

Тріщиностійкість однорідних і неоднорідних стикових зварних з'єднань

М. С. Когут

Львівський державний аграрний університет, Львів, Україна

Описано методики оцінки міцності стикових зварних з'єднань за тріщиностійкістю шляхом осьового розтягу малогабаритних циліндричних зразків із кільцевою тріщиною і тріщочкового згину балкових зразків із боковою тріщиною, що ініційовані в низько- або середньоміцних наплавках, уварених у високоміцні основи цих зразків. Детально досліджено пришовну ділянку стикового зварного з'єднання, де виявлено найменшу тріщиностійкість металу зони сплавлення і найбільшу – вихідного матеріалу незалежно від типу випробувальних зразків. Метали шва і зони термічного впливу мають більші значення тріщиностійкості, аніж зона сплавлення, і менші порівняно з вихідним матеріалом. На прикладі осьового розтягу трубчастого зразка з внутрішньою кільцевою тріщиною в наплавці досліджено тріщиностійкість для семи варіантів неоднорідних зварних з'єднань в залежності від впливу режимів термічної обробки сталей: 35 і Ст. 3 після нормалізації, 09Г2С, 20Х і 30ХГСА після гартування та середнього відпуску і нормалізації.

Ключові слова: стикове з'єднання, зварний шов, тріщиностійкість, наплавка, циліндричний зразок, балка.

1. Постановка проблеми. Практика експлуатації зварних конструкцій та аналіз причин руйнування їх елементів зі стиковими швами, показує, що вони, як правило, виходять з ладу через наявність технологічних дефектів (непровари, пустоти або включення), які сприяють формуванню пришовних ділянок із пониженою міцністю.

Вплив механічної неоднорідності зварних з'єднань біля ділянки шва на їх міцність в умовах крихкого та квазікрихкого руйнування оцінено на основі критеріїв механіки руйнування, зокрема тріщиностійкості K_c (K_{1c}) та критичного розкриття тріщини δ_c , в роботах [1–3]. Певні напрацювання щодо оцінки міцності стикових зварних з'єднань зі сталі 50 за параметрами K_{1c} і δ_c після випробувань балкових зразків із боковими тріщинами у прямому і косому швах отримано раніше [4]. Відомі також для оцінки міцності сталей середньої і низької міцності та їх зварних з'єднань методики визначення K_{1c} через параметр δ_c – критичне розкриття тріщини [5–12], побудовані на концепціях δ_c -моделі Леонова–Панасюка [13] та методах J -інтеграла або R -кривих [14–18], використання яких доцільне у випадках значних пластичних деформацій, що мають місце на продовженні вершини тріщини.

Суть J -інтеграла полягає в застосуванні енергії деформації для оцінки тріщиностійкості матеріалу в пружно-пластичній постановці при поширенні тріщини та аналізі діаграм руйнування з вираженою текучістю. Сама концепція контурного енергетичного інтеграла сформульована незалежно Черпановим [19, 20] і Райсом [21, 22]. Разом із тим цей метод потребує певної доробки [23–25], хоча основні положення і методика виконання досліджень за методом J -інтеграла знайшли своє вирішення у міжнародних норма-

тивних документах [26, 27], які на сьогодні методологічно доповнені в проектах європейських стандартів [28–30].

Слід зазначити, що основна проблема при реалізації таких досліджень пов'язана з вимірюванням критичного розкриття тріщини δ_c , адже не відомо, на якій відстані від вістря макротріщини (сотих, тисячних міліметра чи величини діаметра зерна структури матеріалу) можна коректно його визначити, оскільки, як показано в роботах [31, 32], $\delta_c = \delta_{пл} - \delta_{пр}$, де $\delta_{пл}$ – пластична і $\delta_{пр}$ – пружна складові деформацій при руйнуванні матеріалу. У той же час методика вимірювання δ_c потребує розробки складної контрольної-вимірювальної техніки (датчики, апаратура, технологія виготовлення дослідного зразка з тріщиною тощо).

Незважаючи на аналіз наведених вище досліджень, ряд питань із цієї актуальної проблеми потребує вирішення. Зокрема, недостатньо вивчено вплив технологічних і конструктивних чинників на міцність стикових з'єднань за критерієм K_{1c} в залежності від способу та геометрії формування шва під час зварювання однорідних або неоднорідних матеріалів. Мало ефективних методик щодо визначення тріщиностійкості K_{1c} металу зварних з'єднань (пришовної ділянки) на простих і економічних лабораторних зразках, які можна було б застосовувати в інженерній практиці.

Мета роботи – встановити тріщиностійкість K_{1c} однорідних і неоднорідних зварних з'єднань із стиковими швами на циліндричних, призматичних і трубчастих зразках із тріщинами в залежності від режимів термічної обробки сталей, місця знаходження тріщини в пришовній ділянці, а також текстури сталей за силовим критерієм механіки руйнування K_{1c} і на основі цього показати переваги використання цих зразків із точки зору ефективності визначення K_{1c} у порівнянні з відомими підходами та методиками вищенаведених досліджень.

2. Науково-методичні підстави для дослідження. Використовували низьковуглецеві сталі Ст. 3, сталь 35, 09Г2С, а також конструкційні 20Х, 30ХГСА. Із цих сталей виготовляються елементи зварних конструкцій мостобудування (прогони, арки, балки), транспортного машинобудування (осі, стояки), кранового устаткування (ферми, рами) тощо.

Оскільки розглядаються квазікрихкі і в'язкі матеріали, для яких коректно визначити параметр K_{1c} дещо складно [33, 34], у даній роботі представлено методики визначення цього параметра на малогабаритних циліндричних і призматичних зразках із тріщинами у нанесених наплавках (прошарках), а також компактних трубчастих зразках, складених із двох частин із твердішого матеріалу, у які уварено наплавки з досліджуваних матеріалів.

Коротко розглянемо методологію досліджень циліндричних і призматичних зразків із тріщинами за параметром K_{1c} . Суть її полягає в тому, що у циліндричному і призматичному зразках виточували канавку (паз) шириною $2c$ і глибиною a (рис. 1). Матеріал основи зразків повинен бути високоміцним із підвищеною твердістю. Потім канавку заплавляють досліджуваним матеріалом низької або середньої міцності, після чого зразки шліфують до заданих розмірів D , B , де D – діаметр циліндричного, а B – товщина призматичного зразків (рис. 1).

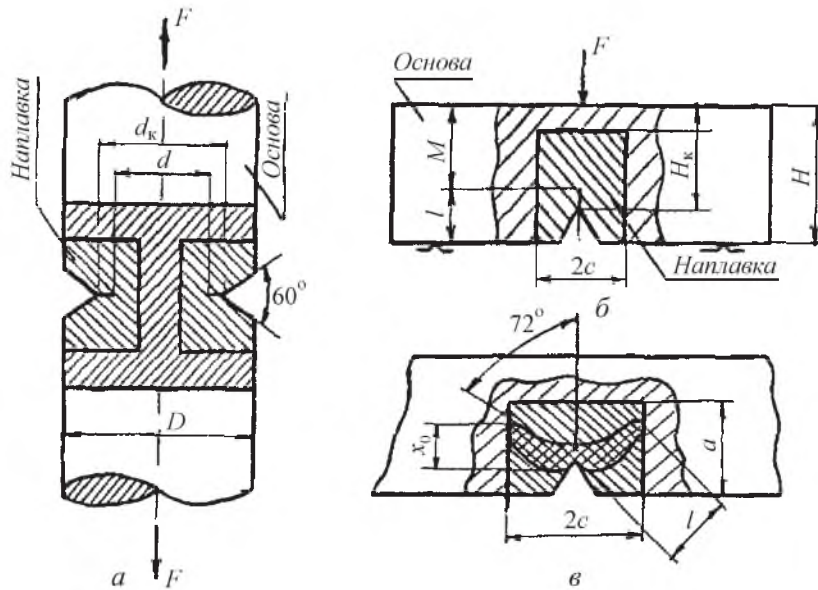


Рис. 1. Навантаження циліндричного (а) і призматичного (б) зразків із тріщиною у наплавці та форма пластичної зони у вершині тріщини в наплавці (в): $\alpha = 72^\circ$ – кут нахилу пелюсток пластичної зони; x_0 – товщина ізокліни; l – довжина ізокліни.

Кінцевими операціями є нанесення концентратора посередині наплавки в канавці із заданою гостротою і глибиною та ініціювання тріщини від утомленості в наплавці.

Водночас для коректного визначення K_{1c} на таких зразках необхідно дотримуватись умов автомодельності зони передруйнування, виходячи з її розмірів, зокрема:

для циліндричного [33, 34]:

$$D > 2,3(K_{1c}/\sigma_{0,2})^2, \quad d > 1,6(K_{1c}/\sigma_{0,2})^2; \quad (1)$$

для призматичного [35]:

$$B > 2,5(K_{1c}/\sigma_{0,2})^2. \quad (2)$$

Оскільки у вершині вихідної тріщини (рис. 1,в) завжди мають місце пластичні деформації, що виникають під час деформування зразка у вигляді двох смуг (ізоклін), направлених під кутом 72° до площини тріщини, то їх довжину чисельно обчислюють за співвідношенням [36, 37]

$$l^* = 0,184(K_{1c}/\sigma_{0,2}). \quad (3)$$

За допомогою розмірів циліндричного зразка з кільцевою тріщиною глибиною

$$l = \frac{D - d}{2} \quad (4)$$

і призматичного з боковою тріщиною

$$l = H - M \quad (5)$$

можна знайти товщину ізокліни x_0 :

для циліндричного зразка:

$$x_0 = 0,035d, \quad (6)$$

для призматичного:

$$x_0 = 0,035M. \quad (7)$$

Прийmemo, що висота канавки $2c = 3$ мм і врахуємо, що відносний розмір тріщини для циліндричного зразка $\lambda = d/D = 0,7$, для призматичного $\lambda = M/H = 0,7$. У результаті визначимо розміри елементів пластичних смуг та канавки:

$$x_0 = l^* \operatorname{tg} 72^\circ, \quad C \leq x_0 \operatorname{tg} 72^\circ \quad (8)$$

або

$$C \leq 0,035 \cdot 0,7 D \operatorname{tg} 72^\circ \quad (9)$$

для циліндричного зразка і

$$C \leq 0,035 \cdot 0,7 B \operatorname{tg} 72^\circ \quad (10)$$

для призматичного зразка, звідки D і $B \geq 20,78$ мм.

Отже, якщо циліндричний чи призматичний зразки виготовлено з матеріалу, для якого при D чи $B = 21$ мм виконуються умови автомодельності [38], а висота канавки в'язкого матеріалу $2c = 3$ мм, то K_{1c} є достовірною характеристикою матеріалу. Окрім того, за даними досліджень [31] встановлено, що зі збільшенням висоти канавки $2c \gg 3$ мм отримаємо $K_c \gg K_{1c}$, тобто маємо невідповідність умов автомодельності [38].

Таким чином, для матеріалів із великим значенням K_{1c} і низькою границею міцності σ_B (низьковуглецеві сталі) для досягнення умов автомодельності [38] необхідно використовувати зразки більшого діаметра, але вони будуть набагато менші, ніж зразки з однорідного матеріалу [39, 40].

Запропонований підхід до визначення K_{1c} квазікрихких чи в'язких матеріалів, як буде показано нижче, полягає в тому, що умови плоскої деформації у вістрі тріщини досягаються в плоско-паралельному тонкому прошарку, який уварено між двома поверхнями міцнішого і твердішого матеріалу, що гальмує розвиток пластичних деформацій з вершини тріщини, тобто створює умови крихкого руйнування досліджуваної наплавки. При цьому розрахунок фундаментальної характеристики тріщиностійкості K_{1c} можна здійснювати за формулами лінійної механіки руйнування без запису

та розшифрування діаграми руйнування, маючи тільки граничне значення руйнівного зусилля $F = F^*$ та геометричні розміри зразка з тріщиною.

3. Виготовлення зразків для дослідження зварних з'єднань. Циліндричні та призматичні зразки з наплавкою виготовляли за такою технологією. У заготовках діаметром D або товщиною B і десятикратною довжиною L виточували кільцеву канавку глибиною $a = 0,4R$ і висотою $2c = 3$ мм для циліндра або бокову канавку глибиною $a = 0,4H$ – для балки, де R – радіус циліндра по зовнішньому діаметрі; H – висота балки. Потім ці канавки заправляли, а поверхню наплавки обробляли шляхом точіння чи шліфування до діаметра D для циліндричного зразка або до висоти H для балки, посередині висоти цих наплавко наносили концентратори глибиною $d_k/D = 0,8$ або $H_k/H = 0,8$ із радіусом дна $\rho \leq 0,1$ мм. Кінцевою операцією для обох типів зразків є ініціювання вихідної тріщини на дні концентраторів шляхом утомного деформування за запропонованими методиками [37]. Матеріалом основи для виготовлення зразків двох партій служила високовуглецева сталь У7 у стані поставки. Розміри циліндричних заготовок: $D = 25$ мм; $L = 250$ мм; призматичних: $B = 25$ мм; $L = 250$ мм, при цьому висота канавки для наплавлення $2c = 3$ мм. Заплавлення канавок здійснювали аргонодуговим зварюванням, дві партії циліндричних зразків – сталлю 20Х і Ст. 3 і дві партії призматичних зразків – сталлю 20Х і Ст. 3. Після загартовування (нагрів до 1050 К, витримка 20 хв, охолодження в маслі) їх шліфували та нарізали V-подібний концентратор посередині висоти наплавки глибиною до $d_k = 20$ мм і радіусом дна у вістрі $\rho \leq 0,1$ мм для циліндричних зразків і глибиною до $l = 5$ мм і радіусом дна у вістрі $\rho \leq 0,1$ мм для призматичних зразків (рис. 1,а,б).

Режими навантаження зразків двох типів під час ініціювання тріщин від утомленості були сталими з урахуванням міцнісних властивостей матеріалу наплавки. Глибина тріщини порівняно з діаметром циліндричного зразка та висотою призматичного була однаковою, тобто $d/D = 0,7$ і $M/H = 0,7$. Отже, отримали зразки з тріщиною в наплавлених матеріалах, які придатні для визначення K_{Ic} в'язких сталей та їх зварних з'єднань.

Необхідно відзначити, що моделювання роботи в'язкого матеріалу в об'ємі твердішої основи зумовлює сприятливі умови для реалізації крихкого руйнування внаслідок максимального стиснення пластичних деформацій спереду фронту вихідної тріщини як для циліндричного, так і призматичного зразків.

Що стосується технології виготовлення трубчастих зразків із внутрішньою кільцевою тріщиною в наплавці, то її суть зводиться до наступного: спочатку виготовляли ліву і праву частини заготовок п'ятикратної довжини кожна. Після цього їх з'єднували шляхом пресування виступу в отвір (рис. 2,б,в). Потім у місці стику частин нарізали кільцевий концентратор глибиною $D_{тр}$ і кутом у вістрі $\alpha = 60^\circ$. Після заплавлювання його досліджуваним матеріалом, висвердлювання отвору у лівій частині діаметром d_0 , шліфування зовнішньої поверхні в місці наплавки до діаметра D та нарізування на кінцях різьби M отримували трубчастий зразок із внутрішньою кільцевою тріщиною, який придатний для оцінки міцності стикового шва однорідних чи неоднорідних зварних з'єднань (рис. 2,а).

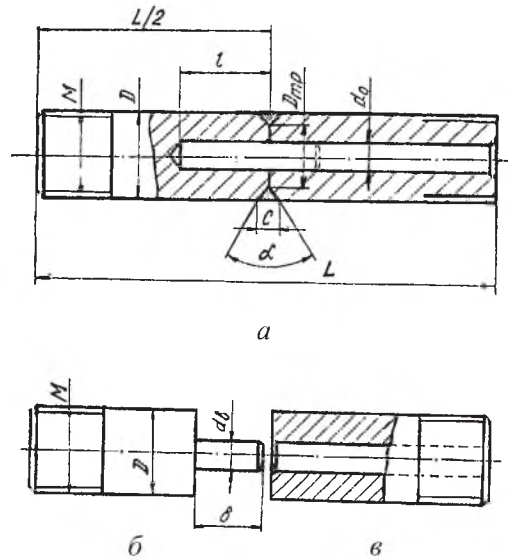


Рис. 2. Складений трубчастий зразок із внутрішньою кільцевою тріщиною в наплавці (а), ліва частина з виступом (б), права частина з отвором (в).

4. **Визначення K_{1c} на циліндричних, призматичних і трубчастих зразках із вихідними тріщинами.** Характеристики K_{1c} стикових зварних з'єднань для силової схеми осевого розтягу циліндричного зразка з кільцевою тріщиною в наплавці визначали за формулою [37]

$$K_{1c} = \frac{F^*}{D\sqrt{D}} y, \quad (11)$$

де безрозмірна функція

$$y = \frac{0,7976\sqrt{1-\lambda}}{\lambda\sqrt{\lambda}\sqrt{1-0,8012\lambda}}; \quad (12)$$

F^* – руйнівне зусилля для циліндричного зразка з кільцевою тріщиною; y – поправкова функція, що залежить від відносного розміру кільцевої тріщини $\lambda = d/D$ (d – діаметр циліндра в площині кільцевої тріщини; D – зовнішній діаметр циліндричного зразка).

Для реалізації силової схеми триточкового згину балкового зразка (рис. 1,б) з боковою тріщиною в наплавці використовується формула [34]

$$K_{1c} = \frac{3F^* L\sqrt{3}}{2B\sqrt{H^3}} f(\epsilon), \quad (13)$$

де безрозмірна функція

$$f(\epsilon) = 1,93 - 3,07\epsilon + 14,53\epsilon^2 - 25,11\epsilon^3 + 25,8\epsilon^4; \quad (14)$$

F^* – руйнівне зусилля для призматичного зразка з боковою тріщиною; $f(\varepsilon)$ – поправкова функція, яка залежить від відносного розміру бокової тріщини; $\varepsilon = l/H$; l – довжина тріщини; H , B , L – висота, товщина та довжина балкового зразка відповідно.

Таким чином, маючи руйнівне зусилля $F = F^*$ під час розтягу циліндра з кільцевою тріщиною або згину балки з боковою тріщиною, геометричні розміри D , d , $\lambda = d/D$ чи l , H , B , $\varepsilon = l/H$ та формули (11), (12) і (13), (14), можна визначити значення K_{1c} для матеріалу зварного з'єднання за вказаними силовими схемами (рис. 1,а,б).

Тріщиностійкість K_{1c} металу шва зварного з'єднання під час розтягу трубчастого зразка з внутрішньою кільцевою тріщиною можна визначити за формулою [41]

$$K_{1c} = \frac{F^*}{D\sqrt{D}} y(\varepsilon, \varepsilon_1). \quad (15)$$

Тут безрозмірна функція

$$y(\varepsilon, \varepsilon_1) = \frac{5,6248(1 - \varepsilon_1)(1 - 0,736(1 - \varepsilon)/(1 - \varepsilon_1))\sqrt{\varepsilon - \varepsilon_1}}{\pi(1 - \varepsilon)(1 - \varepsilon_1)\sqrt{(\varepsilon - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon) + (1 - \varepsilon_1)^2(1 - 0,736(1 - \varepsilon)/(1 - \varepsilon_1)^2)}}, \quad (16)$$

де D – зовнішній діаметр трубчастого зразка; $\varepsilon = D_{тр}/D$ – відносний розмір кільцевої тріщини в трубчастому зразку; $\varepsilon = d_0/D$ – відносний розмір товщини стінки зразка; d_0 – діаметр отвору в трубчастій частині зразка, який дорівнює діаметру виступу d у суцільній циліндричній частині зразка; $y(\varepsilon, \varepsilon_1)$ – поправкова функція, яка враховує відносний розмір внутрішньої кільцевої тріщини та товщину стінки в трубчастому зразку (рис. 3). Маючи значення зусилля $F = F^*$ після руйнування зварного зразка та виміряні геометричні розміри D , $D_{тр}$, d_0 , за формулами (15) і (16) можна розрахувати тріщиностійкість K_{1c} металу шва із заданими механічними властивостями.

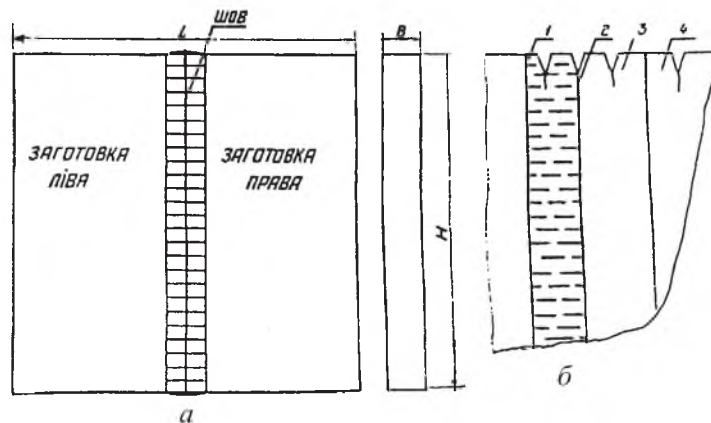


Рис. 3. Зварювання заготовок (а) і місця виготовлення надрізів для ініціювання тріщин у лабораторних зразках зі зварним з'єднанням (б): 1 – Ш; 2 – ЗС; 3 – ЗТВ; 4 – ВМ.

5. Обговорення результатів експериментів.

5.1. *Тріщиностійкість металу наплавки малогабаритних зразків.* Дві партії зразків із тріщинами в наплавках випробовували на розтяг та згин із використанням описаних раніше устаткування та методики [37].

Отримані результати зведено в табл. 1. Там же для порівняння наведено розміри циліндричних і призматичних зразків, розміри наплавки та механічні властивості сталей. Як видно з даних табл. 1, значення K_{1c} добре узгоджуються між собою, що свідчить про коректність оцінок за запропонованими методиками.

У табл. 2 представлено розміри малогабаритних циліндричних і призматичних зразків із наплавками зі сталі Ст. 3 ($\sigma_B = 300$ МПа; $\sigma_{0,2} = 240$ МПа; $\delta = 25\%$; $\psi = 72\%$), а також розміри великогабаритних циліндричних і призматичних зразків, виготовлених із цієї ж сталі без наплавки. Порівнюються і інші техніко-економічні показники для двох типів циліндричних і двох типів балкових зразків, які отримано після випробувань, пов'язаних із визначенням K_{1c} . Ці дані вказують на значну перевагу малогабаритних зразків перед великогабаритними.

Т а б л и ц я 1

Значення тріщиностійкості K_{1c} після випробувань малогабаритних циліндричних і призматичних зразків

Марка матеріалу наплавки та тип випробувального зразка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	D , мм	B , мм	$2c$, мм	K_{1c} , МПа $\sqrt{м}$
Сталь 20Х, нормалізація	620	430	25,0	–	3,0	58,7
Сталь Ст. 3 у стані поставки, циліндричний зразок із кільцевою тріщиною в наплавці	300	240	25,0	–	3,0	52,3
Сталь 20Х, нормалізація	620	430	–	25,0	3,0	62,2
Сталь Ст. 3 у стані поставки, призматичний зразок із боковою тріщиною в наплавці	300	240	–	25,0	3,0	55,6

Т а б л и ц я 2

Техніко-економічні характеристики для двох типів зразків

Характеристика	Малогабаритні зразки	Великогабаритні зразки [35]
Руйнівне зусилля F^* , кН, для циліндричного зразка	30	900
призматичного зразка	18	400
Максимальне зусилля для розривної машини, кН	50	1000
Вартість випробувальної розривної машини, тис. грн.	30	174
Маса випробувального зразка, г	600	30000

Примітка. Розміри циліндричних зразків, мм: $D = 25$, $L = 250$ (малогабаритні); $D = 150$, $L = 1500$ (великогабаритні); розміри призматичних зразків, мм: $B = 25$, $L = 250$ (малогабаритні); $B = 150$, $L = 500$ (великогабаритні).

5.2. *Тріщиностійкість металу пришовної області однорідних зварних з'єднань.* Міцність пришовної ділянки однорідних зварних з'єднань зі сталі 50 вивчали раніше [42]. Спробуємо кількісно оцінити міцність пришовної ділянки таких з'єднань із нормалізованих сталей 09Г2С, Ст. 3 і сталі 35 на циліндричних і призматичних зразках із вихідними тріщинами.

Із цією метою заготовки зварювали за схемаю, показаною на рис. 3,а, з двох карт листового прокату розміром $L \times H \times B = 250 \times 150 \times 20$ мм. Операцію з'єднання заготовок виконували аргонодуговим зварюванням присадними матеріалами дротів, які за хімічним складом близькі до марки досліджуваної сталі.

Після механічного розрізання зварених карт-заготовок на призматичні бруси виготовляли дві партії циліндричних ($D = 15$ мм, $L = 150$ мм) і призматичних ($H = 20$ мм, $B = 15$ мм, $L = 150$ мм) зразків.

У всіх партіях зразків за схемою, показаною на рис. 3,б, у різних місцях пришовної ділянки наносили концентратори глибиною $t = 3$ мм і гостротою дна $\rho \leq 0,1$ мм, зокрема посередині шва (Ш), на межі зони сплавлення (ЗС), в зоні термічного впливу (ЗТВ) та у вихідному матеріалі (ВМ).

За методикою [37] у зразках всіх партій ініціювали тріщини від утомленості. Режими ініціювання відповідали рекомендаціям [35] із розрахунку $K_f \leq 0,67 K_{1c}$ (K_f – коефіцієнт інтенсивності напружень під час утомного руйнування).

Для дослідження пришовної ділянки зварних з'єднань було випробувано по 12 шт. зразків кожної партії.

Статичні випробування на розтях циліндричних та згин призматичних зразків із тріщинами виконували на устаткуванні за методиками [35, 37]. Значення K_{1c} знаходили за формулами (11), (12) та (13), (14). Результати випробувань зведено у табл. 3.

Т а б л и ц я 3

Значення K_{1c} (МПа $\sqrt{м}$) для пришовної ділянки однорідних зварних з'єднань конструкційних сталей

Зона з ініційованою тріщиною у зварному з'єднанні	Циліндричний зразок (сталь)			Призматичний зразок (сталь)		
	09Г2С	Ст. 3	35	09Г2С	Ст. 3	35
Лінія сплавлення (ЛС)	65,1	37,5	42,8	68,0	40,2	47,3
Ш	68,5	39,2	44,3	72,7	41,4	50,2
ЗТВ	70,2	40,4	46,7	75,9	45,6	53,7
Поздовжня орієнтація тріщини до напрямку вальцювання у ВМ	80,4	58,0	72,4	87,2	60,8	76,5
Поперечна орієнтація тріщини до напрямку вальцювання у ВМ	91,4	62,0	78,6	100,3	70,5	83,0

Примітка. Тут і в табл. 4 наведені дані K_{1c} – середні значення за даними випробування трьох зразків для кожного варіанта з'єднання.

Як видно з даних табл. 3, найменшу тріщиностійкість мають зварні з'єднання ЗС, а найбільшу – ВМ. Для металу ЗТВ отримано проміжні значення K_{1c} : вони більші, аніж для ЗС, і менші, аніж для ВМ. На тріщиностійкість досліджуваних сталей вплинула і їх анізотропія: більший опір руйнуванню характерний для поперечного орієнтування тріщини до вальцювання порівняно з паралельним.

Отже, запропонований підхід дав можливість ранжирувати міцність пришовної ділянки за тріщиностійкістю на двох типах зразків із тріщинами відносно вихідного матеріалу досліджуваних сталей, чого не можна було зробити на підставі даних випробувань стандартних зразків типу Шарпі або Менаже на ударну в'язкість.

5.3. *Тріщиностійкість металу шва неоднорідних зварних з'єднань.* Розглянемо зміну тріщиностійкості наплавленого металу під час з'єднання двох різних металів (сталей) на модернізованому зварювальному автоматі типу А-825М, переоснащеному в автоматичну установку [1]. Із цією метою виготовляли шість варіантів складених із двох частин циліндричних зразків [43] (рис. 2,а) і зварених із різним поєднанням конструкційних (20Х, 30ХГСА після нормалізації і гартування) і низьковуглецевих (35, Ст. 3 після нормалізації) сталей. Тобто ліву частину (рис. 2,б) виготовляли з однієї марки сталі, праву (рис. 2,в) – з іншої.

Режими й умови кругового зварювання кільцевого концентратора в місці стику частин були постійними. Швидкість обертання зразка під час вертикального базування $v = 0,14 \text{ с}^{-1}$, кількість проходів по замкнутому контуру $n = 2$, для зварювання використовували дріт Св08Г2С діаметром 1,6 мм.

Після висвердлювання у лівій частині отвору діаметра d_0 , точіння та шліфування зовнішнього діаметра D отримували трубчасті зразки з внутрішньою кільцевою тріщиною у шві, які використовували при випробуваннях для визначення K_{1c} .

Геометричні розміри цих зразків такі: $D = 14 \text{ мм}$; $D_{\text{тр}} = 10 \text{ мм}$; $d_0 = 7 \text{ мм}$ і загальна довжина $L = 80 \text{ мм}$. Експерименти проводили шляхом осьового розтягу зразка до руйнування на розривній машині РМ-10 зі швидкістю переміщення рухомого захоплювача $v = 0,5 \text{ мм/хв}$. Розраховані за формулами (15) і (16) значення K_{1c} для семи варіантів зварних з'єднань із різних сталей представлено в табл. 4. Зазначимо, що кожна марка сталі мала свій структурний стан за рахунок заданого режиму термічного зміцнення.

Як видно з даних табл. 4, найбільш тріщиностійким є метал шва зварного з'єднання сталі Ст. 3 після нормалізації (1133 К) і сталі 30ХГСА після гартування (1133 К) і відпуску (833 К) (варіант II), а найменш тріщиностійким – метал шва зварного з'єднання сталей Ст. 3 і 20Х після нормалізації (1133 К) (варіант III). Решта варіантів зварних з'єднань мають проміжні значення тріщиностійкості K_{1c} .

Таким чином, запропонований підхід дозволив кількісно ранжувати міцність неоднорідних зварних з'єднань за тріщиностійкістю K_{1c} на трубчастому зразку з внутрішньою кільцевою тріщиною у шві і на цій основі запропонувати конкретні рекомендації щодо їх вибору для практики.

Значення тріщиностійкості K_{1c} для неоднорідних зварних з'єднань конструкційних сталей

Варіант зварного з'єднання	Марка сталі для неоднорідних з'єднань і режими їх термообробки	Середні значення тріщиностійкості K_{1c} , МПа $\sqrt{м}$
I	Ст. 3 і 30ХГСА після нормалізації (1133 К)	44,3
II	Ст. 3 після нормалізації (1133 К) і 30ХГСА після гартування (1133 К) і відпуску (833 К)	47,4
III	Ст. 3 і 20Х після нормалізації (1133 К)	22,3
IV	Ст. 3 після нормалізації (1133 К) і 20Х після гартування (1133 К) і відпуску (773 К)	34,0
V	30ХГСА після гартування (1133 К) і відпуску (773 К) і 30ХГСА після нормалізації (1133 К)	38,6
VI	20Х після гартування (1133 К) і відпуску (773 К) і 20Х після нормалізації (1133 К)	36,1
VII	Ст. 3 і 35 після нормалізації (1133 К)	28,2

Висновки

1. Розроблено методики оцінки міцності стикових зварних з'єднань, що складаються із низькоміцних і високоміцних ділянок конструкцій малогабаритних циліндричних і призматичних зразків із тріщинами, для визначення K_{1c} квазікрихких і в'язких матеріалів шляхом заплавлення кільцевих і бокових канавок досліджуванім матеріалом (наплавкою) із заданими фізико-механічними властивостями.

2. Стисненість пластичної деформації у вістрі тріщини досягається завдяки несучій здатності високоміцної основи (матриці) зразка, яка створює умови для крихкого руйнування для досліджуваної наплавки. При цьому розрахунок за формулами лінійної механіки руйнування значення характеристики K_{1c} можна здійснювати без запису та розшифрування діаграми руйнування, маючи тільки руйнівне зусилля $F = F^*$ та геометричні розміри зразка з тріщиною.

3. На основі випробувань різних ділянок стикового зварного з'єднання зі сталей 35, 09Г2С, Ст. 3 виявлено, що найменший опір руйнуванню (K_{1c}) має зона сплавлення матеріалу з основою, що зумовлено негативним впливом залишкових напружень та інтенсивних дифузійних процесів, які відбуваються в розплавленій ванні під час зварювання і погіршують чистоту структури металу шва.

4. Схема осевого розтягу трубчастого зразка з внутрішньою кільцевою тріщиною в кільцевій наплавці створює умови для крихкого руйнування за аналогією п. 3 і є ефективним інструментом ранжування міцності металу шва неоднорідних зварних з'єднань за параметром K_{1c} . Для прогнозування довговічності трубчастих деталей з неоднорідними зварними з'єднаннями

такий зразок найреальніше моделює роботу зварених трубопроводів, що дозволяє оцінювати міцність шва зварного з'єднання з урахуванням впливу різних середовищ, тиску тощо.

Резюме

Описаны методики оценки прочности стыковых сварных соединений по трещиностойкости путем осевого растяжения малогабаритных цилиндрических образцов с кольцевой трещиной и трьохточечного изгиба балочных образцов с боковой трещиной, которые инициированы в низко- или среднепрочных наплавках, вваренных у высокопрочные основы образцов. Детально исследовано пришовный участок стыкового сварного соединения, где обнаружено, что металл зоны сплавления имеет наименьшую трещиностойкость, исходный материал независимо от типа испытываемых образцов – наибольшую. Значения трещиностойкости металлов шва и зоны термического влияния по сравнению с таковыми зоны сплавления больше, а по сравнению с исходным материалом – меньше. На примере осевого растяжения трубчатого образца с внутренней кольцевой трещиной в наплавке исследована трещиностойкость для семи вариантов неоднородных сварных соединений в зависимости от влияния режимов термической обработки сталей: 35 и Ст. 3 после нормализации, 09Г2С, 20Х и 30ХГСА после закалки, среднего отпуска и нормализации.

1. *Козут Н. С., Шахматов М. В., Ерофеев В. В.* Несущая способность сварных соединений. – Львов: Світ, 1991. – 184 с.
2. *Махненко В. И., Починок В. Е.* Применение критериев механики разрушения к расчету на прочность сварных соединений с предусмотренными несплошностями трещиноподобного типа // Автомат. сварка. – 1982. – № 1. – С. 1 – 6.
3. *Серенсен С. В., Гиренко В. С., Дейнего и др.* Критическое раскрытие трещин при квазихрупком и хрупком разрушении // Там же. – № 2. – С. 1 – 6.
4. *Козут М. С., Караїм В. С., Лебідь Н. М., Панько О. І.* Оцінка міцності стикових зварних з'єднань зі сталі 50 за критеріями тріщиностійкості // Пробл. прочности. – 2003. – № 2. – С. 147 – 155.
5. *Гиренко В. С.* Определение вязкости разрушения сварных соединений по критерию δ_K // Хладостойкость сварных соединений. – Якутск, 1978. – С. 9 – 15.
6. *Николс Р.* Оценка сопротивления материалов разрушению по критическому раскрытию трещин // Новые методы оценки сопротивления материалов хрупкому разрушению. – М.: Мир, 1972. – С. 11 – 18.
7. *Новые методы сопротивления металла хрупкому разрушению* / Под ред. Ю. Н. Работнова. – М.: Мир, 1972. – 361 с.

8. Панасюк В. В., Андрейків А. Е. К теории определения критического раскрытия трещины // *Механика деформируемых тел и конструкций*. – М.: Машиностроение, 1975. – С. 373 – 378.
9. Панасюк В. В., Андрейків О. С., Стадник М. М. Визначення величини розкриття вершини тріщини у пружнопластичних тілах // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 1990. – № 6. – С. 53 – 61.
10. Писаренко Г. С., Науменко В. П. Экспериментальные методы в механике разрушения материалов // Там же. – 1982. – № 2. – С. 28 – 41.
11. Писаренко Г. С., Стрижало В. А. Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. – Киев: Наук. думка, 1986. – 264 с.
12. Пустовой В. Н. Исследование работоспособности элементов конструкций в рамках КРТ-критерия // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 1992. – № 3. – С. 111 – 112.
13. Леонов М. Я., Панасюк В. В. Развитие найдрібніших тріщин у твердому тілі // *Прикл. механіка*. – 1959. – 5, № 4. – С. 391 – 401.
14. Ильин А. В., Никонов Ю. А., Прохоров Д. В. Метод определения критического значения J -интеграла в условиях стабильного роста трещин // *Пробл. прочности*. – 1992. – № 3. – С. 18 – 25.
15. Нешпор Г. С., Кудрявцева Г. Д. Применение R -кривой для оценки вязкого разрушения // *Завод. лаб.* – 1986. – № 4. – С. 55 – 58.
16. Писаренко Г. С., Науменко В. П., Волков Г. С. Определение трещиностойкости материалов на основе энергетического контурного интеграла. – Киев: Наук. думка, 1978. – 123 с.
17. Смоленцев В. И. Метод определения J -интеграла и его составляющих // *Завод. лаб.* – 1979. – № 1. – С. 73 – 76.
18. Begley J. A. and Landes I. D. The J -integral as a fracture criterion // *Fracture Toughness*. – ASTM STP 514. – 1977. – P. 1 – 23.
19. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
20. Черепанов Г. П. Современные проблемы механики разрушения // *Пробл. прочности*. – 1987. – № 8. – С. 3 – 13.
21. Rice J. R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks // *J. Appl. Mech., Ser. E*. – 1968. – No. 35. – P. 287 – 298.
22. Rice J. R., Paris P. C., and Merkle J. G. Some further results of J -integral analysis and progress in flow growth and fracture toughness testing // *ASTM STP 536*. – 1973. – P. 231 – 245.
23. Георгиев М. Н., Морозов Е. М. О достоверности определения K_{Ic} с помощью J -интеграла // *Завод. лаб.* – 1980. – № 3. – С. 273 – 277.
24. Маркочев В. М., Морозов Е. М. Работа разрушения и работа пластической деформации в испытаниях на вязкость разрушения // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 1978. – № 6. – С. 71 – 74.

25. Романив О. Н., Никифорчин Г. Н. Использование метода J -интеграла для оценки трещиностойкости конструкционных материалов // Физ.-хим. механика материалов. – 1978. – № 3. – С. 80 – 95.
26. JSME 5.001-1981. Method of Elastic-Plastic Fracture Toughness Testing J_{Ic} . – Japanese Society for Mechanical Engineers, 1981. – 15 p.
27. Standard Test Method for J_{Ic} . A Measure of Fracture Toughness // ASNI/ASTM E. – 1981. – No. 813. – 10 p.
28. SINTAP defect assessment procedure for strength mis-matched structures // Eng. Fract. Mech. – 2000. – 67, No. 6. – P. 529 – 546.
29. The engineering treatment model // Int. J. Press. Vess. Piping. – 2000. – 77. – P. 905 – 981.
30. Fracture mechanics analysis of the BIMET welded pipe tests // Ibid. – 2004. – 81. – P. 251 – 277.
31. Козут М. С. Визначення тріщиностійкості зварних з'єднань багатозразовим випробуванням призматичного зразка з боковою тріщиною // Вісн. держ. ун-ту “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні”. – 1999. – Вип. № 371. – С. 79 – 82.
32. Лебідь Н. М., Русинко К. М. Оцінка тріщиностійкості зварних з'єднань із квазікрихких і в'язких матеріалів за критерієм критичного розриву тріщини // Там же. – С. 65 – 71.
33. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Ковчик С. Е. Методы и оценки трещиностойкости конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1977. – 276 с.
34. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – Киев: Наук. думка, 1991. – 415 с.
35. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 61 с.
36. Черепанов Г. П., Каплун А. Б., Пучков Ю. И. О влиянии масштабного фактора на хрупкую прочность // Пробл. прочности. – 1970. – № 7. – С. 36 – 41.
37. Козут Н. С. Трещиностойкость конструкционных материалов. – Львов: Вища шк., 1986. – 160 с.
38. Андрейкив А. Е. Пространственные задачи теории трещин. – Киев: Наук. думка, 1982. – 348 с.
39. Махутов Н. А., Москвичов В. В. Определение характеристик разрушения при неупругом деформировании цилиндрических образцов с трещиной // Завод. лаб. – 1978. – № 10. – С. 254 – 263 с.
40. Махутов Н. А., Морозов Е. М. Методы испытаний в механике разрушения // Там же. – 1982. – № 2. – С. 105 – 109.

41. *Козут Н. С., Панько И. Н.* Применение трубчатого образца для определения трещиностойкости материала сосудов давления и их сварных соединений // Физ.-хим. механика материалов. – 1984. – № 4. – С. 63 – 67.
42. *Козут М. С., Лебідь Н. М., Караїм В. С., Кунинець І. В.* Методика визначення міцності стикових швів зварних з'єднань рейок // Вісн. Львів. держ. аграрного ун-ту “Агроінженерні дослідження”. – 2001. – № 5. – С. 150 – 160.
43. *Козут Н. С.* Сборный трубчатый образец для определения трещиностойкости вязких материалов сварных соединений // Завод. лаб. – 1986. – № 2. – С. 76 – 78.

Поступила 02. 02. 2005