

М.Ю. Каховський

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

ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МЕХАНІЗОВАНОГО МОКРОГО ПІДВОДНОГО ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОЛЕГОВАНОЇ КОРОЗІЙНОСТІЙКОЇ СТАЛІ



Викладено результати проведення зварювально-ремонтних робіт самозахисним порошковим дротом при мокрому підводному зварюванні високолегованих корозійностійких сталей типу 18-10. Застосування даної технології дає змогу зменшити участь людини в процесі зварювання в екстремальних умовах. Практична цінність цієї технології полягає 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 електроди.

Для проведення зварювально-ремонтних робіт і технічного обслуговування обладнання і трубопроводів при видобутку нафти й газу з морського дна, виконанні суднопідйомних і судноремонтних робіт, виготовленні елементів гідротехнічних та портових споруд, а також елементів енергетичного обладнання широко застосовують підводне зварювання.

Більшість елементів технічного обладнання виконано з низьколегованих конструкційних сталей. Однак з огляду на низькі антикорозійні властивості низьколегованих сталей у виготовленні оснащення все ширше застосовується високолегована корозійностійка сталь.

Одним з основних об'єктів застосування підводного зварювання високолегованих корозійностійких сталей є басейни для зберігання відпрацьованого ядерного палива на АЕС.

Після вивантаження з активної зони реактора тепловиділяючі елементи витримують у басейні для зберігання відпрацьованого ядер-

ного палива протягом 2–5 років для зменшення залишкового енерговиділення. Басейни — це заповнені прісною водою бетонні конструкції глибиною близько 25 м, облицьовані високолегованою хромонікелевою корозійностійкою сталлю типу 18-10 товщиною 3–5 мм. Під час операцій завантаження/вивантаження тепловиділяючих елементів досить часто виникають механічні пошкодження в обшивці корпусу басейну. Несвоєчасний ремонт призводить до витoku радіоактивної води, що може привести до екологічної катастрофи.

Через високий рівень радіації доступ обслуговуючого персоналу до обладнання, що знаходиться в безпосередній близькості до реактора АЕС, обмежений. При ремонті або регламентних роботах намагаються максимально застосовувати техніку з дистанційним керуванням. При необхідності використовувати людську працю задача сильно ускладнюється. Одним з можливих шляхів виходу з такої ситуації може слугувати використання водного середовища, яке є природним бар'єром, що зменшує вплив

радіоактивного випромінювання на водолаза при виконанні зварювально-ремонтних робіт.

Перші спуски людини під воду в таких умовах відносяться до середини 1970-х років, коли перші АЕС в США досягли середини терміну експлуатації [1]. Уперше зварювання під водою застосували через 10 років на Пенсильванській АЕС [2], оснащених реакторами на киплячій воді потужністю 1050 МВт. У 1984 р. під час завантаження палива візуальний контроль виявив втомну тріщину в корпусі паросушувача. 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 обробку крайок під зварювання. Потім воду злили, а дефектну ділянку заварили вручну неплавким електродом.

У 1987 р. під час чергової операції по завантаженню паливом була виявлена ще одна втомна тріщина в корпусі парогенератора довжиною 1400 мм [2]. 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 варіантів ремонту у таких умовах вибрали мокре підводне зварювання покритими електродами. Приміщення було заповнене водою, і водолази-зварники виконали необхідний обсяг робіт під водою. Успішне виконання проекту підтвердило придатність мокрого підводного зварювання

покритими електродами як реальної альтернативи традиційним способам ремонту.

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 середовищі з високим рівнем радіації. Також слід зазначити, що досить високими були втрати виробництва і внаслідок непланових (повторних) ремонтів, викликаних як недостатнім забезпеченням якості ремонтних робіт, так і недостатнім рівнем надійності обладнання/систем і дій оперативного персоналу [3]. На даний момент асортимент ринку матеріалів для проведення зварювально-ремонтних робіт для мокрого підводного зварювання високолегованих корозійностійких сталей представлений тільки спеціалізованими покритими електродами (табл. 1).

Однак ручне дугове зварювання покритими електродами порівняно з механізованим і автоматизованим способами зварювання характеризується більш низькою продуктивністю виконання зварювально-ремонтних робіт, а також більш низькою якістю зварних швів. Крім того, світові тенденції розвитку зварювального устаткування йдуть у напрямку автоматизації (а отже, і механізації) процесу зварювання для повного виключення участі людини в роботах в особливо небезпечних умовах (таких, як підводне зварювання).

Враховуючи економічні реалії атомної енергетики, де година простою АЕС може коштувати півмільйона доларів [1], постала вкрай гостра необхідність створення технології більш оперативного ремонту басейнів для зберігання відпрацьованого ядерного палива.

Оскільки зварювання дротом суцільного перетину в середовищі захисних газів під водою неможливе, то в Інституті електрозварювання (ІЕЗ) ім. Є.О. Патона НАН України було прийнято рішення про розробку технології із застосуванням самозахисного порошкового дроту із високолегованих корозійностійких ста-

Таблиця 1

Покриті електродами для мокрого підводного зварювання високолегованих корозійностійких сталей

Марка електрода	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

лей типу 18-10 для мокрого підводного зварювання.

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

Підводне зварювання має ряд особливостей, відмінних від зварювання на повітрі. При мокрому підводному зварюванні дуга горить в замкнутому об'ємі парогазового мішура, що утворюється за рахунок продуктів дисоціації води, а також згоряння та випаровування плавкого електрода і зварного виробу [4]. Щільність води в 850 разів більше щільності повітря, теплоємність — в 4 рази, а теплопровідність — в 25 разів [5]. На дугу, яка горить у водному середовищі, діють два види стиснення (контрагування) — від охолоджуючого впливу і гідростатичного тиску стовпа рідини [6]. Також слід відмітити, що охолоджуюча дія води, підвищений тиск, дисоціація води та її парів призводять до дестабілізації процесу горіння дуги, що в свою чергу призводить до необхідності витратити більшу потужність на підтримку дугового розряду, ніж у випадку зварювання на повітрі [7, 8]. При зварюванні в умовах радіоактивного середовища використання фізичних властивостей води як природного бар'єру зменшує вплив радіаційного випромінювання на людину.

Підводне зварювання високолегованих корозійностійких сталей має ряд відмінностей від зварювання низьколегованих конструкційних сталей. У 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 ($55\text{--}60\text{ см}^3/100\text{ г}$) і перебуває, як правило, в межах розчинності [4].

Пріоритетним завданням при підводному зварюванні корозійностійких сталей є забезпечення надійного захисту розплавленого металу від окислювального впливу навколишнього середовища. Кисень, взаємодіючи з роз-

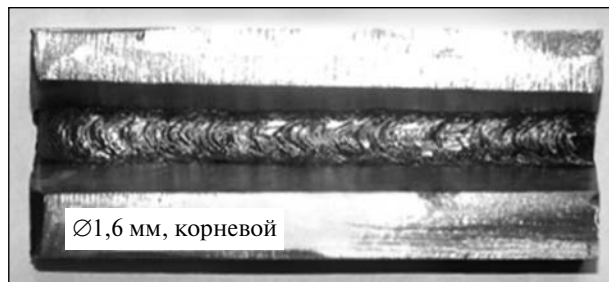


Рис. 1. Зовнішній вигляд зварних швів при мокрому підводному зварюванні високолегованої корозійностійкої сталі типу 18-10

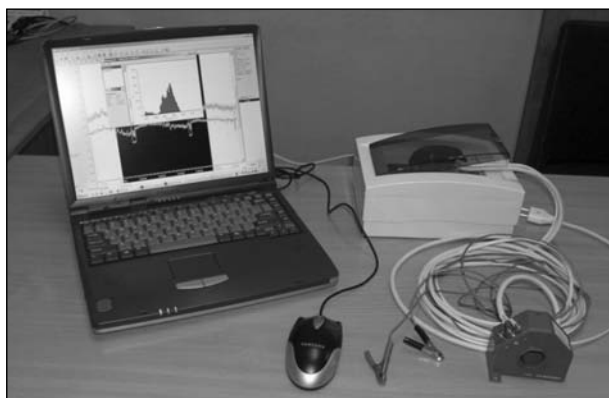


Рис. 2. Зовнішній вигляд аналізатора зварювальних процесів марки ASP-19

плавленим металом, як на стадії краплі, так і на стадії ванни 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. Вміст кисню в металі шва доходить до 0,25 мас. % [4].

На рис. 1 наведено зовнішній вигляд зварних швів, виконаних при мокрому підводному зва-

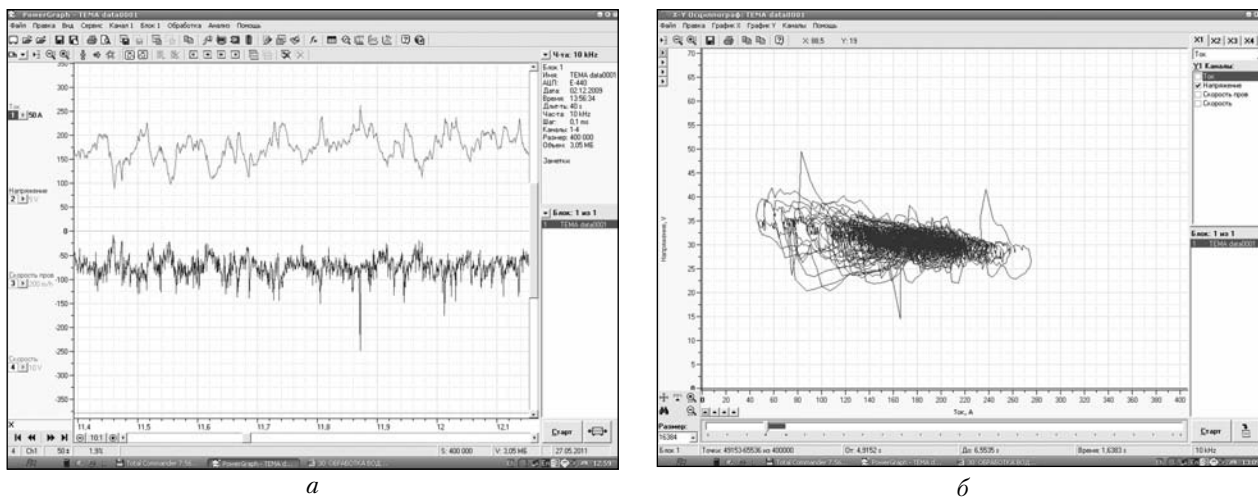


Рис. 3. Осцилограми процесу зварювання (а) і ВАХ процесу зварювання порошковим дротом (б)

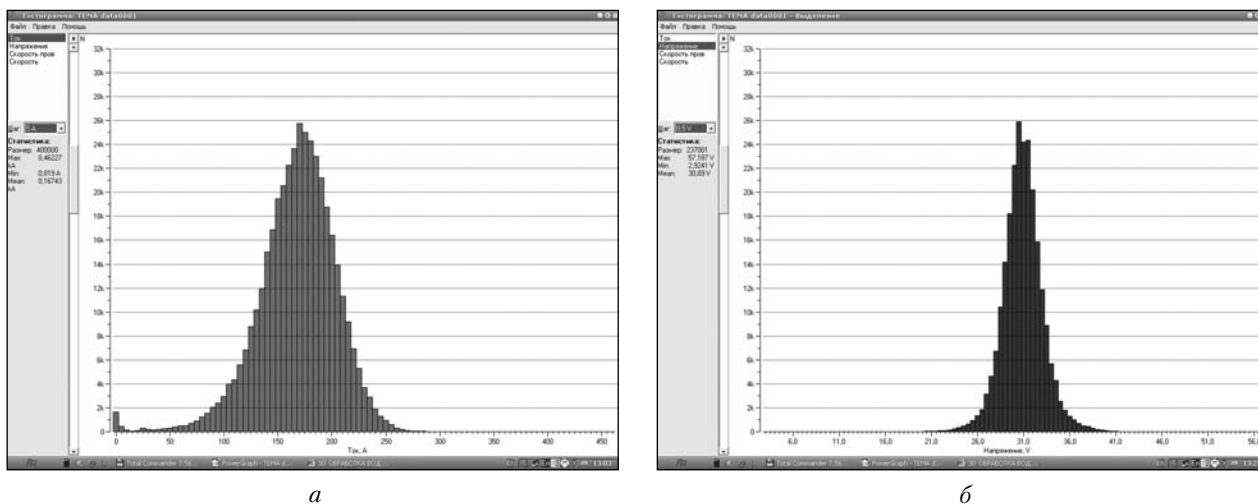


Рис. 4. Гістограми зварювального процесу струму (а) і напруги (б)

Таблиця 2

Результати хімічного складу наплавленого металу 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	0,30	0,015	0,025
Вода	0,04	0,32	1,23	20,90	9,4	0,21	0,018	0,022
ГОСТ 10052-75	0,05–0,12	<1,3	1–2,50	18–22,00	8–10,50	0,70–1,30, але не менше ніж 8•С	<0,020	<0,030

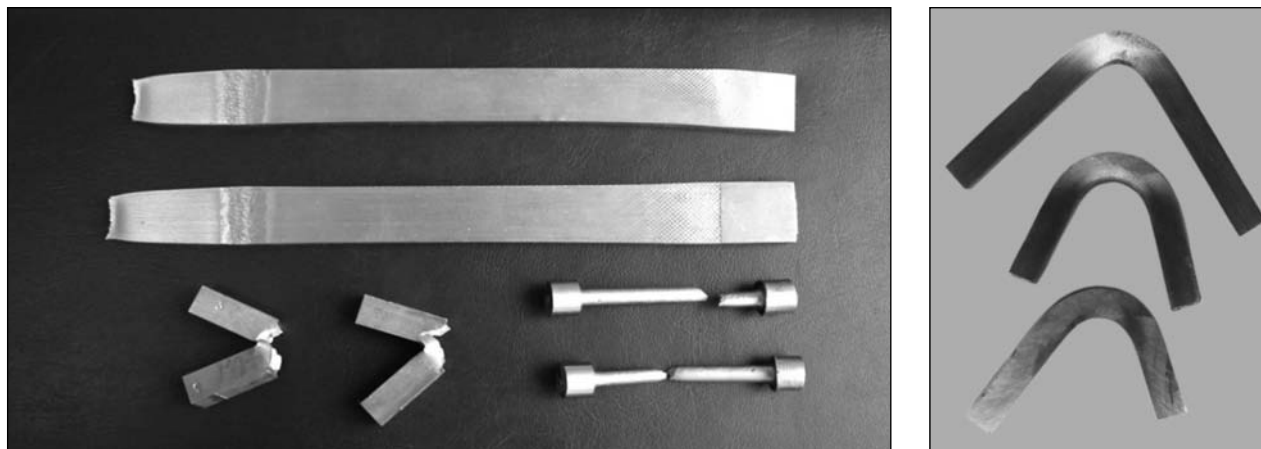


Рис. 5. Зовнішній вигляд зразків після механічних випробувань

риванні дослідним дротом із високолегованої корозійностійкої сталі типу 18-10 (12X18H10T). Зварювання виконувалося самозахисним порошковим дротом діаметром 1,6 мм на постійному струмі зворотної полярності з використанням випрямляча ВДУ-601 (жорстка характеристика) як джерела живлення на режимах: $U_{\text{д}} = 32-34 \text{ В}$; $I_{\text{св}} = 140-160 \text{ А}$.

Випробування дослідних дротів проводили в спеціальному зварювальному басейні, заповненому водопровідною водою. Оцінку характеристик процесу плавлення і переносу електродного металу, а також стабільність процесу горіння дуги проводили з використанням аналізатора зварювальних процесів ASP-19 (рис. 2). Як видно з осцилограм струму і напруги, а також вольт-амперної характеристики (рис. 3), гістограм струму і напруги (рис. 4), які побудовані за допомогою програми Power Graph Professional v.3.3., процес зварювання проходить без коротких замикань та з задовільною стабільністю процесу горіння дуги.

За результатами хімічного аналізу склад наплавленого металу відповідає заданому типу легування 06X20H9Г2Б згідно з ГОСТ 10052-75. Оцінку вмісту феритної фази в наплавленому металі проводили об'ємним магнітним методом з використанням феритометра марки МФ-10і. Вміст феритної складової в металі шва типу 06X20H9Г2Б згідно з 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 з ГОСТ 6032-2003. Аналіз зразків після випробувань показали повну відсутність міжкристалітної корозії.

Результати аналізу хімічного складу наплавленого металу при підводному зварюванні дослідним дротом, наведені в табл. 2, практично повністю збігаються з даними при зварюванні самозахисним порошковим дротом при зварюванні на повітрі.

Вміст водню, кисню та азоту визначали з останнього шва семишарового наплавлення. Ре-

Таблиця 3

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

Середовище зварювання	Вміст газів в наплавленому металі		
	мас. %		см ³ /100г
	[N]	[O]	[H]
Повітря	0,06	0,05	10,5
Вода	0,03	0,07	27,0

Примітка. В таблиці наведено середні дані трьох вимірів вмісту водню і кисню в зразках МІ-99, вирізаних з останнього шару наплавлень.

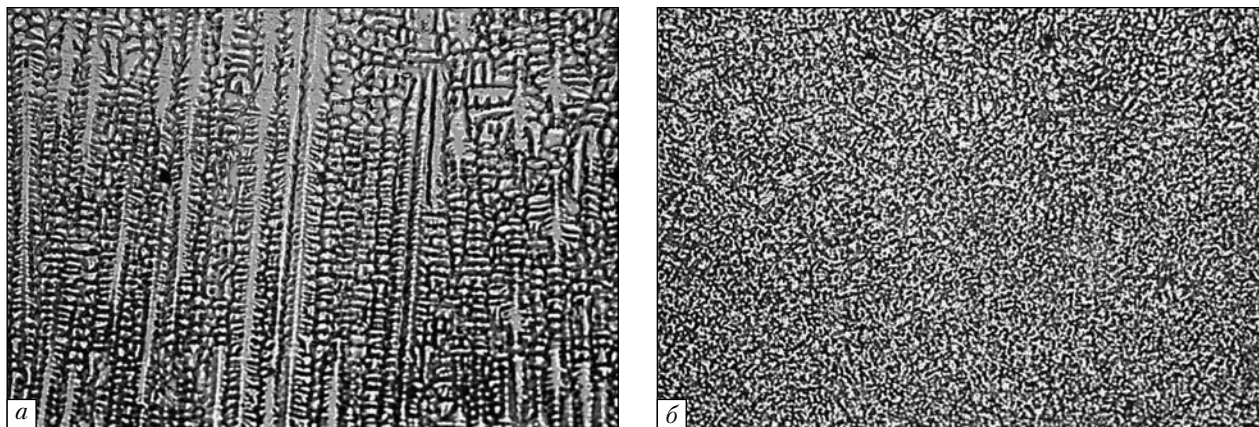


Рис. 6. Мікроструктури металу швів, зварених на повітрі (а) і під водою (б)

Таблиця 4

Механічні властивості металу шва і зварного з'єднання при мокрому підводному зварюванні високолегованої корозійностійкої сталі типу 18-10 порошковим самозахисним дротом ПП-АНВ-25 при температурі випробувань 20 °С

Межа текучості $\sigma_{0,2}$, МПа	Тимчасовий опір розриву σ_r , МПа	Відносне подовження δ , %	Відносне звуження Ψ , %	Ударна в'язкість a_k , Дж/см ²	Кут загину, град. $R = t$
350,8	623,3	25,7	28,7	90,3	68...103

зультати вмісту газів наплавленого металу наведено в табл. 3.

Механічні властивості металу шва і зварного з'єднання наведено в табл. 4, а зовнішній вигляд зварних зразків на рис. 5.

Отримані результати механічних випробувань задовольняють вимогам класу В міжнародного стандарту з підводного зварювання ANSI / AWS D3.6.

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 в значній мірі подібнюється — розмір зерен зменшується більш ніж у 3 рази (рис. 6).

Розрахункові дані, наведені в роботі [9], показують, що проведення зварювально-ремонтних робіт з використанням технології механізованого підводного зварювання самозахисним порошковим дротом марки ПП-АНВ-25 у по-

рівнянні з технологією ручного дугового зварювання покритими електродами скорочують час виконання робіт і сумарну вартість ремонту об'єкта в 2,63 рази.

ВИСНОВКИ

1. Результати випробувань показали, що розроблений вперше в світовій практиці самозахисний порошковий дріт марки ПП-АНВ-25 забезпечує необхідний хімічний склад і механічні властивості згідно з ГОСТ 10052-75 і вимогами класу В міжнародного стандарту підводного зварювання ANSI / AWS D 3.6-92.

2. Новий порошковий дріт марки ПП-АНВ-25 дозволяє підвищити продуктивність і якість підводних зварювально-ремонтних робіт, отримати економічний ефект за рахунок скорочення часу простою виробничого циклу об'єкта, що ремонтується.

3. Застосування механізованого способу зварювання самозахисним порошковим дротом дозволяє зменшити шкоду здоров'ю водолаза-

зварника за рахунок меншого часу перебування в радіоактивному середовищі, а в перспективі — за рахунок автоматизації процесу повністю виключити участь людини при зварюванні відповідальних конструкцій в особливо небезпечних умовах.

ЛІТЕРАТУРА

1. R. Hancock. Underwater nuclear // *Welding Journal*. — 2003. — № 9. — Р. 48—49.
2. J.E. O'Sullivan. Wet underwater weld repair of Susquehanna unit 1 steam dryer // *Welding journal*. — 1988. — № 6. — Р. 19—23.
3. Подушка М.Н., Рыстенков А.Н., Скалозубов В.И., Ковришкин Ю.Л. Проект и перспективы программы оптимизации планирования и управления ремонтных кампаний энергоблоков Запорожской АЭС // *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. Вип. 15, 2011. С. 35—41.
4. Авиллов Т.И. Исследование процесса дуговой сварки под водой // *Сварочное производство*. — 1958. — N 5. — С. 12—14.
5. Кононенко В.Я. Подводная сварка и резка. — К.: Університет «Україна», 2011. — 264 с.
6. Мадатов Н.М. Подводная сварка и резка метал лов. — Л.: Судостроение, 1967. — 164 с.
7. Лесков Г.И., Потиха О.М. Энергетические параметры дуги в условиях гидростатического давления до 5 МПа // *Автомат. сварка*. — 1999. — № 1. — С. 15—18.
8. Лесков Г.И. Энергетические характеристики дуги со стальными электродами в атмосфере водорода // *Автомат. сварка*. — 1993. — № 10. — С. 3—5.
9. Каховський М.Ю. Порошковий самозахисний дріт для підводного зварювання високолегованої корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т // *Молодий вчений*. — 2014. — № 11. — С. 12—15.

REFERENCES

1. R. Hancock. Underwater nuclear. *Welding Journal*. 2003, N9: 48—49.
2. J.E. O'Sullivan. Wet underwater weld repair of Susquehanna unit 1 steam dryer. *Welding journal*. 1988, N6: 19—23.
3. Podushka M.N., Rystenkov A.N., Skalozubov V.I., Kovrizhkin Ju.L. Proekt i perspektivy programy optimizacii planirovanija i upravlenija remontnyh kampanij jenergo-blokov Zaporozhskoj AJeS. *Problemi bezpeki atomnih elektrostancij i Chornobilja*. Vip. 15, 2011: 35—41 [in Russian].
4. Avilov T.I. Issledovanie processa dugovoj svarki pod vodoj. *Svarochnoe proizvodstvo*. 1958, N5: 12—14 [in Russian].
5. Kononenko V.Ja. *Podvodnaja svarka i rezka*. Kyiv: Universitet Ukraina, 2011 [in Russian].

6. Madatov N.M. *Podvodnaja svarka i rezka metallov*. Leningrad: Sudostroenie, 1967 [in Russian].
7. Leskov G.I., Potiha O.M. Jenergeticheskie parametry dugi v uslovijah gidrostaticeskogo davlenija do 5 MPa. *Avtomat. svarka*. 1999, N1: 15—18 [in Russian].
8. Leskov G.I. Jenergeticheskie karakteristiki dugi so stal'nymi jelektrodami v atmosfere vodoroda. *Avtomat.svarka*. 1993, N10: 3—5 [in Russian].
9. Kahovs'kyj M.Ju. Poroshkovyj samozahysnyj drit dlja pidvodnogozvarjvannjavyso kolegovanoi'korozijnostijkoj' stali 12 H18N10T. *Molodyj vchenyj*. 2014, N11: 12—15 [in Ukrainian].

Н.Ю. Каховский

Институт электросварки им. Е.О. Патона
НАН Украины, Киев

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ МОКРОЙ ПОДВОДНОЙ СВАРКИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ

Изложены результаты проведения сварочно-ремонтных работ самозащитной порошковой проволокой при мокрой подводной сварке высоколегированных коррозионностойких сталей типа 18-10. Применение данной технологии позволяет уменьшить участие человека в процессе сварки в экстремальных условиях. Практическая ценность этой технологии заключается в возможности выполнения сварочно-ремонтных работ непосредственно под водой без каких-либо дополнительных монтажных работ.

Ключевые слова: мокрая подводная сварка, сталь 12Х18Н10Т, АЭС, самозащитная порошковая проволока, FCAW, покрытые электроды.

М.Ю. Kakhovskiy

Paton Electric Welding Institute, NAS of Ukraine, Kyiv

INNOVATIVE TECHNOLOGY OF MECHANIZED WET UNDERWATER WELDING OF HIGH-ALLOY CORROSION-RESISTANT STEEL

The results of the practice of welding-repair technology using self-shielded flux-cored wire for wet underwater welding of high-alloy stainless steels type 18-10 are presented. The application of the technology allows reducing human participation in welding process under the extreme conditions. The practical value of the technology consists in the 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.

Стаття надійшла до редакції 26.03.15