

ОЦІНЮВАННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА МІШАНИХ МАКРОМЕХАНІЗМІВ РУЙНУВАННЯ

WEN GUANG SONG¹, Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ², П. С. КУНЬ², В. М. ЧИРВА³

¹ School of Computer Science, Yangtze University, Jingzhou, China;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

³ ТОВ "Придніпров'я"

Розглянуто задачу про граничну рівновагу пружно-пластичного тіла з тріщиною за одночасної реалізації трьох макромеханізмів руйнування. На основі енергетичного підходу та деяких гіпотез запропоновано критеріальні рівняння для мішаного руйнування. Розрахункові значення зіставлені з експериментальними.

Ключові слова: мішаний макромеханізм руйнування, енергетичний критерій, граничний стан.

Щоб оцінити міцність матеріалів та прогнозувати ресурс елементів конструкцій, необхідні дослідження поширення тріщин у конструкційних матеріалах за складного напруженого стану, оскільки вони спричиняють вихід з ладу як окремих деталей вузлів, так і аварії на великих промислових об'єктах. Закономірності руйнування матеріалів, а також методи аналізу надійності та довговічності елементів конструкцій під дією різного роду навантажень привертають увагу дослідників упродовж останніх десятиріч [1–4].

Найуніверсальнішим для опису перебігу фізичних процесів, зокрема під час статичного чи втомного руйнування за довільного навантаження, вважають енергетичний підхід. Тому спробуємо теоретично обґрунтувати структуру критерію граничної рівноваги за статичного навантаження, що зумовлює одночасну реалізацію всіх трьох макромеханізмів руйнування.

Щоб змоделювати і оцінити ріст втомних тріщин у конструкційних елементах, потрібні граничні значення деяких параметрів, які фігурують, як правило, в критеріальних рівняннях граничної рівноваги. Експериментально встановлено [2], що за наявності двох макромеханізмів руйнування (розтягу і поперечного зсуву чи розтягу і поздовжнього зсуву) ділянки безпечних значень силових параметрів (K_{I^*}/K_{Ic} і K_{II^*}/K_{IIc} чи K_{I^*}/K_{Ic} і K_{III^*}/K_{IIIc}) обмежені еліпсоподібними кривими.

Для опису експериментальних даних за одночасної реалізації біля вершини тріщини трьох макромеханізмів руйнування запропоновано рівняння граничної поверхні [5], яке є узагальненням критерію Ірвіна для тріщини нормального відриву:

$$\left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^{n_1} + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}}\right)^{n_2} + \left(\frac{K_{III}}{K_{IIIc}}\right)^{n_3} = 1, \quad (1)$$

де n_k ($k = 1, 2, 3$) пов'язані зі структурою матеріалу параметри, що визначають експериментально; K_{Ic} , K_{IIc} , K_{IIIc} – характеристики тріщиностійкості матеріалу. При цьому

$$2 \leq n_k \leq 4. \quad (2)$$

Для теоретичного обґрунтування співвідношення (2) використаємо енергетичний критерій, в межах якого прийемо деякі гіпотези.

Розглянемо наскрізну прямолінійну макротріщину в ідеальному пружно-пластичному тілі, яке біля вершини тріщини деформується під складним статичним навантаженням (σ , τ_1 , τ_2) (рис. 1).

Для аналізу руйнівних процесів у заданому тілі виберемо умовно біля вершини тріщини елементарний розрахунковий елемент. Вважаємо, що його енергетичний стан відображає рівноважну ситуацію в тілі аж до моменту його руйнування. Тобто енергетичні запаси одиниці об'єму є питомою характеристикою матеріалу тіла.

За одного макромеханізму руйнування – розтягу чи одного зі зсувів (поперечного або поздовжнього) – питому енергію руйнування визначають за повною діаграмою деформування в істинних координатах “деформація–напруження”. А критерій руйнування тіла з тріщиною виражають умовою досягнення енергією деформування розрахункового елемента, розміщеного у вершині тріщини, критичного значення:

$$G_i = G_{ic}, \quad (3)$$

де

$$G_i = \sigma_i \cdot \varepsilon_{i \max} \quad \text{та} \quad (4)$$

$$G_{ic} = \sigma_i \cdot \varepsilon_{ic} \quad (5)$$

– енергії деформування та руйнування відповідно. Індекс i вказує на тип деформування: I – розтяг; II, III – поперечний чи поздовжній зсуви; σ_i – границя плинності матеріалу за відповідного навантаження (розтягу чи зсуву):

$$\sigma_I = \sigma_0, \quad \sigma_{II} = \tau_{01}, \quad \sigma_{III} = \tau_{02}. \quad (6)$$

Критеріальні рівняння (3) зручно записати у відносних величинах:

$$\omega_i = 1, \quad (7)$$

де безрозмірний параметр

$$\omega_i = G_i / G_{ic} \quad (8)$$

можна трактувати як індикатор накопичення відносної енергії руйнування елемента чи відносного пошкодження матеріалу. Рівняння (7) описує умову досягнення енергією деформування критичного руйнівного значення або повного пошкодження, що відповідає втраті тілом цілісності.

Загалом за одночасної дії трьох макромеханізмів руйнування біля вершини тріщини кожен з них вносить свій вклад в умову досягнення сумарної відносної енергії критичного значення, яку за аналогією з (7) запишемо компактно так:

$$\sum_{i=1}^3 \omega_i = 1. \quad (9)$$

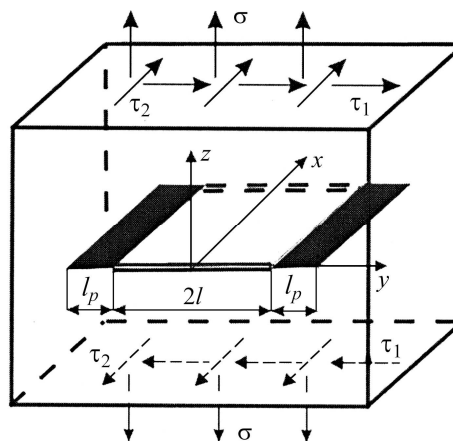


Рис. 1. Схема навантаження тіла з наскрізною тріщиною.

Fig. 1. Loading chart of a body with a through crack.

Рівняння (9) є відображенням відомого емпіричного правила Майнера лінійного сумування пошкоджень матеріалу [6]. В розгорнутій формі воно, згідно з прийнятими позначеннями, таке:

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} + \frac{G_{III}}{G_{IIIc}} = 1. \quad (10)$$

Використовуючи зв'язок між енергетичними, деформаційними та силовими параметрами для ідеального пружно-пластичного матеріалу розрахункового елемента [7], умову (10) запишемо у вигляді критеріального рівняння

$$\frac{K_I^2}{K_{Ic}^2} + \frac{K_{II}^2}{K_{IIc}^2} + \frac{K_{III}^2}{K_{IIIc}^2} = 1. \quad (11)$$

Отже, критерій (11) є прямим результатом гіпотези про локальний енергетичний баланс у початковий момент руйнування. Він характеризує критичну поведінку за складного навантаження тих матеріалів, що задовольняють цю гіпотезу, підтверджену численними експериментальними результатами.

Тепер розглянемо другу гіпотезу. В заданих умовах навантаження тіла з тріщиною біля її вершини утворюється спільна для трьох макромеханізмів ділянка пластичних деформацій, де матеріал тіла задовольняє умову пластичності Губера–Мізеса, тобто

$$\sigma^2 + 3(\tau_1^2 + \tau_2^2) = \sigma_0^2, \quad (12)$$

що відповідає рівності інтенсивності напружень за складного навантаження градієнту плинності за одновісного розтягу.

Оскільки кожен тип деформування по-своєму впливає на загальне пошкодження, то постулюємо, що момент руйнування тіла з тріщиною настає за умови досягнення критичного сумарного значення відносних енергій деформування, акумульованих на спільній ділянці пластичних деформацій:

$$\frac{\tilde{G}_I}{\tilde{G}_{Ic}} + \frac{\tilde{G}_{II}}{\tilde{G}_{IIc}} + \frac{\tilde{G}_{III}}{\tilde{G}_{IIIc}} = 1, \quad (13)$$

де

$$\tilde{G}_i = \int_0^{l_p} G_i(x) dx = \sigma_i \cdot \int_0^{l_p} \varepsilon_i(x) dx; \quad (14)$$

$$\tilde{G}_{ic} = \int_0^{l_{pc}} G_i(x) dx = \sigma_i \cdot \int_0^{l_{pc}} \varepsilon_i(x) dx. \quad (15)$$

Згідно з результатами розв'язків у межах δ_c -моделі [8] для переміщень берегів модельної тріщини енергетичні параметри (14), (15) набудуть вигляду

$$\tilde{G}_i = 0,33 \cdot \sigma_i \cdot \varepsilon_i(0) \cdot l_p, \quad (16)$$

$$\tilde{G}_{ic} = 0,33 \cdot \sigma_i \cdot \varepsilon_{ic} \cdot l_{pc}. \quad (17)$$

Враховуючи те, що за мішаного руйнування тіла біля вершини тріщини формується єдина зона передруйнування (як біжуча, так і критична), то у межах лінійної механіки руйнування (припускаючи малість пластичних зон) ці розв'язки для довжин пластичних зон матимуть вигляд

$$l_p = \frac{K_I^2}{8\sigma_0^2} = \frac{K_{II}^2}{8\tau_{01}^2} = \frac{K_{III}^2}{8\tau_{02}^2}; \quad l_{pc} = \frac{K_{Ic}^2}{8\sigma_0^2} = \frac{K_{IIc}^2}{8\tau_{01}^2} = \frac{K_{IIIc}^2}{8\tau_{02}^2}. \quad (18)$$

Підставляючи залежності (16)–(18) у рівняння (13), запишемо остаточний вигляд критеріального рівняння

$$\frac{K_I^4}{K_{Ic}^4} + \frac{K_{II}^4}{K_{IIc}^4} + \frac{K_{III}^4}{K_{IIIc}^4} = 1, \quad (19)$$

яке є наслідком другої гіпотези і порівняно з критеріальним (11) менш жорстке, так як поверхня граничних навантажень, яку воно описує, випукліша і повністю покриває поверхню, що відповідає рівнянню (11), через що критичні силові параметри набудуть більші значення (рис. 2).

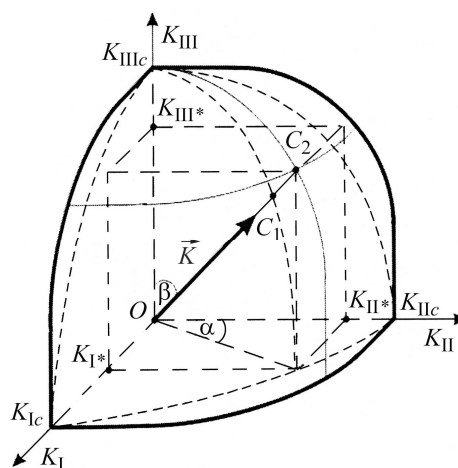
Зв'язок між модулями граничних векторів навантажень $\vec{K}_* = \vec{K}(K_{I*}, K_{II*}, K_{III*})$ описує співвідношення

$$K_{2*} = K_{1*} \cdot f(\alpha, \beta), \quad (20)$$

Рис. 2. Схема визначення характеристики K_* за допомогою вектора \vec{K} на поверхні граничних навантажень.

Fig. 2. Determination of characteristic K_* by means of vector \vec{K} on the critical loading surface.

де K_{1*}, K_{2*} – значення коефіцієнтів інтенсивності напружень за певного напрямку вектора навантажень \vec{K}_* , що лежать на граничних поверхнях, описаних рівняннями (11) і (18);



$$f(\alpha, \beta) = \left((\sin \alpha \cdot \cos \beta)^4 + (\cos \alpha \cdot \cos \beta)^4 + \sin^4 \beta \right)^{-0,25}. \quad (21)$$

Зокрема, $\max[f(\alpha, \beta)] = f(\pi/4, \pi/4) = 1,28$, що стосується навантаження, якщо $K_I = K_{II} = K_{III}$.

Це варто мати на увазі, вибираючи критеріальне рівняння для оцінювання швидкості росту втомної тріщини та залишкової довговічності. Наприклад, під час експлуатації труби бурових колон з різьбовим з'єднанням піддані дії закруту та розтягу-стиску [9]. У вершині різьбового р'вчака виникає складний напружений стан, за якого реалізується механізм деформування I+III. Як свідчить практика, тримку здатність таких конструкцій необхідно визначати на основі запропонованого підходу, оскільки за врахування лише відривного механізму руйнування матимемо неправильну оцінку.

РЕЗЮМЕ. Рассмотрена задача о граничном равновесии упругопластического тела с трещиной при одновременной реализации трех макромеханизмов разрушения. На основании энергетического подхода и некоторых гипотез предложены критериальные уравнения для смешанного нагружения. Расчетные значения сопоставлены с экспериментальными.

SUMMARY. A problem of the limit equilibrium of the elasto-plastic body with a crack at simultaneous realization of three macromechanisms of fracture is considered. On the basis of the energy approach and some hypotheses the formulas of criterion equations under the mixed loading are proposed. The calculation and experimental values are compared.

Роботу виконано за сприяння PetroChina Innovation Foundation (2017D-05007-03004), 2016 Knowledge Innovation Special Foundation провінції Губей (2016 C738), Open Fund of the Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University), Міністерства освіти Китаю (K2016-04) та Фонду аспірантури провінції Хенану.

1. *Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. Т. 1: Основы механики разрушения / В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, В. З. Партон. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.*
2. *Іваницький Я. Л., Кунь П. С. Тріщиностійкість конструкційних матеріалів за складного навантаження. – Львів: Сполом, 2013. – 280 с.*
3. *Аналіз напружено-деформованого стану зони передруйнування за двовісного навантаження пластини з центральною тріщиною / Yuanli Du, Ю. В. Мольков, Т. М. Ленковський, Р. А. Ковальчук // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – 53, № 1. – С. 78–83.
(Analysis of the stress-strain state of the process zone of a plate with central crack under biaxial loading / Yu. Du, Yu. V. Mol'kov, T. M. Lenkovs'kyi, R. A. Koval'chuk // Materials Science. – 2017. – 53, № 1. – P. 86–92.)*
4. *Оцінка пошкоджень колектора водяного економайзера тріщинами термічної втоми / Р. Я. Косаревич, О. З. Студент, Я. Д. Онищак, А. Д. Марков, І. В. Ріпей, Б. П. Русин, Г. М. Никифорчин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – 40, № 1. – С. 109–114.
(Estimation of damage to the collector of a water economizer by thermal fatigue cracks / R. Ya. Kosarevych, O. Z. Student, Ya. D. Onyshchak, A. D. Markov, I. V. Ripei, V. P. Rusyn, H. M. Nykuforchyn // Materials Science. – 2004. – 40, № 1. – P. 132–138.)*
5. *Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.*
6. *Екобори Т. Научные основы прочности и разрушения материалов / Пер. с яп. – К.: Наук. думка, 1978. – 352 с.*
7. *Андрейкив А. Е. Пространственные задачи теории трещин. – К.: Наук. думка, 1982. – 346 с.*
8. *Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. – К.: Наук. думка, 1968. – 246 с.*
9. *Напружено-деформований стан бурильної колони у криволінійному стовбурі свердловини із виробками стінок / Р. В. Рачкевич, А. С. Величкович, В. В. Гриців, А. А. Козлов, І. О. Рачкевич // Зб. наук. праць Нац. гірничого ун-ту. – 2012. – № 37. – С. 124–134.*

Одержано 27.10.2017