

*Сергій МАКСИМОВ, Алла РАДЗІЄВСЬКА, Людмила НИРКОВА,
Сергій МЕЛЬНИЧУК*

**ВПЛИВ СКЛАДУ МЕТАЛУ ШВА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ, ВИКОНАНИХ
МОКРИМ ПІДВОДНИМ ЗВАРЮВАННЯМ, НА ЇХ КОРОЗІЙНУ ТРИВКІСТЬ
В УМОВАХ МОРСЬКОЇ КОРОЗІЇ**

*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ, 03150. E-mail: maksimov@paton.kiev.ua*

Sergey MAXIMOV, Alla RADZIYEVSKA, Lyudmila NYRKOVA, Sergey MELNYCHUK

**INFLUENCE OF THE METAL COMPOSITION OF WELDED JOINTS
OBTAINED BY WET UNDERWATER WELDING, ON ITS CORROSION
RESISTANCE IN THE CONDITIONS OF MARINE CORROSION**

*E.O. Paton Electric-Welding Institute of the NAS of Ukraine
11, Kazimir Malevich Str., Kyiv, 03150. E-mail: maksimov@paton.kiev.ua*

ABSTRACT

One of the most common defects occurring in welded metal structures that are exploited under water are corrosion spots. For its repairing, wet underwater welding, including welding by powdered wire, is used. It is necessary to ensure the corrosion resistance of the weld joint at the level of properties of the base metal. The purpose of the work was to investigate the corrosion resistance of welded joints with ferrite and austenite surfacing layers made by the method of wet underwater welding, in conditions that simulate the marine corrosion.

Welded joints, surfacing layer of which were obtained by powder wires based on PPP AN-2 with copper content of 0, 1 and 2%, and powdered wire with nickel coating were investigated. For investigating the distribution of corrosion potential through the surface of welded joint, the potentiometric measuring method under the drop applied. Potentials measured by chloride silver comparison electrode using the potentiostat PI.-50.1. It was shown that the most corrosion-resistant surfacing layer is obtained when the wire of PPS AN-2 + 2% Cu wire and powdered wire with nickel coating are used. Taking into account that the area of surfacing layer is much smaller than the area of metal construction, it will be expecting an increasing in the corrosion resistance of this zone and weld metal construction in general.

According to results of corrosion studies of welding joints with surfacing layers under conditions of variable wetting by 3% NaCl during 2000 hours, it was established that their surface of that specimens undergoes non-uniform corrosion with corrosion spots. Prevailing local destruction and cracks in the heat-affected zone of the butt weld joint and the surfacing layer on the specimens were not found, which is confirmed by the results of metallographic tests.

KEY WORDS: *pipe steel St3, potentiometry, periodic wetting, marine corrosion, wet underwater welding, flux-cored wire.*

ВСТУП

Однією із причин виходу з ладу металоконструкцій, що працюють у водному середовищі, у тому числі в морських умовах, є корозія. Так, наприклад, корозійне зношування листів підводної частини корпусу судна може досягати від 0,3 до 0,5 mm/year. Ще більш критична ситуація з корозією зварних швів. Швидкість їх руйнування перевищує швидкість корозії основного металу і у низці випадків може досягати 1...3 mm/year [1, 2]. Посилена вибіркочу корозію у вигляді борозн уздовж зварних швів (по обидва боки) спостерігали в металі зони термічного впливу (ЗТВ) пазових, стикових швів і швів приварки до основного виробу – до 1 mm/year, у багатьох випадках спостерігали наскрізне корозійне руйнування лінії сплавлення (утворення свищів) [1]. На думку авторів праці [2] зварні шви піддаються

руйнуванню внаслідок виникнення термоелектрорушійної сили між звареними деталями в умовах високої електропровідності морської води (ефект Зеебека). Оскільки зональна температура морської води майже завжди деякою мірою відрізняється від температури корпусу судна, то після зварювання цих деталей утворюється гальванічна пара між металом шва і біляшовної зони, що в кілька разів може пришвидшувати корозію менш «благородної зони» зварного з'єднання.

Для ремонту прокородованих зварних швів трубопроводів, що експлуатуються під водою, застосовується мокре підводне зварювання. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблені спеціалізовані порошкові дроти, призначені для зварювання маловуглецевих і низьколегованих сталей, у тому числі підвищеної міцності. В останньому випадку для забезпечення стійкості проти утворення холодних тріщин у зоні термічного впливу використовують електродні матеріали аустенітного типу [3]. Метою роботи було дослідження корозійної тривкості зварних з'єднань із феритними та аустенітним наплавленими шарами, виконаними методом мокрого підводного зварювання в умовах, що моделюють морські.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методика підготовки зразків для досліджень аналогічна до наведеної у праці [4] і полягала в наступному. Попередньо у повітрі були зварені стикові з'єднання зі сталі Ст3. Уздовж однієї зі сторін шва по лінії сплавлення була зроблена канавка глибиною 8 mm. Заварювання канавок виконували під водою порошковими дротами феритного та аустенітного типів на режимі: $I_{зв} = 180...200$ А, $U_d = 33...34$ V.

Характеристика досліджених зразків зварних з'єднань із наплавленими шарами наведена в табл. 1.

Таблиця 1. Характеристика зразків зварних з'єднань трубної сталі Ст3 із феритним та аустенітним наплавленим металом

Table 1. Characteristics of the samples of welded joints of pipe steel St3 with ferrite and austenitic weld metal

№ зразка	Вид наплавленого металу
1	феритний, виконаний дротом ППС АН-2
2	феритний, виконаний дротом ППС АН-2 + 1 % Cu
3	феритний, виконаний дротом ППС АН-2 + 2 % Cu
4	аустенітний, виконаний дротом з Ni стрічки

Як випробувальний розчин застосовували 3% NaCl.

Для дослідження розподілу потенціалів корозії по поверхні зварного з'єднання застосовували метод під краплею. Потенціали вимірювали відносно хлорсрібного електрода порівняння за допомогою потенціостата ПІ-50.1 упродовж 30 min на різних зонах зразків 33: основному металі (ОМ), зоні термічного впливу між основним металом за зварним швом (ЗШ) (далі ЗТВ_{ОМ-ЗШ}), зварному шві, зоні термічного впливу між зварним швом і наплавленим шаром (ЗТВ_{ЗШ-НШ}), зоні термічного впливу між наплавленим шаром та основним металом (ЗТВ_{НШ-ОМ}). Перед вимірюваннями зразки знежирювали оксидом магнію, промивали водогінною, потім дистильованою водою, висушували фільтрувальним папером.

Корозійні випробування зразків зварних з'єднань виконували в умовах змінного змочування 3% розчином NaCl за температури (20±2) °C упродовж 250, 700, 1000 і 2000 hours. Зразки навантажували за чотириточковою схемою до 0,8σ_T основного металу [4]. Після корозійних випробувань методом оптичної мікроскопії досліджували область в околі наплавленого шару. Металографічні шліфи готували за стандартною методикою.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Як відомо з досвіду експлуатації металокопункцій у морських умовах, переважному корозійному руйнуванню піддається зона сплавлення. Для її ремонту запропоновано

використовувати ремонтну технологію наплавленням, причому матеріал наплавленого шару вибирали більш легованим, щоб підвищити корозійну тривкість цієї зони.

Але контакт більш і менш легованих шарів у корозивно-агресивному середовищі призводить до електрохімічної гетерогенності. Для отримання попередніх даних щодо електрохімічної гетерогенності зварного з'єднання із наплавленим шаром аналізували їх потенціали корозії. Результати вимірювань наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Потенціали корозії різних зон зварного з'єднання зі сталі Ст3 із феритними та аустенітним наплавленими шарами

Table 2. Corrosion potentials of different zones of welded joint of St3 steel with ferrite and austenite cladding layer

№ зразка	Потенціал, V						
	ОМ (BM)	ЗТВ _{ОМ-ЗШ} (HAZ _{BM-Weld})	ЗШ (Weld)	ЗТВ _{ЗШ-НШ} (HAZ _{Weld-SL})	НШ (SL)	ЗТВ _{НШ-ОМ} (HAZ _{SL-BM})	ОМ (BM)
1	-0,550	-0,591	-0,500	-0,532	-0,548	-0,575	-0,550
2	-0,550	-0,591	-0,500	-0,537	-0,554	-0,580	-0,550
3	-0,550	-0,591	-0,500	-0,550	-0,499	-0,557	-0,550
4	-0,550	-0,591	-0,500	-0,566	-0,185	-0,450	-0,550

Скорочення: ОМ – основний метал, ЗТВ_{ОМ-ЗШ} – зона термічного впливу між основним металом та зварним швом, ЗШ – зварний шов, ЗТВ_{ЗШ-НШ} – зона термічного впливу між основним металом за зварним швом, НШ – наплавлений шар, ЗТВ_{НШ-ОМ} – зона термічного впливу між наплавленим шаром та основним металом.
Abbreviation: BM – base metal, HAZ_{BM-Weld} – heat affected zone between base metal and weld, Weld, HAZ_{Weld-SL} – heat affected zone between weld and cladding layer, SL – surfacing layer, HAZ_{SL-BM} – heat affected zone between cladding layer and base metal.

Для кращого сприйняття на рис. 1 наведено схематичну діаграму розподілу потенціалів.

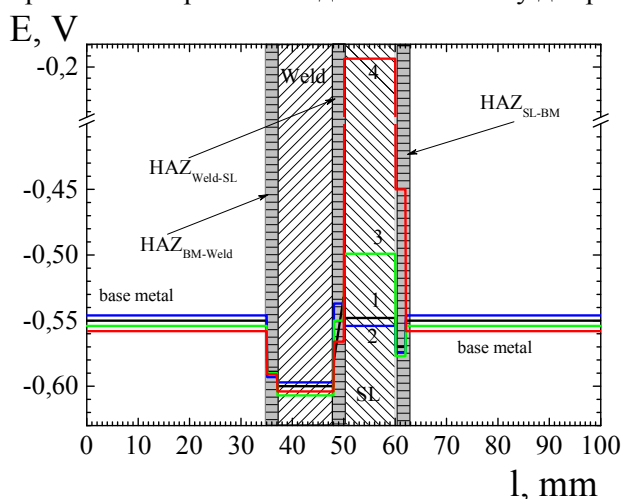


Рис. 1. Розподіл потенціалів по поверхні зразка ЗЗ із феритними та аустенітним НШ: 1 – феритний, виконаний дротом ППС АН-2; 2 – феритний, виконаний дротом ППС АН-2 + 1% Cu; 3 – феритний, виконаний дротом ППС АН-2 + 2% Cu; 4 – аустенітний, виконаний дротом з Ni стрічки.

Fig. 1. Distribution of potentials through the surface of the welded joint sample with ferrite and austenite cladding layer: 1 – ferrite, made by wire PPS AN-2; 2 – ferrite, made by wire PPS AN-2 + 1% Cu; 3 – ferrite, made by wire PPS AN-2 + 2% Cu; 4 – austenitic, made using of Ni strip wire.

Встановлено, що потенціал корозії основного металу сталі Ст3 дорівнював приблизно -0,550 V, металу шва – -0,500 V, зони термічного впливу стикового зварного з'єднання був від'ємніший, ніж основного металу та металу шва і становив ~-0,591 V. Присутність у зварному з'єднанні зони з більш від'ємним потенціалом під час контактування із корозивно-агресивним середовищем створювало умови для її руйнування, що і спостерігали під час експлуатації таких зварних металоконструкцій.

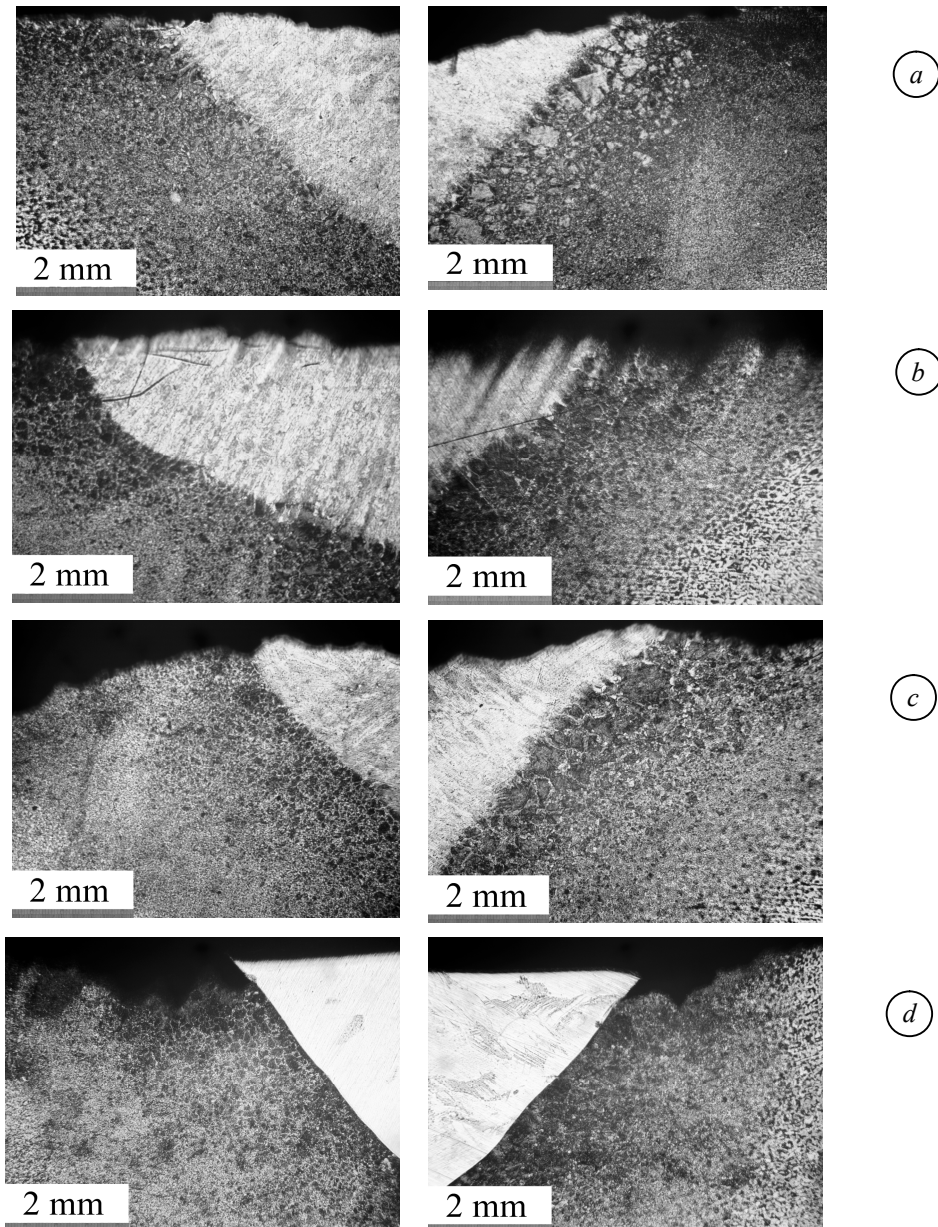


Рис. 2. Мікрофотографії біляповерхневих шарів зразків 33 зі сталі Ст3 із наплавленими шарами різного хімічного складу після досліджень в умовах сумісного впливу постійного навантаження та змінного змочування упродовж 700 годин: *a* – феритний, виконаний дротом ППС АН-2; *b* – феритний, виконаний дротом ППС АН-2+1 % Cu; *c* – феритний, виконаний дротом ППС АН-2+2 % Cu; *d* – аустенітний виконаним дротом з Ні стрічки.

Fig. 2. Microphotographs of near surface layers of welded joint samples of St3 steel with cladding layer of different chemical composition after investigations under conditions of complex exposure of constant load and different wetting by 3 % NaCl during 700 hours: *a* – ferrite, made by wire PPS AN-2; *b* – ferrite, made by wire PPS AN-2 + 1% Cu; *c* – ferrite, made by wire PPS AN-2 + 2% Cu; *d* – austenitic, made using of Ni strip wire.

У разі руйнування цієї зони та відновлення її наплавленням отримували більш легований, порівняно зі ЗТВ, шар. Потенціал корозії цього шару відрізнявся залежно від застосовуваного зварювального дроту. Так, потенціал корозії наплавленого шару, виконаного дротом ППС АН-2, дорівнював близько -0,548 V. При введенні до складу дроту 1 % міді потенціал корозії майже не змінився і становив близько -0,554 V. Збільшення вмісту міді до 2 % сприяло «облагороджуванню» потенціалу корозії наплавленого шару, він набув значення -0,499 V. При застосуванні дроту з Ні стрічки потенціал наплавленого шару становив -0,185 V. Таким чином, застосування ремонту методом наплавлення наведеними вище зварювальними дротами

сприяє зміщенню потенціалу корозії зони до позитивніших значень. Найбільш корозійнотривкий наплавлений шар забезпечується при застосування дроту ППС АН-2 + 2 % Cu та дроту з Ni стрічки. Враховуючи, що площа наплавленого шару набагато менша від площі металоконструкції, можна очікувати підвищення корозійної тривкості цієї зони та зварної металоконструкції в цілому.

Під час експлуатації металоконструкції у морських умовах найнебезпечнішою є зона, яка піддається періодичному змочуванню з боку корозивно-агресивного середовища. Досліджували корозійну тривкість зварного з'єднання із наплавленими шарами різного хімічного складу в умовах, що моделюють сумісний вплив постійного навантаження та періодичного змочування. Внаслідок різної корозійної тривкості зон ЗЗ з НШ, в умовах навантаження ЗЗ могло відбуватися їх розтріскування, тому після випробувань за змінного змочування впродовж 250, 700, 100 та 2000 hours досліджували вплив напружень, що стискають і напружень, що розтягують. Для цього після випробувань за змінного змочування зразки загинали на кут 180°, після чого металографічним методом досліджували зону сплавлення для виявлення можливих локальних ушкоджень.

Відмічено, що під час контакту зі середовищем поверхня зварних з'єднань піддавалася суцільній нерівномірній корозії, на поверхні утворилися корозійні плями та виразки. Переважного локального руйнування зони сплавлення стикового зварного шва та наплавленого шару також не виявлено на жодному зі зразків.

На рис. 2 представлені мікрофотографії зон зварних з'єднань із наплавленим шаром після 700 hours. Встановлено, що глибина локального корозійного руйнування основного металу становила від 100 до 400 μm . На наплавлених шарах, виконаних дротами ППС АН-2, ППС АН-2+1 % Cu, ППС АН-2+2 % Cu глибина корозійних виразок становила приблизно (400...500) μm , (200...400) μm і (200...700) μm відповідно. НШ, виконаний дротом із Ni стрічки, залишився без змін, глибина корозійного руйнування дорівнювала нулю. Локальних корозійних пошкоджень у вигляді тріщин не виявлено на жодному зварному з'єднанні з наплавленим шаром. Зі збільшенням тривалості експонування у середовищі до 2000 hours спостерігали несуттєве збільшення глибини нерівномірної корозії, але тріщин і локального руйнування по зоні сплавлення не виявили.

ВИСНОВКИ

1. Ремонт із застосуванням технології наплавленням дротами ППС АН-2, ППС АН-2+1 % Cu, ППС АН-2+2 % Cu і дроту з Ni стрічки дає можливість отримати більш легований шар. Найбільш корозійнотривкий наплавлений шар забезпечується при застосуванні дротів ППС АН-2 + 2 % Cu та з Ni стрічки. Враховуючи набагато меншу площу наплавленого шару порівняно з площею конструкції, можна очікувати підвищення корозійної тривкості цієї зони та зварної металоконструкції в цілому.

2. В умовах змінного змочування розчином 3 % NaCl поверхня зварних з'єднань із наплавленими шарами зазнає суцільної нерівномірної корозії з утворенням корозійних плям і виразок. Переважного локального руйнування і тріщин по зоні сплавлення стикового зварного шва та наплавленого шару на зразках зварних з'єднань із наплавленими шарами не виявлено. Збільшення тривалості експонування у середовищі не сприяє переважному руйнуванню зони сплавлення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Коломийцев Е.В. Коррозионная стойкость сварных соединений судокорпусных материалов. Автоматическая сварка. 2012. № 4. С. 59–64.
2. Сиротюк А.М., Дмитрах І.М. Оцінювання корозійно-механічних дефектів сталей підводних трубопроводів. Вісник НУК імені адмірала Макарова. 2014. № 2. С. 66–72.
3. Максимов С.Ю., Савич І.М., Захаров С.М. Структура и свойства металла, наплавленного под водой порошковой проволокой с никелевой оболочкой. Автоматическая сварка. 2003. № 4. С. 19–22.
4. Гусаченко А.И., Савич І.М., Лось Е.П. Коррозия швов сварных соединений корпусных сталей типа 09Г2 и возможность их подварки под водой. Автоматическая сварка. 1987. № 11. С. 58–60.
5. ГОСТ 9.901.2-89 Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Испытания на коррозионное растрескивание образцов в виде 99693изогнутого бруса.