

## Оцінка міцності стикових зварних з'єднань із сталі 50 за критеріями тріщиностійкості

М. С. Когут, В. С. Караїм, Н. М. Лебідь, О. І. Панько

Львівський державний аграрний університет, Львів, Україна

*Запропоновано теоретико-експериментальну інженерну методику оцінки міцності стикових зварних з'єднань за схемою триточкового згину балкових зразків із вихідною боковою тріщиною у металі прямого та косою швів відповідно за силовим ( $K_{Ic}$ ) і деформаційним ( $\delta_c$ ) критеріями механіки крихкого та квазікрихкого руйнування. Для визначення  $K_{I\max}$  у випадку згину балки з косою тріщиною отримано формулу, яка враховує значення коефіцієнтів інтенсивності напружень  $K_I$ ,  $K_{II}$  та кут нахилу  $\theta^*$ . Досліджено також пластичну зону у вістрі тріщини та кінетику поширення останньої в залежності від геометричної форми швів і гостроти дна концентратора в них для стикових зварних з'єднань. Наведено дані щодо ранжування міцності таких зварних з'єднань за критеріями тріщиностійкості  $K_{Ic}$  і  $\delta_c$ .*

**Ключові слова:** стикові зварні з'єднання, балковий зразок, триточковий згин, крихке і квазікрихке руйнування, критерії тріщиностійкості.

**Вступ.** Практика експлуатації зварних конструкцій та аналіз причин їх руйнування показують, що крихке та квазікрихке руйнування відбуваються, як правило, внаслідок наявності технологічних дефектів структури, форми дефекту та місця його залягання в об'ємі матеріалу, дефектів шва зварного з'єднання (непровари, несплавності, пустоти і включення), які, в свою чергу, зумовлюють неоднорідність властивостей окремих ділянок з'єднання та появу в них зон зі зниженою деформаційною здатністю [1–3].

Відомі певні напрацювання щодо впливу механічної неоднорідності зварних з'єднань і оцінки їх міцності за умов крихкого та квазікрихкого руйнування на основі використання критеріїв механіки руйнування, зокрема тріщиностійкості  $K_c$  ( $K_{Ic}$ ) та критичного розкриття тріщини  $\delta_c$  [4–6]. Також проводиться розробка методик вимірювання  $\delta_c$  на двох концентраторах – кільцевих тріщинах у наплавках циліндричних зразків [7] і на призматичних зразках із боковою тріщиною у наплавці змінної висоти [8].

Разом із тим мало приділялось уваги вивченню впливу технологічних і конструктивних чинників на міцність стикових зварних з'єднань за параметрами тріщиностійкості  $K_{Ic}$  і  $\delta_c$  в залежності від способу і геометрії формування шва та гостроти дефекту – тріщини у цьому шві. За нашою інформацією, ефективних методик для визначення тріщиностійкості та ранжування міцності таких зварних з'єднань на лабораторних зразках, які можна було б застосувати в інженерній практиці, недостатньо.

Мета даної роботи – дослідження міцності стикових зварних з'єднань на нових конструкціях призматичних балкових зразків із прямим і косим швами в залежності від гостроти концентратора та орієнтації тріщини у цих швах на основі використання силового ( $K_{Ic}$ ) і деформаційного ( $\delta_c$ ) критеріїв механіки руйнування.

**Коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН).** Розглянемо згин балкового зразка з боковою тріщиною у прямому та косому стикових швах зварних з'єднань (рис. 1).

У випадку бокової тріщини, перпендикулярної до поверхні основи балки (рис. 1,а), коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_I$  визначено в роботі [9]:

$$K_I = 11,9274 \sqrt{\varepsilon} M / [h b \sqrt{b(1-\varepsilon)^{3/2}} \sqrt{1+7,9927 \varepsilon}], \quad (1)$$

де  $\varepsilon = l/b$  – відносний розмір тріщини;  $l$  – довжина тріщини в металі прямого шва;  $b$  – ширина зразка;  $h$  – його товщина;  $M = PL/2$  – згинальний момент від прикладеного зусилля  $P$  посередині зразка.

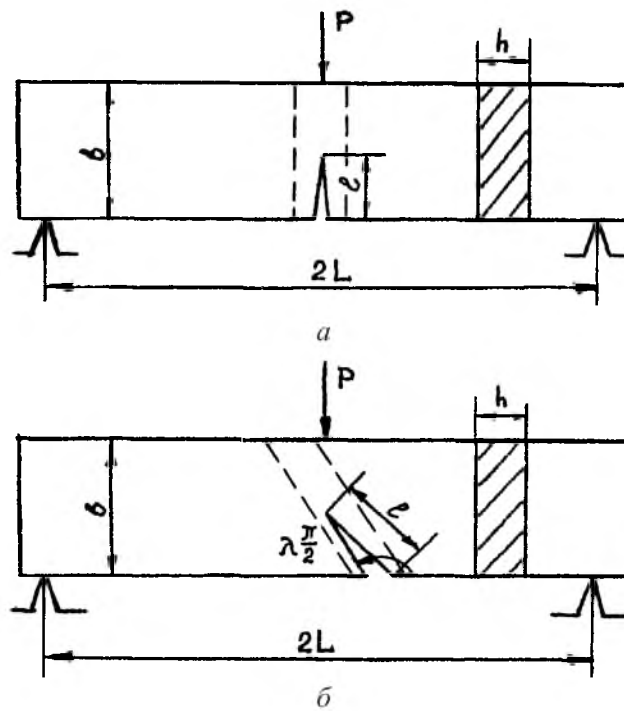


Рис. 1. Схема триточкового згину балкового зразка з прямою (а) і косою (б) боковими тріщинами у прямому і косому швах.

Якщо ж бокова тріщина нахилена під кутом  $\alpha = 45^\circ$  до основи зразка, (рис. 1,б), то у вістрі тріщини окрім  $K_I$  буде діяти і коефіцієнт інтенсивності напружень при поздовжньому зсуві  $K_{II}$ . У цьому випадку для загального КІН наведено формулу [10]

$$K_{I\max} = \left( K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - 1,5 K_{II} \sin \theta \right) \cos \frac{\theta}{2}, \quad (2)$$

де  $\theta$  – кут між початковим напрямком тріщини та її поширенням після досягнення гранично-рівноважного стану (коли  $P = P^*$ , то  $\theta = \theta^*$ ).

Кут  $\theta = \theta^*$  визначають за допомогою співвідношення [10]

$$\theta^* = 2\arctg[1 - \sqrt{1 + 8\text{ctg}^2\alpha} / (4\text{ctg}\alpha)] \quad (3)$$

або з експериментальних досліджень.

Для визначення  $K_I$  і  $K_{II}$ , що входять у формулу (2), скористаємося даними робіт [10, 11]:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi l} f(\varepsilon, \lambda); \quad K_{II} = \sigma\sqrt{\pi l} g(\varepsilon, \lambda), \quad (4)$$

де  $\lambda$  – безрозмірна величина, що змінюється від 1 до 2, коли кут нахилу тріщини приймає значення від  $\pi/2$  до  $\pi$ ;  $l$  – довжина косої тріщини в металі косої шва (рис. 1,б).

Безрозмірні функції  $f(\varepsilon, \lambda)$ ,  $g(\varepsilon, \lambda)$  графічно зображено на рис. 2 для прямокутної пластини розміром  $2L \times b$  при  $L/b = 1$  [11].

Значення напружень в (4) визначаємо за формулою [12]

$$\sigma = \frac{6M}{hb^2}, \quad (5)$$

тобто вважаємо, що силова схема розтягу пластини з боковою косою тріщиною еквівалентна силовій схемі згину балкового зразка з аналогічною тріщиною.

Таким чином, при проведенні експериментів на зразках-балках, послаблених боковою прямою тріщиною, значення КІН слід визначати за формулою (1), а на балках, послаблених боковою косою тріщиною з довільним кутом нахилу, – за формулою (2), де складові  $K_I$  і  $K_{II}$  слід обчислювати за формулами (3) і (4) з урахуванням залежностей, наведених на рис. 2.

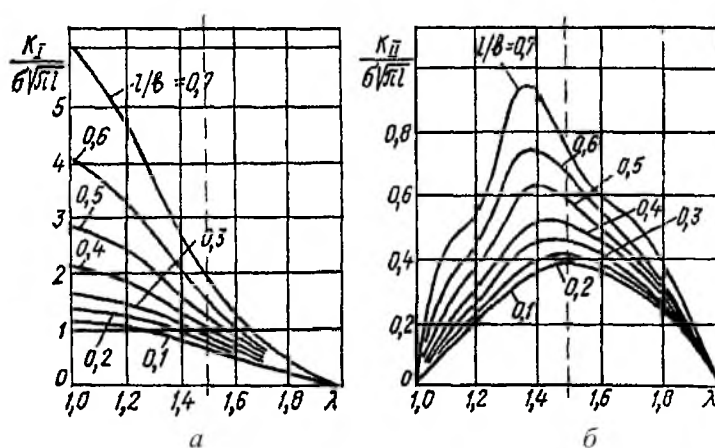


Рис. 2. Безрозмірні залежності КІН  $K_I$  (а) і  $K_{II}$  (б) від параметрів  $\lambda$  та  $\varepsilon$  при розтязі прямокутної пластини з краєвою довільно орієнтованою тріщиною для  $L/b = 1$  [11] ( $L$  – половина довжини пластини;  $b$  – ширина пластини).

**Підготовка та виготовлення дослідних зразків.** Матеріалом досліджень служила конструкційна сталь 50 (0,50%С), що використовується для виготовлення рейок трамвайної колії. Із тіла головки рейки в поздовжньому напрямку вирізали прямокутні бруси (рис. 3) з прямим і косим торцем. Перед зварюванням торці обох партій брусів у верхній частині шліфували для щільного прилягання цих поверхонь при контакті.

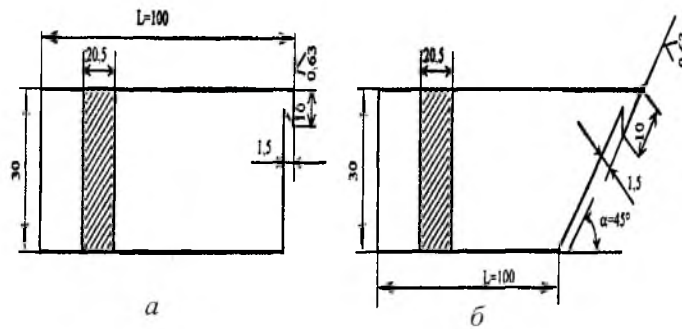


Рис. 3. Геометричні розміри половинок прямокутників брусів із прямим (а) і косим (б) торцями для зварювання встик.

Потім їх стикували і у затиснутому стані з'єднували шляхом автоматичного зварювання. Присадковим матеріалом для формування шва був зварювальний дріт ( $\varnothing 1,0$  мм) із матеріалу того ж класу, що і матеріал рейки. Товщина шва у місці заплавлення ( $t = 3$  мм) співрозмірна з шириною паза, утвореного внаслідок стикування двох частин брусів. Для зняття внутрішніх напружень після зварювання заготовки відпалювали при температурі  $800^{\circ}\text{C}$  з витримкою 3 г та кінцевим охолодженням разом із піччю. Фінішною операцією було шліфування бокових і торцевих поверхонь зварених таким чином з'єднань. У результаті одержано дві партії дослідних зразків (рис. 4, а, б) із прямим і косим швами і вихідною боковою тріщиною довжиною  $l = 10 \pm 0,1$  мм, утвореною у верхній непровареній частині, які придатні для визначення критеріїв  $K_{Ic}$ ,  $K_{I\max}$ . Для решти зразків інших партій замість вихідних тріщин у металі прямого та косоного швів виготовляли бокові концентратори глибиною  $l = 3$  мм з різною гостротою дна ( $\rho \leq 0,25; 0,5; 1,0$  мм) та кутом у вістрі  $\alpha = 60^{\circ}$  (рис. 4, в, з).

Загальна кількість зразків-балок із прямим і косим швами в кожній партії складала 12 шт. Ці зразки служили для вивчення міцності стикових зварних з'єднань у залежності від гостроти концентратора та геометрії сформованого шва в таких з'єднаннях.

**Методика та результати експериментальних досліджень.** Статичний триточковий згин зварених зразків-балок із прямим і косим швами і боковою тріщиною в них і таких же зразків інших партій з різними радіусами закруглення дна концентратора (рис. 4) виконали на розривній машині зі швидкістю переміщення її активної нижньої траверси  $V = 1,0$  мм/хв. Зразок-балку встановлювали у стандартний пристрій для триточкового згину плоского зразка, обидва торці якого стороною з надрізом опиралися на роликові ножі, тоді як центральний роликовий ніж розміщувався посередині довжини зразка з протилежної сторони від надрізу.

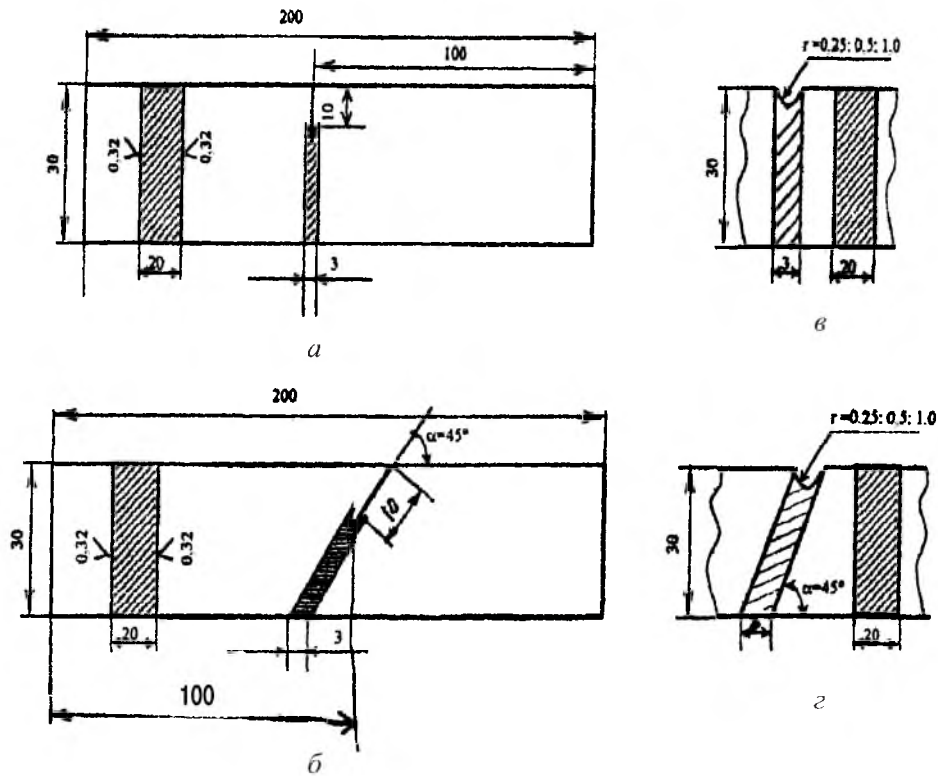


Рис. 4. Геометричні розміри балкових зразків із прямим (а) і косим (б) швами з тріщиною, а також із прямим (в) і косим (г) швами з концентраторами різної гостроти дна.

Завдяки застосуванню цієї схеми навантаження у вістрії тріщини зразка з прямим швом (рис. 4,а) має місце руйнування за типом  $K_I$ , а у зразку з косим швом (рис. 4,б) – за змішаною модою  $K_I + K_{II}$ .

Для підрахунку  $K_{Ic}$  металу з'єднань за вибраною схемою триточкового згину балкових зразків із боковою тріщиною у прямому шві використано формулу (1), а для підрахунку  $K_{I\max}$  при аналогічному згині балкових зразків із боковою тріщиною у косому шві ( $\alpha = 45^\circ$ ) – формули (2)–(4).

За допомогою цих формул підраховували і умовні значення  $K_c$  у залежності від гостроти дна концентратора у металі прямого та косоного швів. У процесі експерименту фіксували величину руйнівного зусилля  $P = P^*$ , геометричні розміри зразків  $b$  і  $h$ , обчислювали згинальні моменти  $M$ , а також вимірювали довжину прямої і косої тріщин  $l$  та напрям кута поширення тріщини  $\theta^*$ .

У випадку косої тріщини, нахиленої під кутом  $\alpha = 45^\circ$ , згідно з рис. 1,б і рис. 2 величина  $\lambda = 1,5$ . Використавши  $\varepsilon = l/b = 0,3333$  і  $\lambda = 1,5$ , згідно з рис. 2 (штрихові горизонтальні лінії) визначили значення безрозмірних функцій  $f(\varepsilon, \lambda)$  і  $g(\varepsilon, \lambda)$ , які відповідно дорівнюють

$$f(0,3333; 1,5) = 1; \quad g(0,3333; 1,5) = 0,44. \quad (6)$$

Як показали обчислення за формулою (3) і дані експериментальних досліджень, в момент руйнування зразка з косою тріщиною кут її поширення складає  $\theta^* = -90^\circ$ , тобто тріщина буде зростати перпендикулярно до основи балки. Дійшовши до лінії сплавлення металу косою шва з основою, тріщина поширюється по цій лінії аж до повного руйнування зразка-балки.

У результаті залежність (2) після відповідних обчислень прийме вигляд

$$K_{I\max} = 1,2198\sigma^* \sqrt{\pi l}, \quad (7)$$

де  $\sigma^*$  – граничне руйнівне напруження, яке витримує балка при дії згинального моменту.

Результати експериментів для зварних з'єднань зі сталі 50 щодо залежності  $K_c$  та  $\delta$  від геометричної форми швів і напрямку тріщини у цих швах представлено на рис. 5. Там же наведено величини  $K_c$  для інших партій дослідних зразків зварних з'єднань у залежності від гостроти дна концентратора  $\rho$ . Видно, що функція  $K_c = f(\rho)$  для гострих концентраторів і тріщини в інтервалі  $0 \leq \rho \leq 0,25$  мм приймає стабільні мінімальні значення, що для прямого шва складає  $K_c = K_{Ic}$ , для косою –  $K_c = K_{I\max}$  (штрихові горизонтальні лінії на рис. 5,а). Для зразків зі збільшеними радіусами дна концентратора отримано зростання умовних значень характеристики  $K_c = f(\rho)$  в інтервалі  $0,25 \leq \rho \leq 1,0$  мм (криві 1, 2 на рис. 5,а) як для прямого, так і для косою швів матеріалу зварних з'єднань.

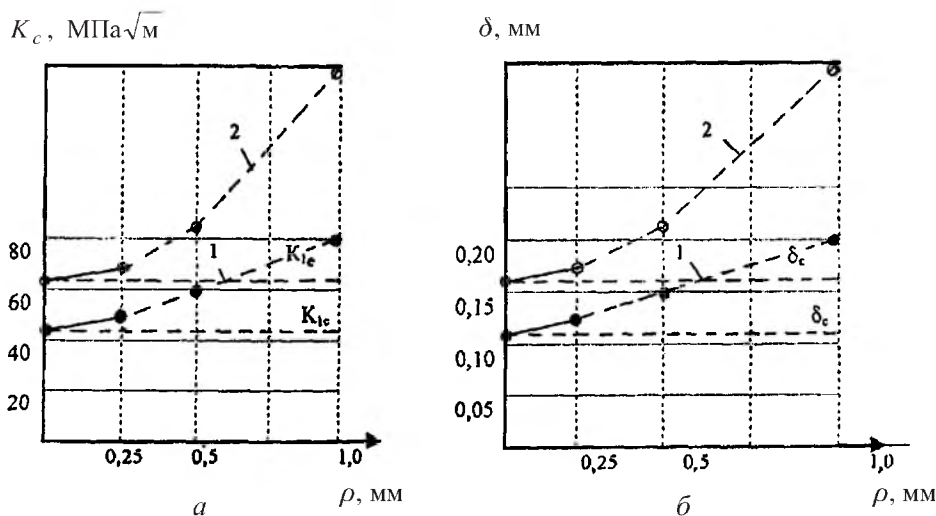


Рис. 5. Залежність в'язкості руйнування  $K_c$  (а) і розкриття тріщини  $\delta$  (б) від гостроти дна концентратора після згину балкових зразків: 1, 2 – зварне з'єднання з прямим і косим швом відповідно.

Що стосується міцності стикових зварних з'єднань у залежності від геометрії виготовленого шва, то перевагу слід надати косому шву у порівнянні з прямим, про що свідчать більші значення  $\Delta = K_{I\max} - K_{Ic}$  для цих швів відповідно.

Одночасно на цих же партіях дослідних зразків, де визначали тріщиностійкість прямого ( $K_{Ic}$ ) і косоного ( $K_{I\max}$ ) швів, а також умовну тріщиностійкість прямого і косоного швів із різною гостротою концентраторів ( $K_c = f(\rho)$ ), виміряно розкриття тріщини  $\delta_c$  і  $\delta_{c\max}$  та розкриття берегів концентраторів-надрізів  $\delta = f(\rho)$ . У всіх випадках вимірювання розкриття тріщини і зміщення берегів концентраторів різної гостроти дна здійснювали катетометром, окуляр якого був сфокусований у кінчик тріщини або у радіус дна концентратора. Результати цих вимірювань (рис. 5,б) практично підтверджують отримані закономірності (рис. 5,а).

При обстеженні полірованої бокової грані зразка-балки практично не виявлено формування пластичної зони у вістрі тріщини у металі прямого та косоного швів. На діаграмі руйнування майже відсутня ділянка текучості матеріалу. Після повного руйнування зразка відмічався кристалічний злом сірого кольору і, як наслідок, мінімальні тріщиностійкість  $K_{Ic}$  (рис. 5,а) і критичне розкриття тріщини  $\delta_c$  (рис. 5,б) металу шва зварних з'єднань (нижні точки на кривих 1, 2).

Для зразків із різним радіусом дна концентратора в інших партіях на полірованих поверхнях їх бокових граней чітко виражені пластичні смуги, які, розгалужуючись із вістря тріщини до її фронту, формують кут  $\alpha = 72^\circ$ . Діаграма руйнування має значну ділянку текучості, протяжність якої зростає зі збільшенням радіуса дна концентратора  $\rho$  у металі прямого шва. Контрастність цих смуг, їх розміри по ширині та висоті збільшуються з ростом навантаження згину, близького до руйнівного, тобто  $\rho = \rho^*$ . Це саме маємо і при руйнуванні зварних з'єднань із різною гостротою дна концентратора  $\rho$  у металі косоного шва, де пластичні смуги більш контрастніші, ніж у металі прямого шва. Як наслідок, відповідно зростають умовні значення  $K_c = f(\rho)$  і  $\delta = f(\rho)$  – на рис. 5 штрихові лінії.

Викликає інтерес і кінетика підростання тріщини у зразках із прямим та косим швами. Так, у першому випадку тріщина поширюється посередині шва вертикально вгору, про що свідчить майже прямолінійний злом зразка-балки. Що стосується косоного шва, то тут поширення тріщини відбувається майже прямолінійно вгору на короткому відрізку, доки її вершина сягне лінії зони сплавлення. Відмічається розворот тріщини, при цьому подальший її ріст, тобто напрямок поширення, забезпечує кут нахилу шва зварного з'єднання ( $\alpha = 45^\circ$ ) аж до повного руйнування зразка-балки.

Результати експериментальних досліджень отримано на зварних з'єднаннях зі сталі 50, механічні характеристики якої наступні:  $\sigma_B = 640$  МПа;  $\sigma_{0.2} = 380$  МПа; ударна в'язкість  $a_H = 40$  Дж/см<sup>2</sup>.

## Висновки

1. Розроблено теоретико-експериментальну інженерну методику оцінки міцності стикових зварних з'єднань на лабораторних балкових зразках із вихідною боковою тріщиною у металі прямого та косоного швів. Вона виявилася ефективним інструментом для ранжування таких з'єднань за силовими ( $K_{Ic}$ ) і ( $K_{I\max}$ ) і деформаційними ( $\delta_c$ ) і ( $\delta_{c\max}$ ) критеріями тріщиностійкості.

2. На прикладі досліджень стикових зварних з'єднань зі сталі 50 встановлено більші значення тріщиностійкості ( $K_{I\max} = 69 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  і  $\delta_{c\max} = 0,17 \text{ мм}$ ) для металу з тріщиною у косому шві в порівнянні з тріщиностійкістю ( $K_{Ic} = 43 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  і  $\delta_c = 0,11 \text{ мм}$ ) для металу з тріщиною у прямому шві.

3. Проведено детальне теоретичне узагальнення формули (2) для підрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{I\max}$  у випадку бокової косої тріщини, що знаходиться в металі косою шва призматичного балкового зразка, стикового зварного з'єднання.

4. Візуальні спостереження свідчать про збільшення пластично-деформованої області в залежності від геометричної форми шва та гостроти дна концентратора у прямому і косому швах стикових зварних з'єднань. Вона мінімальна у матеріалі прямого шва з вихідною тріщиною і максимальна у матеріалі косою шва з найбільшим радіусом закруглення дна концентратора.

5. Кінетика поширення тріщини у металі прямого шва проходить вертикально по всій висоті поперечного перетину балкового зразка, а в металі косою шва – спочатку вертикально до лінії сплавлення шва з основним матеріалом із подальшим розворотом і поширенням по лінії сплавлення в напрямку сформованого кута нахилу шва, тобто в площині косою перетину балкового зразка стикового зварного з'єднання.

## Резюме

Предложена теоретико-экспериментальная инженерная методика оценки прочности стыковых сварных соединений по схеме трехточечного изгиба балковых образцов с исходной боковой трещиной в металле прямого и косою швов с помощью соответственно силового ( $K_{Ic}$ ) и деформационного ( $\delta_c$ ) критериев механики хрупкого и квазихрупкого разрушения. Для определения  $K_{I\max}$  в случае изгиба балки с косою трещиной получена формула, учитывающая значения коэффициентов интенсивности напряжений  $K_I$ ,  $K_{II}$  и угол наклона  $\theta^*$ . Исследованы также зона пластичности в вершине трещины и кинетика ее распространения в зависимости от геометрической формы швов и остроты дна концентратора в них для стыковых сварных соединений. Приведены данные по ранжированию прочности таких сварных соединений с помощью критериев трещиностойкости  $K_{Ic}$  и  $\delta_c$ .

1. Козут Н. С., Шахматов М. В., Ерофеев В. В. Несущая способность сварных соединений. – Львів: Світ, 1991. – 184 с.
2. Шахматов М. В., Ерофеев В. В., Михайлов В. И. и др. Влияние щелевидных дефектов на границе сплавления на несущую способность механически неоднородных сварных соединений // Применение механики разрушения для оценки прочности и надежности сварных соединений и конструкций. – Л., 1983. – С. 74 – 78.
3. Романив О. Н. Вязкость разрушения конструкционных материалов. – М.: Металлургия, 1979. – 200 с.



4. *Махненко В. И., Починок В. Е.* Применение критериев механики разрушения к расчету на прочность сварных соединений с предусмотренными несплошностями трещинообразного типа // Автомат. сварка. – 1982. – № 1. – С. 1 – 6.
5. *Серенсен С. В., Гиренко В. С., Дейнего В. Г. и др.* Критическое раскрытие трещин при квазихрупком и хрупком разрушении // Там же. – № 2. – С. 1 – 6.
6. *Steigerwald A. E. and Hanna G. L.* Influence of workhardening exponent of the fracture toughness high strength materials // Trans. Metallurg. Soc. AIME. – 1968. – **242**, No. 2. – P. 320 – 328.
7. *Лебідь Н. М., Русинко К. М.* Оцінка тріщиноотривкості зварних з'єднань із квазікрихких і в'язких матеріалів за критерієм критичного розкриття тріщини // Вісник держ. ун-ту “Львівська політехніка”. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – 1999. – Вып. № 371. – С. 65 – 71.
8. *Когут М. С.* Визначення тріщиноотривкості зварних з'єднань багатозонним випробуванням призматичного зразка з боковою тріщиною // Там же. – С. 79 – 82.
9. *Панько І. М.* Теоретичні основи інженерних методів оцінки тріщиноотривкості матеріалів і елементів конструкцій. – Львів: Львівський державний аграрний ун-т, 2000. – 279 с.
10. *Панасюк В. В.* Механика квазихрупкого разрушения материалов. – Киев: Наук. думка, 1991. – 415 с.
11. *Bowie J. L.* Solution of plane crack problems by mapping technique // Methods of Analysis and Solutions of Crack Problems. – Leyden: Noordhoff Intern. Publ., 1973. – P. 1 – 55.
12. *Тимошенко С. П.* Сопротивление материалов. – М.: Наука. – Т. 1, 1965. – 363 с.

Поступила 26. 12. 2000