

ОЦІНКА МІЦНОСТІ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЗА СИЛОВИМ K_{Ic} КРИТЕРІЄМ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ НА МАЛОГАБАРИТНИХ ЗРАЗКАХ З НАПЛАВКАМИ

В роботі запропоновано методики оцінки тріщиностійкості стикових зварних з'єднань за критерієм K_{Ic} , які базуються на випробуванні малогабаритних циліндричних, призматичних і трубчастих зразків з тріщинами в основному матеріалі, зварному шві та зоні сплавлення.

Встановлено, що найменший опір руйнуванню має зона сплавлення досліджуваного матеріалу.

На величину тріщиностійкості (K_{Ic}) зварного з'єднання істотно впливають твердість наплавки, яка зростає із збільшенням вмісту вуглецю та бору, що входять до складу зварювального дроту. Задовільна збіжність значень K_{Ic} , отриманих на трьох типах випробувальних зразків, засвідчує коректність запропонованих методик оцінки міцності зварних з'єднань.

Постановка проблеми та завдання дослідження

В механіці руйнування елементів конструкцій зі зварними з'єднаннями велику увагу приділяють розробленню методик оцінки опору металу шва і пришовної ділянки поширенню тріщини. Відомо, що найбільш схильних до руйнування є зварні з'єднання із високоміцних конструкційних, високовуглецевих та інструментальних сталей, особливо після їх термічного зміцнення.

Істотно впливають на опір матеріалу поширенню тріщини марка вихідного матеріалу та марка зварювального дроту.

Вплив механічної неоднорідності зварних з'єднань на їх міцність за критеріями крихкого і квазікрихкого руйнування - критичного коефіцієнту інтенсивності напружень K_c (K_{Ic}) та критичного розкриття тріщини δ_c досліджували в працях [1,2]. Методики визначення δ_c на циліндричних і призматичних зразків з концентраторами-тріщинами у наплавках подані в працях [3,4].

Проте недостатньо досліджені вплив технологічних і конструктивних чинників на тріщиностійкість K_{Ic} , зокрема способу і геометрії формування шва, на простих і економічних лабораторних зразках, які можна було би застосовувати в інженерній практиці.

Мета роботи – розробити методики оцінки міцності металу шва та пришовної ділянки для стикових зварних з'єднань, які ґрунтуються на випробуванні малогабаритних зразків з тріщинами і теоретичних розв'язках задач механіки руйнування, та дослідити тріщиностійкість окремих ділянок однорідних і неоднорідних зварних з'єднань зі стиковими швами на малогабаритних циліндричних, призматичних і трубчастих зразках за критерієм механіки руйнування K_{Ic} залежно від марки наплавлювального дроту.

Науково-методичні підстави дослідження

Основною підставою для реалізації науково-методичних досліджень є методики визначення K_{Ic} при розтягуванні та згинанні малогабаритних циліндричних і призматичних зразків з тріщинами у наплавках (прошарках), в основі більш твердого матеріалу, трубчастих зразків, складених із двох частин, виготовлених із неоднорідних матеріалів і зварених у вигляді кільцевого шва заданим матеріалом наплавленого дроту [4, 5].

Для коректного визначення K_{Ic} на таких зразках необхідно дотримуватись умов автотодельності зони передруйнування, виходячи з їх розмірів. Зокрема – для циліндричного і трубчастого зразків діаметрів робочої ділянки D визначається співвідношенням [6, 7]:

$$D \geq 2,3(K_{Ic} / \sigma_{0,2})^2, \quad (1)$$

- для призматичного зразка [8]:

$$B \geq 2,5(K_{Ic} / \sigma_{0,2})^2 \quad (2)$$

Тут $\sigma_{0,2}$ – умовна межа текучості; B – товщина призматичного зразка.

Задавшись висотою виточки $2c=3$ мм і враховуючи, що відносний розмір тріщини $\lambda=d/D=0,7$ для циліндричного зразка (рис.1,а) і $\varepsilon=l/H=0,7$ для призматичного зразка (рис.1,б), розміри пластичної зони та виточки (рис.1,в) можна визначити за такими співвідношеннями:

$$x_0 = c \cdot \operatorname{tg} 72^\circ; \quad c \leq x_0 \operatorname{tg} 72^\circ, \quad (3)$$

або
$$c \leq 0,035 \cdot 0,7 \cdot D \operatorname{tg} 72^\circ \quad (4)$$

для циліндричного і трубчастого зразків;

$$C \leq 0,035 \cdot 0,7 \cdot B \operatorname{tg} 72^\circ \quad (5)$$

для призматичного зразка. З (3) і (4) знаходимо $D, B \geq 20,78$ мм.

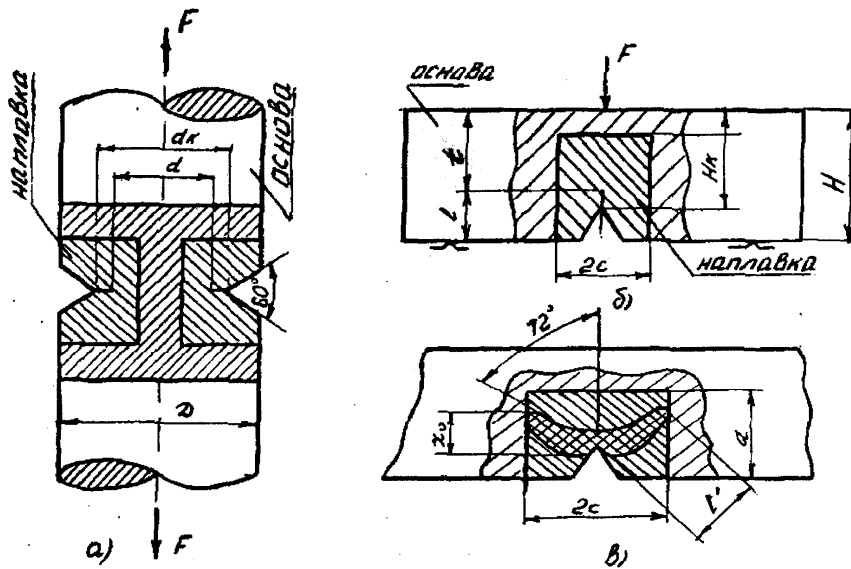


Рис.1. Схема навантаження циліндричного – (а) і призматичного - (б) зразків з тріщиною у наплавці та форма пластичної зони у вершині тріщини - (в) $\alpha = 72^\circ$ - кут нахилу пелюсток пластичної зони до площини тріщини; x_0 – товщина ізоклини; l' – довжина ізоклини; $a, 2c$ – глибина та ширина наплавки відповідно

Отже, якщо циліндричний, трубчастий, чи призматичний зразки виготовлені із матеріалу, для якого при D і $B=21$ мм виконуються умови автомодельності (1), (2) і висота виточки $2c=3$ мм, то визначене K_{Ic} є достовірною характеристикою матеріалу наплавки.

Якщо матеріал наплавки характеризується високою міцністю і низькою пластичністю (високоміцні сталі, сплави), то коректне значення K_{Ic} можна отримати і при менших значеннях D, B випробувальних зразків. І навпаки, для матеріалів з низькою міцністю та високою пластичністю (низьковуглецеві сталі, сплави) для досягнення умов автомодельності необхідні зразки з більшими значеннями D і B .

Треба також зазначити, що зразки з регламентованою виточкою для наплавлення досліджуваного матеріалу будуть набагато меншими від розмірів зразків, виготовлених із суцільного матеріалу [10, 11].

Результати досліджень

Тріщиностійкість K_{Ic} при осьовому розтягу циліндричного зразка (рис.1,а) з кільцевою тріщиною в наплавці визначали за формулою [12]:

$$K_{Ic} = \frac{F^*}{D\sqrt{D}} y, \quad (6)$$

де y - безрозмірна функція, яка визначається за формулою:

$$y = \frac{0,7976\sqrt{1-\lambda}}{\lambda\sqrt{\lambda}\cdot\sqrt{1-0,8012\cdot\lambda}}, \quad (7)$$

де F^* - руйнівне зусилля.

Для випадку трьохточкового згину балкового зразка (рис.1,б) з боковою тріщиною в наплавці визначали із рівняння [6]:

$$K_{Ic} = \frac{3F^* \cdot L\sqrt{3}}{2B\sqrt{H^3}} \cdot f(\varepsilon), \quad (8)$$

де $f(\varepsilon)$ - така безрозмірна функція:

$$f(\varepsilon) = 1,93 - 3,07\varepsilon + 14,53\varepsilon^2 - 25,11\varepsilon^3 + 25,8\varepsilon^4. \quad (9)$$

Тут F^* - руйнівне зусилля для призматичного зразка з боковою тріщиною; $\varepsilon=l/H$, (l - довжина тріщини; H, B, L - відповідна висота, товщина та довжина призматичного зразка).

Таким чином, маючи руйнівне зусилля F^* при розтягу циліндра з кільцевою тріщиною чи згині балки з боковою тріщиною, а також геометричні розміри $D, d, \lambda=d/D$ чи $L, H, B, \varepsilon = l/H$ і користуючись відповідними формулами (6),(7) і (8),(9), можна визначити значення K_{Ic} для матеріалу зварного з'єднання.

Тріщиностійкість K_{Ic} металу зварного шва при розтягу трубчастого зразка з внутрішньою кільцевою тріщиною (рис.2) визначали за формулою [13]:

$$K_{Ic} = \frac{F^*}{D\sqrt{D}} \cdot y(\varepsilon, \varepsilon_1), \quad (10)$$

де $y(\varepsilon, \varepsilon_1)$ безрозмірна функція

$$y(\varepsilon, \varepsilon_1) = \frac{5,6248(1-\varepsilon_1)(1-0,736(\frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon_1}))\sqrt{(\varepsilon-\varepsilon_1)}}{\pi(1-\varepsilon)(1-\varepsilon_1) \cdot \sqrt{(\varepsilon-\varepsilon_1)(1-\varepsilon) + (1-\varepsilon)^2 \left(1-0,736(\frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon_1})^2\right)}}. \quad (11)$$

Тут D - зовнішній діаметр трубчастого зразка; $\varepsilon = D_{mp}/D$ - відносний розмір кільцевої тріщини в трубчастому зразку; $\varepsilon = d_0/D$ - відносний розмір товщини стінки трубчастого зразка; d_0 - діаметр отвору в трубчастій частині зразка, який рівний діаметру виступу d_e у суцільній циліндричній частині зразка. Визначивши з експерименту значення F^* при руйнуванні зварного зразка та вимірявши його геометричні розміри D, D_{mp}, d_0 , за формулами (10) і (11) можна підрахувати тріщиностійкість K_{Ic} металу шва із заданими механічними властивостями.

При дослідженні міцності зварних з'єднань використано три методики: осьовий розтяг циліндричного зразка з зовнішньою кільцевою тріщиною, трьохточковий згин балкового зразка з боковою тріщиною і осьовий розтяг трубчастого зразка з внутрішньою кільцевою тріщиною.

В якості матеріалу наплавки взято чотири марки порошкового дроту: ПП-АН19; ПП-АН125; ПП-АН170М2 і ПП-АН170. Діаметр дроту $D=2,6$ мм для всіх марок.

Кожна марка порошкового дроту мала сертифікат, завод виготовлювач, номер плавки.

Хімічний склад і твердість зазначених марок порошкових дротів наведено в табл.1.

Таблиця 1

Вміст хімічних елементів і твердість порошкових дротів

№	Марка	Хімічні елементи, %						Твердість HRC
		C	Cr	B	Ti	Mo	Mn	
1.	ПП-АН19	0,11	-	-	-	-	1,5	-
2.	ПП-АН125	2,00	15,00	0,60	0,20	-	-	48...54
3.	ПП-АН170М2	0,75	19,00	3,00	0,60	1,80	-	58...61
4.	ПП-АН170	0,75	19,00	3,00	0,60	-	-	62...65

Примітка: Для всіх марок порошкового дроту вміст фосфору в межах $P=0,01...0,02\%$ та сірки $S=0,015...0,02\%$. Решта до вмісту хімічних елементів порошкових дротів належить залізу (Fe).

Виготовили три партії циліндричних, призматичних і трубчастих зразків із сталі 35Л. Розмір $D, B=25$ мм і $L=200$ мм (рис.1,а,б), а також $D=25$ мм, $d_0=10$ мм, $L=200$ мм (рис.2,а,б) відповідно.

Після виготовлення кільцевої виточки шириною $2c=3$ мм і глибиною $d=5$ мм в циліндричних зразках і шириною $2c=3$ мм і глибиною $a=15$ мм в призматичних зразках, а також шириною $2c=3$ мм і глибиною $D_{mp}=20$ мм для трубчастих зразків, їх заправляли (по 3 зразки в кожній партії) порошковим дротом марок ПП-АН19, ПП-АН125, ПП-АН170, ПП-АН170М2 шляхом зварювання автоматом А-825М.

Фінішними операціями були шліфування та нарізання V-подібного кільцевого концентратора у наплавці глибиною $d_k=20$ мм з радіусом дна при вершині $\rho \leq 0,1$ мм для циліндричних зразків і $l=5$ мм, $\rho \leq 0,1$ мм для призматичних зразків відповідно.

Втомні тріщини в циліндричних і трубчастих зразка ініціювали при напруженнях $\sigma_{3z} \leq 0,6 \cdot \sigma_T$. Де σ_T – межа текучості зварювального дроту.

В обох типах зразків відносна глибина тріщини була однаковою, тобто $d/D=t/H=0,7$ (рис.2,а,б).

Для трубчастих зразків внутрішні кільцеві тріщини створювали шляхом складання лівої та правої частин (виступ-отвір) до змикання, а потім подальшого нарізання V-подібного кільцевого концентратора в місці стику частин, його заплавлення, точіння шліфування та нарізання різьби на кінцях зразка.

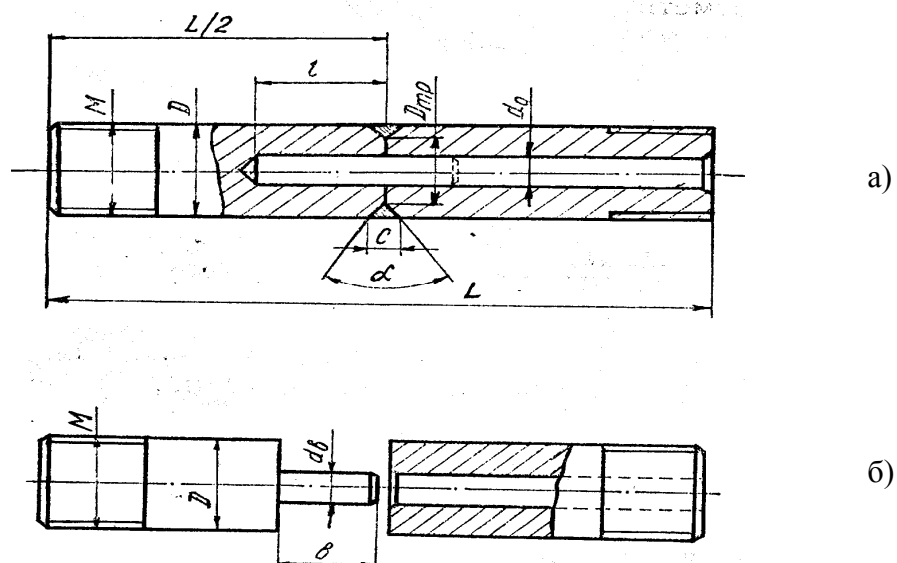


Рис.2. Складений трубчастий зразок з внутрішньою кільцевою тріщиною в наплавці – (а); ліва і права частини; зразка – (б)

Випробування трьох типів зразків на розтяг та згин виконали за методиками [11,12]. Значення K_{Ic} , для шва і металу по лінії сплавлення для чотирьох марок наплавки обчислено за формулами (6) – (11) і наведено в табл.2. Там же для порівняння представлено значення K_{Ic} основного матеріалу (Сталі 35 Л), із якої були виготовлені дослідні зразки.

Таблиця 2.

Значення K_{Ic} ділянок зварного з'єднання

№ пп	Марка порошкового дроту	Тріщиностійкість K_{Ic} , МПа· $\sqrt{м}$								
		Циліндричний зразок			Призматичний зразок			Трубчастий зразок		
		Лінія сплав- лення	Звар- ний шов	Осно- вний метал	Лінія сплав- лення	Звар- ний шов	Осно- вний метал	Лінія сплав- лення	Звар- ний шов	Осно- вний метал
1.	ПП-АН19	46,3	50,2	78,6	48,4	52,4	82,1	51,1	54,3	85,2
2.	ПП-АН125	35,7	40,8		37,7	43,7		40,3	46,9	
3.	ПП-АН170М2	21,8	30,1		24,2	34,2		27,5	36,1	
4.	ПП-АН170	18,9	26,5		20,8	30,8		23,2	32,2	

Примітка: наведені дані K_{Ic} характеризують середнє арифметичне значення після випробувань трьох зразків для кожного варіанту наплавки зварного з'єднання.

Як видно з табл.2 найменшу тріщиностійкість має метал наплавки вздовж лінії сплавлення після наплавлення порошковим дротом ПП-АН170, а найбільшу – після наплавлення порошковим дротом ПП-АН19. Це саме стосується металу зварного шва з дещо більшим зростанням значень K_{Ic} відповідно. Для зварного шва і лінії сплавлення виконаних порошковими дротами ПП-АН125 і ПП-АН170М2 одержано проміжні значення тріщиностійкості K_{Ic} .

На наш погляд підвищення твердості НРС металу наплавки обумовлено збільшеним вмістом бору та вуглецю в порошкових дротах. Візуальними обстеженнями зламів циліндричних, і призматичних зразків виявлено крихкий характер руйнування поверхні зварного шва після наплавки порошковим дротом ПП-АН170, а також квазікрихке руйнування зварного шва після наплавки порошковим дротом ПП-АН19.

Разом з тим виявлено, що чим більша твердість металу наплавки, тим більша різниця значень K_{Ic} зони сплавлення і основного матеріалу і навпаки (див. дані в табл.2). Збіжність значень K_{Ic} , визначена на трьох типах випробувальних зразків, вказує на коректність запропонованих методик для оцінки тріщиностійкості стикових зварних з'єднань.

Висновки

1. Розроблено методики оцінки тріщиностійкості стикових зварних з'єднань, які базуються на випробуванні складових (із низькоміцних і високоміцних ділянок) малогабаритних циліндричних, призматичних і трубчастих зразків із тріщинами.
2. На основі проведених досліджень ділянок зварного з'єднання виявлено, що найменший опір руйнуванню за критерієм K_{Ic} має зона сплавлення досліджуваного матеріалу з основним матеріалом. Зниження тріщиностійкості K_{Ic} зварного з'єднання обумовлено зростанням твердості металу наплавки. Регулюванням величини вмісту бору в порошковому дроті можна створювати наплавки різної твердості, схильні як до крихкого, так і до квазікрихкого руйнування.
3. Задовільна узгодженість значень K_{Ic} , отриманих на трьох типах зразків, свідчить про коректність запропонованих методик.

Three methods of joint durability estimation are offered in work welded joints after the power criterion K_{Ic} , which are based on constituents low from strong and high strong's areas of constructions of small cylinder,

prismatic and tubular standards with cracks in the basic material, stitch and area of alloy of explored material with the initial material. It is set, that the least resistance to destruction the area of alloy of explored material on the melting in the comparison with the initial material has. In addition on the quantitative size of crack resistance (K_{Ic}) welded joints substantially influence got hardness on the melting, which grows from maintenance of carbon (C) and bor (B), that are included in the chemical composition of powder-like wire, by which weld welded joint. Good results of the K_{Ic} values, calculated on three types of tester standards confirms about correctness of offered methods the concerning estimation of durability of elements of constructions with welded joints.

Література

1. Влияние шелевидных дефектов на границе сплавления на несущую способность механически неоднородных сварных соединений. М.В.Шахматов, В.В.Ерофеев, В.И.Михайлов и др. В кн. Применение механики разрушения для оценки прочности и надежности сварных соединений и конструкций. – Л., 1983. – С.74-78.
2. Махненко В.И., Починок В.Е. Применение критериев механики разрушения к расчету на прочность сварных соединений с предусмотренными несплошностями трещинообразного типа // Автоматическая сварка. – 1982. - №1. – С.1-6.
3. Лебідь Н.М., Русинко К.М. Оцінка тріщиностійкості зварних з'єднань із квазікрихких і в'язких матеріалів за критерієм критичного розкриття тріщини // Вісник державного університету “Львівська політехніка”. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні. – 1999. - №371. – С.65-71.
4. Когут Н.С. Трещиностойкость конструкционных материалов. – Львов: Выща школа. 1986. - 160 с.
5. Когут Н.С. Сборный трубчатый образец для определения трещиностойкости вязких материалов сварных соединений // – Заводская лаборатория.- 1986. - №2. – С.76-78.
6. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Ковчик С.Е. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. – Киев: Наукова думка. - 1977. – 277 с.
7. Когут Н.С., Шахматов М.В., Ерофеев В.В. Несущая способность сварных соединений. – Львов: Світ. - 1991. – 184 с.
8. 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.
9. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука. - 1974. – 640 с.
10. Андрейкив А.Е. Пространственные задачи теории трещин. Киев: Наукова думка. - 1982. – 348 с.
11. Махутов Н.А., Москвичов В.В. Определение характеристик разрушения при неупругом деформировании цилиндрических образцов с трещиной. //– Заводская лаборатория. – 1982. - №2. - С.105-109.
12. Когут М.С., Лебідь Н.М., Караїм В.С., Кунинець І.В. Методика визначення міцності стикових швів зварних з'єднань рейок // Вісник Львівського державного аграрного університету “Агроінженерні дослідження”. – 2001. - №5. – С.150-160.
13. Когут Н.С., Панько И.Н. Применение трубчатого образца для определения трещиностойкости материала сосудов давления и их сварных соединений // Физико-химическая механика материалов. – 1984. - №4. – С.63-67.

Одержано 16.05.2003 р.