

Н. Ю. Каховский, С. Ю. Максимов, Г. В. Фадеева

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ул. Боженко, 11, Киев, 03680, Украина

СВАРОЧНО-РЕМОНТНЫЕ РАБОТЫ НА АЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ПОДВОДНОЙ СВАРКИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ТИПА 18-10

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 08X18H10T, АЭС, самозащитная порошковая проволока, FCAW, покрытые электроды.

Подводную сварку широко применяют для проведения сварочно-ремонтных работ и технического обслуживания оборудования и трубопроводов для добычи нефти и газа с морского дна, изготовления элементов гидротехнических сооружений, локального ремонта судов и гребных винтов кораблей, а также элементов атомных АЭС.

Развитие данной отрасли продемонстрировала «Международная выставка-конференция сварочных материалов и технологий «SCHWEISSEN & SCHNEIDEN 2013», проходившая в городе Эссен (Германия), которая показала все больший рост автоматизации сварочных процессов и количества автоматического оборудования для выполнения сварочных работ, в том числе и для подводной сварки.

Тенденции развития сварочных процессов идут в направлении механизации и автоматизации [1]. Среди продукции более 1700 компаний, были представлены автоматические сварочные линии от крупнейших производителей сварочных роботов, таких как Kuka, Panasonic, ABB и др. В США, Японии и ЕС используют в основном механизированные и автоматизированные способы сварки. Применение штучных электродов относительно невелико. Тогда как в Китае и многих странах Азии более 50 % всех сварочных материалов до сих пор являются штучными электродами, несмотря на то, что низкий уровень механизации снижает производительность процесса изготовления продукции. Применение ручной дуговой сварки штучными электродами в этих странах объясняется тем, что затраты на сварочное оборудование и вспомогательные материалы относительно низки (рис. 1) [1].

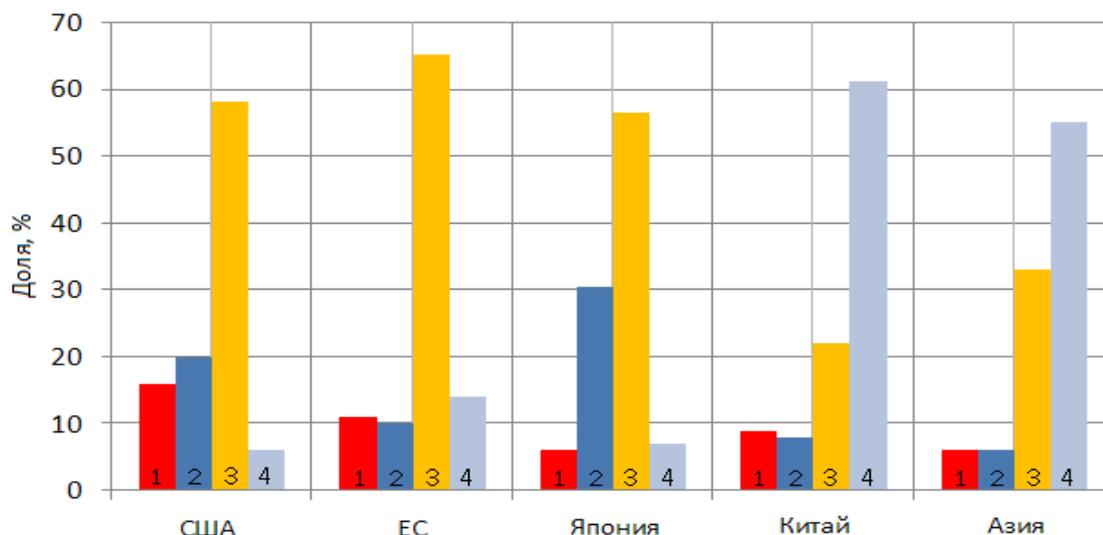


Рис. 1. Структура применения процессов сварки в мировом производстве по состоянию на 2010 г.:
1 – под флюсом; 2 – порошковой проволокой в защитных газах; 3 – сплошной проволокой в защитных газах;
4 – штучными электродами.

© Н. Ю. Каховский, С. Ю. Максимов, Г. В. Фадеева, 2014

Переход на оборудование для автоматической и механизированной сварки продиктован экономическими реалиями настоящего времени и борьбой заводов за уменьшение себестоимости продукции. Применение такого оборудования положительно сказывается на качестве сварочных изделий, скорости изготовления продукции, а также позволяет производственным линиям работать круглосуточно, что значительно увеличит продуктивность за счет непрерывного производства [2, 3].

Рост использования автоматического оборудования ведет к росту потребности сварочных материалов (для автоматического и механизированного способов сварки) в пользу отжига, например, от ручной дуговой сварки и покрытых электродов. Одним из таких примеров является механизация (и последующая автоматизация) технологии проведения подводных сварочно-ремонтных работ элементов из высоколегированной стали типа 18-10 с применением в качестве сварочного материала самозащитной порошковой проволоки (FCAW).

Одним из основных объектов применения мокрой подводной сварки высоколегированных коррозионно-стойких сталей являются бассейны для хранения отработанного ядерного топлива на АЭС. После извлечения тепловыделяющих элементов из активной зоны реактора, они выдерживаются в бассейне хранения отработанного ядерного топлива 2...5 лет для уменьшения остаточного энерговыделения. Бассейны представляют собой бетонные конструкции глубиной 24 м, облицованные нержавеющей коррозионно-стойкой сталью типа 18-10 толщиной 3...5 мм и заполненные пресной водой. Во время операций загрузки-выгрузки тепловыделяющих элементов достаточно часто возникают механические повреждения в обшивке корпуса бассейна. Несвоевременный ремонт приводит к утечке радиоактивной воды в окружающую среду, что может привести к экологической катастрофе.

Технология ремонта заключалась в остановке производственного цикла АЭС, опорожнения бассейна, его дезактивации и проведения сварочно-ремонтных работ покрытыми электродами для ручной дуговой сварки. Такая операция требует много времени и приводит к остановке производственного цикла АЭС. Учитывая экономические реалии атомной энергетики, где час простоя АЭС может стоить полмиллиона долларов [4], существовала крайне острая необходимость создания технологии оперативного ремонта бассейнов для хранения отработанного ядерного топлива. Ее суть заключалась в исключении операции откачки воды и дезактивации бассейнов, а ремонт повреждений осуществлять методом мокрой подводной сварки с помощью водолаз-сварщика.

Кроме того, как показали исследования по измерению уровня радиоактивного излучения на элементах АЭС, деминерализованная вода хорошо защищает от радиации, так что водолаз, работающий в радиоактивной среде, часто в меньшей степени подвергается радиации, чем оператор, работающий в той же среде, но без воды [5]. Таким образом, вода производит эффект защиты от радиации, а значит позволяет находиться водолазу-сварщику большее время под водой и работать более продуктивно. Учитывая то, что индивидуальная доза в квартал ограничивается 1000 мбэр (1 бэр) [5], проведение сварочных работ на АЭС с использованием наиболее продуктивной (быстрой) технологии подводной сварки потребует привлечения меньшего числа специалистов (сварщиков и операторов).

На данный момент ремонт также выполняют специализированными покрытыми электродами для мокрой подводной сварки высоколегированных коррозионно-стойких сталей представленными на рынке продуктами, приведенных в табл. 1.

Таблица 1. Покрытые электроды для мокрой подводной сварки высоколегированных коррозионно-стойких сталей

Марка электрода	Диаметр, мм	Страна производитель
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	Великобритания

Однако сварочные электроды по сравнению с самозащитной порошковой проволокой имеют ряд недостатков, а именно:

- большой диаметр сварочных электродов, затрудняющий сварку во всех пространственных положениях;

- более низкую производительность выполнения работ и большой коэффициент расхода сварочного материала, вследствие чего большую стоимость 1 кг наплавленного металла;

- более длительный контакт водолаза с радиоактивной водой и увеличенное время простоя АЭС во время ремонта.

Использование технологии механизированной подводной сварки с применением самозащитной порошковой проволоки (FCAW) позволит:

- повысить производительность и качество проведения подводных сварочно-ремонтных работ за счет использования механизированного способа сварки;

- уменьшить вред здоровью водолаза-сварщика за счет меньшего времени пребывания в радиоактивной среде;

получить экономический эффект за счет меньшего времени простоя производственного цикла АЭС.

Для подтверждения выгоды от использования технологии механизированной подводной сварки, был выполнен условный расчет экономического эффекта при проведении сварочно-ремонтных работ для 100 кг сварного шва, приведенного в табл. 2.

Таблица 2. Расчет экономического эффекта

Критерий	Формула	Порошковая проволока	Покрытые электроды
Коэффициент расхода сварочного материала	Справочные данные	1,05...1,1	1,6...1,7
Необходимое количество сварочных материалов на 100 кг сварного шва, кг	$\text{№ 2} = \text{№ 1} \cdot 100 \text{ кг}$	105...110	160...170
Продуктивность выполнения работ, кг/ч	Справочные данные	4,8...5,0	1,8...1,9
Время на выполнение работ, ч	$\text{№ 4} = 100 \text{ кг} / \text{№ 3}$	20	52,6
Зарплата водолаза-сварщика, грн./ч	Статистические данные	250	250
Стоимость оплаты водолаза-сварщика, грн.	$\text{№ 6} = \text{№ 4} \cdot \text{№ 5}$	5000	13150
Простой производственного цикла АЭС, грн.*	$\text{№ 7} = 1000000 \cdot \text{№ 4}$	2000000	5260000
Суммарная стоимость ремонта, грн.**	$\text{№ 8} = \text{№ 7} + \text{№ 6}$	2005000	5273150

* При условии убытков от простоя одного энергоблока АЭС 100000 грн./ч.

** Без учета стоимости сварочных материалов.

После анализа расчетных данных можно сделать вывод, что проведение сварочно-ремонтных работ с использованием технологии механизированной подводной сварки самозащитной порошковой проволокой, по сравнению с технологией ручной дуговой сварки покрытыми электродами, время выполнения работ и суммарная стоимость ремонта сокращается в 2,63 раза.

С целью использования вышеприведенных преимуществ, в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины была разработана самозащитная порошковая проволока для мокрой подводной сварки высоколегированных коррозионностойких сталей типа 18-10 взамен технологии выполнения сварочных работ покрытыми электродами.

На рис. 2 приведен внешний вид сварных швов сделанных при мокрой подводной сварке высоколегированной коррозионностойкой стали типа 18-10. Сварка выполнялась проволокой диаметром 1,6 мм на постоянном токе обратной полярности, с использованием в качестве источника питания выпрямителя ВДУ-601 (жесткая характеристика).



Рис. 2. Внешний вид сварных швов при мокрой подводной сварке высоколегированной коррозионностойкой стали типа 18-10.

По результатам химического анализа состав наплавленного металла отвечает заданному типу легирования 06X20N9Г2Б согласно ГОСТ 10052-75. Микроструктура металла шва – аустенит + 6 % α -фазы. Обеспечивается стойкость против МКК.

Результаты анализа химического состава сварного шва при подводной сварке опытной проволокой (табл. 3) практически полностью совпадают с данными при сварке самозащитной порошковой проволокой для сварки на воздухе.

Таблица 3. Результаты химического состава металла шва при мокрой подводной сварке и при сварке на воздухе

Среда	Химический состав наплавленного металла, мас. %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	S	P
Воздух	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

В ходе испытаний разработанной порошковой проволокой были сварены стыковые соединения стали 12X18Н10Т толщиной 12 мм. Процесс сварки протекает без коротких замыканий, о чем свидетельствуют осциллограммы тока и напряжения, а также внешняя вольтамперная характеристика (рис. 3), гистограммы тока и напряжения (рис. 4), построенные с помощью программы Power Graph Professional v.3.3.

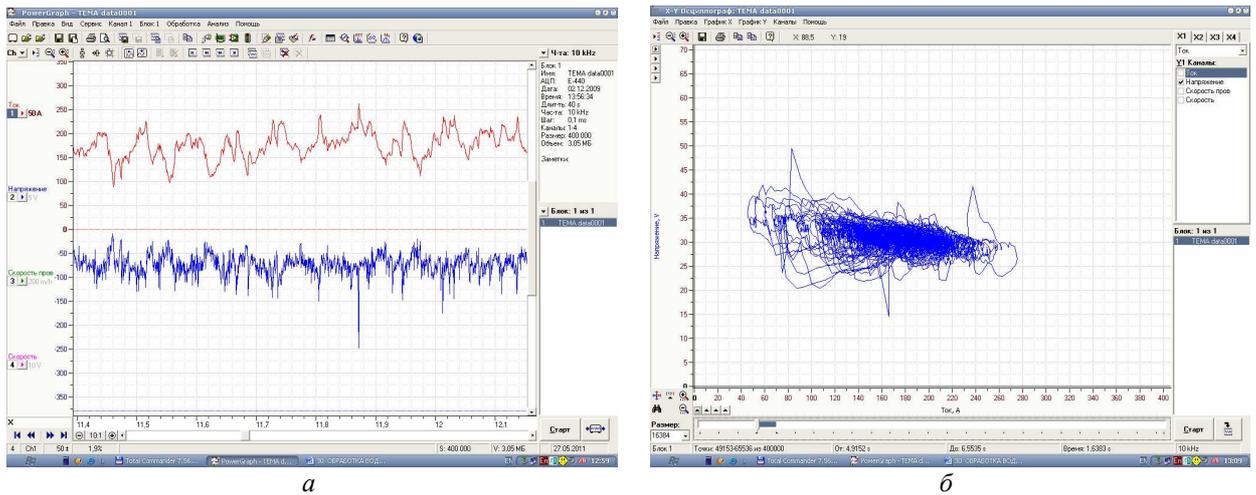


Рис. 3. Осциллограмма процесса сварки (а) и внешняя вольтамперная характеристика процесса сварки порошковой проволокой (б).

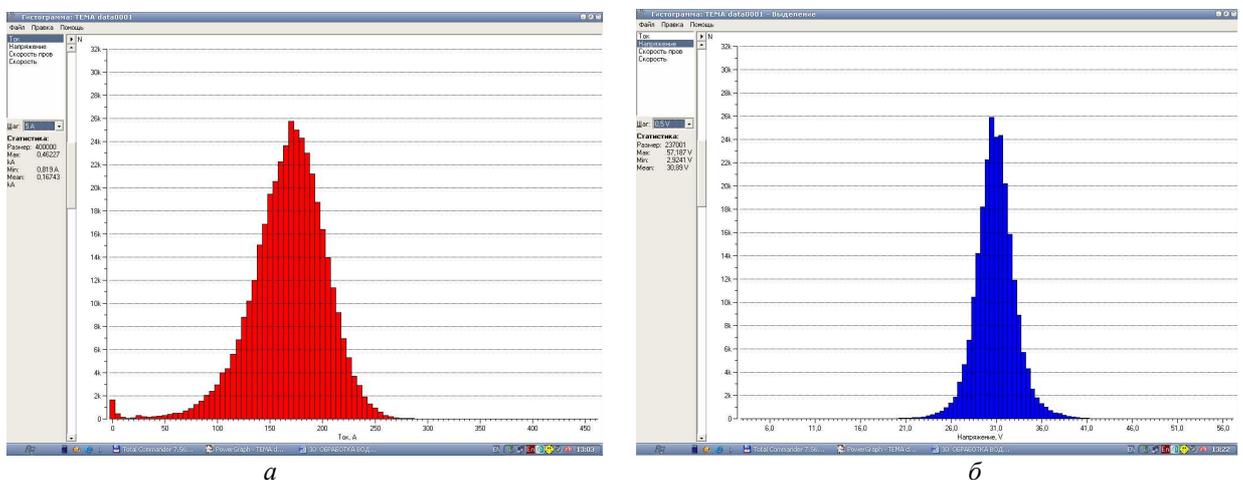


Рис. 4. Гистограммы сварочного процесса по току (а) и напряжению (б).

Механические свойства сварочных образцов приведены ниже, а их внешний вид на рис. 5. Полученные результаты механических испытаний удовлетворяют требованиям класса «В» международного стандарта по подводной сварке ANSI/AWS D3.6.

Механические свойства сварочных образцов при мокрой подводной сварке высоколегированной коррозионностойкой стали типа 18-10

Марка	Температура испытаний, К	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %	a_k , Дж/см ²	Угол загиба, град R = t
ПП-АНВ-25	293	350,8	623,3	25,7	28,7	90,3	68...103

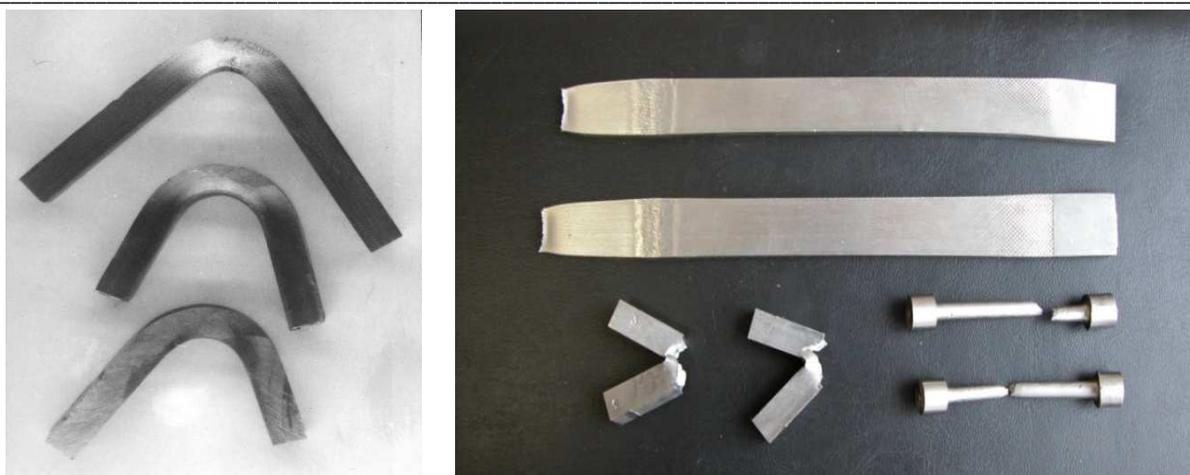


Рис. 5. Внешний вид образцов после механических испытаний.

Самозащитной порошковой проволоке для мокрой подводной сварки высоколегированных хромоникелевых коррозионностойких сталей типа 18-10 присвоена марка ПП-АНВ-25.

По своим свойствам разработанная самозащитная порошковая проволока для подводной сварки высоколегированных коррозионностойких сталей полностью соответствует требованиям класса «В» международного стандарта по подводной сварке ANSI/AWS D3.6.

Выводы

Разработана самозащитная порошковая проволока, которая обеспечивает необходимый химический состав и механические свойства согласно ГОСТ 10052-75 и требования класса «В» международного стандарта подводной сварки ANSI/AWS D3.6-92.

Создана основа для возможности автоматизации процесса сварки для исключения полного участия человека в работах в особо опасных условиях

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розерт Р. Применение порошковых проволок для сварки в промышленных условиях // Автоматическая сварка. – 2014. - № 6-7. – С. 60 - 64
2. Мазур А.А., Пустовойт С.В., Петрук В.С., Бровченко Н.С. Рынок сварочных материалов Украины // Автоматическая сварка. – 2014. - № 6-7. – С. 49 - 55
3. Кононенко В.Я. Подводная сварка и резка в странах СНГ// Автоматическая сварка. – 2014. - № 6-7. – С. 43 – 48.
4. Hancock R. Underwater nuclear // Welding Journal. – 2003. - № 9. –Р. 48 – 49.
5. O`Sullivan J.E. Wet underwater weld repair of Susquehanna unit 1 steam dryer // Welding journal. – 1988. № 6. - P. 19 - 23.

М. Ю. Каховський, С. Ю. Максимов, Г. В. Фадєєва

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. Боженко, 11, Київ, 03680, Україна

ЗВАРЮВАЛЬНО-РЕМОНТНІ РОБОТИ НА АЕС ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ МЕХАНІЗОВАНОГО ПІДВОДНОГО ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ КОРРОЗІЙНОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ ТИПУ 18-10

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 08X18H10T, АЕС, самозахисний порошковий дріт, FCAW, покриті електроди.

M. Yu. Kakhovskyi, S. Yu. Maksimov, G. V. Fadeeva

Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Bozhenko str., 11, Kyiv, 03680, Ukraine

NPP'S WELDING REPAIR WORKS USING TECHNOLOGY OF MECHANIZED UNDERWATER WELDING OF CORROSION-RESISTANT STEEL TYPE OF HIGH 18-10

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 08Cr18Ni10Ti, NPS, self-shielding flux-cored wire, FCAW, covered electrodes.

REFERENCES

1. *Rozert R.* Application of flux-cored wires for welding under industrial conditions // *Avtomaticeskaja svarka.* – 2014. - № 6-7. – P. 60 - 64. (Rus)
2. *Mazur A.A., Pustovojt S.V., Petruk V.S., Brovchenko N.S.* Ukrainian market of welding consumables // *Avtomaticeskaja svarka.* – 2014. - № 6-7. – P. 49 - 55. (Rus)
3. *Kononenko V.Ya.* Underwater welding and cutting in CIS // *Avtomaticeskaja svarka.* – 2014. - № 6-7. – P. 43 - 48. (Rus)
4. *Hancock R.* Underwater nuclear // *Welding Journal.* – 2003. - № 9. - P. 48 – 49.
5. *O`Sullivan J.E.* Wet underwater weld repair of Susquehanna unit 1 steam dryer // *Welding journal.* – 1988. - № 6. - P. 19 - 23.

Надійшла 22.09.2014

Received 22.09.2014