

КРИТЕРІЙ ГРАНИЧНО-РІВНОВАЖНОГО СТАНУ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З ТРІЩИНАМИ ЗА ДВОВІСНОГО РОЗТЯГУ

Андрейків О.Є., Штаюра Н.С.

Львівський національний університет імені Івана Франка

У роботі запропоновано деформаційний критерій поширення втомної тріщини у нескінченній пластині за двовісного навантаження та отримано вираз для розрахунку критичних розтягуючих зусиль p_c та q_c для найбільш небезпечного випадку за умов пластичності Губера-Мізеса. Побудовано графічну залежність безрозмірного значення критичної величини зовнішнього зусилля від параметру навантаження пластини вздовж лінії розміщення тріщини та встановлено, що поперечне зусилля q зменшує критичне значення зовнішніх зусиль p_c . Проведено порівняння отриманих результатів із літературними експериментальними даними.

Ключові слова: критерій руйнування, гранично-рівноважний стан, тонкостінний елемент конструкції з тріщиною, двовісний розтяг, граничне зусилля навантаження.

Постановка проблеми. Елементи конструкцій енергетичної галузі (трубопроводи газо-транспортної системи, посудини під тиском) працюють за умов складного навантаження. В процесі зміни навантаження у елементах конструкцій відбувається перерозподіл напружень, деформацій, умов течіння матеріалу перед вершиною концентратора чи тріщини. Такий перерозподіл напружено-деформованого стану призводить до зміни гранично-рівноважного стану елементів конструкцій. Аналіз цих змін дає можливість контролювати процеси розвитку тріщини та руйнування. Важливим для оцінювання залишкової міцності тонкостінних елементів конструкцій з тріщинами за двовісного навантаження, яке імітує роботу магістральних нафтопроводів, елементів обшивки літаків є встановлення умов локального руйнування та розроблення критеріїв міцності тіл з тріщинами.

Аналіз досліджень і публікацій. В літературі відомо багато різних підходів до розв'язання таких задач [1-2]. Всі вони стосуються крихких і квазікрихких високоміцних матеріалів і в них не враховується вплив двохвісного напруженого стану на пластичне деформування в зоні передруйнування біля вершини тріщини. Матеріали трубопроводів, як правило [3-4], виготовляються із достатньо пластичної сталі і тому розрахунок їх залишкової міцності треба проводити з врахуванням впливу двохвісного напруженого стану на пластичне деформування в зоні передруйнування.

Метою роботи є – розроблення критерію руйнування тонкостінних елементів конструкцій з тріщинами за двовісного розтягу та дослідження впливу двовісного навантаження на граничні зусилля руйнування.

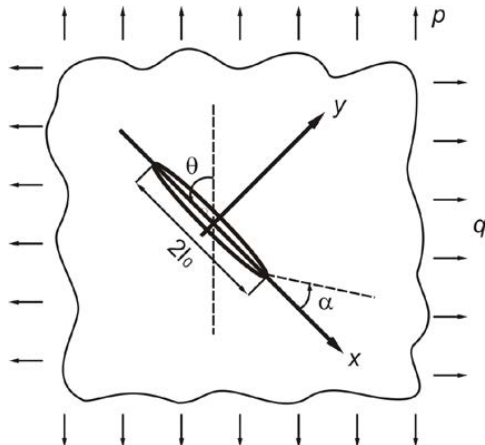


Рис. 1. Схема навантаження пластини з тріщиною

Формулювання задачі та метод її розв'язання. Розглянемо нескінченну пластину послаблену прямолінійною тріщиною початкової довжини $2l_0$. Пластина монотонно розтягується в двох взаємно перпендикулярних напрямках рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності p і q (рис. 1). Задача полягає у визначенні таких значень зовнішніх зусиль $p = p_c$, $q = q_c$, після досягнення яких наступить гранично-рівноважний стан пластини з тріщиною і пройде її поширення.

Для пластичних сталей розрахунок залишкової міцності проводимо з врахуванням впливу двохвісного напруженого стану на зону передруйнування біля вершини тріщини. Для цього застосовуємо деформаційний критерій, записаний у загальному вигляді:

$$\delta_t(p_*, \eta, \alpha_*, \theta, l_0) = \delta_C, \quad \left[\frac{\partial \delta_t(p_*, \eta, \alpha, \theta, l)}{\partial \alpha} \right]_{\alpha=\alpha_*} = 0. \quad (1)$$

Тут $\delta_t(p, \eta, \alpha, \theta, l_0)$ – розкриття у вершині тріщини [1], яке залежить від кутів початкового поширення тріщини $\alpha = \alpha_*$ і її орієнтації θ і визначається так $\delta_t = \sqrt{\delta_{It}^2 + \delta_{IIIt}^2}$, де δ_{It} і δ_{IIIt} – нормальне і дотичне розкриття вершини тріщини; $\eta = qp^{-1} \leq 1$ – жорсткість двовісного навантаження.

Розглянемо найнебезпечніші орієнтації тріщини $\theta = \theta_*$ відносно напрямку розтягуючих зусиль p . Як впливає з [1] найбільш небезпечною орієнтацією тріщини буде значення кута $\theta_* = \pi/2$, а $\alpha_* = 0$. Для такого випадку система рівнянь (1) зведеться до такого рівняння:

$$\delta_t(p_*, \eta, 0, \pi/2, l_0) = \delta_C. \quad (2)$$

Вважаючи, що макроскопічна тріщина розміщена в пластині з ідеально пружно-пластичного матеріалу, розкриття $\delta_t(p, \eta, 0, \pi/2, l_0)$ представимо наступним чином

$$\delta_t(p, \eta, 0, \pi/2, l_0) = E^{-1} K_I^2(p, l_0) \cdot \sigma_T^{-1}(\sigma_T, q). \quad (3)$$

Тут σ_T – межа текучості матеріалу пластини; $K_I(p, l_0)$ – коефіцієнт інтенсивності напружень біля вершини тріщини довжини $2l_0$ в задачі Гріффітса, який визначаємо за формулою [1]

$$K_I = p \sqrt{\pi l_0}, \quad (4)$$

де $\sigma_t(\sigma_T, q)$ – усереднені напруження в зоні передруйнування біля вершини тріщини, які визначаємо за умови пластичності Губера-Мізеса так

$$\sigma_t(\sigma_T, q) = \sigma_T [-0,5\xi + \sqrt{1 - 0,3\xi^2}] \quad \xi = q\sigma_T^{-1}. \quad (5)$$

Підставляючи вирази (3)-(5) в рівняння (2) для визначення критичних значень зовнішніх зусиль $p = p_*$, $q = q_*$ отримуємо наступні формули:

$$p_* = \left(\frac{\delta_C E \sigma_T}{\pi_0} \right)^{1/2} \left[-0,5\xi + \sqrt{1 - 0,75\xi^2} \right]^{1/2}, \quad q_* = p_* \eta. \quad (6)$$

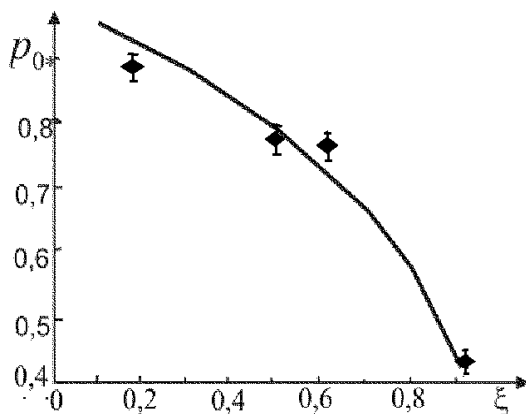


Рис. 2. Залежність p_{0*} від безрозмірного параметру ξ : суцільна лінія — за формулою (6), точки — експериментальні дані [5]

На рис. 2 за формулою (6) побудовано графічну залежність безрозмірного значення критичної величини зовнішнього зусилля $p_{0*} = p_*(\pi_0)^{1/2} (\delta_C E \sigma_T)^{-1/2}$ від параметру ξ навантаження пластини вздовж лінії розміщення тріщини. Як впливає з аналізу рис. 2, наявність розтягуючих зусиль q вздовж лінії розміщення тріщини за двовісного навантаження за вказаних значень параметрів $\theta_* = \pi/2$,

$a_* = 0$ зменшує критичне значення зовнішніх зусиль $p = p_*$.

Отримані результати порівняли із літературними експериментальними даними [5]. В основу цих досліджень було покладено силову схему двовісного розтягування нескінченної пластини з центральною втомною тріщиною із сталі 09Г2С товщиною $t = 1,5$ мм ($\sigma_T = 340$ МПа, $\sigma_B = 400$ МПа). Схема двовісного навантаження реалізується при розтягуванні хрестоподібного зразка з центральною тріщиною зусиллям p , прикладеним перпендикулярно до тріщини та зусиллям q , направленим уздовж лінії тріщини (схема «розтяг-розтяг»). У зразках на універсальній випробувальній машині EUS-20 вирошували втомні тріщини за силовою схемою одновісного циклічного навантаження з асиметрією циклу $R = 0,3$ і частотою 12 Гц. Хрестоподібні зразки з центральною тріщиною статично навантажували зусиллями p і q за пропорційних їх співвідношень до старту тріщини і визначали критичні значення цих зусиль та характеристику тріщиностійкості δ_C .

Як видно із рис. 2 експериментальні дані добре корелюють з аналітичною залежністю для жорсткостей двовісного навантаження $\eta = 0,2; 0,5; 0,6; 0,92$.

Висновки. Запропоновано деформаційний критерій поширення втомної тріщини за двовісного навантаження та отримано формули для визначення критичних значень зовнішніх зусиль p_* , q_* . За умов двовісного навантаження поперечна сила q , що діє паралельно до лінії тріщини зменшує як критичне значення зовнішніх зусиль p_* , так і деформаційну характеристику опірності руйнуванню матеріалу — розкриття вершини тріщини δ_C .

Список літератури:

1. Механика разрушения и прочность материалов. Справ. пособие в 4-х т. —Т.1 Основы механики разрушения материалов/ В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, В.З. Партон — Киев: Наук. думка, 1990. — 488с.
2. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. — К.: Наук. думка, 1976. — 376 с.
3. Анучкин М.П., Горицкий В.Н., Мирошниченко Б.И. Трубы для магистральных трубопроводов. — М: Недра, 1986. — 231 с.
4. Копельман Л.А. Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. — Л: Машиностроение, 1978. — 232 с.
5. Іваницький Я. Л., Штаюра С. Т., Мольков Ю. В., Іваницька Л.М. Опірність руйнуванню сталей за двовісного навантаження у водні // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2012. — № 3. — С. 18-23.

Андрейкив А.Е., Штаюра Н.С.

Львовский национальный университет имени Ивана Франко

КРИТЕРИЙ ПРЕДЕЛЬНО-РАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ТРЕЩИНАМИ ПРИ ДВУХОСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Аннотация

В работе предложено деформационный критерий распространения усталостной трещины в бесконечной пластине при двухосном нагружении и получено выражение для расчета критических растягивающих усилий и для наиболее опасного случая в условиях пластичности Губера-Мизеса. Построена графическая зависимость безразмерного значения критической величины внешнего усилия от параметра нагрузки пластины вдоль линии размещения трещины и установлено, что поперечное усилие q уменьшает критическое значение внешних усилий. Проведено сравнение полученных результатов с литературными экспериментальными данными.

Ключевые слова: критерий разрушения, предельно-равновесное состояние, тонкостенный элемент конструкции с трещиной, двухосное растяжение, предельное усилие нагружения.

Andreykiv O.Y., Shtayura N.S.
Ivan Franko National University of Lviv

BOUNDARY-EQUILIBRIUM STATE CRITERION OF STRUCTURAL THIN-WALLED ELEMENTS WITH CRACK UNDER BIAXIAL LOADING

Summary

In this work strain criterion for fatigue crack growth in nondimensional plate under biaxial loading are proposed and formula for critical tension forces calculation and in most dangerous case under Guber-Mises's plastic conditions is obtained. Graphical dependents for nondimensional value of critical external force versus weighting parameter along crack line placing is built and is established that the across force q decreases external forces critical values. Obtained results with known experimental results from literature is compered.

Keywords: fracture criterion, boundary-equilibrium conditions, structural thin-walled element with crack, biaxial loading, critical value of loading.