

**М. Підгурський, докт. техн. наук**

*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **КРИТЕРІЇ РОЗВИТКУ ФОРМИ ВТОМНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ТРІЩИН У ЗВАРНИХ ВУЗЛАХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ**

*Встановлено критерії розвитку форми втомних поверхневих тріщин, які поширюються в зонах зварних з'єднань. Критерії базуються на умові постійності КІН по контуру тріщини. Розглянуто особливості розповсюдження поверхневих тріщин в однорідних і неоднорідних полях напружень.*

**M. Pidhurskyu**

## **THE CRITERIA OF DEVELOPMENT OF FORM OF FATIGUE SURFACE CRACKS IN THE WELDED JOINED**

*The criteria of development of form of fatigue surface cracks, which distribute in the areas of the welded connections, are set. Criteria are based on the condition of constancy SIF on the contour of crack. The estimation of features of distribution of surface cracks is conducted in the homogeneous and heterogeneous fields of stresses.*

### **Умовні позначення**

$K_I$  – коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа $\sqrt{м}$ ;

$a/c$  – відношення півосей поверхневої напівеліптичної тріщини;

$\frac{da}{dN}$ ,  $\frac{dc}{dN}$  – швидкість росту контура тріщини в характерних точках, м/цикл.

Проблема надійності зварних з'єднань, зокрема при дії циклічних навантажень, є однією з найбільш актуальних [1, 2]. На сьогодні основні критеріальні залежності в умовах статичного і циклічного навантажень розроблені стосовно до тріщин з прямолінійним фронтом [3]. Проте найбільш типовим і небезпечним експлуатаційним дефектом типу тріщини у зварних елементах конструкцій є нескрізні тріщини зі складним у плані контуром. Для таких тріщин значну складність викликає як визначення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН), так і встановлення конфігурації її контура, як початкового, так і біжучого, особливо в реальних умовах експлуатації, оскільки більшість методів неруйнівного контролю, що застосовуються сьогодні, зорієнтовані на оцінку площі дефектів, і не дають достатньо інформації про їх конфігурацію [1, 3].

Складність полягає також у тому, що в процесі навантаження матеріалу з нескрізним дефектом типу тріщини останній може певним чином змінитися, перш ніж буде досягнуто його критичне значення. При цьому рухомий контур є геометрично нестійким, і сьогодні невідомі рішення задач для найзагальнішого випадку. Відсутність рішень пов'язана зі значними математичними труднощами при складанні і розв'язанні систем диференціальних рівнянь.

Найбільш загальними критеріями, що визначають напрямок росту тріщини, є критерій максимальних розтягуючих напружень [4], критерій максимуму потоку енергії [5], критерій мінімуму густини енергії [6], критерій максимальної швидкості розвитку втомної тріщини [7], критерій максимальних нормальних напружень [8]. Вказані критерії розроблені для розв'язання задач з наскрізними однопараметричними тріщинами, фронт яких є прямолінійним.

У [9] описано підхід до прогнозування зміни форми контура нескрізної тріщини, що розвивається. Цей підхід враховує зміну величини КІН по фронту тріщини. Підхід [9] базується на передумові, що в процесі розвитку втомна тріщина намагається набути найбільш вигідної форми, яка відповідає умові постійності КІН по всьому контуру. На

основі цієї передумови запропоновано залежність для прогнозування зміни форми напівеліптичної довільної тріщини, що розвивається в однорідному полі напружень при рівномірному розтягу:

$$\frac{da}{dc_1} = \left( \frac{c_1}{a} \right)^{\frac{n}{2}}, \quad (1)$$

де  $a$  – глибина тріщини, м;

$c_1=2c$  – довжина тріщини на поверхні, м;

$n$  – показник степеня в залежності Періса.

Проте, застосовуючи формулу (1), неможливо оцінити зміну форми тріщини із енергетично нестабільним контуром.

Досить мало також даних про зміну форми поверхневих тріщин, що розвиваються в зонах зварних з'єднань, та критерії, які описують цю кінетику. Так, особливістю втомних пошкоджень зварних з'єднань є суттєве сповільнення темпу розвитку нескрізної тріщини в глибину матеріалу при виході її вершини із зони концентрації напружень [9].

Особливо ускладнюється оцінка форми нескрізної тріщини при стохастичній природі зародження і об'єднання невеликих тріщин в одну, магістральну, що є характерним для зварних з'єднань. Похибки при встановленні конфігурації контура суттєвим чином впливають на точність визначення КІН для тріщин з викривленим фронтом.

У зв'язку з цим проаналізуємо результати експериментальних досліджень зміни форми фронту поверхневої тріщини для випадків її розвитку у гладких зразках (однорідному полі напружень) – випадок *I*; в зонах зварних з'єднань (неоднорідне поле напружень) – випадки *II*, *III*. У випадках *I* і *II* поверхневі тріщини ініціювались від штучного надрізу глибиною 2-3 мм, виконаного дисковою фрезою діаметром 27 мм і товщиною 0,13 мм при циклічному навантаженні розтягом, що викликає у перетинах зразків напруження  $\sigma_n = (0.45 - 0.5)\sigma_T$ . Коефіцієнт асиметрії циклу навантажень  $R=0,25 \dots 0,3$ . У випадку *III* поверхневі тріщини зароджувались природним шляхом у зоні сплавлення шва з основним металом при циклічному навантаженні напівнатурних модельних зразків. У всіх випадках зразки виготовлені зі сталі 09Г2С товщиною 20 мм. Зварні з'єднання виконувались вручну, електродами УОНИ - 13/55.

При дослідженні зміни форми поверхневої тріщини з числом циклів навантаження  $N$  необхідно отримати значення швидкостей росту тріщини  $\frac{dX_{er}}{dN}$  у кожній точці її контура (рис. 1) або ж, згідно з концепцією набуття контуром енергетично стабільної форми, – оцінити значення КІН для точок контура тріщини. Взаємозв'язок між енергетичними і силовими характеристиками встановлюється критерієм Ірвіна [5].

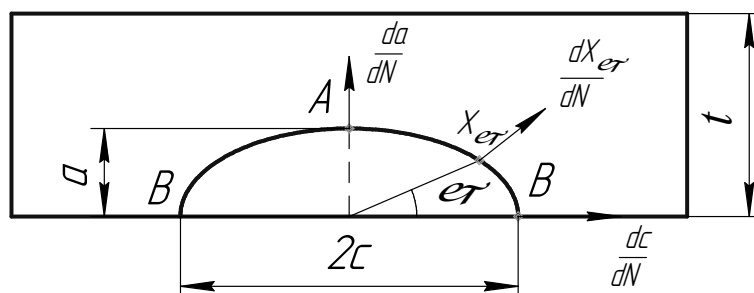


Рисунок 1 – Поверхнева напівеліптична тріщина у пластині

Для обчислення КІН  $K_I$  рекомендується використовувати вираз [10]:

$$K_I = \frac{\sigma_n \sqrt{\pi a}}{E(k)} \cdot F_S \left( \frac{a}{c}; \frac{a}{t}; \frac{c}{w}; \varphi \right), \quad (2)$$

де  $\sigma_n$  – номінальні напруження, МПа;

$F_S \left( \frac{a}{c}; \frac{a}{t}; \frac{c}{w}; \varphi \right)$  – поправкова функція, що враховує вплив вільних поверхонь;

$E(k)$  – еліптичний інтеграл другого роду.

Проведемо аналіз досліджуваних випадків.

**Випадок I.** На рис. 2 представлено злами зразків (поперечний перетин  $80 \times 20$  мм), що демонструють форму, яку набувають поверхневі тріщини, що розвиваються в однорідному полі напружень при пульсуючому навантаженні. Кінетику форми досліджували за допомогою фарбувальної рідини.

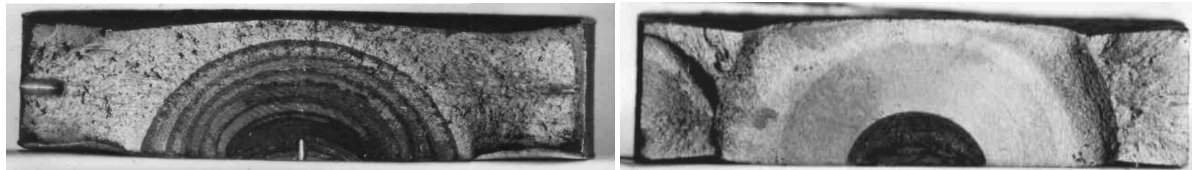


Рисунок 2 – Кінетика форми поверхневої тріщини, що розвивається в зразках з однорідним полем напружень при пульсуючому навантаженні

У результаті досліджень зміни форми поверхневої тріщини встановлено, що тріщина, ініційована від дискового надрізу, поширюється спочатку в глибину зразка (у напрямку півосі  $a$ ). Подальший ріст поверхневої тріщини відбувається у напрямку двох півосей  $a$  і  $c$ .

Для аналізу зміни форми поверхневої тріщини, що розвивається в зоні однорідного поля напружень, достатньо оцінити значення КІН на кінцях малої  $a$  і великої  $c$  півосей півеліпса за залежностями:

$$K_{1,A} = \sigma_n \cdot \sqrt{\pi a} \frac{M}{\Phi}; \quad K_{1,B} = \sigma_n \cdot \sqrt{\pi a} \frac{M}{\Phi} \cdot S, \quad (3)$$

де  $M$ ,  $\Phi$ ,  $S$  – функції параметрів  $a$ ,  $c$ ,  $t$ .

Результати розрахунків наведено у таблиці 1.

Аналіз результатів свідчить, що КІН, визначені на кінцях півосей поверхневої тріщини на початковому етапі ( $a/t = 0,146 \dots 0,183$ ) суттєво відрізняються (значення КІН у т. А в 1,52...1,42 рази більше, ніж у т. В). При такому розподілі КІН тріщина поширюється в глибину зразка. При подальшому розвитку тріщини ( $a/t = 0,34 \dots 0,38$ ) (табл. 1) спостерігається стабілізація КІН по її фронту. У цьому випадку тріщина поширюється як у глибину, так і по поверхні зразків. Форма тріщини набуває енергетично стабільної форми.

**Випадок II.** Поверхнева тріщина розповсюджується у тавровому зварному з'єднанні при пульсуючому навантаженні від ініційованого біля кромки шва дискового надрізу (рис.3).

Тріщина розвивається в неоднорідному полі напружень, розподіл яких на поверхні елемента та їх зміна по товщині зразка схематично представлені на рис. 4. Загальні розрахункові напруження визначаються конструктивною формою елемента, залишковими зварними напруженнями, дефектами в зоні зварного шва. Максимальні напруження концентруються в зоні сплавлення шва з основним металом, де й ініціюються тріщини при експлуатації конструкцій.



Рисунок 3 – Кінетика форми поверхневої напівеліптичної тріщини, що розвивається в неоднорідному полі напружень при пульсуючому навантаженні

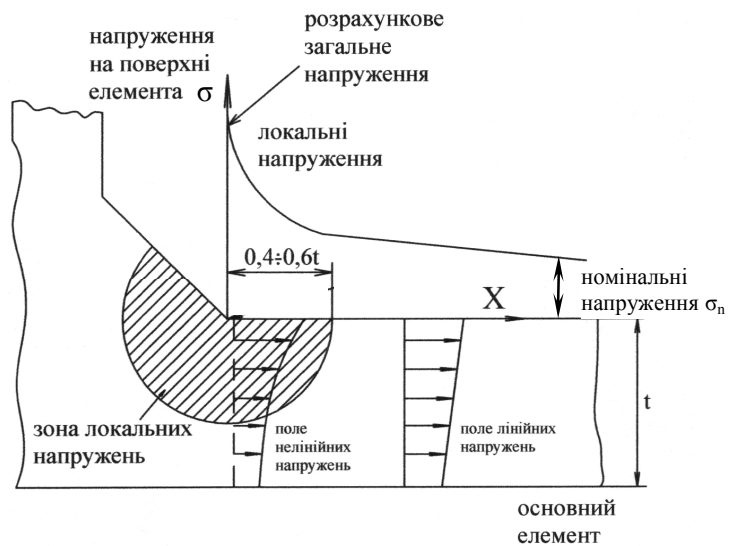


Рисунок 4 – Схематизація локальних напружень в зоні зварного шва

Таблиця 1 – Порівняння значень КІН на контурі поверхневих тріщин

Тип зразка		$\sigma_n$ , МПа	$R_\sigma$	a/t	a/c	$K_{I,A}$ , МПа $\sqrt{m}$	$K_{I,B}$ , МПа $\sqrt{m}$	$\frac{K_{I,A}}{K_{I,B}}$	
<b>Зразок №1</b>									
I. Тріщина в однорідному полі напружень ( $\alpha_\sigma=1,0$ )		180,0	0,25	0,183	0,40	18,71	13,14	1,42	
		-//-	-//-	0,34	0,69	21,94	20,90	1,05	
		-//-	-//-	0,46	0,8	25,39	26,73	0,95	
		-//-	-//-	0,57	0,79	27,36	29,74	0,92	
		-//-	-//-	0,72	0,76	32,92	36,57	0,90	
		-//-	-//-	0,80	0,72	41,25	46,35	0,89	
<b>Зразок №2</b>									
II. Тріщина в неоднорідному полі напружень (таврове з'єднання, $\alpha_\sigma=2,0$ )		187,5	0,25	0,145	0,34	17,02	11,18	1,52	
		-//-	-//-	0,38	0,76	22,25	22,01	1,01	
		-//-	-//-	0,45	0,75	26,50	27,14	0,98	
		-//-	-//-	0,73	0,87	30,83	36,27	0,85	
		-//-	-//-	0,82	0,85	35,64	41,05	0,87	
		-//-	-//-	0,294	0,5	24,12	35,30	0,68	
III. Тріщина в неоднорідному полі напружень (зразки з привареною накладкою, $\alpha_\sigma=1,9$ )		168	0,3	0,125	0,32	18,90	18,56	1,02	
		-//-	-//-	0,294	0,5	24,12	35,30	0,68	
		т. X $_{\phi}$ ( $\phi=5^\circ$ )	-//-	-//-	$K_{I,X\phi} = 26,02 \text{ МПа}\sqrt{m}$ ; $K_{I,A}/K_{I,X\phi} = 0,93$				
		т. А, т.В	-//-	-//-	0,42	0,59	28,78	46,01	0,62
		т. X $_{\phi}$ ( $\phi=10^\circ$ )	-//-	-//-	$K_{I,X\phi} = 29,09 \text{ МПа}\sqrt{m}$ ; $K_{I,A}/K_{I,X\phi} = 0,99$				
		т. А, т.В	-//-	-//-	0,59	0,62	33,40	61,01	0,55
III. Тріщина в неоднорідному полі напружень (зразки з привареною накладкою, $\alpha_\sigma=1,9$ )		т. X $_{\phi}$ ( $\phi=7,5^\circ$ )	-//-	-//-	$K_{I,X\phi} = 34,98 \text{ МПа}\sqrt{m}$ ; $K_{I,A}/K_{I,X\phi} = 0,95$				
		т. А, т. В	168	0,25	0,05	0,70	11,80	14,32	0,82
			-//-	-//-	0,1	0,60	14,77	20,53	0,72
			-//-	-//-	0,2	0,47	16,55	25,49	0,65
т. X $_{\phi}$ ( $\phi=7^\circ$ )	-//-	-//-	$K_{I,X\phi} = 19,02 \text{ МПа}\sqrt{m}$ ; $K_{I,A}/K_{I,X\phi} = 0,92$						

Розподіл локальних напружень в зоні зварного вузла (рис. 4) суттєво ускладнює задачу з визначення КІН по фронту поверхневої тріщини. Вплив конструктивної концентрації напружень в зоні зварного шва, їх розподіл по товщині елемента, вплив залишкових зварних напружень на оцінку КІН визначається модифікованими залежностями Ньюмена-Райю:

$$K_{1,A} = \sigma_n \cdot \sqrt{\pi a} \frac{M}{\Phi} Y_I + \alpha \cdot K_{r,A}; \quad (4)$$

$$K_{1,B} = \sigma_n \cdot \sqrt{\pi a} \frac{MS}{\Phi} Y_I + \alpha \cdot K_{r,B}, \quad (5)$$

де  $Y_I$  - визначається залежністю [11]:

$$Y_I = A \left( \frac{a}{t} \right)^K, \quad Y_I > 1. \quad (6)$$

Для точок тріщини, що лежать на поверхні зразка, коефіцієнт  $Y_I$  береться як константа для фіксованої глибини при  $a=0,15$  мм.

Для таврового X - з'єднання (рис. 3):

$$A = 0,7061 - 0,4091 \left( \frac{h}{t} \right) + 0,1596 \left( \frac{h}{t} \right)^2 + 0,3739 \left( \frac{w}{t} \right) - 0,1329 \left( \frac{w}{t} \right)^2; \quad (7)$$

$$K = -0,2434 - 0,3939 \left( \frac{h}{t} \right) + 0,1536 \left( \frac{h}{t} \right)^2 + 0,3004 \left( \frac{w}{t} \right) - 0,0995 \left( \frac{w}{t} \right)^2,$$

де  $h$ ,  $w$  – катети зварного шва;

$\alpha \cdot K_{r,A}$ ,  $\alpha \cdot K_{r,B}$  - КІН, що враховують вплив розтягуючих залишкових зварних напружень у найглибшій точці А і на поверхні елемента (т. В) [1, 12].

Аналіз кінетики поширення тріщини свідчить, що на початковому етапі розвитку поверхнева тріщина в зоні зварного з'єднання ініціюється і поширюється одночасно по всьому контуру, на відміну від такої ж тріщини, що розповсюджується в однорідному полі напружень однобічно (у глибину зразка). При цьому КІН у найглибшій точці і на поверхні зразка практично рівні (табл. 1).

При збільшенні розмірів тріщини значення КІН на поверхні зразка (т. В) суттєво зростають у порівнянні з точкою А (в 1,47...1,92 рази), що, згідно з концепцією енергетичної стабільності контура тріщини, мало б супроводжувати переважаючий ріст тріщини в напрямку великої осі півеліпса. Проте тріщина продовжує розвиватись як на поверхні, так і в глибину зразка. Аналіз КІН, який змінюється по контуру тріщини в процесі циклічного навантаження, свідчить (табл.1), що форма тріщини є енергетично стабільною по всьому її контуру, за винятком приповерхневих зон ( $\varphi=0...10^\circ$ ), де спостерігається значний градієнт напружень (значення відрізняються майже вдвічі). Такий розподіл напружень в приповерхневій області приводить до зміни кінетики розвитку напівеліптичної тріщини в зоні зварного з'єднання (II) у порівнянні з розповсюдженням аналогічної тріщини (I) в однорідному полі напружень (рис. 5).

Отже, для випадків I, II, що характеризують розвиток поверхневої тріщини при її штучній ініціації, можна виокремити один етап розвитку – плавну зміну співвідношення півосей напівеліптичної поверхневої тріщини до значень  $a/c=0,7...0,85$  і  $a/t < 0,6$ . При збільшенні глибини півеліпса  $a/t > 0,6$  спостерігається деяке зменшення  $a/c$ , що пояснюєть

**Випадок III.** При природному зародженні тріщин в зоні сплавлення накладки з основним металом можна виокремити два етапи формування розвитку тріщини: перший ( $a/t = 0 \div 0,2$ ), при якому визначальним є вплив локальних напружень в зонах концентраторів, і другий ( $a/t > 0,2$ ), коли основним є вплив ефекту від злиття окремих тріщин в одну, магістральну.

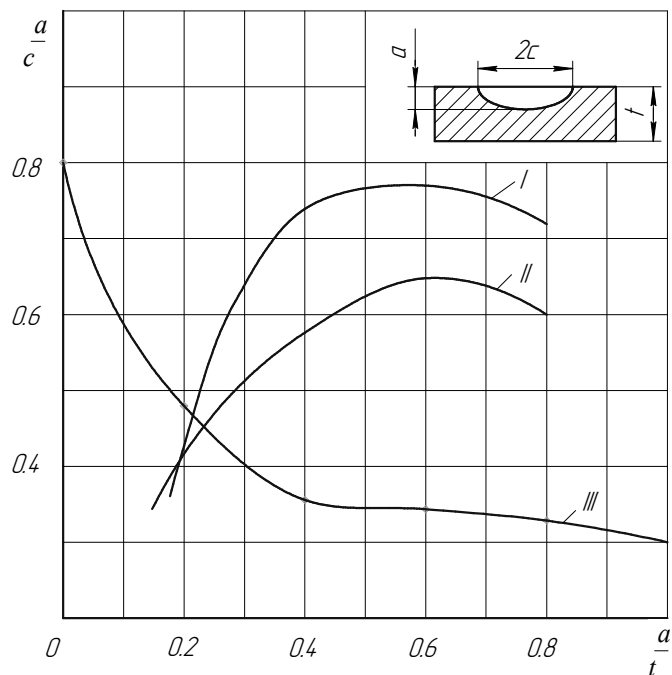


Рисунок 5 – Кінетика форми поверхневих втомних тріщин  
 I - однорідне поле напружень;  
 II – таврове з’єднання зі штучною ініціацією тріщини;  
 III – зварне з’єднання з природною ініціацією тріщини

Так, при циклічних випробуваннях напівнатурних зразків, що моделюють зварні вузли металоконструкцій, отримано злами (рис. 6), що вказують на багатоосередковий характер зародження невеликих поверхневих макротріщин (показано стрілками) у зоні сплавлення накладки з поверхнею зразка біля кромки зварного шва. Невеликі тріщини зв’язані з осередками їх зародження – дефектами різної природи, ймовірнісний характер розташування яких зумовлює випадковість локалізації, орієнтації, часу виникнення тріщин. Розвиваючись, тріщини зближуються, перетинки між ними руйнуються, залишаючи на зламах рубці і східці, а сідловидний фронт тріщини, що утворилася, випрямляється, і стабілізується. Надалі магістральна тріщина, розвиваючись при циклічному навантаженні, приводить до руйнування зразка.

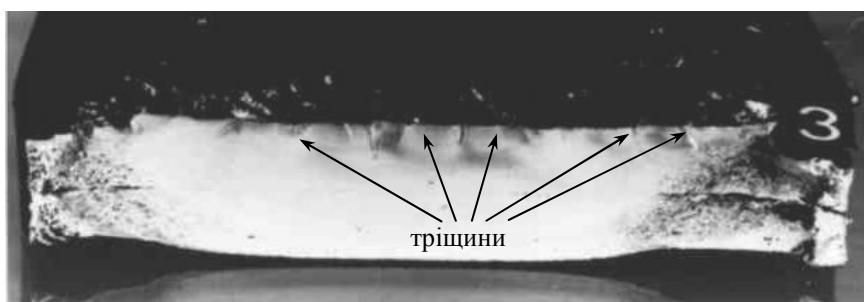


Рисунок 6 – Поверхня руйнування зразка з привареною накладкою, що демонструє багатоосередковий характер зародження поверхневих тріщин

Для малих поверхневих тріщин ( $a/t < 0,1$ ) співвідношення  $a/c = 0,7...0,8$  близьке до значень, отриманих для магістральної тріщини при її стабілізованому розвитку в однорідному полі напружень. Наближаючись до межі  $a/t \approx 0,2$  малі тріщини дещо сповільнюють свій ріст, у цей час підрастають інші малі тріщини, що зливаються з сусідніми, і співвідношення  $a/c$  різко падає (рис. 5). На другому етапі відбувається ріст магістральної тріщини, часом із злиттям з іншими великими тріщинами. На цьому етапі співвідношення  $a/c$  поступово підвищується, іноді – стрибкоподібно через злиття окремих тріщин.

Встановлено, що для випадку лінійного ініціатора руйнувань співвідношення параметрів  $a/c$  поверхневої тріщини (при  $a/t > 0,2$ ) в  $1,8 \div 4,2$  рази менше у порівнянні з тріщиною, що розвивається в однорідному полі напружень. Така суттєва відмінність в кінетиці тріщин пояснюється як особливостями напружено-деформованого стану в зонах концентраторів напружень (див. випадок II), так і стохастичністю зародження та об'єднання тріщин в зварному з'єднанні, причому останнє є визначальним.

На основі проведених вище експериментальних досліджень отримано апроксимаційну залежність для опису форми поверхневої напівеліптичної тріщини, що розповсюджується у зварному з'єднанні (III):

$$\frac{a}{c} = 0,813 - 2,51\left(\frac{a}{t}\right) + 4,428\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 2,54\left(\frac{a}{t}\right)^3. \quad (8)$$

Дана залежність є визначальною при оцінці КІН по фронту поверхневої напівеліптичної тріщини, що розвивається у зварному вузлі. Так, для з'єднання (рис. 6), що моделює приварені елементи, значення величин у формулі (6) визначаються залежностями [11]:

$$A = 0,8068 - 0,1554\left(\frac{h}{t}\right) + 0,0429\left(\frac{h}{t}\right)^2 + 0,0794\left(\frac{w}{t}\right); \quad (9)$$

$$K = -0,1993 - 0,1839\left(\frac{h}{t}\right) + 0,0495\left(\frac{h}{t}\right)^2 + 0,0815\left(\frac{w}{t}\right).$$

Аналіз значень КІН, обчислених для характерних точок контурів малих тріщин, що розповсюджуються у зварних з'єднаннях з привареними накладками, підтверджує висновок про набуття втомною тріщиною в процесі циклічного навантаження найбільш енергетично вигідної форми, яка відповідає умові постійності КІН по її контуру. Надалі малі тріщини зближуються і об'єднуються; сідловидний фронт нової тріщини, розвиваючись при циклічному навантаженні, випрямляється і стабілізується. Оцінка КІН для геометрично нестабільного контура суттєво ускладнюється взаємовпливом полів напружень тріщин, що об'єднуються. Це явище вимагає додаткових досліджень, особливо з врахуванням неоднорідності полів напружень у зонах зварних вузлів.

## Висновки

1. Встановлено критерії і відзначено особливості зародження та розповсюдження поверхневих тріщин у зварних з'єднаннях, що моделюють вузли металоконструкцій. Показано, що в процесі розвитку втомна тріщина намагається набути найбільш енергетично стабільної форми, що відповідає умові постійності КІН по всьому контуру. Критерій набуття енергетичної стабільності контура тріщини обґрунтовує підходи до розробки розрахункових моделей оцінки КІН для наскрізних двопараметричних тріщин, що розвиваються в тонкостінних профільних елементах в умовах згину, стисненого кручення.

2. Результати проведених досліджень дають можливість розробити підходи до побудови поправкових функцій для поверхневих тріщин зі складною геометрією на основі експериментальних даних, вважаючи, що швидкість росту будь-якої точки на контурі є однозначною функцією КІН.

## Література

1. Лобанов Л.М., Махненко В.И., Труфяков В.И. Сварные строительные конструкции Т.І. Основы проектирования. - К.: Наук. думка, 1994. - 416 с.
2. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. - К.: Наук. думка, 2006. - 620 с.
3. Панасюк В.В., Сушинский А.И., Кацов К.Б. Разрушение элементов конструкций с несквозными трещинами. - К.: Наук. думка, 1991. - 172 с.
4. Yoffe E.H. The moving Griffith crack // Phil. Mag. - 1951. - vol. 42. - № 330. - P. 730-750.
5. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. - М.: Наука, 1974. - 640 с.
6. Sih G.C. Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems // Int. J. Fracture. - 1974. - Vol. 10. - №3. - P. 305-320.

7. Панасюк В.В., Андрейків О.Є. Нові підходи до оцінки довговічності зварних з'єднань // Автоматическая сварка. – 2000. - № 9-10. - С. 92-96.
8. Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – Санкт-Петербург: Политехника, 1993. – 391 с.
9. Карзов Г.П., Леонов В.В., Тимофеев Б.Т. Сварные сосуды высокого давления. – Л.: Машиностроение, 1982. – 287 с.
10. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – Т. 1, Т. 2. – 1016 с.
11. Hobbacher A. Stress intensity factors of welded joints // Eng. Fract. Mechanics, 1993 – V.46-№2. - P. 173-182.
12. Підгурський М.І., Рибак Т.І. Циклічна тріщинозривність і руйнування елементів зварних конструкцій // Праці 4 Міжнар. симпозіуму з трибофатики (ISTF4)/ – Тернопіль: ТДТУ, 2002. – Т 1. – С. 290-295.

*Одержано 20.08.2008 р.*