

## ПОРОШКОВИЙ САМОЗАХИСНИЙ ДРІТ ДЛЯ ПІДВОДНОГО ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОЛЕГОВАНОЇ КОРОЗІЙНОСТІЙКОЇ СТАЛІ 12X18H10T

Каховський М.Ю.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона  
Національної академії наук України

У статті викладено результати розробки технології проведення зварювально-ремонтних робіт самозахисним порошковим дротом при мокрому підводному зварюванні високолегованих корозійностійких сталей типу 18-10. Застосування даної технології дає змогу частково або повністю зменшити участь людини в процесі зварювання при екстремальних умовах – на великих глибинах, у радіоактивних середовищах (у випадку АЕС), а також отримати значний економічний ефект за рахунок більшої продуктивності виконання зварювально-ремонтних робіт. Практична цінність застосування цієї технології полягає також і в можливості виконання зварювально-ремонтних робіт безпосередньо під водою без будь-яких додаткових монтажних робіт.

**Ключові слова:** мокре підводне зварювання, сталь 12X18H10T, АЕС, самозахисний порошковий дріт, FCAW, покриті електродами.

**Вступ.** В роботах по будівництву підводних частин різних споруд, підводних трубопроводів, гідроелектростанцій, портових споруд, мостів, в судно-підйомних, судноремонтних і рятувальних роботах часто виникає необхідність виконання підводних зварювальних робіт. Більшість цих елементів виконано з низьколегованих конструкційних сталей, проте все більше застосування знаходить і підводне зварювання високолегованих сталей типу 18-10. Одним з основних об'єктів застосування підводного зварювання високолегованих корозійностійких сталей є басейни для зберігання відпрацьованого ядерного палива на АЕС.

На сьогодні в Україні працюють чотири атомні електростанції (АЕС) – Запорізька, Рівненська, Південноукраїнська та Хмельницька, на яких експлуатуються п'ятнадцять ядерних енергоблоків з реакторними установками типу ВВЕР-1000 і ВВЕР-440. Крім того, ще в 30 країнах світу експлуатуються 193 атомні електростанції з 435 енергоблоками, певна кількість яких підходить до моменту планового ремонту.

**Постановка проблеми.** Після вивантаження тепловідділяючих елементів з активної зони реактора, вони витримуються в басейні зберігання відпрацьованого ядерного палива 2...5 років для зменшення залишкового енерговиділення. Басейни являють собою бетонні конструкції глибиною 24 м, облицьовані високолегованою корозійностійкою сталлю типу 18-10 товщиною 3...5 мм і заповнені прісною водою. Під час операцій завантаження-вивантаження тепловідділяючих елементів досить часто виникають механічні пошкодження в облицьовці корпусу басейну. Несвоєчасний ремонт призводить до витoku радіоактивної води в навколишнє середовище, що може привести до екологічної катастрофи.

Високий рівень радіації обмежує доступ обслуговуючого персоналу до обладнання, що знаходиться в безпосередній близькості до реактора АЕС. При ремонті або регламентних роботах намагаються максимально застосовувати техніку з дистанційним керуванням. В іншому випадку при необхідності використовувати людську працю задача сильно ускладнюється. Одним з можливих шляхів виходу з такої ситуації може слугувати використання фізичних захисних властивостей водного середовища, яке є природним бар'єром, що зменшує вплив радіоактивного випромінювання на водолаза при виконанні зварювально-ремонтних робіт.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Мокре підводне зварювання має ряд особливостей.

При зварюванні під водою дуга горить в газовому пазузі, який утворюється за рахунок випаровування і розкладання води, парів і газів розплавленого металу і компонентів зварювальних матеріалів [1]. Щільність води в 850 разів більше щільності повітря, теплоємність в 4 рази, а теплопровідність в 25 разів [2]. На дугу, яка горить під водою, впливають два види стиснення (контрагування) від охолоджувальної дії водню і гідростатичного тиску стовпа рідини [3]. Також охолоджуюча дія води, підвищений тиск, дисоціація води та її парів призводять до дестабілізації процесу горіння дуги, що в свою чергу призводить до необхідності використання більшої потужності на підтримання дугового розряду, ніж у випадку зварювання на повітрі [4, 5].

Вперше спуски людини під воду в таких умовах відносяться до середини 70-х років, коли в США перші АЕС досягли середини терміну експлуатації [6]. А піонером по застосуванню зварювання під водою стала через 10 років Пенсильванська АЕС [7], оснащена реакторами на киплячій воді потужністю 1050 МВт. У 1984 р під час завантаження палива візуальний контроль виявив втомну тріщину в корпусі паросушувач. Рівень радіації на поверхні корпусу становив 1 бер/год, на відстані 46 см 0,5 бер/год. Для зниження дози опромінення було прийнято рішення виконати ремонт комбінованим способом приміщення заповнили водою і водолаз виконав розділку крайок під зварювання. Потім воду злили, а дефектну ділянку було заварено вручну неплавким електродом.

У 1987 році під час чергової операції по завантаженню паливом була виявлена ще одна втомна тріщина в корпусі парогенератора довжиною 1400 мм [7]. Прилади зафіксували високий рівень радіації навіть у заповненому водою стані – на поверхні металу 6 бер/год, а на відстані 30 см 1,5 бер/год. З можливих в таких умовах варіантів ремонту вибрали – мокре підводне зварювання покритими електродами. Приміщення було заповнене водою, і водолази-зварники виконали необхідний обсяг робіт. Успішне виконання проекту підтвердило придатність мокрому підводному зварюванню покритими електродами в якості реальної альтернативи традиційним способам ремонту.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Однак дана технологія вимагала багато часу і призводила до значних збитків внаслідок зупинки виробничого циклу атомної електростанції, а також до значного негативного впливу на здоров'я водолаза-зварювальника, який виконував зварювальні роботи в радіоактивному середовищі.

Також слід зазначити, що досить високими залишаються втрати виробництва внаслідок непланових (повторних) ремонтів, викликаних як недостатнім забезпеченням якості ремонтних робіт, так і недостатнім рівнем надійності обладнання/систем і дій оперативного персоналу. Багаторічний досвід експлуатації АЕС показав, що одним з визначальних чинників ефективності виробництва (КВВП) є тривалість ремонту реактора після його зупинки [8].

На даний момент, ринок матеріалів для проведення зварювально-ремонтних робіт для мокрого підводного зварювання високолегованих корозійностійких сталей представлений тільки спеціалізованими покритими електродами, які наведено в табл. 1.

Таблиця 1  
**Покриті електроди для мокрого підводного зварювання високолегованих корозійностійких сталей**

Марка електроду	Діаметр, мм	Країна виробник
Magnum MAG 0310x Eagle	3,2...4,0...4,8	США
Broco Underwater SofTouch	3,2...4,0	США
Surweld #33	2,4...3,2	США
Speciality Welds Hammerhead	3,2	Великобританія

Однак зварювальні електроди у порівнянні із самозахисним порошковим дротом мають ряд недоліків, а саме:

- більший діаметр зварювальних електродів, що ускладнює зварювання у всіх просторових положеннях;
- більш низьку продуктивність виконання робіт і більший коефіцієнт витрат зварювального матеріалу, внаслідок чого більшу вартість 1 кг наплавленого металу;
- триваліший контакт водолаза з радіоактивною водою і збільшений час простою АЕС під час ремонту.

**Формулювання цілей статті (постановка задачі).** Враховуючи економічні реалії атомної енергетики, де година простою АЕС може коштувати півмільйона доларів [6], існувала вкрай гостра необхідність створення технології більш оперативного ремонту басейнів для зберігання відпрацьованого ядерного палива.

Головною метою цієї роботи була розробка технології механізації процесу проведення зварювально-ремонтних робіт методом мокрого підводного зварювання самозахисним порошковим дротом.

Використання технології механізованого підводного зварювання із застосуванням самозахисного порошкового дроту (FCAW) дозволить:

- підвищити продуктивність і якість проведення підводних зварювально-ремонтних робіт за рахунок використання механізованого способу зварювання;
- зменшити шкоду здоров'ю водолаза-зварювальника за рахунок меншого часу перебування в радіоактивному середовищі;
- одержати економічний ефект за рахунок меншого часу простою виробничого циклу атомної електростанції.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для підтвердження вигоди від використання технології механізованого підводного зварювання, був виконаний умовний розрахунок економічного ефекту при проведенні зварювально-ремонтних робіт для 100 кг зварного шва, який наведено в табл. 2.

Після аналізу розрахункових даних можна зробити висновок, що проведення зварювально-ремонтних робіт з використанням технології механізованого підводного зварювання самозахисним порошковим дротом, у порівнянні з технологією ручного дугового зварювання покритими електродами, час виконання робіт і сумарна вартість ремонту скорочується в 2,63 рази.

З метою заміни технології виконання зварювальних робіт покритими електродами технологією механізованого підводного зварювання, в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України було розроблено самозахисний порошковий дріт для мокрого підводного зварювання високолегованих корозійностійких сталей типу 18-10.

На рис. 1 наведено зовнішній вигляд зварних швів зроблених при мокрому підводному зварюванні високолегованої корозійностійкої сталі типу 18-10. Зварювання виконувалося дротом діаметром 1,6 мм на постійному струмі зворотної полярності, з використанням в якості джерела живлення випрямляча ВДУ-601 (жорстка характеристика).

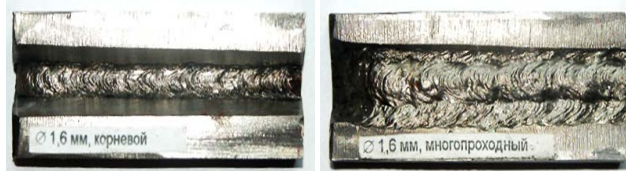


Рис. 1. Зовнішній вигляд зварних швів при мокрому підводному зварюванні високолегованої корозійностійкої сталі типу 18-10

За результатами хімічного аналізу склад наплавленого металу відповідає заданому типу легу-

Таблиця 2

**Розрахунок економічного ефекту**

№	Критерій	Формула	Порошковий дріт	Покриті електроди
1	Коефіцієнт витрати зварювального матеріалу	Довідникові дані	1,05...1,1	1,6...1,7
2	Необхідна кількість зварювальних матеріалів на 100 кг зварного шва, кг	№ 2 = № 1 * 100 кг	105...110	160...170
3	Продуктивність виконання робіт, кг/год	Довідникові дані	4,8...5,0	1,8...1,9
4	Час на виконання робіт, год	№ 4 = 100 кг / № 3	20	52,6
5	Зарплата водолаза-зварника, грн/год	Статистичні дані	250	250
6	Вартість оплати послуг водолаза-зварника, грн	№ 6 = № 4 * № 5	5000	13150
7	Вартість простою виробничого циклу АЕС, грн*	№ 7 = 1000000 * № 4	2000000	5260000
8	Сумарна вартість ремонту, грн**	№ 8 = № 7 + № 6	2005000	5273150

\* За умов збитків від простою одного енергоблоку АЕС 100000 грн/год

\*\* Без урахування вартості зварювальних матеріалів

**Результати хімічного складу металу шва  
при мокрому підводному зварюванні та при зварюванні на повітрі**

Середовище	Хімічний склад наплавленого металу, мас. %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	S	P
Повітря	0,06	0,52	1,83	21,83	9,5	0,3	0,015	0,025
Вода	0,04	0,32	1,23	20,90	9,4	0,21	0,018	0,022

вання 06X20H9Г2Б згідно ГОСТ 10052-75. Мікроструктура металу шва – аустенит + 6%  $\alpha$ -фази. Забезпечується стійкість проти МКК.

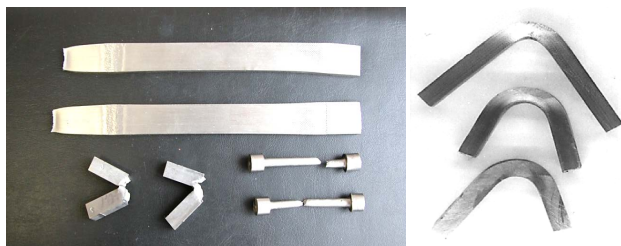
Результати аналізу хімічного складу зварного шва при підводному зварюванні дослідним дротом наведені в табл. 3, практично повністю збігаються з даними при зварюванні самозахисним порошковим дротом для зварювання на повітрі.

Механічні властивості зварювальних зразків наведені в табл. 4, а їх зовнішній вигляд на рис. 2. Отримані результати механічних випробувань задовольняють вимоги класу «В» міжнародного стандарту з підводного зварювання ANSI/AWS D3.6.

Таблиця 4

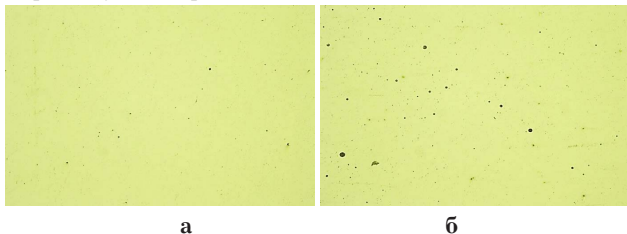
**Механічні властивості зварювальних зразків  
при мокрому підводному зварюванні  
високолегованої корозійностійкої сталі типу 18-10**

Марка порошкового дроту	ПП-АНВ-25
Температура випробувань, К	293
Межа плинності $\sigma_{0,2}$ , МПа	350,8
Межа міцності $\sigma_b$ , МПа	623,3
Відносне подовження $\delta$ , %	25,7
Відносне звуження $\Psi$ , %	28,7
Ударна в'язкість $a_k$ , Дж/см <sup>2</sup>	90,3
Кут загину, град. $R = t$	68...103



**Рис. 2. Зовнішній вигляд зразків  
після механічних випробувань**

Металографічні дослідження показали, що при зварюванні під водою загальна кількість неметалічних включень збільшується майже в 2 рази, але вони дрібнодисперсні і рівномірно розподілені по перетину шва, рис. 3.

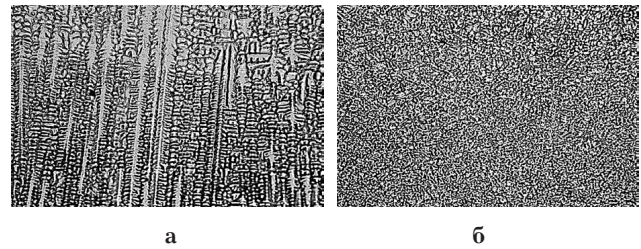


**Рис. 3. Неметалеві включення в металі шва  
при зварюванні на повітрі (а) і під водою (б).**

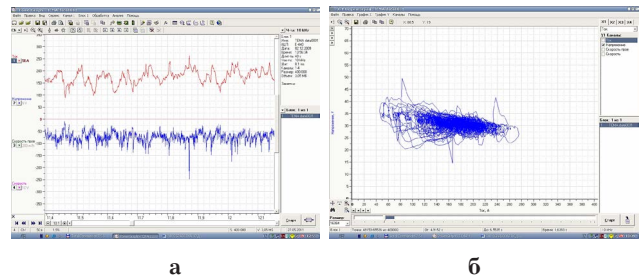
Структура металу шва в значній мірі подрібнюється розмір зерен зменшується більш ніж в 4 рази, рис. 4.

Процес зварювання проходить із задовільною стабільністю процесу горіння дуги і без коротких замикань, про що свідчать осцилограми струму і напруги,

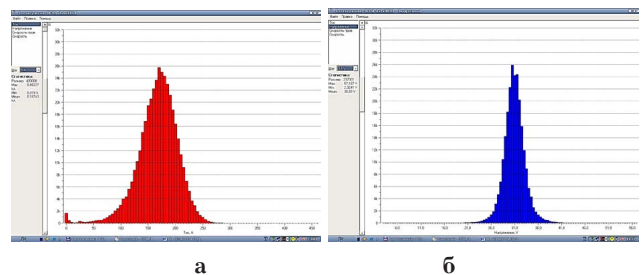
а також зовнішня вольтамперна характеристика (рис. 5), гістограми струму і напруги (рис. 6), які побудовані за допомогою програми Power Graph Professional v.3.3.



**Рис. 4. Мікроструктури металу шва, зварених  
на повітрі (а) і під водою (б)**



**Рис. 5. Осцилограма процесу зварювання (а)  
і зовнішня вольтамперна характеристика процесу  
зварювання порошковим дротом (б)**



**Рис. 6. Гістограми зварювального процесу струму (а)  
і напруги (б)**

Самозахисному порошковому дроту для мокрому підводного зварювання високолегованих хромонікелевих корозійностійких сталей типу 18-10 присвоєна марка ПП-АНВ-25.

За своїми властивостями розроблений самозахисний порошковий дріт для підводного зварювання високолегованих корозійностійких сталей повністю відповідає вимогам класу «В» міжнародного стандарту з підводного зварювання ANSI/AWS D3.6.

#### **Висновки з даного дослідження:**

- Розроблено самозахисний порошковий дріт, який забезпечує необхідний хімічний склад і механічні властивості наплавленого металу згідно ГОСТ 10052-75 і вимоги класу «В» міжнародного стандарту підводного зварювання ANSI/AWS D3.6-92.

- Розроблений дріт дозволяє підвищити продуктивність і якість підводних зварювально-ремонтних робіт, зменшити шкоду здоров'ю водолаза-зварника, отримати економічний ефект, зменшити час простою виробничого циклу атомної електростанції.

• Створено основу для можливості в перспективі автоматизації процесу зварювання для виключення повної участі людини в роботах в особливо небезпечних умовах.

#### Список літератури:

1. Кононенко В.Я. Подводная сварка и резка. – К.: Університет «Україна». 2011. – 264 с.
2. Авилов Т.И. Исследование процесса дуговой сварки под водой // Сварочное производство. – 1958. – № 5. – С. 12-14.
3. Мадатов Н.М. Подводная сварка и резка метал лов. – Л.: Судостроение, 1967. – 164 с.
4. Лесков Г.И., Потиха О.М. Энергетические параметры дуги в условиях гидростатического давления до 5 МПа // Автомат. сварка. – 1999. – № 1. – С. 15-18.
5. Лесков Г.И. Энергетические характеристики дуги со стальными электродами в атмосфере водорода // Автомат. сварка. – 1993. – № 10. – С. 3-5.
6. Hancock R. Underwater nuclear // Welding Journal. – 2003. – № 9. – 48-49 p.
7. O'Sullivan J.E. Wet underwater weld repair of Susquehanna unit 1 steam dryer // Welding journal. – 1988. – № 6. – С. 19-23.
8. Подушка М.Н., Рыстенков А.Н., Скалзубов В.И., Коврижкин Ю.Л. Проект и перспективы программы оптимизации планирования и управления ремонтных кампаний энергоблоков Запорожской АЭС // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чорнобиля. – Вип. 15. – 2011. – С. 35-41.

#### Каховский Н.Ю.

Институт электросварки имени Е.О. Патона  
Национальной академии наук Украины

### ПОРОШКОВАЯ САМОЗАЩИТНАЯ ПРОВОЛОКА ДЛЯ ПОДВОДНОЙ СВАРКИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ 12X18H10T

#### Аннотация

В статье изложены результаты разработки технологии проведения сварочно-ремонтных работ самозащитной порошковой проволокой при мокрой подводной сварке высоколегированных коррозионностойких сталей типа 18-10. Применение данной технологии позволяет частично или полностью уменьшить участие человека в процессе сварки при экстремальных условиях – на больших глубинах, радиоактивных средах (в случае АЭС), а также получить значительный экономический эффект за счет большей продуктивности выполнения сварочно-ремонтных работ. Практическая ценность применения этой технологии заключается также и в возможности выполнения сварочно-ремонтных работ непосредственно под водой без каких-либо дополнительных монтажных работ.

**Ключевые слова:** мокрая подводная сварка, сталь 12X18H10T, АЭС, самозащитная порошковая проволока, FCAW, покрытые электроды.

#### Kakhovskiy N.Yu.

Electric Welding Institute named after E.O. Paton  
National Academy of Sciences of Ukraine

### FLUX-CORED SELF-SHIELDED WIRE FOR UNDERWATER WELDING OF HIGH-ALLOY CORROSION-RESISTANT STEEL 12CR18NI10TI

#### Summary

The article presents results of development of welding-repair technology using self-shielded flux-cored wire for wet underwater welding of high-alloy stainless steels type 18-10. The application of this technology allows partially or completely reducing the human participation in welding process under the extreme conditions: at large depth, in radioactive environments (in case of NPS) and also gaining a significant economic effect due to greater efficiency (productivity) of welding-repair works. The practical value of this technology consists in possibility of welding-repair works directly under water without any additional assembly works.

**Keywords:** wet underwater welding, steel 12Cr18Ni10Ti, NPS, self-shielding flux-cored wire, FCAW, covered electrodes.