

УДК 621.791.051.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ ТИТАНОМ И БОРОМ МЕТАЛЛА ШВА НА ЕГО МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ СВАРКЕ ПОД ВОДОЙ

С. Ю. МАКСИМОВ, В. В. МАЧУЛЯК, А. В. ШЕРЕМЕТА, Е. И. ГОНЧАРЕНКО

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

Одним из негативных последствий влияния экстремальных условий подводной сварки является низкий уровень свойств сварных соединений, в первую очередь, пластичности. Традиционно эта задача решается путем оптимизации микроструктуры металла шва за счет целенаправленного легирования. Целью данной работы было установить влияние микролегирования металла шва титаном и бором на его механические свойства при сварке порошковой проволокой под водой. Исследована структура металла, образующаяся в результате микролегирования, и определены показатели механических свойств наплавленного металла. Установлены оптимальные пропорции микролегирования, при которых обеспечиваются высокие показатели относительного удлинения металла шва. Показано, что его механические свойства соответствуют требованиям класса А Спецификации по подводной сварке ANSI/AWS D3.6. Библиогр. 5, табл. 2, рис. 7.

*Ключевые слова:* подводная сварка, порошковая проволока, металл шва, микролегирование, структура, механические свойства

Экстремальные условия подводной сварки негативно влияют на свойства сварных соединений. Традиционно для повышения механических свойств металла шва используется целенаправленное легирование, оптимизирующее его микроструктуру. Микроструктурой, которая показывает оптимальность сочетания показателей прочности и пластичности сварных соединений низкоуглеродистых конструкционных сталей, считается игольчатый феррит (ИФ).

На рис. 1 представлена схематическая диаграмма превращений при непрерывном охлаждении для мокрой подводной сварки электродными материалами, обеспечивающими получение металла шва ферритного типа. Основными структурными составляющими в металле шва являются зернограничный феррит и феррит с второй фазой, которые характеризуются низкими пластическими свойствами. По результатам исследования микроструктуры швов, выполненных под водой электродами типа Е6013 в условиях Мексиканского залива, было рекомендовано повышать содержание как кислорода, так и марганца в металле для увеличения доли ИФ (рис. 2).

Как альтернативу введения марганца авторы работы [2] использовали добавки титана и бора в шихту порошковой проволоки, получив при сварке на воздухе более 90 % ИФ в металле шва, при этом содержание бора и титана было в пределах 0,004...0,008 и 0,04...0,08 % соответственно. Титан вводился с целью образования включений, которые служат зародышами образования ИФ. Кроме того, титан как потенциальный раскислитель защищает от выгорания легирующие элементы, в

том числе и бор. Бор также содействует образованию включений, которые в основном скапли-

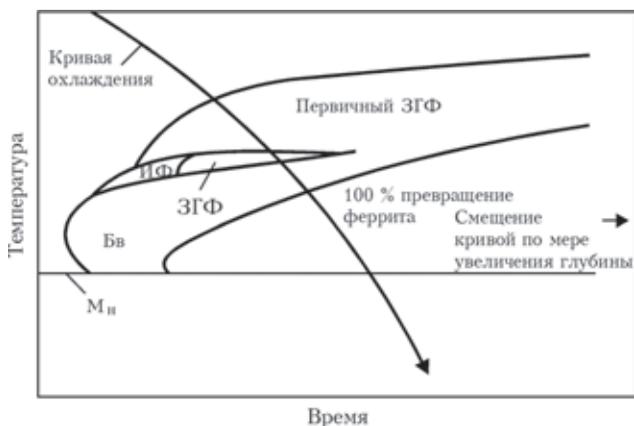


Рис. 1. Схематическая термокинетическая диаграмма для подводной сварки [1]

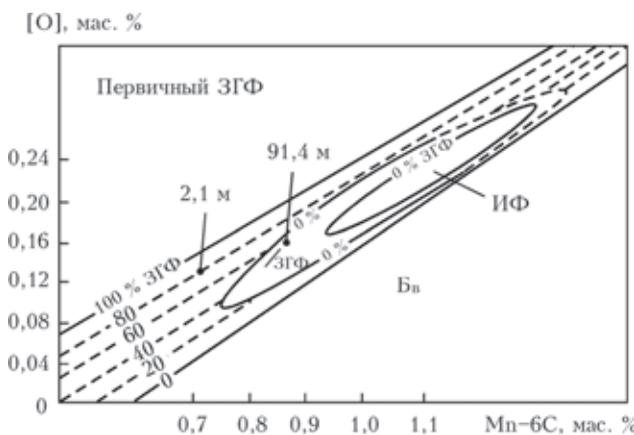


Рис. 2. Прогнозируемое образование структурных составляющих при мокрой подводной сварке [1] на разной глубине

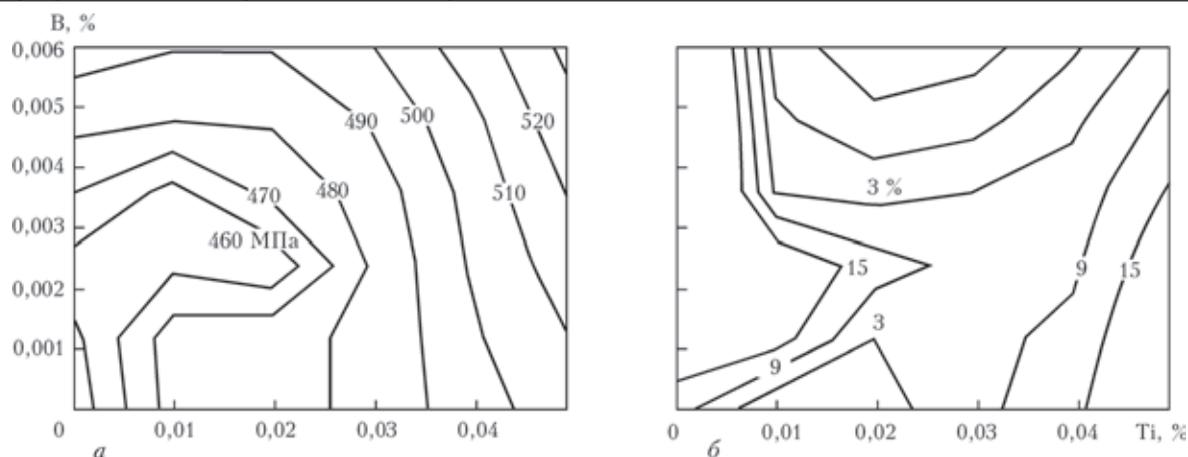


Рис. 3. Влияние содержания титана и бора в металле шва на предел прочности при растяжении (а) и относительное удлинение (б)

Таблица 1. Химический состав металла швов, выполненных Ti- и B-содержащей порошковой проволокой под водой

Номер образца	Содержание, мас. %						
	C	Si	Mn	S	P	Ti	B
1	0,026	0,013	0,20	0,016	0,018	-	-
2	0,013	0,004	0,17	0,022	0,015	0,003	0,002
3	0,015	0,004	0,20	0,022	0,019	<0,002	0,002
4	0,017	0,005	0,23	0,021	0,014	0,005	<0,002
5	0,031	0,106	0,47	0,021	0,021	0,032	<0,002
6	0,039	0,017	0,37	0,023	0,021	0,007	0,0033
7	0,038	0,114	0,58	0,030	0,018	0,0053	0,005
8	0,024	0,020	0,28	0,024	0,023	0,006	0,002
9	0,044	0,080	0,62	0,027	0,018	0,049	0,006

ваются по границам зерен аустенита и затрудняют образование доэвтектоидных фаз, например, зернограничного феррита. В условиях ручной мокрой подводной сварки максимально достижимое количество ИФ (около 60 %) образуется при меньшей степени легирования — 0,03 % Ti и 0,0015 % B [3]. Авторы работы [3] объясняют это тем, что потребность в титане и боре для оптимизации содержания ИФ снижается в результате повышения скорости кристаллизации при сварке в водной среде. Близкие результаты были получены и при использовании порошковой проволоки, в частности, обнаружены две области с максимальным количеством ИФ на уровне 56...57 %. При этом содержание титана и бора в металле шва для первой области составляет 0,023...0,027 и до 0,0002 %, а для второй — 0,030...0,032 и 0,0016...0,0023 % соответственно [4].

Целью данной работы было определение эффективности влияния микролегирования титаном и бором на механические свойства металла шва при сварке порошковой проволокой под водой.

Для проведения исследований была изготовлена партия порошковых проволок типа ППС-АН1 диаметром 1,6 мм с добавками титана и бора в шихту за счет уменьшения количества железного порошка. Титан и бор вводили в виде FeTi и FeB

в количестве 10; 20 и 2; 4 % соответственно как по отдельности, так и совместно. Для получения образцов наплавленного металла многопроходную сварку стыковых соединений стали Ст3 толщиной 14 мм выполняли в лабораторном бассейне на глубине 1 м на режиме:  $U_{д} = 30...32$  В;  $I_{св} = 160...180$  А, полярность обратная.

Из каждого стыкового соединения были изготовлены шлифы и образцы для механических испытаний в соответствии с требованиями класса А Спецификации по подводной сварке ANSI/AWS D3.6 [5]. Химический состав металла швов приведен в табл. 1, результаты механических испытаний — в табл. 2.

Как видно из приведенных данных, легирование титаном и бором во всех случаях приводит к незначительному повышению прочностных свойств металла шва. Что касается пластичности, то их влияние носит неоднозначный характер. Для удобства анализа полученных результатов с помощью специализированного пакета программ (Origin 7, Statistica 6) была выполнена полиномиальная интерполяция экспериментальных данных и получено распределение значений относительного удлинения и предела прочности при растяжении в зависимости от содержания бора и титана в металле шва (рис. 3). Установле-

Таблица 2. Результаты механических испытаний сварных швов

Номер образца	$\sigma_t$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\alpha_{зар}$ , град
1	333,0	440,0	11,3	22,0	50
2	381,6	459,6	12,3	22,0	90
3	374,6	458,6	17,7	35,8	180
4	393,2	469,8	10,7	18,7	69
5	447,5	485,6	7,0	16,0	61
6	342,5	466,3	7,0	16,0	31
7	450,9	485,6	3,7	15,4	135
8	392,1	468,6	16,0	28,2	81
9	494,1	532,4	6,3	12,9	50

но, что составы, обеспечивающие наиболее высокие пластические свойства, находятся в пределах 0,0015...0,0025 % В и до 0,01 % Ti.

Металлографические исследования проводили с помощью микроскопов Polyvag и Neophot-32. Твердость измеряли на микротвердомере М-400 (LECO). Цифровое изображение структуры было получено с помощью цифровой камеры Olympus.

Структура металла шва, выполненного проволокой ППС-АН1 (образец № 1), представляет собой ферритную матрицу и мелкие карбиды, выделившиеся как в теле кристаллитов, так и вдоль их границ (рис. 4). Микротвердость металла последнего прохода составляет  $HV1 = 1880...2130$  МПа. При введении бора количество карбидов уменьшается, что приводит к снижению микротвердости до  $HV1 = 1760...1810$  МПа в образце № 2 и  $HV1 = 1870$  МПа в образце № 3. Структура металла шва представляет собой ферритно-карбидную смесь (рис. 5).

В швах, легированных титаном (образец № 4), структура состоит из феррита разных модификаций: с упорядоченной и неупорядоченной второй фазой, полигонального феррита и небольшого количества участков ИФ и бейнита (рис. 6). Твердость металла возрастает до  $HV1 = 2430...2850$  МПа. При повышении содержания титана (образец № 5) размер выделений полигонального феррита увеличился, ИФ не обнаружен. Твердость

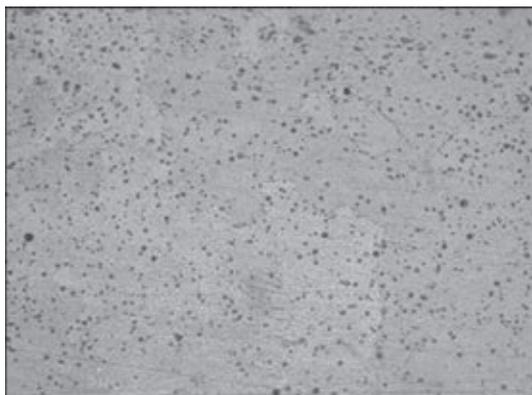


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 500$ ) металла шва без легирования титаном и бором

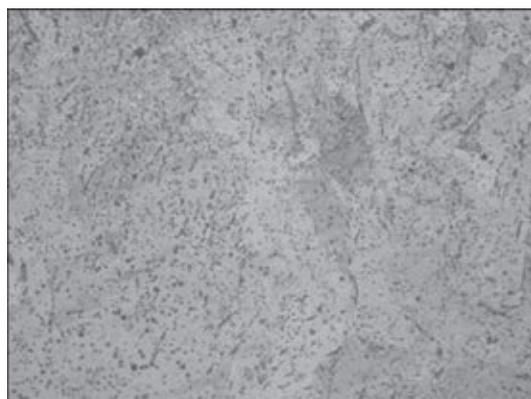


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 500$ ) металла шва, легированного бором

металла шва несколько снизилась — до  $HV1 = 2300...2450$  МПа.

Совместное введение титана и бора не приводит к таким заметным изменениям структуры металла шва, как при раздельном легировании. В зависимости от соотношения содержания легирующих элементов изменяется соотношение количества феррита с упорядоченной и неупорядоченной второй фазой (рис. 7), а при максимальной степени легирования (образец № 9) в шве обнаружены участки бейнита с повышенной твердостью ( $HV1 = 2970$  МПа).

Анализ результатов металлографических исследований и испытаний показывает, что обла-

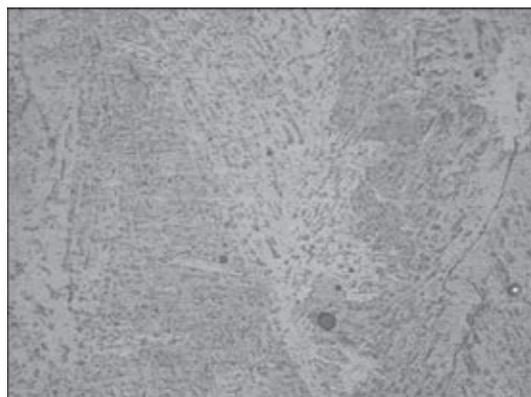


Рис. 6. Микроструктура ( $\times 500$ ) металла шва, легированного титаном

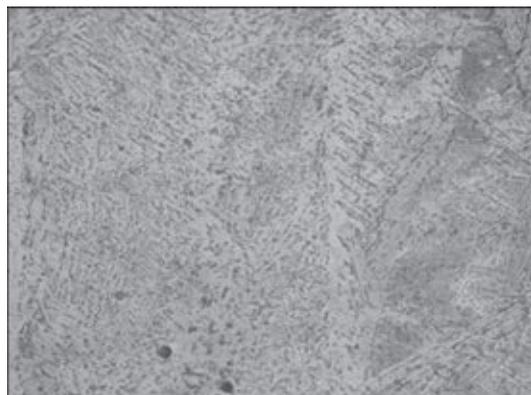


Рис. 7. Микроструктура ( $\times 500$ ) металла шва, легированного титаном и бором

сти с наилучшими пластическими свойствами и максимальным количеством ИФ не совпадают. Наибольшая пластичность наблюдается в швах с ферритно-карбидной структурой. Появление в шве структурных составляющих типа ИФ и верхнего бейнита приводит к снижению относительного удлинения и увеличению прочности. Для объяснения механизма влияния микролегирования металла шва титаном и бором на его свойства требуются дополнительные, более глубокие исследования.

Что касается оптимизации содержания титана и бора в металле шва, то с этой целью были изготовлены и испытаны несколько партий порошковых проволок, обеспечивающих легирование в установленных выше пределах. Были получены следующие средние значения механических свойств:  $\sigma_B = 469$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 378,2$  МПа,  $\delta = 20,8$  %,  $\alpha_{заг} = 180^\circ$ . Таким образом, рациональное микролегирование титаном и бором обеспечивает повышение относительного удлинения металла шва в 1,8 раза при незначительном увеличении временного сопротивления разрыву. По своим механическим свойствам металл шва соответствует требованиям класса А Спецификации по подводной сварке ANSI/AWS D3.6.

## Выводы

1. Микролегирование титаном и бором металла швов, выполненных под водой порошковой проволокой, позволяет эффективно управлять их пластическими свойствами.

2. Установлены пределы содержания титана и бора (0,005...0,010 и 0,0015...0,0025 % соответственно), при которых относительное удлинение металла швов низколегированных стелей класса прочности K40 увеличивается в 1,8 раза при незначительном повышении временного сопротивления.

3. Область с наилучшими пластическими свойствами не совпадает с областью максимального количества ИФ. Для уточнения механизма влияния микролегирования металла шва титаном и бором в условиях сварки под водой на его свойства требуются более глубокие исследования.

1. Ibarra S., Grabbs C., Olson D. L. Fundamental approaches to underwater welding metallurgy // J. of Metals. – 1988. – № 12. – P. 8–10.
2. Oh D. W., Olson D. L. The influence of boron and titanium on low carbon steel weld metal // Welding J. – 1990. – № 4. – P. 151–158.
3. Sanchez-Osio A., Liu S., Olson D. L. et al. Underwater wet welding consumables for offshore applications // Proc. of 12th Intern. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 1993. – Vol. 3, Pt A. – P. 119–128.
4. Максимов С. Ю., Кражановский Д. В. Содержание игольчатого феррита в металле швов при подводной сварке // Автомат. сварка. – 2006. – № 1. – С. 62–64.
5. ANSI/AWS.D3.6: Specification for underwater welding.

Поступила в редакцию 28.03.2014

## ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com

**СВАРКА И НАПЛАВКА МЕДИ И СПЛАВОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ** / Составители: В. М. Илюшенко, Е. П. Лукьянченко. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 396 с. Мягкий переплет, 165×235 мм.



Сборник включает основные публикации — статьи, доклады, информационные материалы и изобретения в области сварки и наплавки меди и ее сплавов за период с 1953 по 2013 гг., авторами которых являлись в основном сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. В представленных материалах освещен широкий круг вопросов разработки прогрессивных технологических процессов сварки и наплавки этих материалов и опыт их производственного применения в различных отраслях промышленности. Сборник может быть полезен инженерно-техническим работникам сварочного производства, а также специалистам, развивающим исследования в этой области. ISBN 978-966-96309-1-9.

Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка»