

## ВПЛИВ КОРОЗІЙНОГО РОЗЧИНЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МЕТАЛУ НА КОЕФІЦІЄНТ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ У СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ

А. В. МОЛТАСОВ, А. В. КЛИМЕНКО

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ*

Досліджено вплив розчинення поверхневого шару металу зразків стикових зварних з'єднань зі сталі 09Г2С анодно-катодним процесом в електроліті на геометричні параметри зварного шва. Так, наприклад, після корозійних випробувань радіус переходу від металу шва до основного металу на лицьовій стороні з'єднання збільшився з 3,07 до 3,88 мм, а на його кореневій стороні – з 2,16 до 3,09 мм. Зміна геометричних параметрів зварного шва призводить до зміни коефіцієнтів концентрації напружень (ККН), які впливають на циклічну довговічність зварних з'єднань. Тому виконано аналітичні розрахунки ККН у зразку стикового зварного з'єднання зі сталі 09Г2С до та після розчинення поверхневого шару металу. При цьому існуючу формулу для їх визначення на кореневій стороні з'єднання модифіковано для випадку, коли підніжжя лицьового та кореневого підсилень знаходяться досить близько одне від одного. Встановлено, що після корозійного розчинення поверхневого шару металу максимальне значення ККН у досліджуваному зразку зменшується з 1,87 до 1,67.

**Ключові слова:** *стикове зварне з'єднання, корозивне середовище, концентрація напружень, розчинення поверхневого шару, радіус переходу від шва до основного металу.*

The dissolution of the surface layer of metal of the samples of butt welded joints made of 09Г2С steel by the anodic-cathodic process in the electrolyte, as a result of which the geometric parameters of the welded joint changed was studied. So, for example, after corrosion tests the radius of transition from the weld metal to the base metal on the front side of the joint increased from 3.07 to 3.88 mm, and on its root side – from 2.16 to 3.09 mm. Changes in the geometrical parameters of a welded joint affect the value of the stress concentration factors (SCF) which determine fatigue life of the welded joints. Therefore, analytical calculations of the SCF in the sample of the 09Г2С steel butt weld before and after dissolution of the metal surface layer were performed. In this case the existing formula for their determination on the root side of the joint was modified in the case when the bases of facial and root reinforcements were close enough. It was found that after corrosion dissolution of the metal surface layer, the maximum value of the SCF in the specimen decreased from 1.87 to 1.67.

**Keywords:** *butt welded joint, corrosion environment, concentration of stresses, dissolution of the surface layer, radius of transition from a weld to the base metal.*

**Вступ.** Здебільшого на зварні металоконструкції довготривалої експлуатації діють змінні навантаження та корозивні середовища, внаслідок чого відбувається корозійне розчинення поверхневого шару металу, утворюються корозійні пошкодження тощо. Це призводить до зниження розрахункових характеристик опору втомі основного металу та зварних з'єднань і, відповідно, сприяє передчасному корозійно-втомному руйнуванню [1–4]. Відомо, що характеристики опору втомі зварних з'єднань залежать від залишкових зварювальних напружень, коефіцієнтів

концентрації напружень (ККН) та структури зони термічного впливу, а їх руйнування відбувається на лінії переходу від металу шва (МШ) до основного металу (ОМ) [5–7]. Корозійна тривкість різних зон зварного з'єднання (ОМ, МШ та металу зони термічного впливу) зазвичай відрізняється [8–12], тому тривалий вплив корозивного середовища призводить до суттєвої зміни геометричних параметрів шва, тобто до зміни ККН. Таким чином, визначення ККН у зонах переходу від МШ до ОМ стикових зварних з'єднань із різним співвідношенням геометричних розмірів підсилення та кореня шва є важливою науково-практичною задачею в галузі міцності, надійності та довговічності зварних вузлів та конструктивних елементів.

**Метод досліджень.** Корозійне розчинення поверхневого шару зразків стикових зварних з'єднань зі сталі 09Г2С виконували анодно-катодним способом у посудині з електролітом. Загальне розчинення металу – 0,9...1 mm з кожної сторони. Після корозійних досліджень вздовж лінії сплавлення утворилася канавка, що вказує на збільшення радіуса переходу від МШ до ОМ (рис. 1).

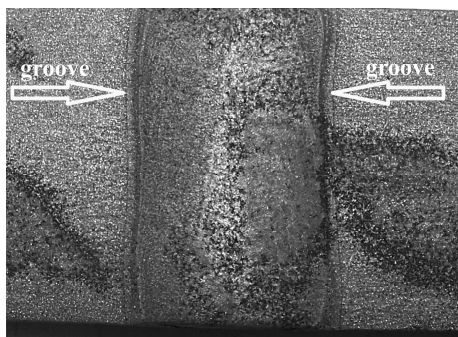


Рис. 1. Зона шва стикового зварного з'єднання після корозійних випробувань.

Fig. 1. Area of the butt welded joint after corrosion tests.

ККН визначали аналітично за допомогою методів, заснованих на гіпотезі ламаних перерізів [13]. Суть подібних методів полягає у встановленні умов рівноваги напружень, які діють у ламаному перерізі, зі зовнішніми силовими чинниками, прикладеними до деталі або вузла складної конфігурації.

**Результати та їх обговорення.** У вихідному стані ширина підсилення на різних сторонах зварного з'єднання, виконаного двостороннім зварюванням, відрізняється (рис. 2). Тому ту сторону, де вона більша, вважатимемо лицьовою, а протилежну – кореневою.

Для встановлення напружень на лицьовій стороні такого з'єднання можна скористатися формулами праці [14] для стикового з'єднання без кореня шва, де теретичний ККН визначають за формулою

$$\alpha_{\sigma}^f = \frac{\delta}{r_f \left( \ln \frac{r_f + a_0}{r_f} + \frac{\delta - a_0}{r_f + a_0} \right)}, \quad (1)$$

де  $\delta$  – товщина з'єднуваних пластин;  $r_f$  – радіус переходу від лицьової частини шва до основного металу.

Параметр  $a_0$ , який характеризує глибину дії концентратора на лицьовій стороні з'єднання, для прийнятої геометричної моделі, згідно з працею [15], обчислюємо за формулою

$$a_0 = 4\sqrt{2} \frac{r_f \cdot h_f}{\sqrt{g_f^2 + 4h_f^2}}, \quad (2)$$

де  $h_f$  і  $g_f$  – висота і ширина підсилення шва на лицьовій стороні з'єднання, відповідно.

Під час розрахунків ККН на кореневій стороні стикового зварного з'єднання з асиметричним підсиленням необхідно враховувати збільшення поперечного перерізу через лицьове підсилення [16] та ексцентриситет прикладання осевого навантаження стосовно центрів інерції перерізів на ділянці з підсиленням [14, 17].

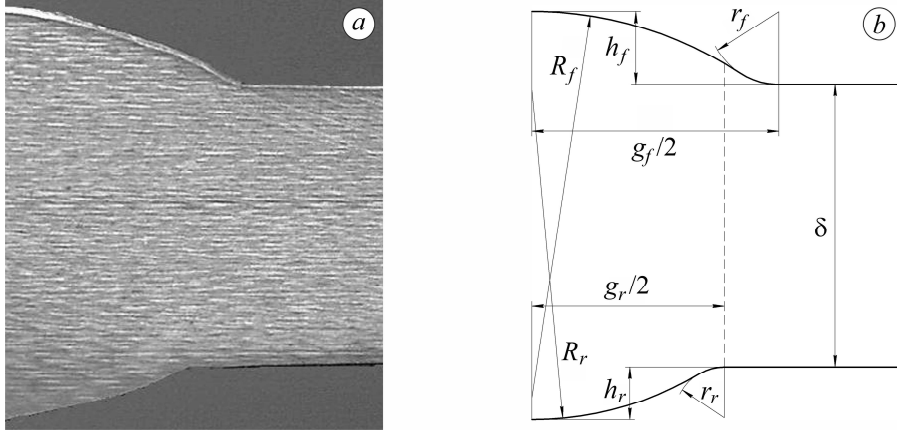


Рис. 2. Макрошліф стикового зварного з'єднання (а) та його ідеалізована модель, яка описує підсилення шва дугами кіл, які дотикаються [18] (b).

Fig. 2. Macrosection of a butt welded joint (a) and its idealized model describing the reinforcement of a weld by arcs of touching circles [18] (b).

Для розрахунку ККН біля підніжжя кореневої частини шва (переріз позначено штриховою лінією на рис. 3b) з урахуванням усіх зазначених ефектів використовували формулу [19]

$$\alpha_{\sigma}^r = \frac{\delta}{r_r \cdot \left( \ln \frac{r_r + b_0}{r_r} + \frac{m \cdot \delta - b_0}{r_r + b_0} \right)} + \frac{\delta^3 \cdot m \cdot (m-1)}{4r_r \cdot \left[ \left( r_r + \frac{m \cdot \delta}{2} \right)^2 \ln \frac{r_r + b_0}{r_r} - b_0 \cdot (r_r + m \cdot \delta) + \frac{b_0^2}{2} + \frac{m^3 \cdot \delta^3 + (m \cdot \delta - 2b_0)^3}{24(r_r + b_0)} \right]}, \quad (3)$$

де  $r_r$  – радіус переходу від кореневої частини шва до основного металу.

Параметр  $b_0$ , який характеризує глибину дії концентратора на кореневій стороні з'єднання, обчислюємо за формулою [17]

$$b_0 = 4\sqrt{2} \frac{r_r \cdot h_r}{\sqrt{g_r^2 + 4h_r^2}}, \quad (4)$$

де  $h_r$  і  $g_r$  – висота і ширина підсилення шва на кореневій стороні з'єднання, відповідно.

Коефіцієнт  $m$  вказує на збільшення перерізу завдяки лицьовій частині підсилення, його визначаємо за формулою [19]

$$m = 1 + \frac{h_f - R_f + \sqrt{R_f^2 - g_r^2/4}}{\delta}, \quad (5)$$

де  $R_f$  – радіус випуклої частини підсилення на лицьовій стороні.

Для визначення ККН на лицьовій стороні з'єднання після розчинення поверхневого шару металу можна використовувати формулу (1). Однак через збільшення радіусів переходу від МШ до ОМ переріз, що відповідає підніжжю кореневого підсилення, перетинає лицьове підсилення не на випуклій частині, а в зоні спряження з ОМ (штрихова лінія на рис. 3b). Тому під час розрахунків ККН на кореневій стороні такого з'єднання коефіцієнт, який характеризує збільшення перерізу через лицьове підсилення, інший:

$$m_1 = 1 + \frac{r_f + \sqrt{r_f^2 - l^2}}{\delta}, \quad (6)$$

де  $l$  – відстань між підніжжями підсилень на лицьовій та кореневій сторонах, яку визначаємо за формулою

$$l = \frac{g_f - g_r}{2}.$$

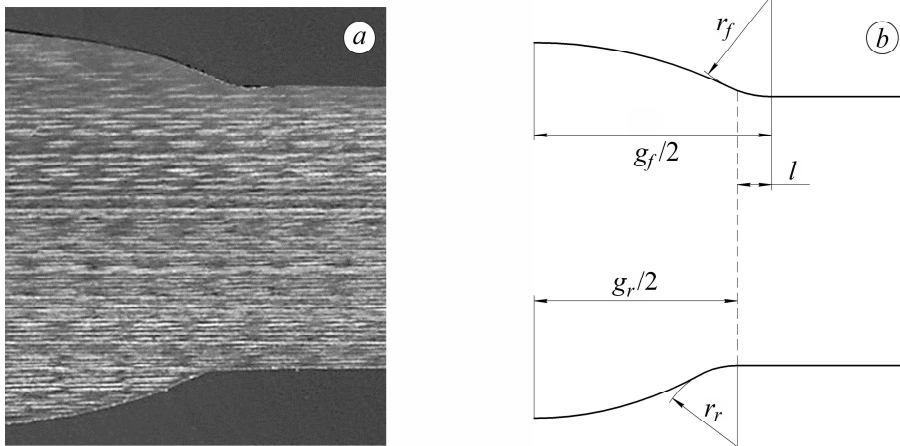


Рис. 3. Макрошліф стикового зварного з'єднання після корозійного розчинення поверхневого шару металу (a) та його ідеалізована модель (b).

Fig. 3. Macrosection of a butt welded joint after corrosion dissolution of the surface layer of metal (a) and its idealized model (b).

Отже, для визначення ККН на кореневій стороні з'єднання, у якого підніжжя лицьового та кореневого підсилень знаходяться досить близько одне від одного, формулу (3) слід переписати у вигляді

$$\alpha_{\sigma}^r = \frac{\delta}{r_r \cdot \left( \ln \frac{r_r + b_0}{r_r} + \frac{m_1 \cdot \delta - b_0}{r_r + b_0} \right)} + \frac{\delta^3 \cdot m \cdot (m-1)}{4r_r \cdot \left[ \left( r_r + \frac{m_1 \cdot \delta}{2} \right)^2 \ln \frac{r_r + b_0}{r_r} - b_0 \cdot (r_r + m_1 \cdot \delta) + \frac{b_0^2}{2} + \frac{m_1^3 \cdot \delta^3 + (m_1 \cdot \delta - 2b_0)^3}{24(r_r + b_0)} \right]}. \quad (7)$$

За результатами розрахунків встановили, що внаслідок корозійного розчинення поверхневого шару металу мінімальний радіус переходу від МШ до ОМ збільшується з 2,16 до 3,09 mm, при цьому максимальне значення ККН знижується з 1,87 до 1,67 (див. таблицю).

#### Результати розрахунків ККН у стикових зварних з'єднаннях зі сталі 09Г2С

Стан	Сторона	Товщина $\delta$	Радіус переходу $r$	Ширина підсилення $b$	Висота підсилення $h$	Радіус опуклості $R$	Глибина дії концентратора ( $a_0$ або $b_0$ )	ККН ( $\alpha_\sigma$ )
		mm						
Вихідний	Лицьова ( $f$ )	12,03	3,07	21,01	3,08	16,38	2,44	1,69
	Коренева ( $r$ )		2,16	16,38	2,23	13,99	1,61	1,87
Після розчинення	Лицьова ( $f$ )	10,35	3,88	18,23	2,08	17,13	2,44	1,53
	Коренева ( $r$ )		3,09	15,60	2,00	13,12	2,17	1,67

#### ВИСНОВКИ

Для зміни геометричних розмірів зварного шва і, відповідно, ККН, розчинено поверхневий шар металу зразків стикових зварних з'єднань зі сталі 09Г2С анодно-катодним процесом в електроліті. Після корозійних випробувань радіус переходу від металу шва до основного металу на лицьовій стороні з'єднання збільшився з 3,07 до 3,88 mm, а на його кореневій стороні – з 2,16 до 3,09 mm. Існуючу формулу для визначення коефіцієнта концентрації напружень на кореневій стороні з'єднання, відповідно до гіпотези ламаних перерізів, модифікували для випадку, коли підніжжя лицьового та кореневого підсилень знаходяться досить близько одне від одного. Аналітичні розрахунки ККН у досліджуваних зразках показали, що внаслідок корозійного розчинення поверхневого шару металу його значення на лицьовій стороні з'єднання зменшується з 1,69 до 1,53, а на кореневій – з 1,87 до 1,67.

1. *Typical damages of welded metal structures of bridges* / V. A. Kovtunenکو, A. G. Sineok, A. M. Gerasimenko, and V. A. Zadorozhny // *The Paton Welding J.* – 2005. – № 10. – P. 27–32.
2. *Toyoda M.* How steel structures fared in Japan`s great earthquake // *Welding J.* – 1995. – **74**, № 12. – P. 31–42.
3. *Davis J. R.* Corrosion of Weldments. – USA: ASTM international, 2006. – 236 p.
4. *Похмурський В. І., Хома М. С.* Корозійна втома металів і сплавів. – Львів: СПОЛЮМ, 2008. – 304 с.
5. *Increasing the corrosion fatigue resistance of welded joints by high-frequency mechanical peening* / V. V. Knysh, S. A. Solovei, V. I. Kir`yan, and V. N. Bulash // *Strength of Materials.* – 2018. – **50**, № 3. – P. 443–447.
6. *Motrunicн S., Klochkov I., and Poklaytsky A.* High cycle fatigue behavior of thin sheet joints of aluminium-lithium alloys under constant and variable amplitude loading // *Welding in the World.* – 2020. – **64**, № 12. – P. 1971–1979.
7. *Abdullah A., Malaki M., and Eskandari A.* Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening // *Materials and Design.* – 2012. – **38**. – P. 7–18.

8. *Influence of the atmosphere corrosion on the fatigue life of welded T-joints treated by high frequency mechanical impact* / V. Knysh, S. Solovei, L. Nyrkova, I. Klochkov, and S. Motrunich // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – **16**. – P. 73–80.
9. *Microstructure and corrosion behavior of the heat affected zone of a stainless steel 308L–316L weld joint* / C. Ma, Q. Peng, J. Mei, E. H. Han, and W. Ke // *J. of Mater. Sci. & Technol.* – 2018. – **34**, № 10. – P. 1823–1835.
10. *Bakulo A. V., Yakushin B. F. and Puchkov Yu. A. Structure and corrosion resistance of welded joints of alloy 1151 in marine atmosphere* // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2017. – **59**, № 3–4. – P. 218–222.
11. *Han Q. H., Wang X., and Lu Y. Experimental investigation on the corrosion behavior of G20Mn5QT cast steel and butt weld with Q345D steel* // *Corr. Sci.* – 2018. – **132**, № 3. – P. 194–203.
12. *Influence of the accelerated corrosion exposure on the fatigue behavior of welded joints treated by high frequency mechanical impact* / V. Knysh, S. Solovei, S. Motrunich, L. Nyrkova, and H. C. Yildirim // *Int. J. of Fatigue*. – 2021. – **149**. – Article number 106272.
13. *Определение напряжений в опасных сечениях деталей сложной формы* / А. В. Верховский, В. П. Андронов, В. А. Ионов, О. К. Лупанова, В. И. Чевкинов. – М.: Машгиз, 1958. – 148 с.
14. *Moltasov A. V. Stressed state of a butt-welded joint with regard for displacements of the centers of inertia* // *Materials Science*. – 2019. – **55**, № 3. – P. 358–366.
15. *Moltasov A. V. Application of the method of non-planar sections to determine stresses in the zones of concentration caused by weld reinforcement in butt-welded joints* // *Strength of Materials*. – 2013. – **45**, № 1. – P. 116–122.
16. *Moltasov A. V. A Study of the stress state in stress concentration zones under tension of an asymmetrically reinforced butt-welded joint* // *Strength of Materials*. – 2017. – **49**, № 5. – P. 718–725.
17. *Tsumarev Y. A. Effect of off-centre tensile loading on the stress state of butt-welded joints* // *Welding Int.* – 2011. – **25**, № 11. – С. 872–875.
18. *Moltasov A. V. Approximate calculation of radius of weld transition to base metal of welded butt joint according to normalized parameters* // *The Paton Welding J.* – 2017. – № 9. – P. 50–52.
19. *Молтасов А. В., Ткач П. Н. Расчет напряжений вблизи корневого усиления стыкового сварного соединения* // *Збірник наук. праць НУК*. – 2019. – **475**, № 1. – С. 34–42.

*Одержано 25.06.2021*