

УДК 670.191.33

Підгурський І. М.

**ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ КОНЦЕНТРАТОРІВ НАПРУЖЕНЬ
НА ВЕЛИЧИНУ КОЕФІЦІЄНТІВ ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ
ВЗДОВЖ КОНТУРІВ МОДЕЛЬОВАНИХ ЕЛІПТИЧНИХ
ПОВЕРХНЕВИХ ТРІЩИН**

Багато елементів машин і споруд мають конструкційні і технологічні концентратори напружень, які в умовах експлуатації можуть накопичувати пошкодження. Одним з найрозповсюджуваних дефектів, що обмежують терміни безпечної роботи конструкцій, є поверхневі напівеліптичні тріщини. Особливо важливою ця проблема є для зварних конструкцій [1].

Для опису поведінки об'єктів, що мають поверхневі дефекти в зонах конструктивних концентраторів напружень необхідно враховувати сукупність таких факторів, як розподіл напружень по товщині елемента, форма дефекту та значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) по контуру поверхневого дефекту.

Відомо, що КІН дозволяє встановити взаємозв'язок між умовами навантаження матеріалу у вершині тріщини, а також з геометрією та напруженим станом тіла, що містить тріщину [2].

Досить мало даних про зміну форми поверхневих тріщин, що розвиваються в зонах концентраторів напружень, та критерії, що описують цю кінетику. Зокрема, особливістю втомних пошкоджень зварних з'єднань є суттєве сповільнення швидкості розповсюдження розвитку наскрізної тріщини в глибину матеріалу при виході її вершини із зони концентрації напружень [3].

Особливо ускладнюється оцінка форми некрізької тріщини при стохастичній природі зародження і об'єднання невеликих тріщин в одну, магістральну, що є характерним для зварних з'єднань. Так, при циклічних випробуваннях напівнатурних зразків, що моделюють зварні з'єднання конструкцій, отримано злами (рис. 1), 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.

Похибки при встановленні конфігурації контуру суттєвим чином впливають на точність визначення КІН для тріщин з викривленим контуром і, як наслідок, на оцінку довговічності елементів конструкцій на стадії розповсюдження тріщин [4, 5].

Метою роботи є оцінка КІН в зонах концентраторів напружень у результаті моделювання елементів конструкцій з поверхневими тріщинами методом скінчених елементів (МСЕ).

Дослідження проводилися за методикою [6]. Застосовували спеціалізований програмний пакет «ANSYS Workbench» [7]. Моделювали поверхневу півеліптичну тріщину у пластині скінчених розмірів під дією розтягуючих напружень в полі однорідних напружень (рис. 2, а) та зоні концентратора напружень (рис. 2, б).

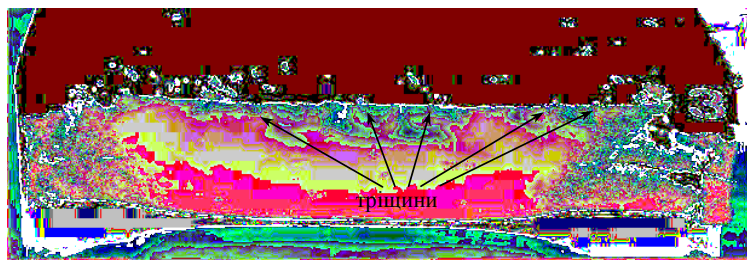


Рис. 1 Поверхня руйнування зразка в зоні зварного шва, що демонструє багатоосередковий характер зародження поверхневих тріщин

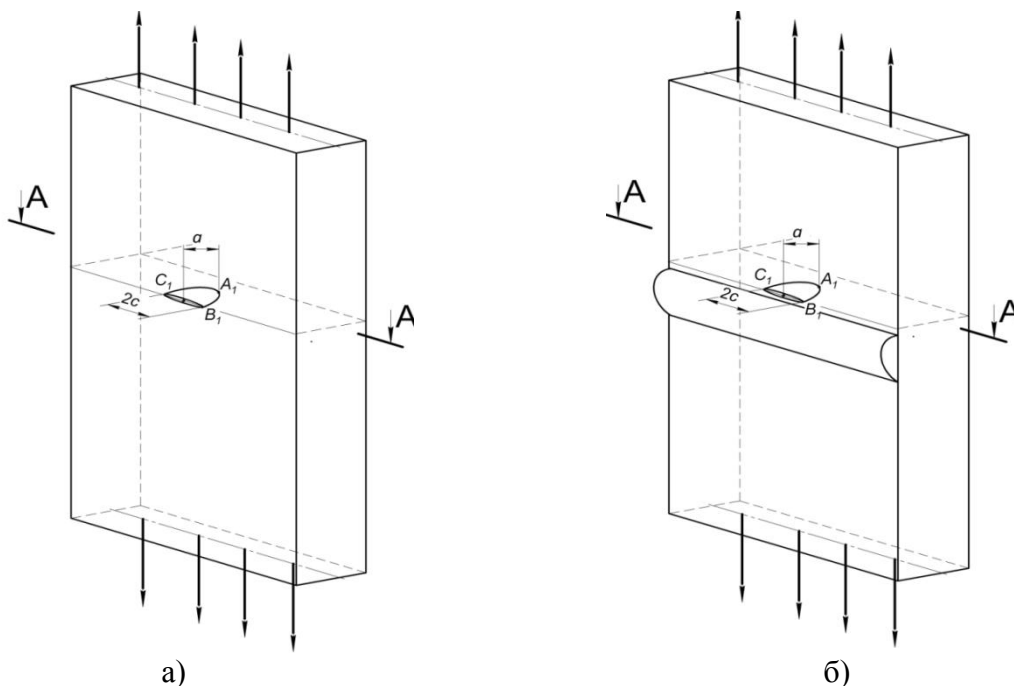


Рис. 2. Поверхнева півеліптична тріщина у пластині скінчених розмірів: а) в однорідному полі напружень; б) в зоні концентратора

Моделювали зразок товщиною $t=20$ мм та шириною 80 мм з низьколегової сталі 09Г2С з $\sigma_T=350$ МПа. Коефіцієнт Пуассона при пружному деформуванні $\nu=0,3$. Напруження розтягу складають 168 МПа. Валик представляє собою півциліндр радіусом 10 мм. Тріщина, що моделюється розташована на відстані 1,5 мм від основи концентратора.

Створено тривимірну модель зразка з глобальною сіткою елементів та модель області тріщини з локальною сіткою тетраедричних елементів. Розмір елементів глобальної сітки становить 2-3 мм, локальної 0,1 мм.

Скінчено-елементна модель півеліптичної тріщини в однорідному полі напружень представлена на рис. 3. Відзначимо, що моделюється одна з втомних тріщин, що представлена на рис. 1.

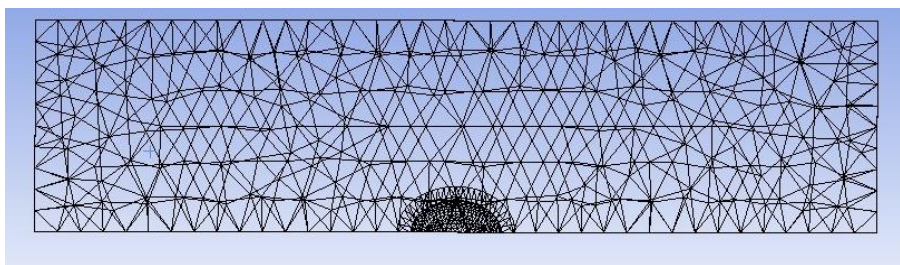


Рис. 3. Скінчено-елементна модель поверхневої півеліптичної тріщини в однорідному полі напружень

У результаті обчислення МСЕ отримано значення КІН вздовж контуру поверхневої тріщини. На рис. 4 представлено результати моделювання поверхневої тріщини з півдіагоналями $a=3$ мм; $c=4,3$ мм; $a/c=0,7$; $a/t=0,15$, що розташовані в однорідному полі напружень (рис. 4, а) та в зоні концентратора (рис. 4, б).

Порівнюючи результати оцінки КІН для характерних точок поверхневої півеліптичної тріщини, отриманими при моделюванні МСЕ (рис. 4, а, табл. 1) з даними, отриманими за залежностями Ньюмена-Раджу [8], варто зазначити, що для найглибшої точки розташованої на півдіагонали a , відносна похибка значення КІН становить 0,93%, а для точок, розташованих на поверхні відносна похибка значення КІН не перевищує 1,82%. Порівняння отриманих даних свідчить про побудову якісної скінчено-елементної моделі поверхневої тріщини.

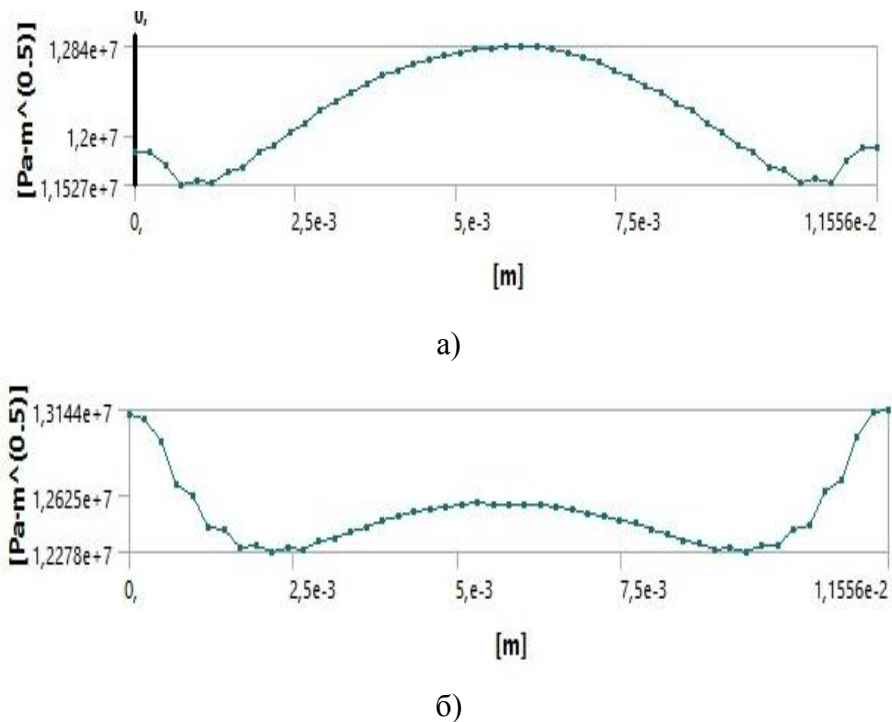


Рис. 4. Розрахунок КІН вздовж контуру поверхневої півеліптичної тріщини: $a=3$ мм; $c=4,3$ мм: а) в однорідному полі напружень; б) в зоні впливу концентратора

Результати обчислених КІН для найглибших точок $K_{1,A}$ поверхневих півеліптичних тріщин та точок на поверхні зразка ($K_{1,B}$ та $K_{1,C}$) в однорідному полі напружень та в зоні концентратора представлено в табл. 1.

Таблиця 1

КІН для характерних точок поверхневих півеліптичних тріщин в однорідному полі напружень та в зоні концентратора

	$\sigma_n/\sigma_{0,2}$	a, мм	c, мм	a/t	Для одинарної тріщини		Для подвійної тріщини		
					$K_{1,A}$	$K_{1,B}$	$K_{1,A}$	$K_{1,B}$	$K_{1,C}$
Тріщини в однорідному полі напружень	0,45 ($\sigma_n=168$ МПа)	3,0	4,30	0,15	12,84	11,84	13,07	12,31	11,99
Тріщини в зоні концентрації напружень	0,45 ($\sigma_n=168$ МПа)	3,0	4,30	0,15	12,57	13,14	12,91	13,82	13,36

Порівняння значень КІН для найглибшої точки поверхневої тріщини та точок на поверхні для ідентичних поверхневих тріщин, розташованих в зоні концентрації напружень (рис. 4, б) та в однорідному полі напружень (рис. 4, а) свідчать, що для найглибшої точки контуру значення КІН є меншими на 2,10% але на поверхні зразка значення КІН для тріщини в зоні концентратора напруження є суттєво вищим – на 11,1%. Такий розподіл КІН по контуру поверхневої тріщини свідчить [9], що ріст фронту поверхневої тріщини здійснюватиметься у напрямку поверхні, а не вглиб зразка, що підтверджується експериментальними даними [5]. Таким чином, при подальшому розповсюдженні поверхневої тріщини співвідношення півдіагоналей a/c зменшуватиметься.

Такий розвиток поверхневої тріщини від концентратора можна пояснити існуючим розподілом напружень по товщині елемента [1], максимальні значення яких спостерігаються в приповерхневій зоні (до $0,1-0,15t$).

Іншим важливим фактором, що впливає на розвиток поверхневих тріщин є взаємний вплив сусідніх тріщин на величину КІН та на їх форму. У зв'язку з цим проведено моделювання взаємодії двох тріщин, розташованих в однорідному полі напружень (рис. 5, а) та в зоні впливу концентратора (рис. 5, б).

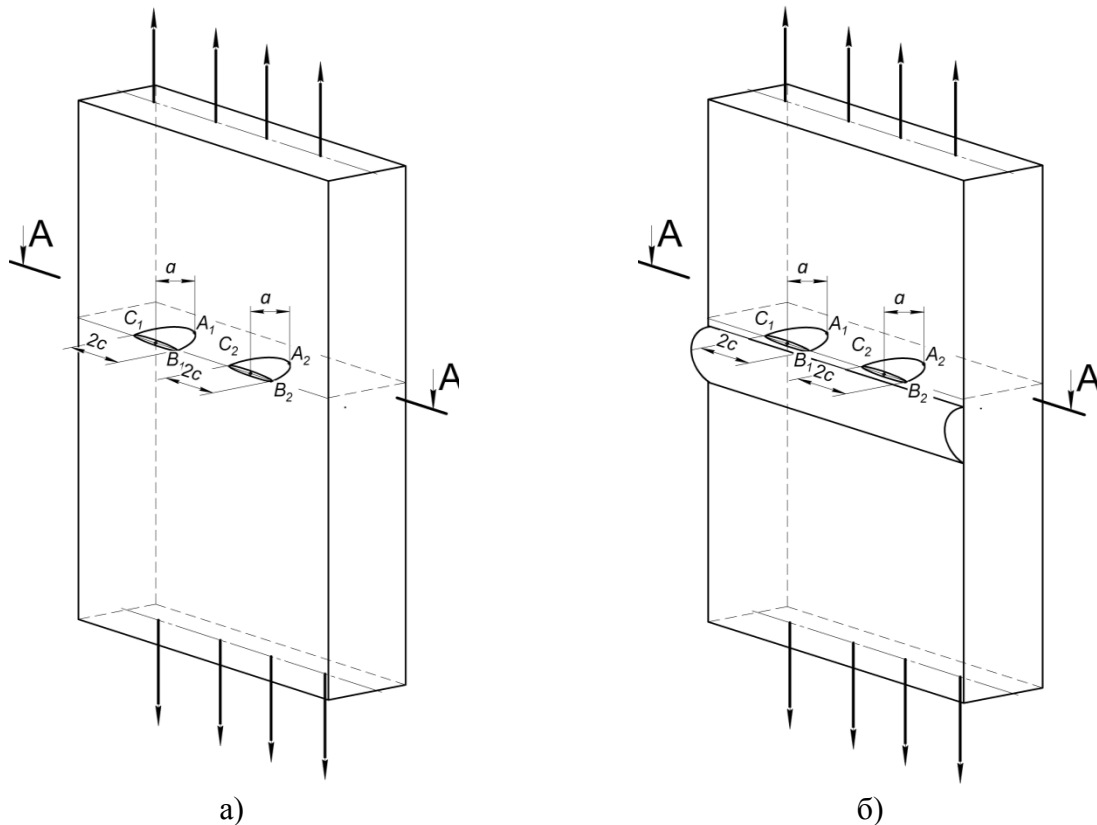


Рис. 5. Моделювання взаємодії двох поверхневих півеліптичних тріщин у пластині скінчених розмірів: а) в однорідному полі напружень; б) в зоні концентратора

Досліджувалися дві однакові поверхневі півеліптичні тріщини з розмірами $a=3\text{ мм}$; $c=4,3\text{ мм}$; $a/c=0,7$; $a/t=0,15$. Відстань між тріщинами $1,5\text{ мм}$. Прикладене максимальне напруження складало 168 МПа .

На рис. 6 представлено переріз пластини $80 \times 20\text{ мм}$, на якому зображено скінчено-елементну модель двох півеліптичних тріщин однакового розміру та розподіл значень КІН K_I вздовж фронту поверхневих тріщин, розташованих в однорідному полі напружень (рис. 7, а) та в зоні концентратора напружень (рис. 7, б) (представлено результати обчислень для однієї з двох взаємодіючих тріщин).

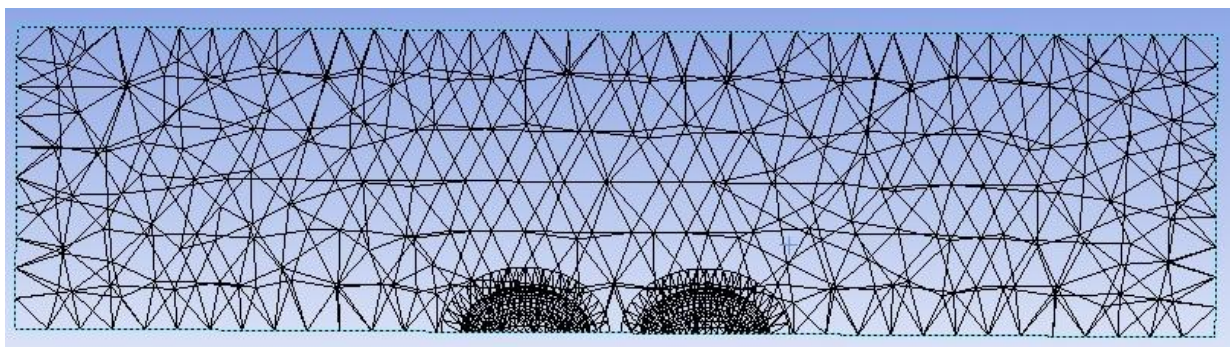


Рис. 6. Скінчено-елементна модель двох поверхневих півеліптичних тріщин в однорідному полі напружень

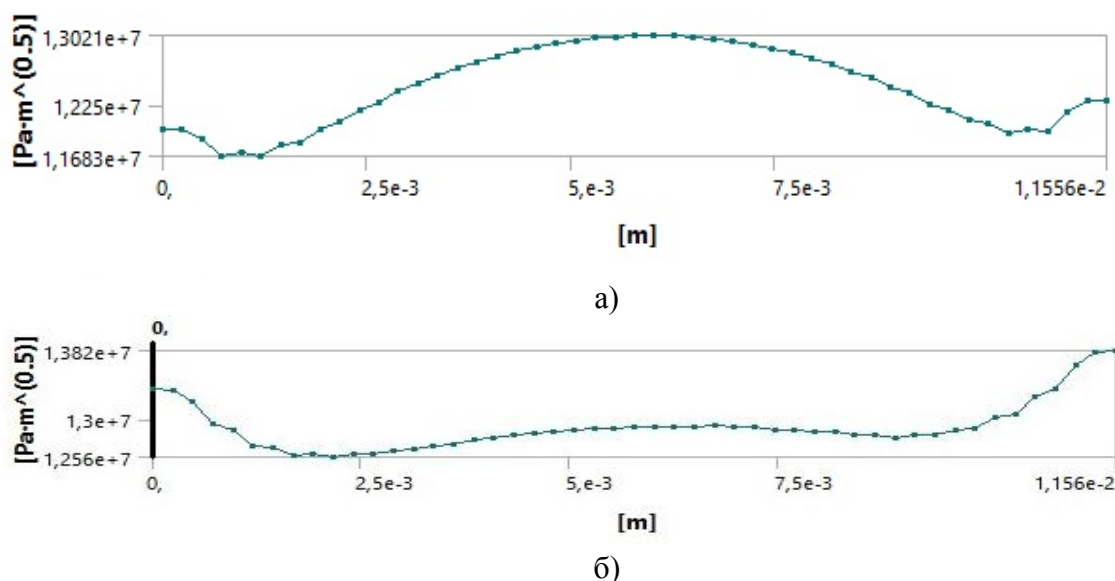


Рис. 7. Розподіл КІН вздовж контуру однієї з двох симетричних поверхневих півеліптичних тріщин при їх взаємодії: а) в однорідному полі напружень; б) в зоні концентратора

У роботах [6, 8] встановлено, що при відстанях між тріщинами, що є співрозмірними з розмірами взаємодіючих тріщин, спостерігається суттєве збільшення КІН для внутрішніх точок контуру тріщин.

ВИСНОВКИ

Максимальне збільшення КІН спостерігається для внутрішніх поверхневих точок контура взаємодіючих тріщин, що розташовані на відстані 1,5 мм одна від одної як в однорідному полі напружень, так і в зоні концентратора. Вплив концентратора напружень на КІН взаємодіючих тріщин є досить суттєвим (збільшення КІН для поверхневих точок контура сягає 11,4–12,3 %) та до 4% у результаті взаємодії тріщин. Збільшення КІН для внутрішніх поверхневих і приповерхневих тріщин пришвидшує процеси об'єднання тріщин, що суттєвим чином впливає на оцінку залишкового ресурсу.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – Киев: Наук. думка, 2006. – 618 с.
2. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие : в 4-х т. / Под общ. ред. Панасюка В. В. – Киев : Наук. думка. – т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / Саврук М. П. – 1988. – 620 с.
3. Карзов Г.П. Сварные сосуды высокого давления / Карзов Г.П., Леонов В.П., Тимофеев Б.Т. – Л. Машиностроение, 1982. – 287 с.
4. Fatigue strength of HSS steel butt-welded joints. Effects of microdefects and failure life predictions / Buirette C., Degallaix G., Claeys J., Menigault J. // Welding in the world, 1999. – Vol. 43. – №3. – P. 27–37.
5. Особенности расчета коэффициентов интенсивности напряжений для поверхностных трещин, развивающихся у сварных швов / Пидгурский Н. И., Барановский В. Н., Ляхов В. В., Пидгурский И. Н. // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: зб. наук. пр. – Краматорськ., 2012. – №3(28). – С. 211–215.
6. Дослідження КІН двох взаємодіючих поверхневих півеліптичних тріщин методом скінченних елементів / П. Ясній, І. Підгурський // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2014. – № 2. – С. 15–25.
7. Морозов Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 456 с.
8. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. В 2-х томах / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 1016 с.
9. Панасюк В. В. Разрушение элементов конструкций с несквозными трещинами / Панасюк В. В., Сушинский А. И., Кацов К. Б. – Киев : Наук. думка, 1991. – 172 с.