

ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКА ДЛЯ МОКРОЙ ПОДВОДНОЙ СВАРКИ

Одной из основных проблем при подводной дуговой сварке является низкий уровень пластичности сварного соединения низколегированной стали вследствие экстремальных условий протекания процесса (Ibarra S., Grabbs C, Olson D. (1988) *Fundamental approaches to underwater welding metallurgy. Journal of Metals. №12. p. 8-10*). Повышения пластичности металла шва можно достичь за счет изменения его микроструктуры путем дополнительного легирования. Концептуальной основой при создании новой порошковой проволоки послужил опыт проведения успешных экспериментов с микролегированием металла шва титаном и бором при сварке на воздухе (Olson D. (1990) *The Influence of Boron and Titanium on Low Carbon Steel Weld Metal. Welding Journal. №4. p.151-158*).

При подводной сварке основными структурными составляющими в металле шва являются зернограничный феррит и феррит со второй фазой, характеризующиеся низкими пластическими свойствами. Поэтому для повышения уровня пластических свойств необходимо уменьшить их долю в металле шва за счет увеличения доли игольчатого феррита (ИФ).

В условиях ручной мокрой подводной сварки максимально достижимое количество ИФ (около 60 %) образуется при легировании металла шва 0,03 % Ti и 0,0015 % B (Sanchez-Osio A., Liu S., Olson D., Ibarra S. (1993) *Underwater Wet Welding Consumables for Offshore Applications. Proc. 12th Int. Conf. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. V.3. Part A. p. 119-128*). Близкие результаты в условиях сварки под водой были получены и при использовании порошковой проволоки. Экспериментально 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 0...0,0002 %, а для второй — 0,03...0,032 и 0,0016...0,0023 %, соответственно (Максимов С., Кражановский Д. (2006) *Содержание игольчатого феррита в металле швов при подводной сварке. Автоматическая сварка. №1. с. 62-64*). Титан вводился с целью образования включений, которые служат зародышами для образования ИФ. Также титан выполняет роль раскислителя и защищает от выгорания бор и другие легирующие элементы. Бор также способствует образованию включений, которые в основном накапливаются по границам зерен аустенита и затрудняют образование доэвтектоидных фаз (зернограничного феррита).

В ходе исследований была изготовлена партия порошковых проволок на базе порошковой самозащитной проволоки для подводной сварки рутил-руднокислого типа ППС-АН1 диаметром 1,6 мм. В шихту проволоки вводили добавки FeTi и FeB за счет уменьшения количества железного порошка. Сварку стыковых соединений из Ст3 толщиной 12 мм выполняли за 7...9 проходов в стационарных условиях в лабораторном бассейне на глубине 1 м. При сварке использовали следующие параметры режима: $U_{д} = 30...32$ В, $I_{св} = 130...150$ А, полярность обратная. Из сваренных стыков вырезали образцы для механических испытаний, а также шлифы для металлографических исследований и определения химического состава металла шва. После выполнения полиномиальной интерполяции экспериментальных данных было установлено распределение значений относительного удлинения и временного сопротивления на разрыв в зависимости от содержания бора и титана в сварном шве. Из контурной карты распределения (рис. 1) видно, что наибольшее значение пластичности достигается при содержании в сварном шве, мас. %: 0,005...0,01 Ti и 0,0015...0,0025 B.

Структура металла шва, выполненного проволокой ППС-АН1 без легирования титаном и бором представляет собой ферритную матрицу с мелкими карбидами (рис. 2). Микротвердость металла последнего валика составляет HV1 — 1880...2130 МПа. При введении бора количество карбидов уменьшается, что приводит к снижению микротвердости до HV1 — 1750...1870 МПа. Структура металла шва — ферритно-карбидная смесь (рис. 3).

При легировании титаном структура представляет собой феррит различных модификаций: с

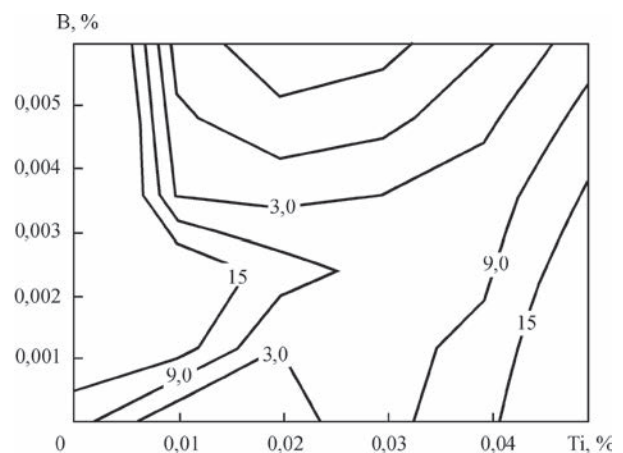
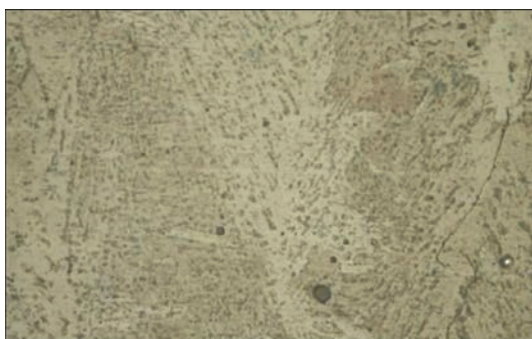


Рис. 1. Зависимость величины относительного удлинения металла шва от содержания в нем титана и бора

Рис. 2. Микроструктура ($\times 500$) нелегированного металлаРис. 3. Микроструктура ($\times 500$) металла шва при легировании боромРис. 4. Микроструктура ($\times 500$) металла шва при легировании титаном

упорядоченной и неупорядоченной второй фазой, полигональным ферритом и небольшим количеством участков с игольчатым ферритом и бейнитом (рис. 4). Микротвердость металла составляет $HV1$ — 2060...2850 МПа. С увеличением массовой доли титана выделения полигонального феррита становятся крупнее, а игольчатый феррит исчезает. При совместном введении в шихту порошковой проволоки титана и бора в металле шва наблюдается в основном феррит с неупорядоченной второй фазой, реже — с упорядоченной, а также небольшие участки игольчатого феррита (рис. 5). Микротвердость изменяется в пределах $HV1$ — 2060... 2620 МПа.

Пользуясь графиком зависимости пластичности металла шва от содержания в нем титана и бора (рис. 1), с целью оптимизации содержания титана и бора в сварном шве была изготовлена партия самозащитных порошковых проволок. По результатам испытаний механических свойств установлено, что при содержании в металле шва

Рис. 5. Микроструктура ($\times 200$) металла шва с повышенными механическими свойствами

0,003 % Ti и 0,002 % B относительное удлинение достигает 20,8%, причем прочность остается на достаточно высоком уровне — 469 МПа, а угол загиба составляет 180° . В целом, механические свойства металла шва соответствуют требованиям класса А Спецификации подводной сварки ANSI/AWS.D3.6.

Структура металла шва состоит из полигонального (расположенного вдоль зерен кристаллизации), видманштеттового феррита, а также пластинчатого феррита с неупорядоченной второй фазой. Данный факт имел место и в предыдущих экспериментах. Игольчатого феррита в металле шва не обнаружено. Микротвердость металла в корне шва составляет $HV1$ — 1810...2210 МПа. В металле шва обнаружено большое количество мелких неметаллических включений (в основном оксиды и силикаты), а также небольшое количество крупных сложных оксидов (рис. 5). На границах между валиками имеются единичные поры. Трещин в шве не обнаружено.

Структура последнего валика подобна структуре валика в корне шва. Отличается несколько большим количеством пластинчатого феррита с упорядоченной второй фазой. Твердость металла последнего валика $HV1$ — 1990...2220 МПа. Игольчатого феррита в структуре последнего валика не наблюдается.

Сварка стыкового соединения на глубине 10 и 20 м дала положительный результат в виде удовлетворительного формирования валика, отсутствия пор, трещин, шлаковых включений в металле шва.

Полученные результаты подтверждают эффективность микролегирования титаном и бором в условиях сварки под водой при решении задачи повышения пластических свойств металла шва. Однако область оптимальных механических свойств металла шва не совпадает с областью содержаний титана и бора, обеспечивающих максимальное количество игольчатого феррита в сварном шве.

С. Ю. Максимов, В. В. Мачуляк