

Каховський М. Ю.

## РОЗРОБКА НОВИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ МОКРОГО ПІДВОДНОГО ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОЛЕГОВАНОЇ КОРОЗІЙНОСТІЙКОЇ СТАЛІ

*Представлено розробку зварювального матеріалу для технології механізованого мокрого підводного зварювання високолегованої корозійностійкої сталі. Виявлено фізико-металургійні процеси та особливості дугового зварювання, що протікають при виконанні під водою зварних з'єднань. Розроблено, вперше в світовій практиці, самозахисний порошковий дріт для мокрого підводного зварювання досліджуваної сталі.*

**Ключові слова:** порошковий дріт, сталь X18H10T, покриті електроди, АЕС, газонасиченість, підводне зварювання.

### 1. Вступ

Підводне зварювання знаходить все ширше використання в наш час. Більшість елементів виконано з низьколегованих конструкційних сталей, однак з огляду на низькі антикорозійні властивості низьколегованої сталі все більше застосування знаходить високолегована корозійностійка сталь.

Об'єктами застосування мокрого підводного зварювання даної сталі являються басейни для зберігання відпрацьованого ядерного палива на АЕС. Залізобетонні конструкції глибиною близько 25 метрів, які облицьовані високолегованою корозійностійкою сталлю і заповнені прісною водою, нерідко під час завантаження, або вивантаження тепловіділяючих елементів зазнають механічних пошкоджень у вигляді тріщин та пробоїв, що призводить до витікання радіоактивної води у навколишнє середовище, що в свою чергу може призвести до екологічної катастрофи.

А отже, технологія зварювально-ремонтних робіт є вкрай актуальною та необхідною, а їх проведення без відповідних зварювальних матеріалів не виявляється можливим.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Перші спроби вирішення даної проблеми відносяться до середини 80-х років, коли в США на деяких атомних електростанціях після планового огляду було виявлено тріщини в облицьованні басейнів [1, 2]. Ремонт було проведено із зупинкою АЕС, злиттям води та проведенням відповідних ремонтних робіт.

Але враховуючи значні втрати часу і збитки внаслідок зупинки виробничого циклу АЕС, а також негативний вплив радіоактивного середовища на здоров'я водолаза-зварника дана технологія потребувала заміни на більш оперативну та менш небезпечну.

В Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України було розроблено спеціалізовані покриті

електроди для мокрого підводного зварювання високолегованої корозійностійкої сталі. Нові покриті електроди дозволили виконувати зварювально-ремонтні роботи набагато оперативніше, а використовуючи фізичні властивості води як захист від радіації завдавати набагато меншого впливу на здоров'я водолаза-зварника.

Однак порівняно з механізованим і автоматизованим способами зварювання, ручне дугове зварювання покритими електродами характеризується більш низькою продуктивністю виконання зварювально-ремонтних робіт і порівняно більш низькою якістю зварних швів.

Крім того, світові тенденції розвитку зварювального устаткування розвиваються в напрямку автоматизації процесу для можливості виключення повної участі людини в особливо небезпечних умовах таких, як підводне зварювання та радіоактивне середовище [3, 4].

Враховуючи вищезазначене та економічну складову атомної енергетики, де за аналітичними даними година простою атомної електростанції може коштувати півмільйона доларів США [2], розробка технології механізованого мокрого підводного зварювання високолегованої корозійностійкої сталі з використанням самозахисного порошкового дроту є більш ніж актуальною.

### 3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

*Об'єктом дослідження* є фізико-металургійні особливості мокрого підводного зварювання досліджуваної сталі.

*Мета досліджень* — розробити самозахисний порошковий дріт для мокрого підводного зварювання високолегованої корозійностійкої сталі типу 18-10.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати наступні задачі:

1. Дослідити ступень газонасиченості металу шва, дослідити окислюючий та наводнюючий вплив водного середовища.

2. Дослідити типи шлакової системи дроту та визначити оптимальне співвідношення газшлакоутворюючих компонентів шихти дроту.

3. Дослідити стабільність процесу горіння дуги у водному середовищі.

4. Отримати задовільні механічні характеристики зварного з'єднання та необхідний хімічний склад металу зварного шва.

Слід зазначити, що на даний час самозахисних порошкових дротів для мокрого підводного зварювання високолегованих корозійностійких сталей в світі не існує, а дана розробка є першою в світовій практиці.

#### 4. Результати досліджень фізико-металургійних особливостей мокрого підводного зварювання досліджуваної сталі

При мокрому підводному зварюванні дуга горить в замкнутому об'ємі парагазового мішура, що утворюється за рахунок продуктів дисоціації води [5, 6]. В низьколегованих сталях перенасичення наплавленого металу воднем призводить до утворення зварювальних дефектів і зниження механічних характеристик зварного шва, в той час як розчинність водню в аустенітному металі досить велика (55...60 см<sup>3</sup>/100 г) і перебуває, як правило, в межах розчинності [7, 8]. Пріоритетним напрямком при мокрому підводному зварюванні високолегованих корозійностійких сталей є зниження вмісту кисню. Взаємодіючи з розплавленим металом він сприяє вигорянню високоактивних легуючих компонентів, може проявлятися у вигляді оксидних включень, які негативно впливають на механічні властивості наплавленого металу, а також у вигляді дефектів, таких як пори [9, 10].

Вміст водню, кисню та азоту визначали зі зразків МІ-99, вирізаних з останнього шару наплавлень. Результати вмісту газів в наплавленому металі наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Вміст газів в наплавленому металі при мокрому підводному зварюванні та при зварюванні на повітрі

Середовище зварювання	Вміст газів в наплавленому металі		
	мас. %		см <sup>3</sup> /100 г
	[N]	[O]	[H]
На повітрі	0,06	0,05	10,5
У воді	0,03	0,07	27,0

На рис. 1 наведено вигляд наплавлень, які виконані при мокрому підводному зварюванні дослідним дротом діаметром Ø1,6 мм на сталь 12X18H10T на постійному струмі зворотної полярності. В якості джерела живлення використовували випрямляч ВДУ-601 (жорстка характеристика) на режимах:  $U_d = 32...34$  В;  $I_{св} = 140...160$  А.

Оцінку стабільності процесу горіння дуги та характеристик процесу плавлення і переносу електродного металу проводили за допомогою аналізатора зварювальних процесів ASP-19. З рис. 2 видно, що процес зварювання проходить із задовільною стабільністю процесу горіння дуги та без коротких замикань.

Результати хімічного аналізу складу наплавленого металу показує відповідність заданому типу легування 06X20H9Г2Б згідно ГОСТ 10052-75 (табл. 2).

Оцінку вмісту феритної фази в наплавленому металі проводили з використанням феритометра марки «МФ-10і» об'ємним магнітним методом. Вміст феритної складової в металі шва типу 06X20H9Г2Б згідно ГОСТ 9466-75

має бути в межах 4...10 мас. %. Структура металу шва — аустеніт + 6% α-фази. Випробування зварних з'єднань на схильність до міжкристалітної корозії проводили за методом «АМ» згідно ГОСТ 6032-2003. Аналіз зразків після випробувань показали повну відсутність МКК.

Результати механічних випробувань повністю задовольняють вимогам класу «В» міжнародного спецстандарту з підводного зварювання ANSI/AWS D3.6 (табл. 3).

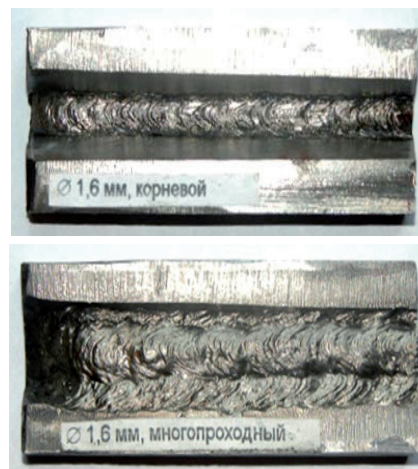
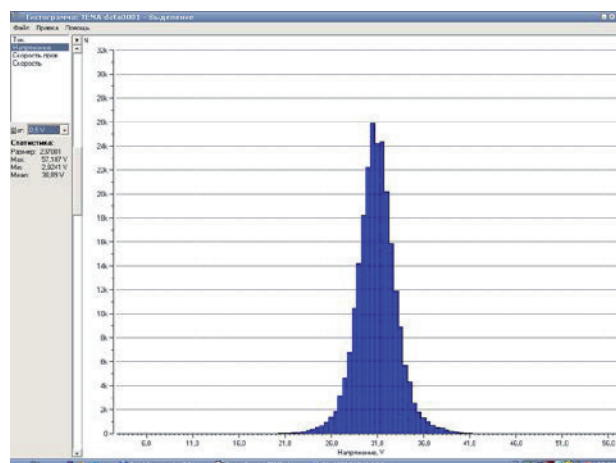
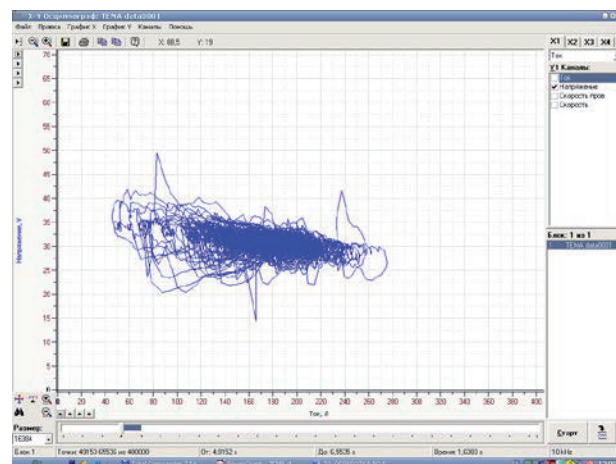


Рис. 1. Одношарове та багатошарове наплавлення, виконані дослідним дротом



а



б

Рис. 2. Гістограми зварювального процесу напруги (а) і вольтперна характеристика процесу зварювання (б)

Таблиця 2

Результати хімічного складу наплавленого металу при мокрому підводному зварюванні та при зварюванні на повітрі

Середовище зварювання	Хімічний склад наплавленого металу, мас. %							
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Nb	P	S
Водне	0,04	1,23	0,32	9,4	20,90	0,21	0,022	0,018
Повітря	0,06	1,83	0,52	9,5	21,83	0,30	0,025	0,015

Таблиця 3

Механічні властивості металу шва і зварного з'єднання

Межа текучості $\sigma_{0,2}$ , МПа	Тимчасовий опір розриву $\sigma_b$ , МПа	Відносне звуження $\Psi$ , %	Відносне подовження $\delta$ , %	Ударна в'язкість $a_k$ , Дж/см <sup>2</sup>	Кут загибну, град. $R = t$
351	624	29	26	90	68...103

Металографічні дослідження металу шва показали, що при мокрому підводному зварюванні загальна кількість неметалічних включень збільшується майже в 2 рази, але вони дисперсні і рівномірно розподілені по перерізу шва. Структура металу шва подрібнюється, при цьому розмір зерен зменшується більш ніж в 2 рази (рис. 3).

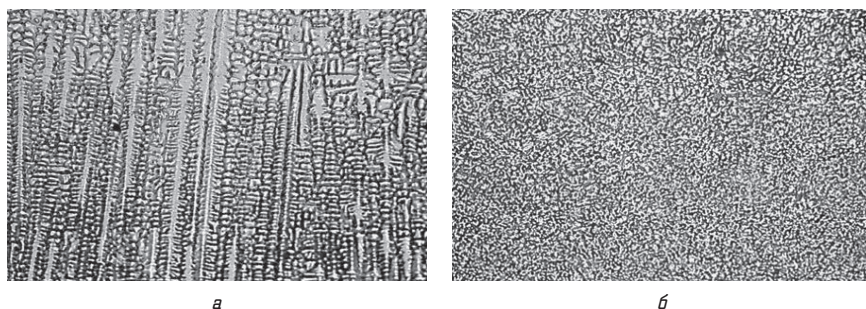


Рис. 3. Зовнішній вигляд мікроструктур металу швів, зварених на повітрі (а) і під водою (б)

Використання технології механізованого підводного зварювання із застосуванням розробленого самозахисного порошкового дроту марки ПП-АНВ-25 в порівнянні з покритими електродами дозволяє скоротити час проведення зварювально-ремонтних робіт, а також сумарну вартість ремонту в 2,6 рази [11].

## 5. Висновки

Результати проведених досліджень і випробувань показали, що:

1. Розроблений зварювальний дріт дає можливість підвищити якість і продуктивність виконання зварювально-ремонтних робіт у водному середовищі, а також отримати економічний ефект внаслідок зменшення часу простою виробничого циклу об'єкту під час ремонту.

2. Хімічний склад наплавленого металу та механічні характеристики зварного з'єднання відповідають вимогам класу «В» міжнародного спецстандарту з підводного зварювання ANSI/AWS D3.6-92 та ГОСТ 10052-75.

3. Застосування технології механізованого мокрому підводного зварювання дослідним самозахисним порошковим дротом створює основу для розробки автоматизованого устаткування, що дозволить в подальшому повністю виключити участь людини при виконанні зва-

рювально-ремонтних робіт відповідальних конструкцій в особливо небезпечних умовах.

## Література

- Hancock, R. Underwater nuclear [Text] / R. Hancock // Welding Journal. — 2003. — № 9. — P. 48–49.
- O'Sullivan, J. E. Wet underwater weld repair of Susquehanna unit 1 steam dryer [Text] / J. E. O'Sullivan // Welding journal. — 1988. — № 6. — P. 19–23.
- Розерт, Р. Применение порошковых проволок для сварки в промышленных условиях [Текст] / Р. Розерт // Автоматическая сварка. — 2014. — № 6–7. — С. 60–64.
- Маковецкая, О. К. Ситуация на рынке основных конструкционных материалов и сварочной техники в Японии [Текст] / О. К. Маковецкая // Сварщик. — 2012. — № 5. — С. 34–41.
- Авилов, Т. И. Исследование процесса дуговой сварки под водой [Текст] / Т. И. Авилов // Сварочное производство. — 1958. — № 5. — С. 12–14.
- Мадатов, Н. М. Подводная сварка и резка металлов [Текст] / Н. М. Мадатов. — Л.: Судостроение, 1967. — 164 с.
- Кононенко, В. Я. Подводная сварка и резка металлов [Текст] / В. Я. Кононенко. — К.: Университет «Україна», 2011. — 264 с.
- Каховский, Н. Ю. Влияние состава шихты порошковой проволоки на стабильность процесса горения дуги при мокрой подводной сварке [Текст] / Н. Ю. Каховский, С. Ю. Максимов // Сборник научных работ Национального университета кораблестроения. — 2014. — № 6. — С. 29–33.
- Balyts'kyi, O. I. Influence of preliminary plastic deformation of 12Kh18N12T steel on its mechanical properties [Text] / O. I. Balyts'kyi, J. Elias, I. V. Rippe // Materials Science. — 2012. — Vol. 47, № 4. — P. 438–446. doi:10.1007/s11003-012-9414-0
- Balitskii, A. I. Determination of stainless steels mechanical properties in high-pressure hydrogen [Text] / A. I. Balitskii, V. I. Vitvitskii // Effects of Hydrogen on Materials. — 2009. — P. 421–428.
- Каховський, М. Ю. Порошковий самозахисний дріт для підводного зварювання високолегованої корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т [Текст] / М. Ю. Каховський // Молодий вчений. — 2014. — № 11. — С. 12–15.

## РАЗРАБОТКА НОВЫХ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МОКРОЙ ПОДВОДНОЙ СВАРКИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ

Представлена разработка сварочного материала для технологии механизированной мокрой подводной сварки высоколегированной коррозионностойкой стали. Установлены физико-металлургические процессы и особенности дуговой сварки, протекающие при выполнении под водой сварных соединений. Разработана, впервые в мировой практике, самозащитная порошковая проволока для мокрой подводной сварки исследуемой стали.

**Ключевые слова:** порошковая проволока, сталь X18N10T, открытые электроды, АЭС, газонасыщенность, подводная сварка.

*Каховський Микола Юрійович, науковий співробітник, відділ металургії і технологій зварювання високолегованих сталей і сплавів, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна, e-mail: m.kakhovskyi@gmail.com.*

*Каховський Николай Юрьевич, научный сотрудник, отдел металлургии и технологии сварки высоколегированных сталей и сплавов, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина.*

*Kakhovskyi Mykola, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: m.kakhovskyi@gmail.com*