

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВА В КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЯХ X18N10T ПРИ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ**

**Н. Ю. Каховский, инж., А. В. Булат, к. т. н., С. Ю. Максимов, д. т. н.**

*ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины*

Задача усовершенствования технологии ремонта повреждений облицовки из стали 12X18N10T железобетонных бассейнов для хранения отработавших свой ресурс тепловыделяющих элементов АЭС в последние годы стала крайне актуальной. На сегодняшний день данная технология ремонта предусматривает опорожнение бассейна, проведение его дезактивации и выполнение сварочно-ремонтных работ электродами для ручной дуговой сварки. Такая операция требует много времени и может привести к остановке производственного цикла АЭС. Учитывая, что один час простоя одного энергоблока АЭС стоит примерно 100000 грн., существует насущная необходимость создания технологии оперативного ремонта бассейнов хранения отработанного ядерного топлива. Для ее решения предполагается исключить операции откачки воды и дезактивации бассейнов, а ремонт повреждений осуществлять методом мокрой подводной электродуговой сварки покрытыми электродами (далее по тексту – подводная сварка). Однако особенности подводной сварки стали 12X18N10T не изучены, а электроды специального назначения не созданы.

На начальном этапе разработки таких электродов предстояло изучить влияние условий сварки на химический состав и структуру сварных швов. Для таких исследований были изготовлены опытные электроды типа Э-08X20Н9Г2Б Ø 3 мм, характеристики которых приведены в табл.1. Для оценки возможности экранирования капель электродного металла от прямого окисляющего и наводораживающего воздействия воды были изготовлены электроды К-3, отличающиеся от К-2 только диаметром покрытия.

*Таблица 1.*

*Характеристики экспериментальных электродов и режимы сварки*

Условное обозначение электродов	Характеристики экспериментальных электродов*		Среда выполнения сварки	Режим сварки		№ шлифа (образца)
	Соотношение в покрытии СаF <sub>2</sub> и TiO <sub>2</sub>	Соотношение диаметров покрытия стержня		I <sub>д.ср.</sub> , А	U <sub>д.ср.</sub> , В	
К-1	1:2	1,6	воздух	118,8	24,3	1
			вода	115,7	26,3	4
К-2	3:1	1,6	воздух	119,3	24,2	2
			вода	111,3	27,4	5
К-3	3:1	1,8	воздух	113,4	25,5	3
			вода	108,5	28,5	6

\*Примечание. В качестве электродных стержней использовали сварочную проволоку Ø3 мм из стали ER304 (Св-04X19Н9)

Указанными электродами постоянным током обратной полярности от инвертора «Кетрри PS-5000» при одинаковых установках режима сварки были выполнены однослойные наплавки и жесткие стыковые соединения пластин из стали 12Х18Н10Т (321) на воздухе и под водой на глубине ~ 0,5 метра. С помощью анализатора сварочных процессов АСП-19 определяли электрические характеристики горения дуги - среднестатистические значения параметров  $I_d^{cp}$  и  $U_d^{cp}$  (см. табл. 1).

Содержание легирующих элементов в сварных швах (в их средней части) определяли методом эмиссионного спектрального анализа с использованием спектрометра ДФС-36 фирмы ЛОМО, а кислорода и водорода – методом восстановительного плавления в потоке газа носителя цилиндрических образцов (вырезанных из центральных участков швов) на установках RO-316 и RH-3 фирмы LECO. Полученные результаты приведены в таблице 2.

*Таблица 2.*

*Химический состав сварных швов*

№ шлифа (образца)	Массовая доля в металле шва						
	Cr	Ni	Mn	Nb	Si	O	H
1	21,3	10,8	2,0	1,0	1,2	0,059	0,0027
4	20,0	10,8	1,5	0,9	0,9	0,071	0,0047
2	21,2	10,6	2,5	1,0	1,2	0,044	0,0019
5	21,0	10,9	2,0	0,7	0,8	0,061	0,0040
3	21,2	9,7	2,4	1,0	1,3	0,049	0,0014
6	21,4	10,4	2,3	0,9	1,0	0,066	0,0029

Для исследования структуры сварных швов и зоны термического влияния (ЗТВ), а также фотографирования неметаллических включений использовали микроскоп НЕОРНОТ-32, оснащенный цифровой фотокамерой OLYMPUS. Для определения доли ферритной фазы использовали ферритометр FERRIT-GEHALTMESSER 1.053. При этом, микроструктуру металла шва и ЗТВ выявляли методом электролитического травления в 20%-ом водном растворе серно-кислого аммония. Результаты исследований структуры швов обобщены в таблице 3.

*Таблица 3.*

*Характеристики структуры металла шва и ЗТВ*

№ шлифа (образца)	Металл шва				ЗТВ	
	Диаметр (средний) γ-ячеек, мкм	Дендритный параметр, мкм	Доля δ- феррита, %	Объемная доля НВ*, %	Балл зерна	Доля δ- феррита, %
1	10	10-12	5,2-8,0	0,22	5	1,5-2
4	10	15-25	5,0-6,0	0,42	6	1-1,5
2	5-7	7-10	9,0-10,5	0,13	6	1-1,5
5	5-7	20-25	8,0-9,0	0,29	6	1-2
3	5-7	10-12	9,0-12,0	0,19	5	1-1,5
6	5-7	15-20	8,0-11,0	0,33	6	1,5-2

\*Примечание. Объемную долю и дисперсность НВ определяли путем обработки результатов фотографирования НВ с помощью компьютерного обеспечения ImigePro.

Согласно данным, приведенным в табл.2 видно, что увеличение в электродном покрытии соотношения  $\text{CaF}_2/\text{TiO}_2$  как при сварке под водой, так и на воздухе, вызывает снижение в металле шва содержания кислорода и водорода, что обусловлено повышением в атмосфере дуги парциального давления фторидов, снижением количества кислорода и связыванием водорода в HF. При прочих равных условия, увеличение диаметра электродного покрытия (электроды К3) приводит, как при сварке на воздухе, так и под водой, к повышению в металле шва содержания кислорода. Вместе с тем, содержание водорода в металле шва при сварке на воздухе возрастает, тогда как при подводной сварке наоборот – сокращается. Такое явление можно объяснить тем, что электродное покрытие и образующийся шлак в любом случае оказывают на металл шва не только окисляющее, но и наводороживающее воздействие. Поэтому, при сварке на воздухе увеличение количества переплавляемого покрытия при неизменном количестве расплавляемого металла приводит к повышению в нем содержания кислорода и водорода [8]. В случае подводной сварки, повышение диаметра покрытия улучшает условия защиты расплавленного металла от доступа воды: на стадии капли за счет увеличения глубины втулочки из оплавленного покрытия на торце электрода (экранированием), а на стадии ванны – за счет возрастающего количества шлака. В результате – суммарного воздействия этих факторов содержание водорода в металле шва снижается.

Насыщение расплавленного металла кислородом при подводной сварке и его взаимодействие с элементами-раскислителями приводит к увеличению в металле шва объемной доли неметаллических включений (НВ), таблице 3. При этом увеличивается количество НВ в диапазоне размеров 0,50...1,25 мкм, рисунок 1.

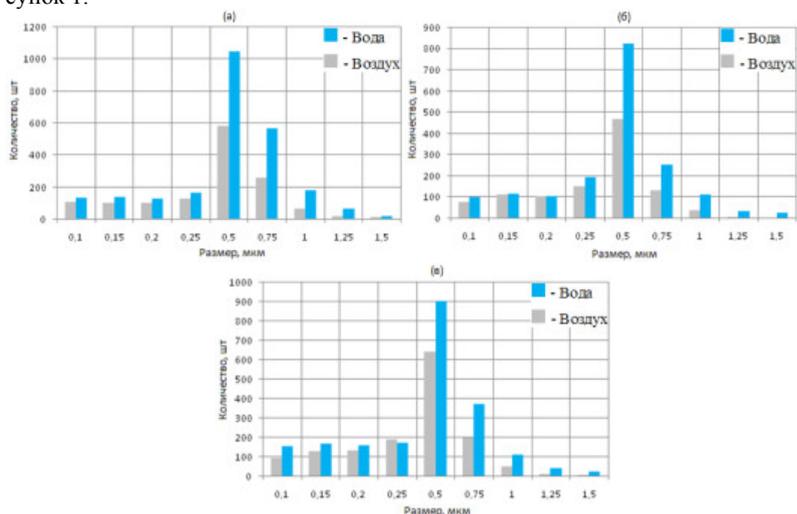
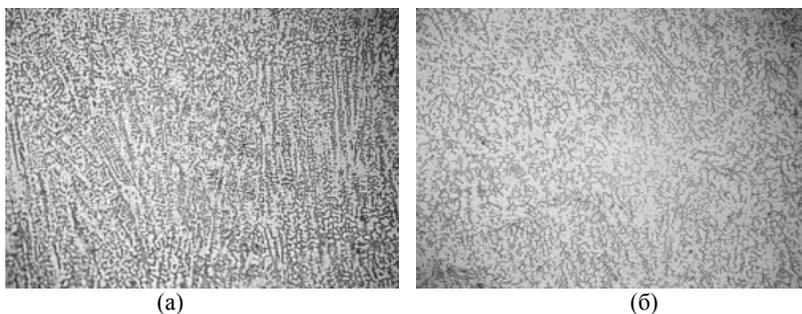


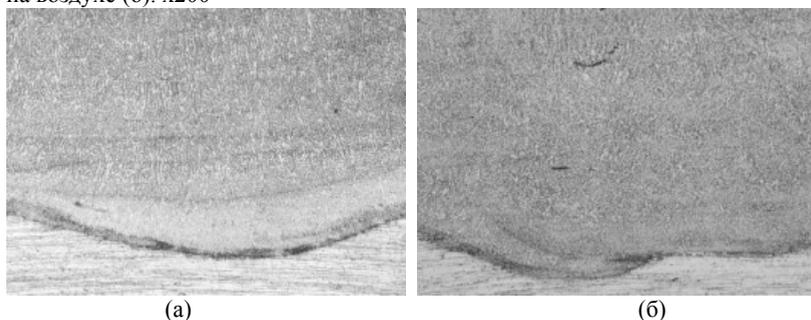
Рис. 1. Влияние условий сварки на количество неметаллических включений в сварных швах, выполненных электродами: К-1 (а), К-2 (б), К-3 (в).

Число НВ размером более 1,25 мкм во всех исследованных образцах практически не изменяется и составляет 8...10% от общего количества, а объемная доля НВ размером 4,7...10,0 мкм остается в пределах 53...67% от всего объема НВ.

Согласно результатам исследований структуры, приведенным в табл.3, видно, что в сварочных швах выполненных под водой (шлифы 4...6) по сравнению с выполненными на воздухе (шлифы 1...3), доля зернограничного  $\delta$ -феррита сокращается. По нашему мнению, это обусловлено окислением элементов-ферритизаторов Si, Nb, Cr (см. табл.2), обладающих более высоким средством к кислороду, чем у Ni и Fe. Характерной особенностью швов, выполненных под водой, является доминирование в их структуре столбчатых кристаллитов (см. рис.2а), тогда – как для швов, выполненных на воздухе, – преобладание ячеистых кристаллитов (см. рис.2б). При этом, в случае сварки под водой ~ в 1,5...2 раза возрастает дендритный параметр (см. табл.2) при неизменном размере аустенитных ячеек, что свидетельствует о развитии дендритных осей второго порядка и расширении температурного интервала кристаллизации металла шва. Из табл. 2 также следует, что для всех экспериментальных электродов, независимо от условий сварки, доля  $\delta$ -феррита и балл аустенитного зерна остаются неизменными.



**Рис. 2.** Микроструктура металла сварного шва при сварке под водой (а) и на воздухе (б). х200



**Рис. 3.** Микроструктура металла сварного шва, ЗТВ и основного металла при сварке под водой (а) и на воздухе (б). х25

### Выводы

1. Как при сварке на воздухе, так и под водой, увеличение диаметра электродного покрытия повышает концентрацию кислорода в металле шва, что обусловлено ростом окисляющего воздействия на расплавленный металл электродного покрытия и шлака.
2. Характерными особенностями сварных швов, выполненных под водой, по сравнению с выполненными на воздухе, являются:
  - повышенная в 1,7...2,2 раза объемная доля и количество оксидных неметаллических включений;
  - более высокое содержание в них кислорода (в 1,2...1,4 раза) и водорода (в 1,7...2,1 раза), пониженное – элементов ферритизаторов (Si, Nb, Cr);
  - преобладание в их структуре столбчатых кристаллитов при пониженной доле зернограничного  $\delta$ -феррита.
3. Увеличение в электродном покрытии соотношения  $\text{CaF}_2/\text{TiO}_2$  и диаметра покрытия в условиях подводной сварки позволяет в 1,2...1,4 раза сократить в металле шва содержание водорода, что можно объяснить повышением в атмосфере дуги парциального давления фторидов и экранированием расплавленного металла от воздействия воды втулочкой из покрытия и возросшим количеством образующегося шлака.

### Список использованных источников

1. Хренов К.К., Ярхо В.И.: - технология дуговой электросварки. – Москва-Ленинград. – «Машиностроение». – 1940 г., 408 стр.
2. Кононенко В.Я. Подводная сварка и резка (2-е издание, дополненное и переработанное) – Киев, 2011. – 264 с.
3. Авилов Т.И. Исследование процесса дуговой сварки под водой // Сварочное производство. - 1958. - N 5. - С. 12-14.
4. Мадатов Н.М. О свойствах парагазового пузыря вокруг дуги при сварке под водой // Автоматическая сварка. -1965. -№12. -с.25-29.
5. Максимов С.Ю. Новые электроды для мокрой сварки под водой во всех пространственных положениях: - Сб. докл. 1 Международной конференции стран СНГ: «Состояние и перспектив развития сварочных материалов в странах СНГ»: -Краснодар-Москва- 1998 г., - стр. 125-128.
6. Мурзин В.В., Мурзин В.Т., Руссо В.Л., Евсеев В.Р.: - Состав электродного покрытия для ручной дуговой сварки: - Автсвид. №1540992.
7. Мурзин В.В., Руссо В.Л., Евсеев В.Р., Узилевский Ю.А. Электрод для ручной дуговой сварки: - Авт. свид. №15497706.
8. Походня И.К. : - Газы в сварных швах.- Москва.- «Машиностроение».- 1972 г., 256 с.