

# ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ОПІР ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 06Г2БДП УТВОРЕННЮ ХОЛОДНИХ ТА ГАРЯЧИХ ТРІЩИН, ВТОМНОМУ І КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ

О.А. Гайворонський<sup>1</sup>, В.Д. Позняков<sup>1</sup>, С.Л. Жданов<sup>1</sup>, А.М. Герасименко<sup>1</sup>, В.Д. Рябоконь<sup>1</sup>, А.О. Максименко<sup>1</sup>,  
Jianxin Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: paton39@ukr.net

<sup>2</sup>Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu, China Науково-технічний університет провінції Цзянсу, КНР No. 666, Changhui Road, Dantu District, Zhenjiang, Jiangsu, China

В роботі вивчено вплив технологічних процесів дугового зварювання на опір зварних з'єднань економнолегованої атмосферостійкої сталі 06Г2БДП утворенню холодних та гарячих тріщин і крихкому та втомному руйнуванню. За допомогою методу Імплант та з використанням технологічної проби Теккен оцінено умови утворення холодних тріщин та рекомендовано методи їх усунення. Показано, що з використанням механізованого зварювання в захисних газах дрони суцільного перерізу та порошковий забезпечують в широкому діапазоні режимів зварювання високу технологічну міцність зварних з'єднань з точки зору утворення гарячих тріщин. Натомість при використанні покритих електродів такий діапазон звужується і при  $V_{\text{леф}} \geq 20$  мм/хв з'єднання схильні до утворення цього дефекту. Результати досліджень з оцінки опору зварних з'єднань крихкому руйнуванню свідчать про високі значення коефіцієнту інтенсивності напружень  $K_Q$  як для металу шва, так і для металу ЗТВ. Визначено границю витривалості таврових з'єднань при випробуванні циклічним навантаженням, яка становить  $[\sigma]_1 = 35$  МПа. Бібліогр. 15, табл. 1, рис. 5.

*Ключові слова:* атмосферостійка сталь, зварні з'єднання, холодні тріщини, гарячі тріщини, крихке руйнування, циклічне навантаження, втомне руйнування

**Вступ.** Публікації останніх років свідчать про підвищення масштабів застосування атмосферостійких економнолегованих сталей в металоконструкціях мостів та в інших будівельних конструкціях [1–3]. Такі тенденції характерні для розвинутих країн, таких як США, Японія, Італія, Великобританія [4–7]. З огляду на зацікавленість вітчизняних мостобудівників в застосуванні для прогонових будов мостів атмосферостійкого прокату в Україні запропонована економнолегована атмосферостійка сталь 06Г2БДП з підвищеним до 0,05 % вмістом фосфору [3]. Проведені дослідження впливу термічних циклів зварювання на зміну структури і механічних властивостей металу ЗТВ зварних з'єднань зазначеної сталі дозволили встановити діапазон оптимальних швидкостей охолодження, при якому підвищується статична міцність та ударна в'язкість за рахунок формування бейнітно-мартенситної структури в цій ділянці з'єднання [3, 8]. В роботі [9] на основі проведених досліджень впливу способів дугового механізованого в захисних газах та автоматичного зварювання під шаром флюсу на механічні властивості і структуру зварних з'єднань сталі 06Г2БДП класів міцності С390 та С500 запропоновані зварювальні матеріали, які забезпечують необхідний комплекс механічних властивостей металу швів на рівні ос-

новного металу зазначених вище класів міцності. В той же час відомо, що підвищений вміст в сталі фосфору може погіршувати її здатність до зварювання.

Головні труднощі при зварюванні низьковуглецевих сталей пов'язані з необхідністю запобігання можливості утворення в металі зони термічного впливу і металі шва холодних тріщин, а також структур, що різко знижують опір зварних з'єднань крихкому та втомному руйнуванню. На виникнення холодних тріщин визначальний вплив мають гартівні структури в металі ЗТВ і шва, водень у цих ділянках зварного з'єднання та напруження І роду, викликані процесом зварювання і жорсткістю закріплення з'єднань [10–14].

До найбільш розповсюджених дефектів в зварних з'єднаннях крім холодних тріщин відноситься міжкристалічне руйнування – утворення гарячих тріщин. Гарячі тріщини є одним з видів високо-температурного руйнування. Вони можуть виникати при несприятливому поєднанні чинників, пов'язаних з пониженням деформаційної здатності металу внаслідок появи в структурі легкоплавких евтектик, дефектів кристалічної будови, виділення крихких фаз, а також під дією зовнішніх і внутрішніх напружень. Гарячі, або кристалізаційні, тріщини являють собою мікро – і макроско-

Гайворонський О.А. – <https://orcid.org/0000-0002-5922-5541>, Позняков В.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-8581-3526>, Жданов С.Л. – <https://orcid.org/0000-0003-3570-895X>

© О.А. Гайворонський, В.Д. Позняков, С.Л. Жданов, А.М. Герасименко, В.Д. Рябоконь, А.О. Максименко, Jianxin Wang, 2024

пічні несущальності, які зароджуються в інтервалі кристалізації металу. Температура, при якій вони утворюються, залежить від хімічного складу металу шва. При зварюванні вуглецевих сталей гарячі тріщини утворюються, як правило, в інтервалі температур від 1200 до 1350 °С. Гарячі тріщини – недопустимий дефект зварного з'єднання, який може бути причиною руйнування конструкцій при виготовленні або експлуатації.

Здатність металу шва сприймати пружно-пластичні деформації при високих температурах в процесі зварювання без гарячих тріщин визначає його технологічну міцність. Велика вірогідність наявності дефектів в зварних з'єднаннях металевих конструкцій зумовила для забезпечення надійності їх експлуатації необхідність оцінки імовірності виникнення крихкого руйнування зварних конструкцій в залежності від умов їх навантаження, місця розташування дефекту, його форми та розміру. Вирішення цієї проблеми стало можливим за рахунок використання критеріїв та методів механіки руйнування. В їх основі лежать випробування зразків з штучними дефектами, розміри яких стабільні при виготовленні і піддаються аналітичному трактуванню на відміну від природних технологічних дефектів, стабільний розмір яких дуже важко передбачити.

Тому мета даної роботи полягала у вивченні впливу технологічних процесів зварювання на опір зварних з'єднань сталі 06Г2БДП уповільненому, міжкристалітному, крихкому і втомному руйнуванням. Для досягнення поставленої мети на основі використання спеціалізованих методів досліджень в роботі були вирішені наступні завдання досліджень:

- встановлено вплив технологічних параметрів дугового зварювання (температури попереднього підігріву, погонної енергії зварювання, тощо) та вмісту дифузійного водню в наплавленому металі на опір зварних з'єднань сталі 06Г2БДП утворенню холодних тріщин (уповільненому руйнуванню);

- оцінено опір зварних з'єднань досліджуваної сталі утворенню гарячих тріщин (міжкристалітному руйнуванню);

- вивчено вплив параметрів дугового зварювання на опір зварних з'єднань крихкому і втомному руйнуванням при циклічному навантаженні.

**Методики досліджень.** Дослідження схильності металу ЗТВ зварних з'єднань сталі 06Г2БДП до уповільненого руйнування в залежності від вмісту дифузійного водню в металі шва та величини критичних напружень виконували з використанням методу Імплант [10]. Випробуванням піддавали циліндричні зразки-вставки, які виготовляли із сталі 06Г2БДП завтовшки 13 мм на-

ступного хімічного складу в %: 0,07 С; 1,36 Мп; 0,08 Si; 0,3 Cr; 0,03 Nb; 0,47 Cu; 0,011 S; 0,053 P. З цієї ж сталі були технологічні пластини розміром 300×250 мм, в які вставляли зразки-вставки.

Ручне дугове зварювання виконували електродами АНП-10 діаметром 4,0 мм, які забезпечували показники границі текучості металу швів приблизно на рівні даної сталі і становили 539...550 МПа. Для зварювання використовували наступний режим:  $I_{зв} = 160...180$  А,  $U_{д} = 26...27$  В,  $V_{зв} = 7,5$  м/год. Швидкість охолодження металу ЗТВ регулювали за рахунок попереднього підігріву. При цьому початкова температура пластин змінювалась від 20 до 90 °С, а швидкість охолодження зварних з'єднань в інтервалі температур 600...500 °С ( $W_{6/5}$ ) в діапазоні від 21 до 14 °С/с. Залежності, які характеризують вплив температури попереднього підігріву на швидкість охолодження зразків та термін їх перебування в інтервалі температур 800...100 °С ( $\tau_{8/1}$ ), показано на рис. 1 [11]. Вміст дифузійного водню в наплавленому металі, який визначали методом олівцевих проб з використанням в якості запірної речовини суміші гліцерину з дистильованою водою в пропорції 1:4, змінювали за рахунок електродів з різною вологістю покриття. Для цього електроди зволожувались або прожарювались при різних температурах.

Опір утворенню холодних тріщин зварних з'єднань оцінювали з використанням відомої технологічної проби Теккен [12].

Наявність холодних тріщин в ній виявляли через 24 год після зварювання зовнішнім оглядом поверхні шва та на макрошліфах, якщо вони мали місце в глибині без виходу на поверхню з'єднання. В якості критерію випробувань приймали критичну швидкість охолодження зварних з'єднань

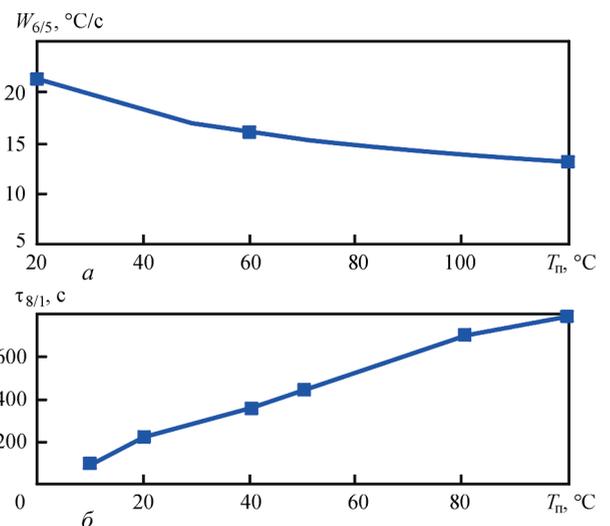


Рис. 1. Вплив температури попереднього підігріву на швидкість охолодження зразків в інтервалі температур 600...500 °С (а) та термін їх перебування в інтервалі температур 800...100 °С (б)

або концентрацію дифузійного водню в наплавленому металі, при яких сумарна протяжність тріщин в корені, на поверхні та в перерізі шва або ЗТВ не перевищувала 50 %.

Ручне дугове зварювання технологічних проб Теккен виконували покритими електродами АНП-10 діаметром 4,0 мм на режимі, що і при зварюванні методом Імплант. Механізоване зварювання в захисних газах виконували дротом суцільного перерізу NiMo1-IG і порошковим дротом Filarc PZ 6114S діаметром 1,2 мм. Зварювання порошковим дротом виконували в CO<sub>2</sub>, а дротом суцільного перерізу в суміші газів 82% Ar+18% CO<sub>2</sub>. Режими механізованого зварювання становили:  $I_{зв} = 180...200$  А,  $U_d = 26...28$  В,  $V_{зв} = 14...16$  м/год. Як ручне дугове так і механізоване зварювання виконували без попереднього підігріву.

Схильність металу шва до утворення гарячих тріщин оцінювали методом випробувань при статичному вигині зварних з'єднань в процесі їх зварювання. При цьому визначали критичну швидкість деформації  $V_{деф}$ , що призводить до утворення гарячих тріщин. Режими зварювання вказані вище, змінною величиною була тільки швидкість зварювання. При ручному дуговому зварюванні її змінювали в діапазоні 9,5...12 м/год, при механізованому – 15...20 м/год.

Для оцінки опору зварних з'єднань крихкому руйнуванню використовували стандартні зразки розміром 120×20×10 мм, які випробували при трьохточковому вигині відповідно до методів механіки руйнування.

Для порівняння одну серію зразків виготовляли з основного металу, інші – із стикових з'єднань, що виконували механізованим зварюванням в суміші газів 82% Ar+18% CO<sub>2</sub> дротом суцільного перерізу NiMo1-IG та порошковим дротом Filarc PZ 6114S в CO<sub>2</sub>.

Надріз та вершину тріщини втоми в зразках розташовували в металі шва або в металі ЗТВ. Навантаження зразків виконували на установці Фрідлянда, при цьому швидкість навантаження становила 4...18 мм/хв.

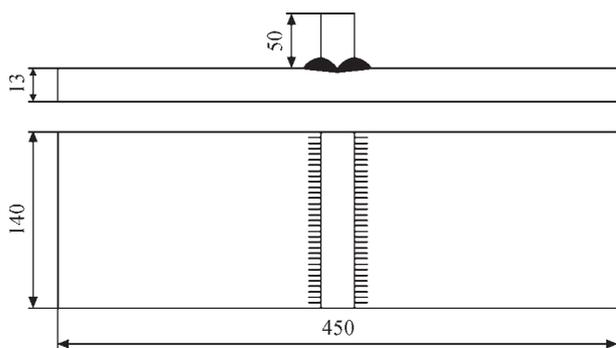


Рис. 2. Схематичне зображення таврового зразка для випробувань на втому

З метою оцінки опору зварних з'єднань втому руйнуванню [15] проводили дослідження з використанням таврових зразків з одним поперечним ребром висотою 50 мм, яке було приварено до пластини завтовшки 13 мм двома кутовими швами з повним проплавленням (рис. 2).

Механізоване зварювання таврових зразків виконували дротом суцільного перерізу BOEHLER NiMo1-IG діаметром 1,2 мм у суміші газів 82% Ar+18% CO<sub>2</sub>. Після зварювання зразки піддавали циклічному навантаженню на згин (установка УМП-02) з частотою 14 Гц при різних напруженнях симетричного циклу 45, 40 та 35 МПа. Під час випробувань на втому фіксували кількість циклів навантаження, при яких відбувалось утворення тріщин втоми критичної величини (3 мм).

**Результати роботи та їх обговорення.** З використанням методу Імплант показано, що напруження, при яких уповільненого руйнування зразків сталі 06Г2БДП не спостерігається, становить 440 МПа. При більших величинах навантажень спостерігалась текучість зразків. Як показали результати раніше проведених металографічних досліджень, за даних умов охолодження в металі ЗТВ, формується бейнітна структура. Виходячи з цього можна вважати, що при обмеженій кількості дифузійного водню в наплавленому металі до 0,8 мл/100 г, метал ЗТВ з такою структурою не зазнає водневого окрихчення та має високий опір утворенню холодних тріщин. Цим же методом встановлено, що критичні напруження, при яких уповільнене руйнування не відбувається, при збільшенні  $[H]_{диф}$  до 3,8 мл/100 г знижуються до 220 МПа, а при зменшенні його значення до 1,8 мл/100 г зростають до 340 МПа (рис. 3).

З підвищенням вмісту дифузійного водню в наплавленому металі від 0,8 до 3,8 мл/100 г ризик утворення холодних тріщин в металі ЗТВ зварних з'єднань зростає. Для виключення вірогідності появи тріщин в таких з'єднаннях рівень залишкових напружень не повинен перевищувати 440 та 360 МПа. Підвищити опір металу ЗТВ зварних

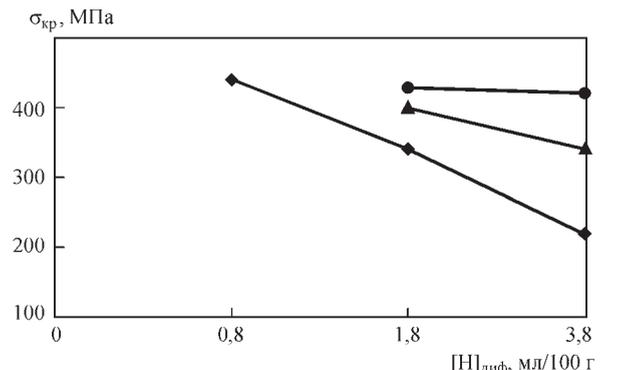


Рис. 3. Вплив дифузійного водню на опір уповільненому руйнуванню металу ЗТВ сталі 06Г2БДП: 1 – ♦ – без підігріву; 2 – ▲ –  $T_n = 60^\circ C$ ; 3 – ● –  $T_n = 90^\circ C$

з'єднань уповільненому руйнуванню можливо за рахунок використання попереднього підігріву. Так встановлено, що при  $[H]_{\text{диф}} = 3,8$  мл/100 г підігрів ( $T_n$ ) до температури  $60^\circ\text{C}$  дає змогу підвищити рівень критичних напружень до 380 МПа, а при  $T_n = 90^\circ\text{C}$  – до  $\sigma = 420$  МПа.

Отже, при обмеженому вмісті дифузійного водню в шві, метал ЗТВ не проявляє схильності до уповільненого руйнування. Відповідно до даних умов зварні з'єднання цієї сталі мають достатній опір утворенню холодних тріщин.

Аналіз макрошліфів, які вирізали з проб Теккен через 24 год після зварювання контрольних швів, показав, що при зварюванні без попереднього підігріву усі вищезазначені способи зварювання і зварювальні матеріали забезпечують достатньо високу стійкість зварних з'єднань проти утворення холодних тріщин незалежно від легування металу шва (рис. 4).

Встановлено, що економнолеговані зварювальні матеріали, а саме електроди АНП-10 та порошковий дріт Filarc PZ 6114S, а також легований нікелем і молібденом дріт суцільного перерізу NiMo1-IG за умов ручного дугового і механізованого

в захисних газах зварювання, забезпечують високий опір зварних з'єднань сталі 06Г2БДП утворенню холодних тріщин.

Отримані дані щодо опору зварних з'єднань сталі 06Г2БДП утворенню гарячих тріщин свідчать (таблиця), що при механізованому зварюванні в захисних газах як порошковим дротом, так і дротом суцільного перерізу забезпечується достатня технологічна міцність в широкому діапазоні швидкостей навантаження. Натомість, за умов використання покритих електродів АНП-10 при швидкості деформації  $V_{\text{деф}} \leq 20$  мм/хв, зварні з'єднання сталі 06Г2БДП мають запас технологічної міцності. Підвищення темпу деформації до значень більше ніж 20 мм/хв призводить до появи гарячих тріщин, опір яким знижується.

Проведеними дослідженнями з використанням критерію механіки руйнування встановлено, що найбільш високі показники  $K_Q$  характерні для основного металу. Їх значення залежать від температури випробувань зразків та зменшуються від 103,8 МПа $\sqrt{\text{м}}$  (температура випробувань  $20^\circ\text{C}$ ) до 90,7 і 86,0 МПа $\sqrt{\text{м}}$  при  $(-20$  та  $-40^\circ\text{C})$  відповідно. Дещо нижчі, але також досить високі значення  $K_Q$  отримані за результатами випробувань зразків, вершина тріщини втомі в яких розташовувалася як по центру металу шва, так і в металі ЗТВ зварних з'єднань.

Незалежно від способу зварювання, досліджені зварювальні матеріали та застосовані режими зварювання забезпечують достатньо близькі показники  $K_Q$ , як для швів, так і для ЗТВ зварних з'єднань. Так, для металу шва, виконаного порошковим дротом Filarc PZ 6114S при температурах випробувань  $-40, -20^\circ\text{C}$  та  $20^\circ\text{C}$  середні значення  $K_Q$  дорівнюють відповідно: 82,2; 84,9 та 96,2 МПа $\sqrt{\text{м}}$ , а для металу шва, виконаного дротом суцільного перерізу NiMo1-IG, при аналогічних температурах випробувань середні значення  $K_Q$  відповідно становлять: 81,6; 84,4 та 94,9 МПа $\sqrt{\text{м}}$  (рис. 5, а).

Подібна залежність показників  $K_Q$  від температури випробувань зразків, а саме, зменшення їх значень по мірі зниження температури, спостерігалась і в зразках, де вершина надрізу припадала на метал ЗТВ зварних з'єднань. За величиною вони дещо нижчі у порівнянні з показниками  $K_Q$

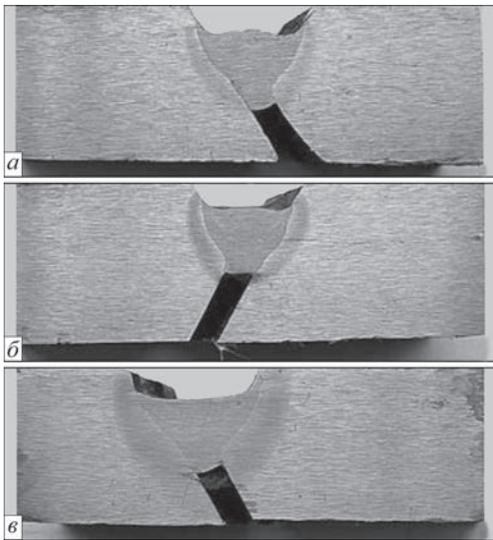


Рис. 4. Макрошліфи зварних з'єднань проб Теккен зі сталі 06Г2БДП, виконаних: а – дротом суцільного перерізу NiMo1-IG у суміші газів 82% Ar+18% CO<sub>2</sub>; б – порошковим дротом Filarc PZ 6114S в CO<sub>2</sub>; в – покритими електродами АНП-10

**Технологічна міцність зварних з'єднань сталі 06Г2БДП**

Номер п/п	Варіант зварювання	Швидкість деформації $V_{\text{деф}}$ , мм/хв	Наявність гарячих тріщин
1	Механізоване порошковим дротом Filarc PZ 6114S діаметром 1,2 мм в CO <sub>2</sub>	10,3	Відсутні
		15	"-"
		28,6	"-"
2	Механізоване дротом суцільного перерізу NiMo1-IG діаметром 1,2 мм в суміші 82% Ar + 18% CO <sub>2</sub>	28,2	"-"
		37,1	"-"
3	Ручне дугове покритими електродами АНП-10 діаметром 4,0 мм	18,3	"-"
		25,5	ε
		32,7	"-"
		52	"-"

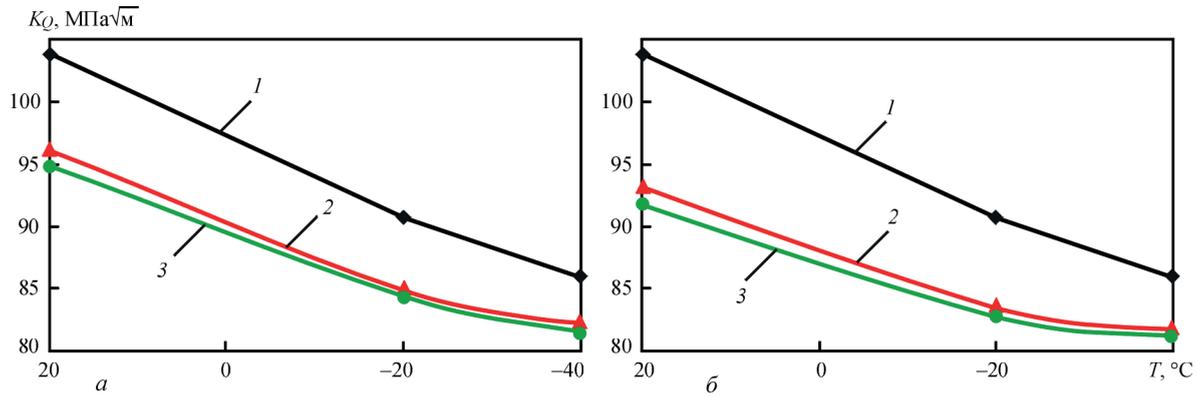


Рис. 5. Залежність значень критичного коефіцієнту інтенсивності напружень  $K_Q$  від температури випробувань для основного металу сталі 06Г2БДП (1 а, б) металу швів (а) і металу 3ТВ (б) зварних з'єднань, виконаних дротом суцільного перерізу Ni-Mo1-IG у суміші газів 82% Ar+18% CO<sub>2</sub> (2) та Filarc PZ 6114S в CO<sub>2</sub> (3)

металу швів, але також знаходяться на високому рівні і при зварюванні порошковим дротом Filarc PZ 6114S становили 81,7; 83,5 та 93,1  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , а при зварюванні дротом суцільного перерізу – 81,2; 82,8 та 91,7  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  при температурах випробувань –40, –20 та 20  $^{\circ}\text{C}$ , відповідно (рис. 5, б).

Результати дослідження на опір втомі показали, що при напруженнях симетричного циклу 45 та 40 МПа в таврових зразках по лінії сплавлення утворювались тріщини критичної довжини. А саме: при  $\sigma_{-1} = 45$  МПа тріщина втомі утворилась після  $N = 999000$  циклів навантаження, при  $\sigma_{-1} = 40$  МПа вона спостерігалась після  $N = 1670000$  циклів навантаження.

За умов випробувань при напруженні симетричного циклу  $\sigma_{-1} = 35$  МПа, таврове з'єднання сталі 06Г2БДП залишалось незруйнованим після  $N = 2,1 \cdot 10^6$  циклів навантаження. Таким чином, можна вважати, що для зварних з'єднань сталі 06Г2БДП границя витривалості знаходиться на рівні  $\sigma_{-1} = 35$  МПа.

## Висновки

Дослідженнями впливу технологічних процесів дугового зварювання на опір зварних з'єднань корозійностійкої сталі 06Г2БДП утворенню холодних і гарячих тріщин та крихкому і втомному руйнуванням встановлено наступне:

- використання економнолегованих електродів АНП-10 з обмеженим до  $[\text{H}]_{\text{диф}} = 0,8$  мл/100 г вмістом дифузійного водню в наплавленому металі при ручному дуговому зварюванні, порошкового дроту Filarc PZ 6114S, а також легованого нікелем і молібденом дроту суцільного перерізу NiMo1-IG при механізованому зварюванні забезпечують високий опір утворенню холодних тріщин в металі 3ТВ та шва зварних з'єднань. З підвищенням вмісту дифузійного водню до  $[\text{H}]_{\text{диф}}$  до 3,8 мл/100 г необхідно застосувати попередній підігрів до  $T_{\text{п}} = 90$   $^{\circ}\text{C}$ ;

- зазначені вище зварювальні матеріали при механізованому зварюванні в захисних газах забезпечують достатню технологічну міцність в

широкому діапазоні швидкостей навантаження. Натомість при ручному дуговому зварюванні покритими електродами АНП-10 запас технологічної міцності забезпечується за умов швидкості деформації  $V_{\text{деф}} \leq 20$  мм/хв;

- високий опір як металу швів, так і металу 3ТВ крихкому руйнуванню забезпечуються також при використанні механізованого зварювання в захисних газах порошковим дротом Filarc PZ 6114S та дротом суцільного перерізу NiMo1-IG. Показники коефіцієнту інтенсивності напружень досягають значень  $K_Q = 96$   $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Зниження температури випробувань до –40  $^{\circ}\text{C}$  призводить до зменшення коефіцієнту інтенсивності напружень на 15 %,  $K_Q = 82$   $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ;

- випробування циклічним навантаженням свідчать, що границею витривалості зварних з'єднань сталі 06Г2БДП є напруження симетричного циклу  $\sigma_{-1} = 35$  МПа.

Автори висловлюють свою вдячність за проведення випробувань зварних з'єднань на опір крихкому і втомному руйнуванню завідувачу групи Яшуку В.А. та старшому науковому співробітнику Завдовесеву А.В.

## Список літератури

1. Ковтуненко В.А., Герасименко А.М., Гоцуляк А.А. (2006) Выбор стали для ответственных сварных строительных конструкций. *Автоматическая сварка*, **11**, 32–37.
2. Позняков В.Д., Жданов С.Л., Максименко А.А. и др. (2013) Свариваемость экономнолегированных сталей 06ГБД, 06Г2БД. *Автоматическая сварка*, **4**, 9–15.
3. Завдовесев А.В., Позняков В.Д., Жданов С.Л. та ін. (2020) Вплив термічних циклів зварювання на формування структури та властивостей корозійностійкої сталі 06Г2БДП. *Автоматичне зварювання*, **9**, 22–27.
4. Morcillo, M., Diaz, I., Cano, H. et al. (2019) Atmospheric corrosion of weathering steels. Over view forengineers. Part II: Testing, inspection, maintenance. *Construction and Building Materials*, **222**, 750–765.
5. Miki, C., Homma, K., Tominaga, T. (2002) High strength and high performance steels and the iruse in bridge structures. *J. of Constructional steel research*, **58**(1), 3–20.
6. Bjorhovde, R. (2004) Development and use of high performance steel. *J. of Constructional Steel Research*, **60** (3–5), 393–400.
7. Albrecht, P., Hall Jr, T.T. (2003) Atmospheric corrosion resistance of structural steels. *J. of Material and civil engineering*, **15**(1), 2–24.

- Бердникова О.М., Позняков В.Д., Костін В.А. та ін. (2021) Структура та характер руйнування металу ЗТВ корозійностійкої сталі 06Г2БДП. *Сучасна електротехнологія*, **3**, 35–41.
- Жданов С.Л., Позняков В.Д., Завдовцев А.В. та ін. (2023) Структура і властивості зварних з'єднань сталі 06Г2БДП. *Автоматичне зварювання*, **9**, 22–27.
- Стеренбоген Ю.А. (1986) Некоторые факторы, определяющие стойкость металла ЗТВ мартенситных сталей против образования холодных трещин. *Автоматическая сварка*, **6**, 5–8.
- Позняков В.Д. (2023) *Зварювальні технології для ремонту металевих конструкцій*. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.
- Гривняк І. (1984) *Свариваемость сталей*. Москва, Машиностроение.
- Лобанов Л.М., Позняков В.Д., Миходуй О.Л. (2004) Влияние остаточных напряжений на технологическую прочность сварных соединений высокопрочной стали 14ХГН-2МДАФБ. *Автоматическая сварка*, **8**, 30–34.
- Царюк А.К., Скульский В.Ю., Нимко М.А. и др. (2016) Усовершенствование технологии сварки высокотемпературных диафрагм проточной части паровых турбин. *Автоматическая сварка*, **3**, 35–43.
- Труфяков В.И. (1973) *Усталость сварных соединений*. Киев, Наукова думка.
- Morcillo, M., Díaz, I., Cano, H. et al. (2019) Atmospheric corrosion of weathering steels. Over view for engineers. Pt II: Testing, inspection, maintenance. *Construction and Building Materials*, **222**, 750–765.
- Miki, C., Homma, K., Tominaga, T. (2002) High strength and high performance steels and their use in bridge structures. *J. of Constructional Steel Research*, **58(1)**, 3–20.
- Bjorhovde, R. (2004) Development and use of high performance steel. *J. of Constructional Steel Research*, **60 (3-5)**, 393–400.
- Albrecht, P., Hall Jr, T.T. (2003) Atmospheric corrosion resistance of structural steels. *J. of Materials in Civil Engineering*, **15(1)**, 2–24.
- Berdnikova, O.M., Poznyakov, V.D., Kostin, V.A. et al. (2021) Structure and fracture mode of HAZ metal corrosion-resistant 06G2BDP steel. *Suchasna Elektrometal.*, **3**, 35–41 [in Ukrainian].
- Zhdanov, S.L., Poznyakov, V.D., Zavidoveyev, A.V., et al. (2021) Structure and properties of welded joints of 06G2BDP steel. *The Paton Welding J.*, **9**, 11-16.
- Sterenbogen, Yu.A. (1986) Some factors determining the resistance of HAZ metal of martensitic steels to cold cracking. *Автоматич. Сварка*, **6**, 5–8 [in Russian].
- Poznyakov, V.D. (2023) *Welding technologies for repair of metal structures*. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
- Hrivnak, I. (1984) *Weldability of steels*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Lobanov, L.M., Poznyakov, V.D., Mikhoduj, O.L. (2004) Effect of residual stresses on technological strength of welded joints of high-strength steel 14KhGN2MDAFB. *The Paton Welding J.*, **8**, 30–34.
- Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu., Nimko, M.A. et al. (2016) Improvement of the technology of welding high-temperature diaphragms in steam turbine flow section. *The Paton Welding J.*, **3**, 28-36.
- Trufyakov, V.I. (1973) *Fatigue of welded joints*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

## References

- Kovtunenkov, V.A., Gerasimenko, A.M., Gotsulyak, A.A. (2006) Selection of steel for critical building welded structures. *The Paton Welding J.*, **11**, 27-31.
- Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L., Maksimenko, A.A. et al. (2013) Weldability of sparsely-alloyed steels 06GBD, 06G2B. *The Paton Welding J.*, **4**, 8-14.
- Zavidoveev, A.V., Poznyakov, V.D., Zhdanov, S.L. et al. (2020) Impact of thermal cycles of welding on formation of the structure and properties of corrosion-resistant steel 06G2BDP. *The Paton Welding J.*, **9**, 22–27.

## INFLUENCE OF ARC WELDING TECHNOLOGY ON RESISTANCE OF WELDED JOINTS OF 06G2BDP STEEL TO COLD AND HOT CRACKS FORMATION, FATIGUE AND BRITTLE FRACTURE

O.A. Haivoronskyi<sup>1</sup>, V.D. Poznyakov<sup>1</sup>, S.L. Zhdanov<sup>1</sup>, A.M. Gerasymenko<sup>1</sup>, V.D. Ryabokon<sup>1</sup>, A.O. Maksymenko<sup>1</sup>, Jianxin Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: paton39@ukr.net

<sup>2</sup>Jiangsu University of Science and Technology, No. 666, Changhui Road, Dantu District, Zhenjiang, Jiangsu, China

The paper studies the effect of arc welding technological processes on the resistance of welded joints of scarcely alloyed atmosphere-resistant 06G2BDP steel to cold and hot cracks formation and brittle and fatigue fracture. With the help of the Implant method and using the technological Tekken sample, the conditions for cold cracks formation were evaluated and the methods of their elimination were recommended. It is shown that with the use of mechanized welding in shielding gases, solid-section and flux-cored wires provide high technological strength of welded joints in terms of hot cracks formation in a wide range of welding modes. On the other hand, when using coated electrodes, this range is narrowed, and at  $V_{def} \geq 20$  mm/min, joints are prone to the formation of this defect. The results of studies on the evaluation of welded joints resistance to brittle fracture indicate high values of the stress intensity factor  $K_Q$  for both the weld metal and HAZ metal. The endurance limit of T-joints when tested by cyclic loading was determined, which is  $[\sigma]_1 = 35$  MPa. 15 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

*Key words:* atmosphere-resistant steel, welded joints, cold cracks, hot cracks, brittle fracture, cyclic loading, fatigue fracture

Надійшла до редакції 13.11.2023  
Отримано у переглянутому вигляді 01.12.2023  
Прийнято 25.12.2023



# INTERNATIONAL CONFERENCE ON WELDING AND RELATED TECHNOLOGIES

**07-10.10.2024**  
wrt2024.com.ua  
Kyiv, Ukraine