = n / 2, \quad C_1 = 10^{\frac{s_2 s_3 - s_4 s_1}{n_1 s_3 - s_1^2}},$$

$$n = \frac{s_2}{s_1} - n_1 \left(\frac{s_2 / s_1 - s_4 / s_3}{n_1 - s_1^2 / s_3} \right), \quad s_1 = \sum_{i=1}^{n_1} \lg \Delta K_{ef}^{(i)}, \quad s_2 = \sum_{i=1}^{n_1} \lg V_i^e,$$

$$s_3 = \sum_{i=1}^{n_1} \left(\lg \Delta K_{ef}^{(i)} \right)^2, \quad s_4 = \sum_{i=1}^{n_1} \lg \Delta K_{ef}^{(i)} \lg V_i^e.$$

Тут $\Delta \delta_{ef} = \Delta K_{ef}^2 / (2\sigma_0 E)$, σ_0 – усереднене значення напружень, задане на берегах модельної тріщини, згідно з узагальненою δ_k -моделлю, E -модуль поздовжньої пружності, $\Delta K_{ef} = K(p_{\max}) - K(p_{op})$ – ефективний розмах КІН, p_{op} – напруження циклу на стадії довантаження (див. рис. 3,а) з досягненням яких повністю усувається ефект закриття тріщини.

Для визначення параметра ефективного розмаху розкриття вершини тріщини $\Delta \delta_{ef}$, який входить у диференціальні рівняння (3) і (4), розглянемо зміну напружено-деформованого стану в її вершині протягом одного циклу навантаження (див. рис. 3,а).

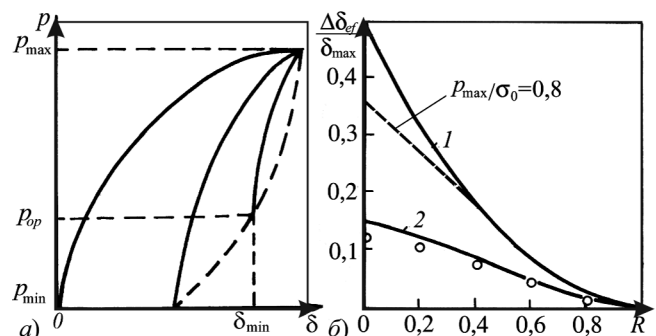


Рис. 3. Залежність величини розкриття вершини тріщини δ_{\min} від напруження $p(t)$ за один цикл навантаження (а), зміна відносного розмаху розкриття вершини тріщини залежно від асиметрії навантаження (б)

Тоді, зберігаючи структуру формули для визначення мінімального розкриття вершини ідеальної тріщини

$$\delta_{\min} = \left(1 - \frac{1}{2} (1 - R)^2 \right) \delta_{\max}, \quad (5)$$

яку запропоновано в роботі (Andreikiv, 1982) і припускаючи, що зі зміною напружень $p_{\min} \leq p \leq p_{op}$ δ_{\min} залишається сталим як на стадії розвантаження і довантаження, у формулі (5), у виразі для асиметрії замість p_{\min} ставимо величину p_{op} , тоді отримаємо:

$$\Delta \delta_{ef} = \left((U_1)^2 / 2 \right) \delta_{\max}; \quad (6)$$

$$\Delta \delta_{ef} = (2l_{pf} / l_p) \delta_{\max}, \quad l_{pf} = (U_1)^2 / 4l_p. \quad (7)$$

Тут $U_1 = 1 - p_{op} / p_{\max}$, l_p, l_{pf} – відповідно статична і циклічна пластичні зони. δ_{\max} – визначаємо методом еквівалентних напружених станів (Panasiuk, 1990). У випадку відомої в літературі (Rice, 1967) функції $U_1(R) = 1 - (0,45 + 0,2R + 0,25R^2 + 0,1R^3)$, встановленої теоретично для $R \geq 0$, отримане за формулою (6) відносне значення $\Delta \delta_{ef}$ (див. рис. 3,б; крива 2) добре узгоджується з експериментальним (Elber, 1970), а максимальна відносна похибка при $R=0$ не перевищує 10%. На основі результатів, поданих на рис. 3,б, можна вказати межі застосовності формули (6) для визначення $\Delta \delta_{ef}$, якщо $U_1(R) = 1 - R$ (ідеальна тріщина, крива 1). Вона прийнятна для автомодельної тріщини при $R \geq 0,7$ і для неавтомодельної (див. рис. 3,б; штрихова лінія) – при $p_{\max} / \sigma_0 \geq 0,8$. При обчисленні відносного значення $\Delta \delta_{ef}$, представленого на рис. 3,б штриховою лінією було використано результати роботи (Newman, 1984). Визначати $\Delta \delta_{ef}$ можна також за формулою (7) через величину циклічної пластичної зони. Як впливає з формули (7), завдяки наявності пластичних витяжок на берегах втомної тріщини зменшуються розміри циклічної пластичної зони, а відповідно, і ефективний розмах розкриття вершини тріщини $\Delta \delta_{ef}$.

Диференціальне рівняння в частинних похідних (3) використовуємо для опису кінетики втомної поверхневої півеліптичної тріщини, віднесеної до полярної системи координат Ora у площині тривимірного тіла (див. рис. 1). За припущення, що півеліптична тріщина у процесі свого розвитку від початкового розміру до критичного залишається півеліптичною, тоді її радіус-вектор $r(\alpha, N)$ визначають за формулою, отриманою в роботі (Stadnyk & Didukh, 2010), а саме:

$$r(\alpha, N) = \frac{a(N)c(N)}{\sqrt{a^2(N)\cos^2\alpha + c^2(N)\sin^2\alpha}}, \quad 0 \leq \alpha \leq \pi. \quad (8)$$

У рівнянні (8) відносно декартової системи координат Oxy маємо, що $tg\alpha = (a/c)tg\theta$ (α – полярний кут, $x = r\cos\alpha, y = r\sin\alpha$; θ – кутовий параметр, $x = c\cos\theta, y = a\sin\theta$).

Очевидно, для встановлення розмірів контуру поверхневої півеліптичної тріщини під циклічним навантаженням достатньо знати розвиток її півосей $a(N)$ і $c(N)$. Для їх знаходження диференціальне рівняння в частинних похідних (3) запишемо у двох точках контуру тріщини ($\alpha = \pi/2$, і $\alpha = 0$).

Враховуючи, що $r(0, N) = c$; $r(\pi/2, N) = a$,

$$\left(\frac{\partial r}{\partial \alpha} \right)_{\alpha=\pi/2} = \left(\frac{\partial r}{\partial \alpha} \right)_{\alpha=0} = 0, \text{ отримаємо:}$$

$$\frac{da}{dN} = V(A, m, \Delta\delta_{thef}, \lambda^{(1)}), \quad \lambda^{(1)} = 1 - \sqrt{\Delta\delta_{ef}^{(1)} / \Delta\delta^*(R)}, \quad (9)$$

$$\frac{dc}{dN} = V(A, m, \Delta\delta_{thef}, \lambda^{(2)}), \quad \lambda^{(2)} = 1 - \sqrt{\Delta\delta_{ef}^{(2)} / \Delta\delta^*(R)},$$

$$a(0) = a_0, \quad c(0) = c_0,$$

де $\Delta\delta_{ef}^{(1)} = \Delta\delta_{ef} |_{\alpha=\pi/2}$, $\Delta\delta_{ef}^{(2)} = \Delta\delta_{ef} |_{\alpha=0}$, a_0, c_0 – відповідно мала і велика півосі початкової поверхневої півеліптичної тріщини.

Отже, задача дослідження кінетики розвитку втомної поверхневої півеліптичної тріщини зводиться до розв'язування системи звичайних диференціальних рівнянь відносно невідомих функцій $a(N)$ і $c(N)$. Після знаходження розв'язку цих рівнянь форма і розміри тріщини в довільний момент часу $t = N/\nu$ (ν – частота циклічного навантаження) визначаються залежністю (8).

Для визначення довговічності тіла $N = N^*$ і критичних розмірів тріщини $r^* = r(N^*, \alpha)$ використовуємо критерій критичного розкриття її вершини. Вважаємо, що тіло з поверхневою півеліптичною тріщиною під циклічним навантаженням зруйнується, якщо для кожної асиметрії R виконується умова

$$\max \{ \Delta\delta_{ef} |_{\alpha=\pi/2}, \Delta\delta_{ef} |_{\alpha=0} \} = \Delta\delta^*(R).$$

Приклад 1. Проведено розрахунок залишкового ресурсу товстостінної труби, підданій дії пульсуючого тиску інтенсивності p ($0 \leq p \leq p_{\max}$), якщо на внутрішній стінці труби в поздовжньому перерізі міститься поверхнева півеліптична тріщина з півосями a і c (рис. 4, а). Задача полягає у визначенні кінетики росту тріщини і кількості циклів навантаження N^* , які відповідають її критичному розміру за таких вихідних параметрів: матеріал – сталь 35ХНЗМФА; $p_{\max} = 240$ МПа; $R = 0$;

$$\nu = 2 - 10 \text{ Гц}; \quad R_1 = 62,5 \text{ мм}; \quad R_2 = 84 \text{ мм}; \quad E = 2,14 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

$$\sigma_T = 1180 \text{ МПа}; \quad \mu = 0,26; \quad \sigma_B = 1280 \text{ МПа};$$

$$A = 5 \cdot 10^4 \text{ цикл/м}; \quad m = 2,18; \quad \lambda_0 = 0,83; \quad \delta_{fc} = 0,023 \text{ мм};$$

$$a_0 = 0,5 \text{ мм}; \quad c_0 = 1 \text{ мм}.$$

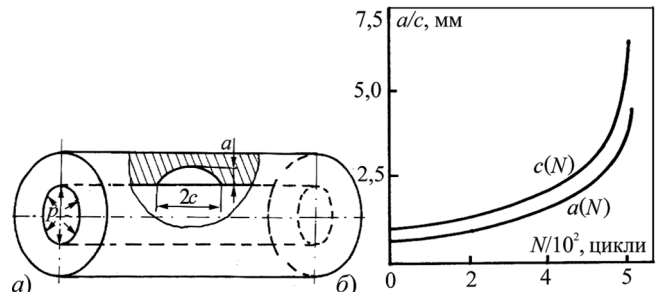


Рис. 4. Поверхнева півеліптична тріщина в товстостінній трубі під внутрішнім тиском (а), зміна довжин півосей півеліптичної тріщини від кількості циклів внутрішнього пульсуючого тиску (б)

Результати розв'язку поставленої задачі подано на рис. 4,б. Як видно, за дії даного пульсуючого тиску залишкова довговічність труби становитиме 610 циклів навантаження, а критичні розміри півосей тріщини $a^* = 4,6$ мм, $c^* = 6,5$ мм. Порівняння розрахункової довговічності товстостінної труби ($N^* = 610$ циклів) з даними (Andreikiv, 1998) натурального експерименту ($N^* = 450$ циклів) свідчить про їх задовільне узгодження. Розбіжність між теоретичними та експериментальними даними може виникнути, зокрема, через неточність у визначенні початкових розмірів тріщини.

Приклад 2. Нехай Т-подібний трубчастий зварний вузол морської стаціонарної платформи знаходиться під циклічним навантаженням, що зумовлене одночасною дією статичного розтягу зусиллям P і циклічного

згинального моменту M (рис. 5, а). В зоні стику зварного шва і основного матеріалу (в зоні термічного впливу (ЗТВ)), де діють залишкові напруження, що виникають у процесі зварювання трубчастих елементів, є втомна поверхнева півеліптична тріщина. Задача полягає у визначенні ресурсу трубчастого зварного вузла на стадії росту втомної поверхневої півеліптичної тріщини з урахуванням усереднених по довжині тріщини залишкових напружень розтягу $\bar{\sigma}_3$, за таких вихідних даних: матеріал – сталь 09Г2С;

$$\sigma_{\max}^{(1)} = \bar{\sigma}_3 + \sigma_{\max} = 230 \text{ МПа}; R_1 = 208 \text{ мм}; R_2 = 228 \text{ мм};$$

$$R^{(1)} = (\bar{\sigma}_3 + \sigma_{\min}) / (\bar{\sigma}_3 + \sigma_{\max}) = 0,3; \nu = 20 \text{ Гц};$$

$$\sigma_1^{(ЗТВ)} = 300 \text{ МПа}; \sigma_B^{(ЗТВ)} = 400 \text{ МПа}; E = 2,14 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

$$A = 8,4 \cdot 10^5 \text{ цикл/м}; m = 2,09; \lambda_0 = 0,89; \delta_{fc} = 0,039 \text{ мм}.$$

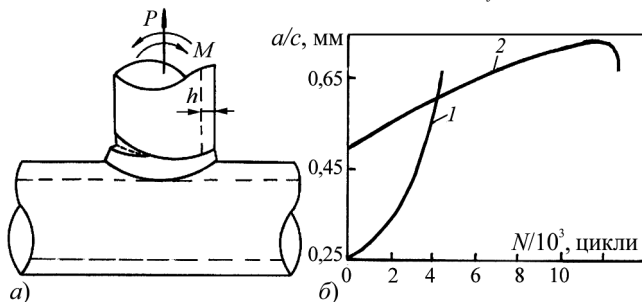


Рис. 5. Трубчастий зварний вузол (а), зміна відношення півосей втомної поверхневої півеліптичної тріщини від кількості циклів навантаження (б)

Результати розв'язку задачі подані на рис. 5,б, де показано кінетику розвитку відношення півосей початкових втомних півеліптичних тріщин $a/c = 0,25$ ($a_0^{(1)} = 5 \text{ мм}, c_0^{(1)} = 20 \text{ мм}$) і $a/c = 0,5$ ($a_0^{(2)} = 5 \text{ мм}, c_0^{(2)} = 10 \text{ мм}$) аж до критичного значення $a^*/c^* = 0,67$. Як бачимо з рис. 5,б, тріщина, для якої $2c_0/h > 1$ ($2c/h = 2$ – крива 1), стає наскрізною, що призводить до втрати герметичності і несної здатності трубчастого зварного вузла. Якщо $2c_0/h \leq 1$ ($2c/h = 1$ – крива 2), то нестабільний розвиток тріщини відбувається вздовж зварного пояса. Цей факт

підтверджений напівнатурними експериментальними дослідженнями Т-подібних трубчастих зварних вузлів (Steklov, Smirnov, Zorin et al., 1986). Встановлено критичний розмір тріщин $a^* = 14 \text{ мм}, c^* = 20,5 \text{ мм}$, а також визначено залишкову довговічність трубчастого зварного вузла $N_*^{(1)} = 4400$ циклів, $N_*^{(2)} = 12800$ циклів.

Перелік використаних джерел

- Andreikiv, O. Ye., Stadnyk, M. M., Zazuliak, V. A., Didukh, I. V., & Bielas, O. M. (1998). Metodyka rozrakhunku dovhovichnosti artyleriiskykh stvoliv na stadii rozvytku poverkhnevyykh trishchyn z urakhuvanniam dii vysokyykh temperatur. *Artyleriiskii stolni systemy, boieprypasy, zasoby artyleriiskoi rozvidky ta keruvannia vohnem*, 23, 90–99. [in Ukrainian].
- Andreikiv, A. E. (1982). *Prostranstvennye zadachi teorii treshhin*. Kyiv: Nauk. dumka. 245 p. [in Russian].
- Elber, W. (1970). Fatigue crack closure under cyclic tension. *Eng. Fract. Mech.*, 2(1), 37–45.
- Finney, J. M., & Deimendjan, G. (1992). Delta- K- effective: which formula? *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 15(2), 151–158.
- Newman, J. C. Jr. (1984). A crack opening stress equation for fatigue crack growth. *Int. J. Fracture*, 24(4), 131–135.
- Panasiuk, V. V., Andreikiv, O. Ye., Stadnyk, M. M., & Didukh, I. V. (1990). Vyznachennia velychyny rozkryttia vshyny trishchyny u pruzhnoplastychnykh tilakh. *Fyz.-khyim. mekhanika materiyalov*, 6, 53–61. [in Ukrainian].
- Panasiuk, V. V. (1968). *Predelnoe ravnovesie khrupkikh tel s treshhinami*. Kyiv: Nauk. dumka. 246 p. [in Russian].
- Rice, J. R. (1967). Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue. *Fatigue crack propagation. Philadelphia (Pa): Amer. Soc. Test. Mater.*, 247–309. (ASTM; STP 415).
- Stadnyk, M. M., & Didukh, I. V. (2010). Otsinka dovhovichnosti trubnykh elementiv na stadii rostu vtomnoi poverkhnevoi pive-liptychnoi trishchyny. *Visnyk LNU imeni Ivana Franka. Seriya mekh.-mat.*, 73, 23–29. [in Ukrainian].
- Steklov, I. K., Smirnov, A. X., Zorin, E. E., et al. (1986). Razvitie ustalostnykh treshhin v svarynykh trubchatykh uzлах. *Avtomaticheskaya svarka*, 10(1), 6–8. [in Russian].

М. М. Стадник, И. В. Дидух

Национальный лесотехнический университет Украины, г. Львов, Украина

ОЦЕНКА РЕСУРСА ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБ И ТРУБЧАТЫХ СВАРНЫХ УЗЛОВ НА СТАДИИ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНЫ

Исследованы проблемы оценки ресурса трубчатых элементов конструкций на стадии развития усталостных поверхностных трещин. Предложена обобщенная математическая модель развития усталостных трещин в упругопластическом теле, которое находится под действием циклических напряжений. Основу математической модели составляет дифференциальное уравнение в частных производных, в котором скорость роста усталостной трещины является однозначной функцией эффективного размаха раскрытия ее вершины $\Delta\delta_{ef}$. Для исследования кинетики развития усталостных трещин с использованием предложенного в работе дифференциального уравнения достаточно построить только одну диаграмму усталостного разрушения для конкретного значения асимметрии, сэкономив материалы и время на построении усталостных диаграмм. Разработан аналитический метод для приближенного определения эффективного размаха, основу которого составляет метод эквивалентных напряженных состояний. Предложен аналитический подход для приближенного определения δ – раскрытия для поверхностной полуэллиптической трещины в трубчатых элементах конструкций, если известно неоднородное распределение напряжений по их толщине. получены аналитические соотношения для определения констант материала, входящих в дифференциальные уравнения кинетики развития усталостных трещин. в работе определена долговечность толстостенной трубы, Т-образного трубчатого сварного узла морской стационарной платформы, если в зоне стыка основного материала и сварного шва находится усталостная поверхностная полуэллиптическая трещина. Полученные решения задач сопоставлены с известными теоретическими и экспериментальными данными.

Ключевые слова: остаточная долговечность; усталостная трещина; циклическая нагрузка; эффективный размах раскрытия вершины трещины; характеристика усталостной трещиностойкости; коэффициент асимметрии; диаграмма усталостного разрушения; толстостенная труба; трубчатый сварной узел.

**THE ESTIMATION OF LIFETIME OF THE THICK-WALL TUBES AND THE TUBULAR WELDED JOINTS
AT THE STAGE OF FATIGUE SURFACE SEMIELLIPTICAL CRACK PROPAGATION**

The work is devoted to the problems of assessing the lifetime of tubular structural elements at the stage of surface cracks propagation under cyclic loading effect with account of residual stresses. The mathematical model is based on a partial differential equation to determine the kinetics of fatigue cracks in a three-dimensional elastoplastic body under high-cycle or low-cycle fatigue. In this equation, the basic parameter, responsible for crack growth rate, is the effective crack tip opening displacement range $\Delta\delta_{ef}$. To investigate the fatigue crack growth kinetics in structural elements, depending on stress ration using the proposed differential equation, it is sufficient to use the diagram of fatigue fracture alone in coordinating the rate – displacement range ($V \sim \Delta\delta_{ef}$), thus allowing us to save the materials and time of experimental investigations, related with construction of fatigue curves. The analytical method for approximate determination of $\Delta\delta_{ef}$ with account of the plastic stretches at the fatigue crack edges has been developed. An analytical approach to approximate determination of the δ - opening for a surface semi-elliptical crack in tubular structural elements under non-uniform distribution of stresses over the element thickness has been proposed. The method for determination of fatigue surface semi-elliptical crack kinetics and residual lifetime of the tubular welding joint is proposed based on nonlinear fracture mechanics approaches. The basic parameter, responsible for crack growth rate, is the effective crack tip opening displacement range. Computational results of fatigue surface semielliptical crack kinetics the residual lifetime of tubular structural elements were compared with the known experimental data. The analytical relationships for estimation of material constants, that are used in differential equations of fatigue cracks kinetics have been established. The residual lifetime and growth of fatigue surface semi-elliptical cracks for such structural elements such as thick-wall tubes, and tubular welded joints of marine stationary platforms have been assessed. Numerical results of the residual lifetime of thick-wall tubes and T-shaped tubular welded joints were compared with the known experimental data.

Keywords: residual lifetime; fatigue crack; cyclic loading; effective crack tip opening displacement range; fatigue crack growth resistance; stress ratio; fatigue fracture diagram; thick-wall tube; tubular welded joint.