

УДК 621.746

П.В. Ясній, д.т.н., проф.
 П.О. Марущак, мол. наук. співроб.
 Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ ДЛЯ ПРИЗМАТИЧНОГО БІМЕТАЛЕВОГО ЗРАЗКА З БІЧНОЮ ТРІЩИНОЮ

Отримано аналітичний вираз для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень у біметалевому призматичному зразку з бічною тріщиною із урахуванням пружних властивостей складових біматеріалу. Проведена перевірка запропонованого виразу методом пружної піддатливості. Виявлено задовільне узгодження результатів, отриманих різними методами, що свідчить про коректність запропонованих підходів.

Вступ

Значна частина інженерних конструкцій виготовляється з неоднорідних матеріалів, тому швидкість поширення тріщин в них залежить не лише від величини навантаження і геометричних параметрів конструкції, але й від механічних властивостей окремих складових біметалу [1–4].

Нехтування відмінностями механічних властивостей складових біметалевого зразка, проведення розрахунку параметрів механіки руйнування для них як для однорідного матеріалу може призвести до значних похибок [1].

Відомі праці, в яких пропонуються методи визначення параметрів лінійної та нелінійної механіки руйнування для тріщини, що поширюється перпендикулярно до поверхні розділу біматеріалу. Зокрема I. Barsoum та K.S. Ravi Chandran [2] запропонували формулу визначення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) призматичного тришарового зразка з центральною тріщиною, A.S. Kim та F.R. Riemelmoser [3], [4] вивчали можливість використання J-інтегралу для опису напруженого стану в околі вершини тріщини біматеріалу.

Проте відсутні дані з розрахунку КІН біметалевих зразків з бічною тріщиною, перпендикулярною до поверхні розділу.

Дана стаття присвячена визначенню КІН біметалевого зразка з бічною тріщиною, яка поширюється у біматеріалі перпендикулярно до поверхні розділу.

Урахування неоднорідності матеріалу біметалевого зразка з бічною тріщиною

Сталь 15X13MФ_л використовується як захисний шар роликів машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), основним матеріалом яких є сталь 25X1M1Ф_л. Зразки вирізались з роликів, отриманих методом відцентрового лиття із почерговою заливкою шарів. Механічні властивості матеріалів зразка наведені у табл. 1.

Розподіл напружень перед вершиною тріщини в першому шарі біметалевого зразка з бічною тріщиною (рис. 1, а, б) може бути описаний рівнянням [5] :

$$\sigma_{y1} = \frac{\sigma_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{x}\right)^2}} \text{ для } a \leq x \leq W_1, \quad (1)$$

де a – довжина тріщини;

x – відстань від вершини тріщини до розглядуваної точки вздовж напрямку її поширення;

σ_1 – напруження у першій частині біметалевого зразка;

W_1 – ширина 1-ї ділянки біметалевого зразка;

L – віддаль між захоплювачами випробувальної машини;

$$\sigma_1 = \sigma_{app} \frac{E_1}{E_c}, \quad (2)$$

σ_{app} – напруження у нетто перерізі зразка;

де E_1, E_c – відповідно модулі пружності першого роду першого матеріалу та модуль біметалу в цілому;

Рівняння (2) дійсне за умов сумісної деформації зразка $\varepsilon_c = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$, проковзування частин зразка одна відносно одної відсутнє (тут $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – деформація складових зразка).

Таблиця 1

Механічні властивості складових матеріалів біметалевого зразка

Сталь	$\sigma_s, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$E, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
15X13МФ _л	456	338	$1,81 \cdot 10^5$	6,0	4,8
25X1М1Ф _л	718	509	$2,06 \cdot 10^5$	21,7	47,6

Для біматеріалу, що розглядається (табл 1), виконується умова сумісності деформування [6]:

$$\frac{\sigma_{02}^1}{\sigma_{02}^2} < 2 \dots 2,5, \tag{3}$$

де σ_{02}^1 та σ_{02}^2 – умовна границя текучості першої та другої складових біматеріалу.

До зразка прикладались напруження, значення яких не перевищували σ_{02}^1 та σ_{02}^2

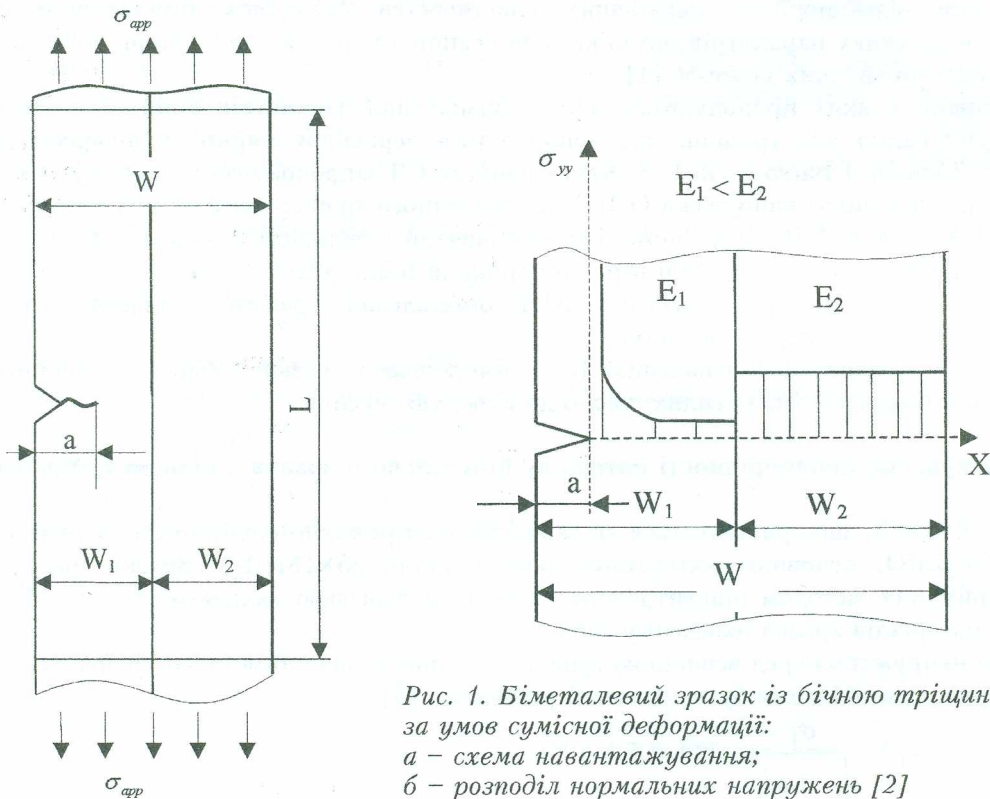


Рис. 1. Біметалевий зразок із бічною тріщиною за умов сумісної деформації:
а – схема навантажування;
б – розподіл нормальних напружень [2]

Модуль пружності першого роду біматеріалу визначали за формулою [2]:

$$E_c = E_1 \left(\frac{W_1}{W} \right) + E_2 \left(\frac{W_2}{W} \right), \tag{4}$$

де W, W_1, W_2 – відповідно повна ширина біметалевого зразка та його складових;

$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{E_2}{E_1}. \tag{5}$$

Розподіл напружень у другому шарі біматеріалу описують рівнянням [5]:

$$\sigma_{yy2} = \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \frac{\sigma_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{x} \right)^2}} \text{ для } W_1 \leq x \leq W_2. \quad (6)$$

Рівняння рівноваги між напруженнями у нетто-перерізі зразка та напруженнями у вершині тріщини [2]:

$$\sigma_{app} W = \int_0^{W_1} \frac{\sigma_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{x} \right)^2}} dx + \int_{W_1}^W \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \frac{\sigma_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{x} \right)^2}} dx. \quad (7)$$

КІН для напівнескінченної пластини з центральною тріщиною, згідно з працею [7], можна представити у вигляді:

$$K_I = \sigma_1 \sqrt{\pi a}. \quad (8)$$

У праці [2] після аналогічних міркувань та підстановки рівняння (7) у (6), спрощень та перетворень отримали формулу для обчислення КІН тришарового напівнескінченного зразка із центральною тріщиною в першому шарі:

$$K_{bi} = \frac{\sigma_{app} \sqrt{\pi a}}{\left[\left(1 - \frac{E_2}{E_1} \right) \sqrt{\left(\frac{W_1}{W} \right)^2 - \left(\frac{a}{W} \right)^2} + \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{a}{W} \right)^2} \right]}. \quad (9)$$

Дана формула дозволяє обчислювати КІН тільки для першої частини зразка. Враховуючи, що чисельник даної формули – це КІН монометалевого зразка з центральною тріщиною, формулу (9) можна переписати у вигляді:

$$K_{bi} = \frac{K_I}{\left[\left(1 - \frac{E_2}{E_1} \right) \sqrt{\left(\frac{W_1}{W} \right)^2 - \left(\frac{a}{W} \right)^2} + \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{a}{W} \right)^2} \right]}. \quad (10)$$

Формули (1)–(8) справедливі як для тришарового біметалевого зразка з центральною тріщиною, так і для двошарового біметалевого зразка з бічною тріщиною. Отже, останній вираз буде справедливий для розрахунку КІН біметалевого зразка з бічною тріщиною у першому шарі (рис. 1).

КІН плоского зразка з бічною тріщиною можна представити наступним чином [8]:

$$K_I = \frac{P}{t\sqrt{W}} F_1 \left(\frac{a}{W} \right), \quad \text{для } L/W = 4, \quad (11)$$

$$F_1 \left(\frac{a}{W} \right) = 0,288 + 3,779 \left(\frac{a}{W} \right) - 1,985 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 3,662 \left(\frac{a}{W} \right)^3.$$

Беручи до уваги, що $\sigma_{app} = \frac{P}{tW}$, одержимо вираз з урахуванням (11) для КІН біметалевого зразка з бічною тріщиною:

$$K_{bi} = \frac{\sigma_{app} \sqrt{W}}{\left[\left(1 - \frac{E_2}{E_1} \right) \sqrt{\left(\frac{W_1}{W} \right)^2 - \left(\frac{a}{W} \right)^2} + \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{a}{W} \right)^2} \right]} F_1 \left(\frac{a}{W} \right). \quad (12)$$

Отримана формула враховує модулі пружності шарів біметалевого зразка з бічною тріщиною.

Застосування методу пружної піддатливості для визначення КІН біметалевого зразка

Для перевірки достовірності формули (12) було використано відомий [9–13] метод пружної піддатливості.

Біметалевий зразок ($W = 25$ мм, $t = 5$ мм, $L = 100$ мм) з тріщиною навантажували одновісним розтягом. Довжина зразка 200 мм, лінія розділу співпадала із поздовжньою віссю симетрії (рис. 1). Визначали КІН зразка з тріщиною при відносній довжині тріщини $(0,2 \dots 0,5) \bar{a}$, тут $\bar{a} = a/W$ – відносна довжина тріщини. На двокоординатному самописці записували діаграму зусилля P – переміщення вздовж лінії дії сили δ_p , для різних довжин тріщини, із подальшою побудовою залежності між піддатливістю зразка і відносною довжиною тріщини у безрозмірних координатах.

Для визначення КІН через піддатливість зразка використовували відому формулу [8–10]:

$$K_I = P \left(\frac{E}{2t} \cdot \frac{d\lambda_0}{da} \right)^{\frac{1}{2}}, \tag{13}$$

$\lambda_0 = \delta_p / P$ – піддатливість зразка.

Після здійснення найпростіших перетворень формулу (10) можна записати у вигляді:

$$K_I = \frac{P}{W\sqrt{2t}} \left(EW \frac{d\lambda_0}{d\bar{a}} \right)^{\frac{1}{2}}. \tag{14}$$

Для надійної фіксації зразка використовували жорсткі захоплювачі, які запобігали провертання половинок зразка під час навантаження. Відстань L між захоплювачами – 100 мм.

Експеримент проводили з використанням модернізованої електромеханічної випробувальної машини $FP 100$ з найбільшим зусиллям 100 кН, із записом даних на ПК, що дозволило здійснювати неперервне отримання та накопичення даних з частотою дискретизації 0,1 с. Основна програма пакета дозволяє в режимі реального часу вивести результати експерименту у графічному вигляді (режим осцилографа), а також у вигляді протоколу [12].

Дані, отримані методом пружної піддатливості, наведені у табл. 2:

Таблиця 2

Результати вимірювання піддатливості біметалевого зразка з бічною тріщиною

a/W	$\lambda, \text{м/Н}$	$EW\lambda$
0,17	4,31E-09	19,50
0,1874	4,42E-09	20,02
0,300	4,97E-09	22,50
0,3143	4,82E-09	21,81
0,3183	5,91E-09	26,76
0,3500	5,79E-09	26,20
0,4000	7,070E-09	32,00
0,4188	7,14E-09	32,32
0,4568	8,82E-09	39,93
0,4684	9,52E-09	43,10

а також на рис. 2:

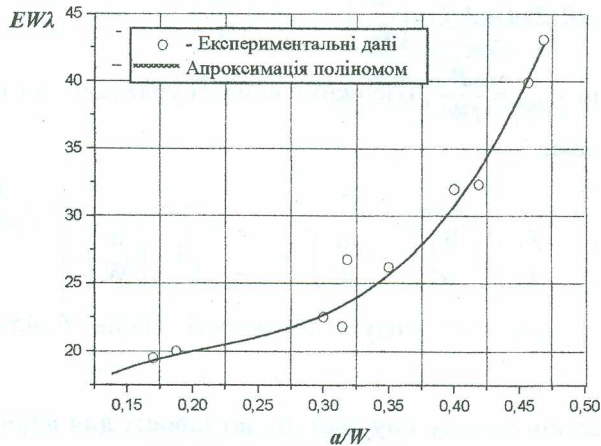


Рис. 2. Тарувальна крива для біметалевого зразка із бічною тріщиною ($L/W = 4$)

На рис. 2 також наведена крива, яка є апроксимацією результатів поліномом за методом найменших квадратів

Прийнявши, що $EW \frac{d\lambda_0}{da} = F_2\left(\frac{a}{W}\right)$, отримаємо формулу для визначення КІН біметалевого зразка з бічною тріщиною методом піддатливості:

$$K = \frac{P}{W\sqrt{2t}} F_2\left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{15}$$

для $L/W = 4$, апроксимація поліномом має наступний вираз:

$$F_2\left(\frac{a}{W}\right) = 4,008 + 180,76\left(\frac{a}{W}\right) - 709,21\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 1065,90\left(\frac{a}{W}\right)^3.$$

Многочлен $F_2(a/W)$ отриманий на основі обробки результатів методом пружної піддатливості із використанням програми Microcal Origin.

Результати досліджень та їх обговорення

На рис. 3 наведено безрозмірні залежності КІН плоского біметалевого зразка з бічною тріщиною від довжини тріщини, у першому шарі отримані: за методом пружної піддатливості, ф-ли (15), з урахуванням пружних властивостей шарів, ф-ли (10), (12) та без урахування, ф-ла (11).

Для випадку поширення тріщини зі сталі 15X13MФ_л у 25X1M1Ф_л (рис. 3,а), всі криві мають подібну форму, причому криві отримані за формулою (11), та методом урахування неоднорідності зразка, ф-ла (12) співпадають на ділянці $\bar{a} = 0,2-0,4$, метод піддатливості на ділянці до $\bar{a} \leq 0,3$ дає значення КІН більші, ніж наведені вище методи. Із зростанням довжини тріщини відмінність між величинами КІН, отриманих різними методами, зменшується.

Коли тріщина поширювалась з 25X1M1Ф_л у 15X13MФ_л, видно, що із зростанням довжини тріщини розбіжність результатів, отриманих за формулою (11), та методом урахування неоднорідності зразка, ф-ла (12) зростають, причому величина похибки для $\bar{a} = 0,5$ складає 25 %.

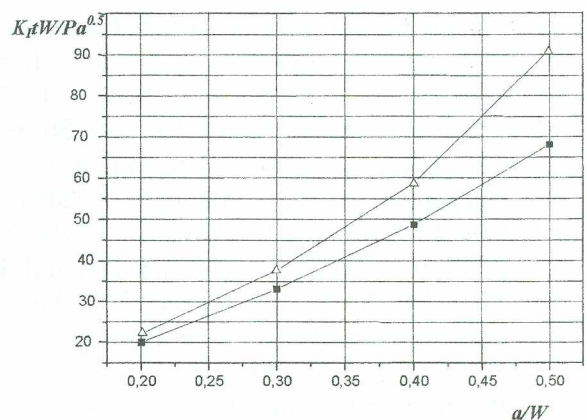
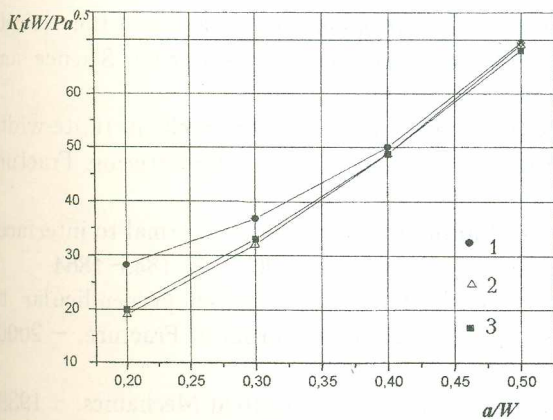


Рис. 3. Залежність $\frac{K_I t W}{P\sqrt{a}}$ біметалевого зразка з бічною тріщиною від довжини

тріщини \bar{a} в першому шарі: а – сталь 15X13MФ_л; б – сталь 25X1M1Ф_л;

1 – метод пружної піддатливості, ф-ла (15); 2 – обчислення з урахуванням неоднорідності, ф-ла (12); 3 – розрахунок без урахування неоднорідності, ф-ла (11)

В табл. 3 представлені значення КІН $K_I t W / Pa^{0.5}$, одержані методом пружної піддатливості та аналітичним методом, з урахування неоднорідності зразка, та відносна похибка.

Порівняльна характеристика КІН для біметалевого зразка, отриманих різними методами

Довжина тріщини		$K_{tW}/Pa^{0.5}$		Відносна похибка $\delta, \%$
Абсолютна, мм	Відносна	Методурахування неоднорідності зразка	Метод піддатливості	
5	0,2	18,8	28,28	50
6,25	0,25	24,88	32,26	29
7,5	0,3	31,71	36,80	16
8,75	0,35	39,41	43,2	9,7
10	0,4	48,11	50	3,9
11,25	0,45	57,88	59,57	2,9
12,5	0,5	67,72	69,49	2,6

*Відмінності значень КІН, отримані на першій ділянці, можуть бути викликані неточностями методу піддатливості для коротких тріщин, оскільки, як відомо [9], із зростанням довжини тріщини точність даного методу зростає.

Висновки

Визначено КІН при одновісному розтязі біметалевого зразка з тріщиною в першому шарі з урахуванням модулів пружності складових матеріалів. Значення КІН, отримані методом піддатливості та з урахуванням неоднорідності пружних властивостей, задовільно узгоджуються при відносній довжині тріщини $\bar{a} \geq 0,3$.

Робота виконана за рахунок бюджетних коштів Державного фонду фундаментальних досліджень, номер державної реєстрації (0101U006829).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Pippan R., Flechsig K., Riemelmoser F. Fatigue crack propagation behavior in the vicinity of an interface between material with different yield stresses // Materials Science Engineering. – 2000. – Vol. A283. – P. 225–233.
2. Barsoum I., K. S. Ravi Chandran Stress intensity factor solutions for cracks in finite-width three layer laminates with and without residual stress effects // Engineering Fracture Mechanics. – 2003. – Vol. 70. – P. 2015–2031.
3. Kim A. S., Besson J., Pineau A. Global and local approaches to fracture normal to interfaces // International Journal of Solids and Structures. – 1999. – Vol. 36. – P. 1845–1864.
4. Riemelmoser F. R., Pippan R. The J - integral at Dugdale cracks perpendicular to interfaces of materials with dissimilar stresses // International Journal of Fracture. – 2003. – Vol. 103. – P. 397–418.
5. Wastergaard H. M. Bearing pressure and cracks // Journal of Applied Mechanics. – 1967. – Vol. 6. – P. 49–53.
6. Gomez X., Echeberria J. Microstructure and mechanical properties of carbon steel A21 superalloy Sanicro 28 bimetallic tubes // Materials Science and Engineering. – 2000. – Vol. A348. – P. 180 – 191.
7. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах. Т.1: Перевод с англ./Под. ред. Мураками Ю. М. – М.: Мир, 1990. – 448.
8. Gross B. Mode I analysis of a face cracked plate subjected to rotationally constrained displacements // International Journal of Fracture. – 1978. – Vol.16. № 6. – P. 623–631.
9. Механика разрушения и прочность материалов. Т. 4 Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / Под. ред. В.В. Панасюка – Наукова думка, 1990. – 680 с.

10. Трощенко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении – Киев.: Наук думка, 1987. – 256 с.
11. Трощенко В.Т., Покровский В.В., Прокопенко А.В. К вопросу об определении вязкости разрушения по результатам на усталость при круговом изгибе // Проблемы прочности. – 1977. – № 1. – С. 3–10.
12. Ясний П.В., Марущак П.О. Автоматизований електромеханічний стенд для випробувань матеріалів в умовах втоми та втоми-повзучості // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2003. – № 3.– Т. 8. – С. 5–11.
13. Гвоздюк М. М. Застосування методу пружної податливості під час визначення КІН для елементів будівельних конструкцій з поверхневими дефектами // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Збірник наукових праць. – Випуск 5.– Львів: Каменярь, 2002. – С. 223–226.

ЯСНИЙ Петро Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства, проректор з наукової роботи Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування,

Тел. 8(0352)25-36-74

e-mail: Yasniy@tu.edu.te.ua

МАРУЩАК Павло Орестович – молодший науковий співробітник кафедри матеріалознавства Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування.

Тел. 8(0352)25-35-09

e-mail: Maruschak@tu.edu.te.ua

Подано 25.06.04