

УДК 621.326

Вячеслав Сидяченко, к.т.н., с.досл., Андрій Котляренко, к.т.н., с.досл.

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ НА ЗРАЗКАХ З РІЗНОЮ СКУТІСТЮ ДЕФОРМАЦІЙ НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРА РОЗКРИТТЯ ВЕРШИНИ ТРІЩИНИ

Анотація. Встановлено, що при двовісному згині хрестоподібного зразка з короткою тріщиною зменшується скутість деформацій у вершині тріщини порівняно з стандартними зразками на тріщиностійкість. Зміну скутості деформацій проаналізовано на основі параметра розкриття вершини тріщини.

Ключові слова: в'язкість руйнування, скутість деформацій, розкриття вершини тріщини.

Viacheslav Sidyachenko, Ph.D.; Andrii Kotliarenko, Ph.D.

STUDY OF STATIC FRACTURE TOUGHNESS ON SPECIMENS WITH DIFFERENT CONSTRAIN BASED ON THE CRACK TIP OPENING DISPLACEMENT PARAMETER

Abstract. It was established that during biaxial bending of a cruciform specimen with a short crack, the constrain of the crack tip decreases compared to standard fracture toughness specimen. The change in the constrain was analyzed based on the crack tip opening parameter.

Key words: fracture toughness, constrain, crack tip opening displacement.

Скутість деформацій, що характеризується здатністю елемента конструкції з тріщиною чинити опір пластичній деформації в околі її вершини, впливає на величину в'язкості руйнування матеріалів. Стандартні зразки з глибокою тріщиною на відцентровий розтяг C(T) і на триточковий згин SEN(B) мають високий ступінь тривісності напружень і відповідно рівень скутості деформацій в околі вершини тріщини, що забезпечує визначення нижньої огинаючої в'язкості руйнування. Для уточнення оцінки цілісності елемента конструкції з тріщиною необхідно розробити методологію розрахунку скутості деформацій у відповідності до геометрії зразка і типу навантаження. В даний час широко застосовуються параметри, що характеризують скутість деформацій у вершині тріщини на зразках при одновісному навантаженні, наприклад T -stress, A_2 , Q -stress, h , T_z [1]. Однак, двовісне навантаження, що діє на береги тріщини в ряді конструкційних елементів може спричинити зміну скутості деформацій, що може призвести як до надмірного консерватизму при розрахунках несучої здатності елемента конструкції з тріщиною так і навпаки.

Автори [2] запропонували параметр $\varphi = A_C / A_{Cref}$, де A_C – площа пластичної зони при руйнуванні, A_{Cref} – площа пластичної зони при руйнуванні референсного зразка, тобто зразка з максимальною скутістю деформацій. Проте застосування параметра φ для аналізу руйнування зразка при двовісному навантаженні не продемонструвало задовільного результату [1].

Один з найбільш цитованих в науковій літературі сучасних універсальних параметрів для характеристики скутості деформацій базується на розкритті вершини тріщини і визначається як відношення розкриття в зразку або елементі конструкції δ до розкриття в стандартному зразку (референсному) при плоскій деформації δ_{ref} при одному і тому рівні J -інтегралу, тобто при визначеній в'язкості руйнування при плоскій деформації (J_{ref}) [3, 4]. Для експериментальних даних, отриманих на матеріалах різних

класів, автори запропонували емпіричну кореляційну залежність для визначення в'язкості руйнування (J_c) в елементі конструкції за відомим значенням скутості деформацій A_d^* :

$$J_c = J_{ref} + 367.6[(A_d^* - 1) + 0.983]^{3.28} - 374.16, \quad (1)$$

де A_d^* визначається чисельно:

$$A_d^* = \delta_J / \delta_{Jref}.$$

Аналогічно на основі параметра A_d^* при узагальненні даних матеріалів різних класів пропонується визначити температуру T_0 :

$$T_0 = T_{0ref} - 170.3(A_d^* - 1), \quad (2)$$

де T_{0ref} – температура визначена за стандартом ASTM1921 на CT-1 зразках.

В даній роботі було здійснено верифікацію параметра A_d^* (1) для прогнозування в'язкості руйнування, що визначалась експериментально для сталі 15X2НМФАА на зразках з різною скутістю деформацій. В'язкість руйнування визначали на зразках: CT-1 (компактний стандартний зразок з довжиною тріщини $a/W=0,5$), SENT, з розміром поперечного перерізу 17×30 мм (зразок з крайовою тріщиною на розтяг, $a/W=0,5$), SENT 10×18 мм (зразок з крайовою тріщиною на розтяг, $a/W=0,5$), SENB 10×18 мм (зразок з крайовою тріщиною на триточковий згин, $a/W=0,133$) і CRSEN (хрестоподібний зразок на п'ятиточковий згин, $a/W=0,1$).

Експериментальні дані по в'язкості руйнування для CRSEN, SENB (10×18 мм, $a/W=0,133$), а також температурна залежність в'язкості руйнування для тріщин нормального відриву (Майстер крива) сталі 15X2НМФАА було запозичено з роботи [5] (рис.1). Оскільки CRSEN – хрестоподібний зразок на двовісний згин не є стандартним, на рис. 2 показано схему його навантаження при визначенні в'язкості руйнування.

Для побудови залежності розкриття вершини тріщини δ від J – інтегралу виконували для кожного з вищенаведених зразків скінчено-елементне моделювання в пружно-пластичній геометрично нелінійній постановці. На рис.3 (а-в) показано скінчено-елементні моделі зразків. Розмір скінчених елементів в околі вершини тріщини для всіх зразків був приблизно однаковий і за рекомендаціями роботи [3] становив $0,001$ мм. За методикою, викладеною в [3,4], обчислювали розкриття вершини тріщини δ_J , як відстань між точкою перетину прямої, проведеної з вершини тріщини з берегом тріщини, до горизонталі, як показано на рис. 4.

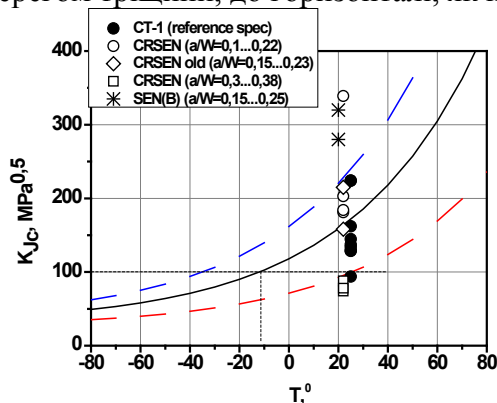


Рис.1. Майстер крива для сталі 15X2НМФА-А, побудована на CT-1 зразках, в'язкість руйнування на триточковий згин (SENB) і при двовісному згині (CRSEN) перераховані за стандартом ASTM E 1921–17a на CT-1 зразки.

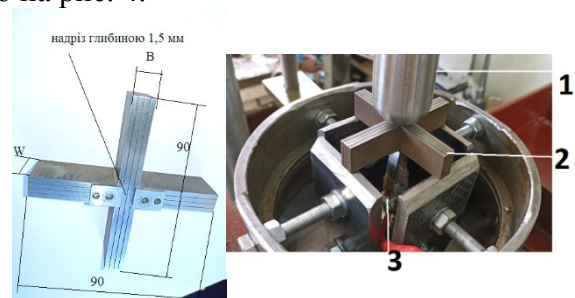


Рис.2. Схема навантаження малогабаритного хрестоподібного зразка на п'ятиточковий згин при статичних випробуваннях на в'язкість руйнування: 1 – навантажуючий шток, 2 – CRSEN зразок, 3 – екстензометр для реєстрації розкриття берегів тріщини.

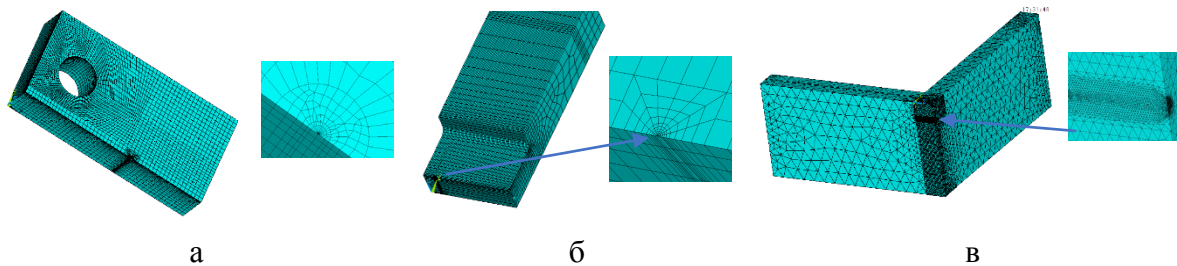


Рис.3. Скінчено-елементні моделі зразків: (а) на відцентровий згин (СТ-1), $a/W=0,5$; (б) на триточковий згин, $a/W=0,13$ (SEN(B)); (в) на двовісний згин, $a/W=0,15$ (CRSEN).

Для визначення параметра A_{α}^* за формулою (1) будували залежність $\delta/2$ від J – інтегралу (рис.5). Визначені величини в'язкості руйнування K_{Jc} , перераховані за J – інтегралом, для кожного зразку, а також параметр A_{α} наведено в табл.1, де відстежується певна закономірність: зі збільшенням скутості деформації зменшується параметр A_{α} і відповідно в'язкість руйнування. Так для SENB з короткою $a/W=0,133$ тріщиною в'язкість руйнування була максимальна, так як і параметр A_{α} . А двовісний згин хрестоподібного зразка CRSEN з короткою тріщиною $a/W=0,15$ дещо збільшує скутість деформацій і зменшує параметр A_{α}^* . Дані табл.1 засвідчили, що для уточнення розрахунку параметра A_{α}^* необхідно для хрестоподібного зразка CRSEN виконати розрахунки розкриття δ з використанням регулярної сітки в околі вершини тріщини.

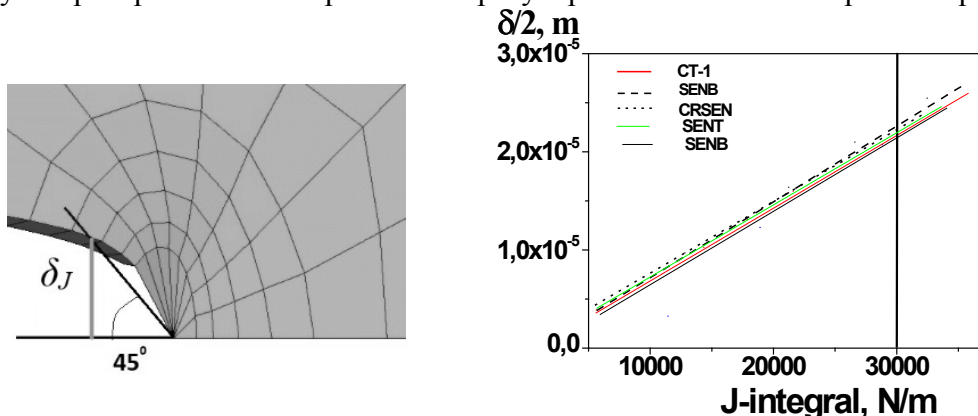


Рис.4. Чисельне визначення розкриття вершини тріщини.

Рис.5. Залежність J -інтегралу від розкриття вершини тріщини.

Таблиця 1 Результати аналізу скутості деформацій за параметром A_{α}^*

Тип зразка	CT-1, $a/W=0,5$	SENB, $a/W=0,15$	CRSEN, $a/W=0,15$	SENT, 17x30 мм, $a/W=0,5$	SENT, 10x18 мм, $a/W=0,5$
$K_{Jc}, MPa^{1/2}$ експер	130	280	200	120	150
$K_{Jc}, MPa^{1/2}$ розрах (1)	130	288	285	125	138
A_{α}^*	1	1,052	1,05	0,95	1,035

Порівнюючи дані для зразків різних розмірів з крайовою тріщиною на розтяг (SENT), можна помітити, що в'язкість руйнування і відповідно параметр скутості A_{α}^*

збільшується при зменшенні поперечного перерізу зразка, тобто зі зменшенням жорсткості напруженого стану в околі вершини тріщини.

Розрахункові значення K_{Jc} , оцінені за залежністю (1), показали відповідну закономірність з урахуванням полоси розкиду експериментальних результатів (табл.1).

За результатами скінченно-елементного моделювання зразків різної геометрії проаналізовано зміну параметра скутості деформацій, що базується на розрахунках розкриття вершини тріщини нормального відриву та може застосовуватись в двопараметричних підходах для оцінки цілісності елементів конструкцій з урахуванням двовісності навантаження. Експериментально встановлено, що за умов мало масштабної текучості двовісне навантаження практично не впливає на величину характеристик тріщиностійкості, а за інших умов навпаки, причому вплив двовісності збільшується зі зменшенням відносної довжини тріщини. Зменшення в'язкості руйнування при двовісному згині у порівнянні з одновісним на малогабаритних хрестоподібних зразках узгоджується з даними отриманими раніше проф. Басом [6] на зразках товщиною 100 мм і пов'язане зі збільшенням скутості деформацій по фронту тріщини при двовісному згині для коротких тріщин ($a/W < 0,2$). На основі експериментальних і чисельних досліджень визначено, що двовісне навантаження хрестоподібних зразків з короткою тріщиною ($a/W < 0,2$) зменшує температуру крихко-в'язкого переходу за Майстер кривою T_0 і відповідно знижує консерватизм оцінки T_0 на основі стандартних зразків на в'язкість руйнування.

Перелік посилань

1. Z. Chen, K. Kouzoumis, R. Kulka, I. Hadley, H. Coules, M. Mostafavi, "A novel unified constraint parameter based on plastic strain energy", *Theor. and Appl. Fract. Mech.*, 126, 103990 (2023).
2. M. Mostafavi, D.J. Smith, M.J. Pavier, "Reduction of measured toughness due to out-of-plane constraint in ductile fracture of aluminium alloy specimens", *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 33 (11), 724–739 (2010).
3. J.Y. Xiao, G.Z. Wang, S.T. Tu, F.Z. Xuan, "Engineering estimation method of unified constraint parameters for semi-elliptical surface cracks in plates", *Eng. Fract. Mech.*, 229, 106935 (2020).
4. J.Y. Xiao, G.Z. Wang, J.X. Zhao, S.T. Tu, F.Z. Xuan, "A general correlation between ductile fracture toughness and unified constraint parameter for different materials", *Eng. Fract. Mech.*, 285, 109296, (2023).
5. Сидяченко В.Г., Котляренко А.А. Дослідження впливу коротких тріщин і двовісного навантаження на в'язкість руйнування корпусної реакторної сталі. Матеріали міжнародної наукової конференції "Актуальні проблеми механіки" до 145-річчя від дня народження С.П. Тимошенка (Електронний ресурс), Київ, Дніпро, Львів, Харків (2023), С.352-353.
6. B.R. Bass, W.J. McAfee, Paul Thomas Williams, W.E Pennell, "Fracture assessment of shallow-flaw cruciform beams tested under uniaxial and biaxial loading conditions", *Nuclear Eng. And Desing.* 188, 259-288 (1999).