

ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНОГО КРИТЕРІЮ НЕСТІЙКОГО ЗРОСТАННЯ ТРІЩИН В КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ

*О. О. Давиденко, кандидат технічних наук
e-mail: davydenko@gmail.com*

Анотація. В статті представлено оцінку розмірів зон пластичності, а також розподіл в них напружень. Наведено методичку визначення параметра нестійкого зростання тріщини з використанням положень А. Гріффітса про мінімум потенціальної енергії та виконання умови рівноваги після початку руйнування на спадаючих ділянках рівноважних діаграм деформування пластичного матеріалу. Розглянуто дві частини роботи руйнування, одна з яких витрачається на утворення нової поверхні розділу і визначається добутком коефіцієнта поверхневого натягу на площу знову утвореної поверхні, і друга, яка при деформації до утворення макротріщини запасується у вигляді пружної потенційної енергії, в момент розриву розсіюється у вигляді тепла. Представлено зміну повної енергії зразка та її складових при збільшенні ширини розкриття тріщини. Загальний баланс енергії представлено алгебраїчною сумою двох вказаних енергій. Величина ширини розкриття, що відповідає нестійкому зростанню тріщини, визначена з умови диференціювання рівняння повної енергії зразка. Рішення задачі щодо визначення критичної довжини тріщини виконано з використанням залежності Інгліса. Обчислені критичні коефіцієнти інтенсивності напружень для конструкційної сталі А-3 (виробництва КНР) в момент нестійкого росту макротріщини. За допомогою спеціального обладнання отримано зразки з тріщинами. Отриманий критичний параметр нестійкого зростання тріщин дозволяє виконувати достовірну оцінку тріщиностійкості матеріалів.

Ключові слова: *пластичність, критерій, матеріал, тріщина, параметр*

Постановка проблеми. Результати випробувань малогабаритних зразків конструкційних сталей показали, що момент утворення макротріщини характеризується початком лінійної ділянки спадної гілки повної діаграми деформацій. Подальший розвиток тріщини до критичного розміру відбувається при постійному

зниженні напружень, і для матеріалів з в'язким характером деформування і руйнування початок нестійкого розвитку макротріщини, на відміну від крихких матеріалів, не збігається з моментом її утворення. Існує проблема визначення параметру нестійкого зростання тріщин для сталевих матеріалів з в'язким характером деформування і руйнування.

Аналіз останніх досліджень. Одним з основних питань механіки руйнування є оцінка розмірів зон пластичності і предруйнування, а також розподіл в них напружень. Поряд з відомими роботами в цій області [1–4], цікаві пропозиції були надані про подібність характеру розподілу напружень у вершині тріщини і на спадаючому ділянці повної діаграми деформування гладкого зразка в умовах досить жорсткого навантаження [5], рис. 1.

Використання традиційних методів випробування матеріалу для визначення критичних характеристик тріщиностійкості (K_{1c} , δ_{1c} , J_{1c}) не завжди зручно, пов'язане з певними труднощами. Наприклад, для отримання K_{1c} для матеріалів з високою в'язкістю руйнування потрібні зразки великих габаритів і спеціальне обладнання. Тому необхідно якось оцінити величини K_{1c} з допомогою зразків менших розмірів. Це можливо на основі пружно-пластичної механіки руйнування, з використанням J -інтегралу. Однак, можливості перерахунку J_{1c} в K_{1c} для низькоміцних сталей також обмежені. До того ж обчисленню значення J -інтеграла передують трудомістка операція фіксування стрибка тріщини. Визначення критичного розкриття тріщини пов'язано зі складними прецизійними випробуваннями.

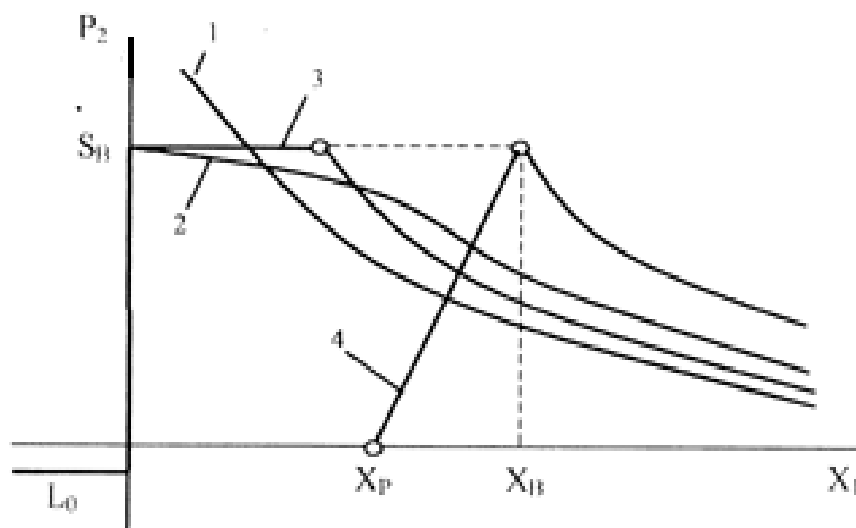


Рис. 1. Епюри напружень на продовженні тріщини: 1 – за рішенням лінійної задачі [1]; 2 – за гіпотезою про сили зчеплення [2]; 3 – за Дагдейлом [4]; 4 – для повністю рівноважними діаграмами напружень [5].

Мета досліджень: розробка методики визначення параметра нестійкого зростання тріщини з використанням положень А. Гріффітса про мінімум потенціальної енергії [6] та виконання умови рівноваги після початку руйнування на спадаючих ділянках рівноважних діаграм деформування пластичного матеріалу.

Результати досліджень. Використання узагальненої теореми мінімуму енергії стає неможливим, якщо не встановлено закон, що зв'язує поверхневу енергію з відстанню між поверхнями. Тому виникає задача встановлення залежності поверхневої енергії від ширини розкриття тріщини (мається на увазі ширина розкриття не вершини, а середній частині тріщини), яку можна визначити за діаграмою враховуючи, що після утворення макротріщини переміщення зразка, як свідчать дослідження, здійснюється тільки за рахунок ширини розкриття тріщини.

Уявімо роботу руйнування на основі вже сформованих понять, що складається з двох частин, одна з яких витрачається на утворення нової поверхні розділу і визначається добутком коефіцієнта поверхневого натягу на площу знову утвореної поверхні. Інша частина роботи, яка при деформації до утворення макротріщини запасується у вигляді пружної потенційної енергії, в момент розриву розсіюється у вигляді тепла. Ця частина роботи, як відомо, пропорційна обсягу тіла, що деформується. Зауважимо, якщо момент розриву розтягнутий у часі, що забезпечується умовами жорсткого навантаження для рівноважних діаграм, зміна повної енергії зразка та її складових після моменту утворення тріщини при збільшенні ширини розкриття може бути представлена в наступному вигляді (1), рис. 2:

$$u - u_0 = -\frac{\Delta l_y}{\Delta l_n} \cdot S_1 \left(\delta - \frac{\delta^2}{2\Delta l_n} \right) + \frac{S_1 \cdot \delta^2 \cdot \Delta l_p}{2 \cdot \Delta l_y \cdot \Delta l_n}, \quad (1)$$

де перший доданок представляє собою зменшення пружної енергії і характеризується різницею площ трикутників АВК і СLM, а другий доданок враховує утворення двох поверхонь, що представлено площею трикутника ОКL, рис. 2.

Рівноважне деформування дозволяє також спостерігати і зростання області "розвантаження" (або відсутності пружної деформації навколо майбутньої макротріщини). Однак, як показали дослідження, зростання області "розвантаження" з досягненням деформацій відповідних т. К (рис. 2), сповільнюється і практично припиняється в момент утворення макротріщини. Подальше деформування здійснюється за рахунок збільшення ширини розкриття макротріщини. Розглянемо зміну повної енергії зразка та її складових при збільшенні ширини розкриття, як показано на рис. 2.

Тріщина, що з'являється у в'язкому матеріалі, спочатку злегка розкривається і потім при досягненні певного значення обидва її кінця розходяться на деяку відстань (стійке підростання). Слід зазначити, що мова йде про спадаючу ділянку кривої, і якщо в цей момент зняти навантаження, то можна отримати зразок з вирощеною тріщиною, рис. 3.

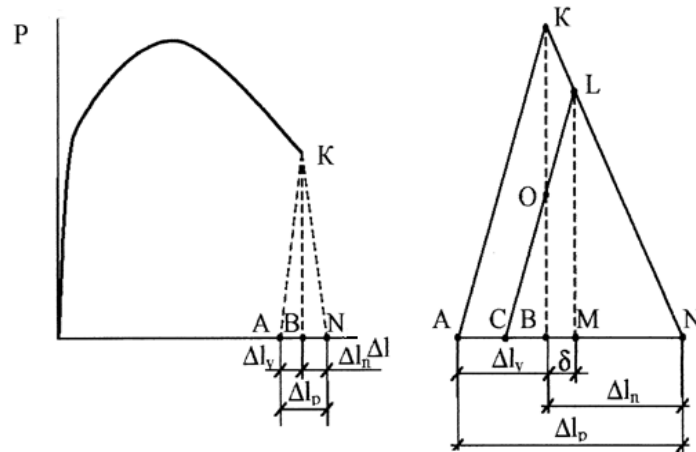


Рис. 2. До визначення параметра нестійкого розвитку тріщини пластичного матеріалу.

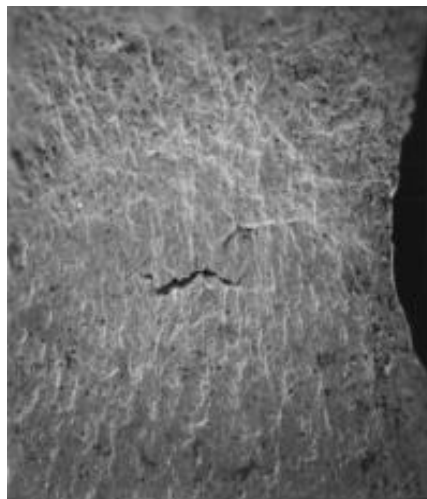


Рис. 3. Зразок конструкційної сталі А3 з вирощеною макротрещиною на спадаючій ділянці діаграми деформацій.

Продовження деформування призводить до досягнення критичного значення ширини розкриття, відповідного нестійкого зростання тріщини і пов'язано зі зміною механізму її розвитку від відриву до в'язкого зрізу. При цьому перехід від стійкого до нестійкого стану відбувається при постійному зменшенні енергії деформації, яка переходить в енергію виникнення нових поверхонь, але більш повільно для в'язкого матеріалу. Тому, згідно рівнянню (1), залежність останньої має нелінійний характер, рис. 4.

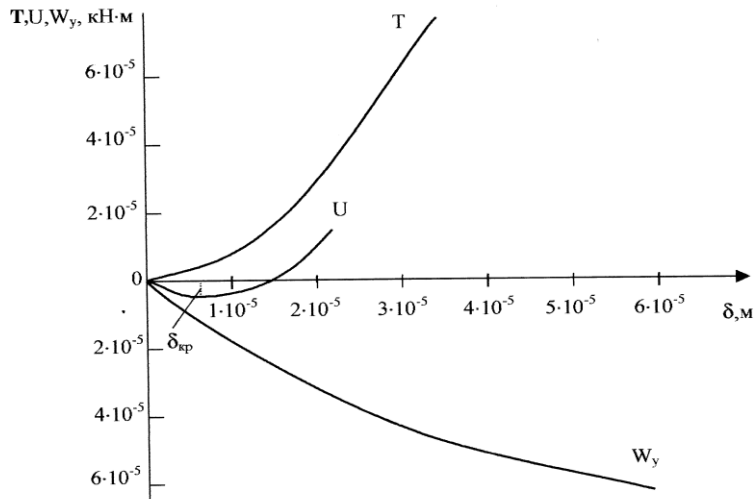


Рис. 4. Зміна енергії зразка в залежності від ширини розкриття тріщини.

На рис. 4 залежність " $T - \delta$ " представляє енергію, необхідну для утворення нової поверхні зростаючої тріщини. Крива " $W_y - \delta$ " представляє енергію, що звільняються в системі при досягненні тріщиною даного розміру. Загальний баланс енергії, який є алгебраїчною сумою двох перерахованих енергій, представлений кривою " $U - \delta$ ".

Точка $\delta_{кр}$ на графіку характеризує момент утворення макротріщини. До точки, відповідної $\delta_{кр}$, система в цілому повинна поглинати енергію; після точки $\delta_{кр}$ енергія починає виділятися із системи. Отже, підростання тріщини до розміру $\delta_{кр}$ не є небезпечним, а величина тріщини, що дорівнює $\delta_{кр}$ відповідає початку нестабільного зростання тріщини.

Величина ширини розкриття, що відповідає нестабільному зростанню тріщини, визначається за умови:

$$\frac{du}{d\delta} = 0 \quad - \frac{\Delta l_y}{\Delta l_n} S_1 + S_1 \frac{\Delta l_y}{\Delta l_n^2} \delta + \frac{S_1 \cdot \Delta l_p \cdot \delta}{\Delta l_y \cdot \Delta l_n} = 0, \quad (2)$$

звідки:

$$\delta_{cr} = \frac{\Delta l_y^2 \cdot \Delta l_n}{\Delta l_y^2 + (\Delta l_n \cdot \Delta l_p)}, \quad (3)$$

або з урахуванням $C = \frac{S_1}{\Delta l_y}$, критична ширина розкриття тріщини буде

дорівнює:

$$\delta_{cr} = \frac{S_1^2}{S_1^2 + C^2 \cdot \Delta l_n \cdot \Delta l_p}. \quad (4)$$

У прикладі, представленому на рис. 2, значення критичної ширини розкриття тріщини для зразків з радіусом концентратора $R = 3 \text{ мм}$ складало $\delta_{cr} = 0.00873 \text{ мм}$.

Проведені досліди, а також дослідження [18] свідчать, що збільшення ширини розкриття (δ) пов'язано і з підростанням довжини тріщини на спадаючому ділянці (KL) діаграми " $P - \Delta l$ ". Тоді, враховуючи, що на момент утворення тріщини матеріал є повністю крихкий і попереду зростаючої тріщини зона пластичної деформації не виявлено, рішення задачі по визначенню критичної довжини тріщини може бути виконано з використанням залежності Інгліса, рис. 5:

$$l_{kp} = \frac{\delta_{kp} \cdot E}{4 \cdot \sigma_k}, \quad (5)$$

або з урахуванням:

$$\sigma = \frac{P_{kp}}{(a - 2l) \cdot b}, \quad (6)$$

$$L_{kp} = 2 \cdot l_{kp} = \frac{\delta_{kp} \cdot E \cdot a \cdot b}{2P_{kp} + \delta_{kp} \cdot b \cdot E}. \quad (7)$$

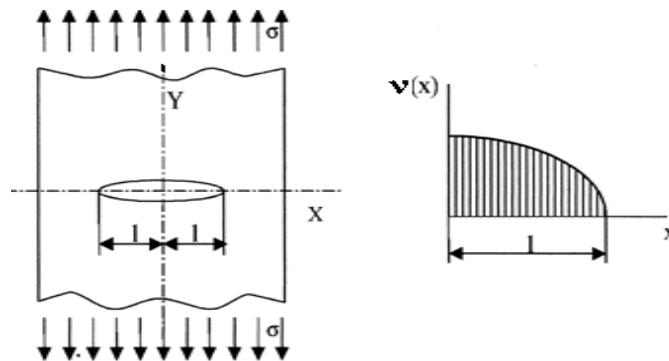


Рис. 5. До визначення критичного розміру довжини тріщини.

У прикладі, представленому на рис. 2, критична довжина тріщини становила 0,88 мм при ширині розкриття $\delta_{kp} = 0.00873 \text{ мм}$.

Отримана залежність (7) може бути корисна для визначення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{1c} :

$$K_{1c} = \sigma_k \cdot f_{1k} \cdot \sqrt{\pi \cdot l_{kp}}, \quad (8)$$

де: l_{kp} – полудовжина тріщини, що визначається за (5); f_{1k} – поправочна функція, що враховує відношення довжини тріщини до ширини пластини:

$$f_{1k} = \sqrt{\frac{2B}{\pi l_{kp}} \cdot \text{tg} \left(\frac{\pi l_{kp}}{2B} \right)}$$

Обчислення критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень для сталі А-3 в момент нестійкого росту макротріщини наведено в табл. 1.

1. Критичні розміри тріщин плоских зразків, обчислені за діаграмою деформацій « $P - \Delta l$ » і механічні властивості конструкційної сталі А-3 в момент нестійкого росту макротріщини.

Тип зразка	$\delta_{кр}$, мм	$l_{кр}$, мм	$\sigma_{кр}$, кН / мм ²	f_{1k}	K_{1c} , МН / м ^{3/2}
Гладкий	0.01416	0.996	0.856	1.026	34.11
R5	0.01422	1.114	0.717	1.034	30.44
R3	0.01422	1.19	0.6989	1.039	30.82

Висновок. Отриманий на основі розвитку деформаційного критерію руйнування критичний параметр нестійкого зростання тріщин дозволяє виконувати достовірну оцінку тріщиностійкості матеріалів при наявності достатньо невеликих, близьких до реальних розмірів дефектів. Важливість такого параметра стає очевидною, оскільки в лінійної механіки руйнування при обчисленні значень K_{1c} для матеріалів з високою в'язкістю руйнування доводиться застосовувати зразки великих габаритів, глибокі тріщини (0,3–0,6 товщини перерізу), низькі температури та рівні номінальних напружень. Тому, в ряді випадків величини K_{1c} визначаються в умовах, що не відповідають реальним (в першу чергу по дефектам і руйнівним напруженням) [8]. Зразки, що використовуються в стандартних методах випробувань при статичному розтягу, передбачають штучну ініціацію тріщини. Вирощена таким чином тріщина ставиться у відповідність або моделює розвиток тріщини від вихідних дефектів технологічного або експлуатаційного походження. При цьому як у випробуваннях, так і в розрахунках не робиться відмінності між природою виникнення дефектів та не враховуються стадії утворення (зародження) тріщини.

Список літератури

1. Irvin G. R. Trans. ASME // Journal of Applied Mechanics. 1957. Vol. 24. № 6. P. 361—369.
2. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. Київ. Наукова думка. 1968. 246 с.
3. Dugdale D. S. Yielding of steel sheets containing stils // Journal Mechanics and Physics Solids. 1960. Vol 8. № 2. P. 100—108.
4. Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении // Журнал прикладной механики и технической физики. 1961. № 4. С. 3—56.

5. Волков С. Д., Дубровина Г. И., Соковнин Ю. П. О краевой задаче механики разрушения // Проблемы прочности. 1978. № 1. С. 3—7.
6. Ярема С. Я. А. А. Гриффитс (1883–1963) // Физико-химическая механика материалов. 1993. № 3. С. 7—13.
7. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Зайцева Л. В. Влияние вида напряженного состояния на кинетику разрушения и трещиностойкость мартенситно-старееющей стали. Сообщение. 2. Оценка трещиностойкости стали // Проблемы прочности. 1991. № 8. С. 14—18.
8. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. Москва. Машиностроение. 1981. 272 с.

References

1. Irvin G. R. (1957). Trans. ASME // Journal of Applied Mechanics. Vol. 24. № 6. 361-369.
2. Panasyuk V. V. (1968). Limiting equilibrium of brittle bodies with cracks. Kiev. Scientific thought. 246.
3. Dugdale D. S. (1960). Yielding of steel sheets containing stils // Journal Mechanics and Physics Solids. Vol 8. № 2. 100-108.
4. Barenblatt G. S. (1961). Mathematical theory of equilibrium cracks during brittle fracture. Journal of applied mechanics and technical physics. No. 4. 3-56.
5. Volkov S. D., Dubrovina G. S., Sokovnin, Yu. P. (1978). On the boundary problem of fracture mechanics // Problems of strength. No. 1. 3-7.
6. Yarema S. Ya. (1993). A. A. Griffiths (1883-1963) // Physicochemical mechanics of materials. No. 3. 7-13.
7. Lebedev A. A., Chausov N. G., Zaitseva L. V. (1991). Influence of stress state on the kinetics of fracture and crack resistance of martensitic-aging steel. Message. 2. Estimation of fracture toughness of steels. Strength of materials. No. 8. 14-18.
8. Makhutov N. A. (1981). Deformation crater destruction and calculation of elements of structures for strength. Moscow. Engineering. 272.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО КРИТЕРИЯ НЕУСТОЙЧИВОГО РОСТА ТРЕЩИН В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

А. А. Давыденко

Аннотация. В статье представлена оценка размеров зон пластичности, а также распределение в них напряжений. Приведена методика определения параметра неустойчивого роста трещины с использованием положений А. Гриффитса о минимуме потенциальной энергии и выполнения условия равновесия после начала разрушения на спадающих участках равновесных диаграмм деформирования пластичного материала. Рассмотрены две части работы разрушения, одна из которых расходуется на образование новой поверхности раздела и определяется произведением коэффициента поверхностного натяжения на площадь вновь образованной поверхности, и вторая – которая при деформации до образования макротрещины запасается в виде упругой потенциальной энергии, в момент разрыва рассеивается в виде тепла. Представлено изменение полной энергии образца и ее составляющих при увеличении

ширины раскрытия трещины. Общий баланс энергии представлено алгебраической суммой двух указанных энергий. Величина ширины раскрытия, что соответствует нестабильному росту трещины, определенная из условия дифференцирования уравнения полной энергии образца. Решение задачи по определению критической длины трещины выполнено с использованием зависимости Инглиса. Вычислены критические коэффициенты интенсивности напряжений для конструкционной стали А-3 (производства КНР) в момент неустойчивого роста макротрещины. С помощью специального оборудования получены образцы с трещинами. Полученный критический параметр неустойчивого роста трещин позволяет выполнять достоверную оценку трещиностойкости материалов.

Ключевые слова: *пластичность, критерий, материал, трещина, параметр*

DEFINITION OF DEFORMATION CRITERION OF UNSTABLE CRACK GROWTH IN STRUCTURAL MATERIALS

O. O. Davydenko

Abstract. *The article presents an assessment of the amount of plastic zones and the distribution of stresses. The technique of determining the parameter of the unstable crack growth through the provisions of A. Griffith on the potential energy minimum and the condition of equilibrium after the beginning of the destruction of the falling parts of the equilibrium diagram of deformation of the plastic material. Considered two parts of fracture, one of which is expended on the formation of the new surface section, and is determined by the product of surface tension on the area of the newly formed surface, and the second is that the deformation before the formation of the macrocrack is stored in the form of elastic potential energy, at the moment of rupture is dissipated as heat. The change in total energy of the sample and its components with increasing width of the crack opening. The overall balance of energy represented by the algebraic sum of these two energies. The value of the opening width, which corresponds to the unstable growth of a crack is determined from the differentiation of the equation of the total energy of the sample. The solution of the problem to determine the critical crack length are made using dependencies of Inglis. The calculated critical stress intensity factors for structural steel A-3 (made in China) to the unstable growth of the macrocrack. With the help of special equipment the samples with cracks. Received critical unstable crack growth allows to perform a reliable estimation of fracture toughness of materials.*

Key words: *plasticity, criteria, material, crack, option*