

УДК 621.791.947.5(204.1)

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВОВ ТИПА Х20Н9Г2Б, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ МОКРОЙ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ

К. А. ЮЩЕНКО, А. В. БУЛАТ, Н. Ю. КАХОВСКИЙ, В. И. САМОЙЛЕНКО,
С. Ю. МАКСИМОВ, С. Г. ГРИГОРЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведены результаты исследования изменений химического состава и структуры металла шва при мокрой дуговой подводной сварке стали 12Х18Н10Т покрытыми электродами. Показано, что в отличие от сварки на воздухе в металле швов при подводной сварке повышается содержание кислорода и водорода при одновременном снижении количества элементов-ферритизаторов. При этом структура металла шва характеризуется наличием преимущественно столбчатых кристаллитов, пониженной долей зернограничного δ -феррита и повышенной объемной долей оксидных неметаллических включений, количество которых с дисперсностью 0,10...1,25 мкм возрастает в 1,5...2 раза. Библиогр. 14, табл. 4, рис. 2.

Ключевые слова: мокрая дуговая подводная сварка, сталь 12Х18Н10Т, покрытые электроды, металл шва, химический состав, структура, неметаллические включения

Электродуговая подводная сварка покрытыми электродами в течение почти 80-ти лет применяется для ремонтно-восстановительных работ на кораблях и гидротехнических сооружениях различного назначения из низкоуглеродистых и низколегированных сталей [1–4]. Ее особенности исследованы достаточно полно [5–9], что позволило создать эффективные технологии и специализированные сварочные материалы [10–13].

В последние годы стала актуальной задача усовершенствования технологии ремонта поврежденных облицовки из стали 12Х18Н10Т железобетонных бассейнов для хранения отработавших свой ресурс тепловыделяющих элементов АЭС. Для ее решения предполагается исключить операции откачки воды и дезактивации бассейнов, а ремонт повреждений осуществлять методом мокрой подводной электродуговой сварки покры-

тыми электродами (далее по тексту — подводная сварка). Однако особенности подводной сварки стали 12Х18Н10Т недостаточно изучены, к тому же до сих пор не созданы электроды специального назначения.

На предварительном этапе разработки таких электродов предстояло изучить влияние условий сварки на химический состав и структуру сварных швов. Для этого были изготовлены экспериментальные электроды типа Э-08Х20Н9Г2Б диаметром 3 мм, характеристики которых приведены в табл. 1. Дополнительно отметим, что для ограничения окисляющего воздействия углекислого газа, а также науглероживания металла шва содержание мрамора в покрытиях ограничили 16 %. Кроме того, для оценки возможности экранирования капель электродного металла от прямого окисляющего и наводороживающего воз-

Таблица 1. Характеристики экспериментальных электродов и режимы сварки

Условное обозначение электродов	Характеристики экспериментальных электродов*			Условия и режим сварки			Номер образца (шлифа)
	Суммарное содержание CaF_2 и TiO_2 в покрытии **, %	Соотношение CaF_2 и TiO_2 в покрытии	Диаметр электрода, мм	Среда	$I_{\text{св}}^{\text{ср}}$, А	$U_{\text{д}}^{\text{ср}}$, В	
К-1	56	1:2	1,6	Воздух	118,8	24,3	1
				Вода	115,7	26,3	4
К-2	56	3:1	1,6	Воздух	119,3	24,2	2
				Вода	111,3	27,4	5
К-3	56	3:1	1,8	Воздух	113,4	25,5	3
				Вода	108,5	28,5	6

* В качестве электродных стержней использовали сварочную проволоку диаметром 3 мм из стали Св-04Х19Н9 (ER304).

** Содержание остальных компонентов покрытия всех экспериментальных электродов было одинаковым.

© К. А. Ющенко, А. В. Булат, Н. Ю. Каховский, В. И. Самойленко, С. Ю. Максимов, С. Г. Григоренко, 2014

Таблица 2. Химический состав металла сварных швов

Номер образца	Содержание, мас. %						
	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

Таблица 3. Характеристики структуры металла швов и ЗТВ

Номер образца	Металл шва				Металл ЗТВ	
	Средний диаметр 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...2,0
4	10	15...25	5...6	0,42	6	1,0...1,5
2	5...7	7...10	9,0...10,5	0,13	6	1,0...1,5
5	5...7	20...25	8...9	0,29	6	1,0...2,0
3	5...7	10...12	9...12	0,19	5	1,0...1,5
6	5...7	15...20	8...11	0,33	6	1,5...2,0

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

действия воды были изготовлены электроды К-3, отличающиеся от электродов К-2 только диаметром покрытия.

Электроды К-1–К-3 на постоянном токе обратной полярности от инвертора «Кетрри PS-500» при одинаковых установках режима сварки были выполнены жесткие стыковые соединения пластин из стали 12Х18Н10Т (321) на воздухе и под водой на глубине около 0,5 м. Аналогичным образом были получены однослойные наплавки на пластины из той же стали. При этом с помощью анализатора сварочных процессов АСП-19 определяли электрические характеристики горения дуги — среднестатистические значения параметров $I_{св}^{cp}$ и $U_{д}^{cp}$. Образцы № 1–6 (шлифы) вы-

резали из соответствующих сварных соединений и наплавов. Содержание легирующих элементов в 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 РО-316 и РН-3 фирмы LECO. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Для исследования структуры сварных швов и ЗТВ, а также фотографирования неметаллических включений (НВ) использовали микроскоп «Neophot-32», оснащенный цифровой фотокамерой «Olympus». Долю ферритной фазы определяли ферритометром «Ferritgehaltmesser 1.053». При этом микроструктуру металла шва и ЗТВ выявляли методом электролитического травления в 20 %-м водном растворе сернокислового аммония. Результаты исследования структуры швов обобщены в табл. 3.

Для измерения твердости по Виккерсу (нагрузка 100 г) металла шва использовали твердомер М-400 фирмы LECO, а твердость по Роквеллу (нагрузка 60 г) металла шва, ЗТВ и основного металла определяли твердомером ТК-2М. Полученные результаты приведены в табл. 4.

Согласно полученным данным (см. табл.1) увеличение в электродном покрытии соотношения CaF_2/TiO_2 как при сварке под водой, так и на воздухе приводит к снижению в металле шва содержания кислорода и водорода, что обусловлено повышением в атмосфере дуги парциального давления фторидов, снижением количества кис-

Таблица 4. Твердость металла швов, ЗТВ и основного металла

Номер образца	$HV0,1$, МПа	HRA	HRA	
	Металл шва		ЗТВ	Основной металл
1	$\frac{2100...2130}{2110}$	$\frac{53,0...55,0}{54,1}$	$\frac{52,5...54,5}{53,5}$	$\frac{50,5...54,5}{52,6}$
4	$\frac{2130...2180}{2146}$	$\frac{52,5...55,0}{53,8}$	$\frac{53,0...54,0}{53,5}$	$\frac{49,0...53,0}{50,3}$
2	$\frac{2190...2210}{2203}$	$\frac{52,0...54,0}{53,2}$	$\frac{53,0...53,5}{53,2}$	$\frac{49,0...53,0}{50,6}$
5	$\frac{2190...2360}{2253}$	$\frac{53,5...54,0}{53,8}$	$\frac{54,0...56,0}{54,8}$	$\frac{51,0...52,5}{51,5}$
3	$\frac{2100...2210}{2136}$	$\frac{55,0...55,5}{55,1}$	$\frac{53,0...55,0}{54,0}$	$\frac{51,0...54,0}{52,6}$
6	$\frac{2180...2300}{2253}$	$\frac{54,0...56,0}{54,8}$	$\frac{53,0...55,5}{54,5}$	$\frac{51,0...53,0}{52,0}$

лорода и связыванием водорода во фтороводород. При прочих равных условия увеличение диаметра электродного покрытия (электроды К-2 и К-3) вызывает повышение содержания кислорода и снижение содержания водорода в металле шва. Такое положение можно объяснить тем, что электродное покрытие и образующийся шлак в любом случае оказывают на металл шва окисляющее воздействие. Поэтому увеличение количества переплавляемого покрытия (шлака) при неизменном количестве расплавляемого металла приводит к повышению в нем содержания кислорода [14]. Кроме того, в условиях подводной сварки увеличение диаметра электродного покрытия улучшает защиту расплавленного металла от доступа воды: на стадии капли — за счет увеличения глубины втулочки из оплавленного покрытия на торце электрода (экранирования), а на стадии ванны — 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 уве-

личению в металле шва объемной доли НВ (см. табл. 3). При этом увеличивается количество НВ размером от 0,50 до 1,25 мкм (рис. 1). Количество НВ размером более 1,25 мкм во всех исследованных образцах практически не изменялось и составляло 8...10 % их общего количества, а объемная доля НВ размером 4,7...10,0 мкм оставалась в пределах 53...67 % всего объема НВ.

Результаты исследования структуры (см. табл. 3) показали, что в швах, выполненных под водой (шлифы № 4–6), по сравнению с полученными на воздухе (№ 1–3) доля зернограничного δ -феррита сокращается. По нашему мнению, это обусловлено окислением элементов-ферритизаторов (кремния, ниобия и хрома), обладающих более высоким средством к кислороду, чем никель и железо. Характерной особенностью швов, выполненных под водой, является доминирование в их структуре столбчатых кристаллитов (рис. 2, а), тогда как для швов, полученных на воздухе, — преобладание ячеистых кристаллитов (рис. 2, б). При этом в случае сварки под водой почти в 1,5...2 раза возрастает дендритный параметр (см. табл. 3) при неизменном размере аустенитных ячеек, что свидетельствует о развитии дендритных осей второго порядка и расширении температурного интервала кристаллизации металла шва. При применении всех экспериментальных электродов доля δ -феррита

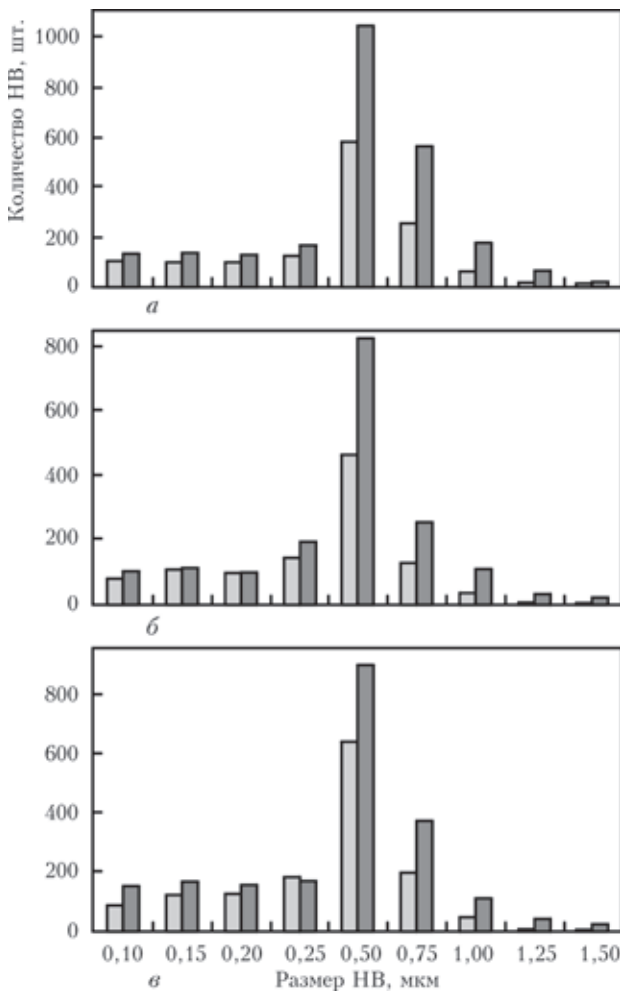


Рис. 1. Влияние условий сварки на воздухе (светлые столбики) и в воде (темные) на количество НВ в сварных швах, выполненных электродами К-1 (а), К-2 (б), К-3 (в)

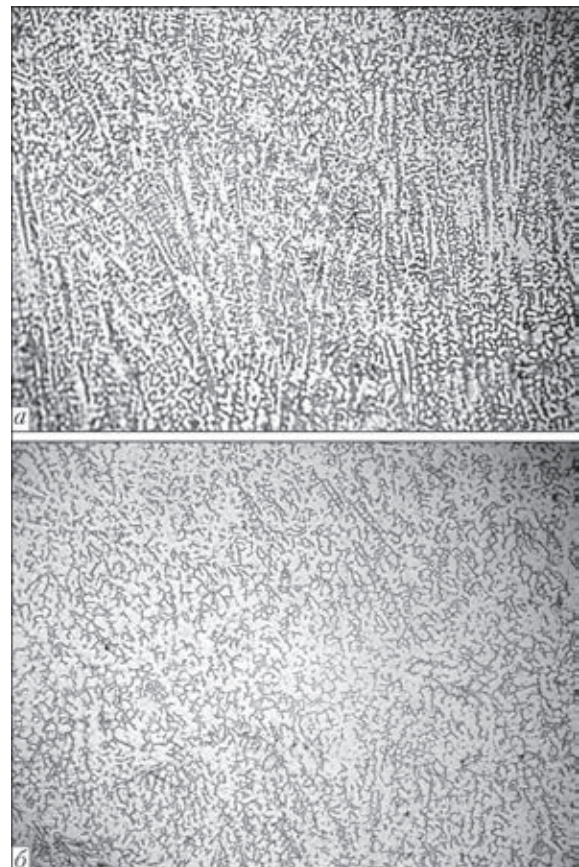


Рис. 2. Микроструктура ($\times 200$) металла сварного шва, выполненного под водой (а) и на воздухе (б)

и балл аустенитного зерна оставались постоянными независимо от условий сварки (см. табл. 3).

Согласно результатам измерения твердости по Виккерсу металла шва (см. табл. 4) у образцов, сваренных под водой (№ 4–6), твердость несколько выше, чем у выполненных на воздухе (№ 1–3). Однако измерения твердости по Роквеллу таких изменений не подтвердили и показали, что на всех исследованных образцах *HRA* минимальная в основном металле и выше в ЗТВ и металле шва, при этом значения твердости в ЗТВ и металле шва практически не отличаются. Такое повышение твердости по сравнению с основным металлом, скорее всего, обусловлено локализацией пластической деформации в процессе сварки в этих зонах соединения.

Выводы

1. При прочих равных условиях характерными особенностями сварных швов, выполненных под водой, по сравнению с полученными на воздухе являются более высокое содержание в них кислорода (в 1,2...1,4 раза) и водорода (в 1,7...2,1 раза); пониженное содержание элементов-ферритизаторов (кремния, ниобия, хрома); повышенная в 1,7...2,2 раза объемная доля и количество оксидных НВ; преобладание в их структуре столбчатых кристаллитов при более низкой доле зернограничного δ -феррита.

2. Увеличение в электродном покрытии соотношения CaF_2 и TiO_2 , а также диаметра электрода в условиях подводной сварки позволяет приблизительно в 1,5 раза снизить содержание водорода в металле шва, что можно объяснить повышением в атмосфере дуги парциального давления фторидов и экранированием расплавленного металла от воздействия воды втулочкой из покрытия с возросшим количеством образующегося шлака.

3. Как при сварке под водой, так и на воздухе увеличение диаметра электродного покрытия повышает концентрацию кислорода в металле шва, что обусловлено ростом окисляющего воздействия на расплавленный металл электродного покрытия и шлака.

1. *Хренов К. К., Ярхо В. И.* Технология дуговой электросварки. – М.-Л.: Машиностроение, 1940. – 408 с.
2. *Хренов К. К.* Подводная электрическая сварка и резка металлов. – М.: Военное изд-во Министерства ВС СССР, 1946. – 160 с.
3. *Авилов Т. И.* Исследование процесса дуговой сварки под водой // Свароч. пр-во. – 1958. – № 5. – С. 12–14.
4. *Савич И. М., Смолярко В. Б., Камышев М. А.* Технология и оборудование для полуавтоматической подводной сварки металлоконструкций // Нефтепромысл. стр-во. – 1976. – № 1. – С. 10–11.
5. *Мадатов Н. М.* О свойствах парогазового пузыря вокруг дуги при сварке под водой // Автомат. сварка. – 1965. – № 12. – С. 25–29.
6. *Kononenko V. Ya.* Technologies of underwater welding and cutting. – Kiev: PWI, 2006. – 174 p.
7. *Reynolds T. J.* Service history of wet welded repairs and modifications // Proc. of Intern. Workshop on State-of-the-Art Science and Reliability of Underwater Welding and Inspection Technology (Houston, USA, Nov. 17–19, 2010). – P. 31–64.
8. *Логунов К. В.* Подводная сварка и резка металлов. – СПб: Коста, 2003. – 152 с.
9. *Кононенко В. Я.* Подводная сварка и резка. – Киев: Эко-технология, 2011. – 264 с.
10. *Савич И. М.* Подводная сварка порошковой проволокой // Автомат. сварка. – 1969. – № 10. – С. 70–71.
11. *Максимов С. Ю.* Новые электроды для мокрой сварки под водой во всех пространственных положениях // Состояние и перспектив развития сварочных материалов в странах СНГ: Сб. докл. 1-й Междунар. конф. стран СНГ. – Краснодар-М., 1998. – С. 125–128.
12. *А. с. 1540992 СССР. МКИ В 23 К35/365.* Состав электродного покрытия для ручной дуговой сварки / В. В. Мурзин, В. Т. Мурзин, В. Л. Руссо, В. Р. Евсеев. – Оpubл. 1990.
13. *А. с. 15497706 СССР. МКИ В 23 К35/365.* Электрод для ручной дуговой сварки / В. В. Мурзин, В. Л. Руссо, В. Р. Евсеев, Ю. А. Узилевский. – Оpubл. 1989.
14. *Походня И. К.* Газы в сварных швах. – М.: Машиностроение, 1972. – 256 с.

Поступила в редакцию 24.03.2014