

## **Металлургические и технологические особенности подводной сварки (Обзор)**

### **Введение**

В настоящее время для проведения подводной сварки в судостроении применяется ручная дуговая сварка покрытыми электродами. Современное отечественное автоматическое и механизированное оборудование и порошковые проволоки для подводной сварки отсутствуют.

Выполнение ручной дуговой сварки покрытыми электродами под водой сопряжено со значительными проблемами, к которым относятся: низкая стабильность горения дуги, высокое разбрызгивание, неудовлетворительное формирования шва, возникновения газовых пор и шлаковых включений. При сварке покрытыми электродами сварочные аэрозоли в большом количестве выделяются в воду, что делает водную среду непрозрачной. Это затрудняет визуальный контроль за процессом плавления металла и формированием шва, что приводит к появлению серьезных дефектов в виде несплавлений и непроваров. Аналогичные проблемы возникают при подводной резке покрытыми электродами. В условиях глубоководной сварки замена штучного электрода для водолаза также является трудоемким процессом.

Другим существенным недостатком является зависимость качества сварных соединений от квалификации сварщика. Как правило, сварочные работы под водой выполняют специально обученные водолазы, которые не могут обеспечить высокое качество сварных соединений из-за несовершенной техники сварки, а также непригодностью снаряжения водолаза к манипулированию покрытым электродом.

Решить указанные проблемы и улучшить качество сварных соединений, технологии разделительной резки позволит создание герметичного мобильного механизированного оборудования и технологии для глубоководной сварки до 60 м с применением специальной порошковой проволоки.

Предлагаемое оборудование и технология позволят уменьшить выбросы большого количества сварочных аэрозолей, обеспечат качественное формирование шва, требуемые механические характеристики и плотность наплавленного металла. При этом снизится трудоемкость выполнения сварочных работ за счет облегчения манипулирования водолазом сварочной горелкой, автоматического регулирования длины сварочной дуги и подачи порошковой проволоки.

### **Покрытые электроды для подводной сварки**

Известны покрытые электроды для подводной сварки ЭПС-52 рудно-кислого типа со стержнем из малоуглеродистой стали. Сварка под водой этими электродами характеризуется неустойчивым горением дуги и удовлетворительным формированием сварного шва. Валики высокие с крупночешуйчатой поверхностью. Отделимость шлаковой корки затруднена. При выполнении многопроходного шва, формирование второго и последующих валиков ухудшается, появляются поры. Механические свойства соединений при сварке под водой электродами ЭПС-52, соответствовали свойствам соединений, выполненных на воздухе электродами типа Э38. Пластичность металла шва не превышает 9%. Электроды ЭПС-А с покрытием флюорито-кальциевого вида и стержнем из проволоки Св-07Х25Н12Г2Т предназначены для сварки под водой низколегированных сталей повышенной прочности. Удовлетворительные сварочно-технологические свойства обеспечивались только при сварке в нижнем и вертикальном положениях. Структура наплавленного металла - высоколегированный мартенсит с большим количеством ферритной фазы. Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете совместно с АО «Электродный завод» разработаны электроды Э38-ЛКИ-1П для подводной сварки углеродистых и некоторых марок низколегированных сталей.

Для сварки низколегированных сталей повышенной прочности в С-Петербургском государственном морском техническом университете были разработаны электроды ЛКИ 2П оригинального состава (Патент 2071895 РФ). Основу газшлаковой композиции покрытия электрода составляют рутил и флюорит. Электродный стержень-проволока Св-

10X16H25AM6. Металл, наплавленный электродам ЛКИ-2П, имеет более высокие механические свойства по сравнению с электродами ЭПС-А.

В ИЭС им. Е.О.Патона была создана оригинальная газошлаковая композиция, позволившая разработать новый электрод марки ЭПС-АН1 для сварки под водой во всех пространственных положениях. Основной составляющей покрытия является рутил. Легирование и раскисление металла шва осуществляется марганцем и кремнием. Их содержание в наплавленном металле не превышает 0,4% и 0,25% (соответственно). Electroды ЭПС-АН1 обладают хорошими сварочно-технологическими свойствами и предназначены для сварки сталей с пределом текучести до 350 МПа под водой на глубине до 20 м. При их использовании обеспечиваются механические свойства металла шва на уровне класса «В» ANSI / AWS D3.6. По сварочно-технологическим и механическим свойствам они превосходят электроды ЭПС-52 и Э38-ЛКИ--1П. Хорошие результаты обеспечиваются, при использовании электродов ЭПС-АН1 в случае сварки металлоконструкций, имеющих слой воды на свариваемых поверхностях.

За рубежом сварка покрытыми электродами является основным технологическим процессом, используемым для создания сварных соединений мокрым способом. Количество марок электродов, поставляемых различными фирмами на рынок, колеблется от 40 до 60 наименований. Electroды выпускаются как для сварки сталей общего назначения, так и для сварки сталей повышенной прочности. На рынок СНГ в настоящее время эти электроды поступают малыми партиями. Их стоимость колеблется от 30 до 45 долларов США за 1 кг.

### **Металлургические особенности подводной сварки**

Металлургические процессы и формирование сварного соединения при дуговой сварке под водой плавящимся электродом происходят в специфических, по отношению к сварке на воздухе, условиях. К ним можно отнести: повышенную температуру дуги; высокую концентрацию кислорода и водорода в реакционной зоне; повышенное по отношению к атмосферному давление в реакционной зоне; попадание в реакционную зону химических соединений, растворенных в морской воде; интенсивное охлаждение металла шва и околошовной зоны.

Дуга и расплавленный металл заключены в постоянно меняющийся парогазовый объем, поддерживаемый парами воды, продуктами ее распада, газами, образующимися за счет диссоциации компонентов шихты порошковых проволок или обмазки электродов и парами металлов. Повышенная температура дуги и капель (выше 2500°С) расплавленного металла способствует росту химической активности ингредиентов в реакционной зоне. Это интенсифицирует их взаимодействие со шлаком и газами.

Кислород, образовавшийся в результате диссоциации паров воды, интенсивно растворяется в металле шва, где его содержание может превышать 0,22%. Кислород взаимодействует с активными элементами, такими как углерод, кремний и марганец, практически полностью окисляя их. Образовавшиеся в результате этой реакции оксиды, попадают в шлак и металл шва, засоряя последний неметаллическими включениями. Не вступивший в реакцию с активными элементами и железом кислород в периферийных частях парогазового пузыря взаимодействует с водородом и окисью углерода.

Водород, образовавшийся в результате диссоциации воды и ее паров, частично растворяется в железе, насыщая расплавленный металл, как на стадии капли, так и на стадии ванны. Общее содержание водорода в металле шва может превышать 0,006%. Оставшаяся часть водорода попадает в парогазовый пузырь и уходит из реакционной зоны с его всплывающей частью. Доля водорода в составе парогазового пузыря меняется и зависит от состава электродного покрытия или сердечника порошковой проволоки, давления (глубины), а также от электрических параметров дуги. Увеличение концентрации водорода в парогазовом пузыре способствует большему наводороживанию металла шва.

В результате непосредственного контакта с водой основного металла и металла шва скорость охлаждения сварного соединения при сварке под водой в 2 - 10 раз выше, чем при сварке на воздухе. Повышенное, по отношению к атмосферному, давление окружающей среды способствует интенсификации металлургических реакций. Более

интенсивно, по отношению к сварке на воздухе, окисляются легирующие элементы и насыщается водородом металл шва.

Все вышеперечисленные факторы, характерные для подводной сварки, затрудняют получение бездефектных сварных соединений непосредственно в воде. Для того чтобы оказать влияние на металлургический цикл, необходимо использовать специализированные электродные материалы, а также воздействовать на термический цикл сварки, путем изменения скорости теплоотвода.

Изучению термического цикла при дуговой сварке под водой уделяется большое значение, так как он оказывает преобладающее влияние на формирование структуры металла шва и зоны термического влияния. Ряд работ в этом направлении выполнен как в Украине, так и в других странах. Было установлено, что скорость охлаждения сварного соединения при сварке под водой покрытым электродом более чем в три раза выше по сравнению со скоростями охлаждения, получаемыми при сварке аналогичных образцов на воздухе. Установлено, что мгновенная скорость охлаждения у линии сплавления в различных участках по длине шва существенно отличается друг от друга. Так в средней части шва при  $500^{\circ}\text{C}$  она составляет  $165^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , а в начальной части валика и у кратера соответственно  $190$  и  $310^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , т. е. в 1,2 и 2 раза больше. Полученные данные показывают, что техника наложения швов может оказать существенное влияние на процесс получения шва без дефектов. Основная теплоотдача происходит через лицевую поверхность шва и зону, прилегающую ко шву. Основными факторами, влияющими на скорость охлаждения сварного соединения, формирующегося под водой, являются толщина основного металла, гидростатическое давление и погонная энергия. Увеличение скорости охлаждения в диапазоне температур  $650...500^{\circ}$  связано с изменением характера кипения на поверхности свариваемого изделия. Пленочное кипение переходит в пузырьковое.

### **Особенности подводной сварки с применением порошковой проволоки**

В 1975 г. были проведены исследования термического цикла при наплавке валика на воздухе и в пресной воде порошковой проволокой ППС-АН1. Установлено, что при сварке с малыми скоростями ( $0,19$  см/с) под водой металл пребывает в расплавленном состоянии значительно меньше времени, чем при сварке на воздухе. Охлаждающее действие среды влечет за собой уменьшение зоны перегрева и значительное сужение всей зоны термического влияния (ЗТВ), а также образование более мелкодисперсной структуры, как в металле шва, так и в ЗТВ. При больших скоростях сварки ( $0,047$  м/с) наблюдается незначительное уменьшение ЗТВ, образование более мелкозернистой структуры в шве и околошовной зоне по сравнению со сваркой на воздухе, а также с подводной сваркой при малой скорости.

Изучалось влияние солёности воды и технологических параметров процесса на скорость охлаждения шва и ЗТВ. Наплавки выполнялись на пластины из стали 09Г2 толщиной  $14$  мм. Использовали порошковые проволоки ППС-АН1 и ППС-АН5. Мощность источника теплоты варьировали за счет изменения силы тока при постоянной скорости сварки и напряжении на дуге. Установлено, что наиболее резкие отличия в термическом цикле наблюдались при сварке на воздухе и под водой. Разница при сварке в пресной и солёной воде сравнительно меньше.

Температурные поля при сварке проволоками ППС-АН1 и ППС-АН5 практически одинаковы и изотермы сливаются. Резкое отличие изотерм при сварке под водой и на воздухе объясняется, в первую очередь, различной теплоемкостью и теплопроводностью сред. Увеличение скорости охлаждения металла шва и околошовной зоны при сварке в солёной воде связано с изменением характера кипения на поверхности металла. Наличие в воде  $\text{NaCl}$  уменьшает возможность образования паровой пленки на поверхности металла и способствует более быстрому ее разрушению. Процесс кипения происходит более равномерно, чем в пресной воде.

Наибольший интерес, применительно к формированию закалочных структур в ЗТВ, представляет скорость охлаждения сварного соединения в диапазоне температур от  $800$  до  $300^{\circ}\text{C}$ . При сварке под водой скорость охлаждения повышается в 5 - 9 раз по сравнению со скоростями охлаждения, полученными при тех же режимах сварки на

воздухе. с увеличением солености воды от 0 до 30 ‰ скорость охлаждения ЗТв возрастает в 1,25 - 1,43 раза.

С использованием скоростной киносъемки в лучах видимой части спектра и синхронного осциллографирования напряжения и тока дуги изучался перенос электродного металла при сварке под водой порошковой проволокой ППС-АН1. Установлено, что границы пузыря образуют почти правильный конус с большим основанием на свариваемом металле. Дуга горит в нижней части парогазового пузыря. Вокруг пузыря наблюдается множество мелких капель расплавленного металла и шлака. Процесс переноса электродного металла при сварке под водой порошковой проволокой близок к процессу сварки под водой проволокой сплошного сечения без дополнительной защиты реакционной зоны газом.

Установлено, что с повышением давления воды, резко возрастает частота КЗ при сохранении их длительности, т. е. сокращается время горения дуги, а доля времени, приходящаяся на короткие замыкания, увеличивается, достигая для проволоки ППС-АН1 - 24% от общего времени сварки. Большое количество коротких замыканий, особенно длительных, ухудшает стабильность дуги, что хорошо согласуется с практикой.

Существенное влияние на перенос металла оказывает глубина. При сварке на воздухе колебания напряжения и тока находятся в очень узких пределах, что свидетельствует о высокой стабильности дуги. По этим параметрам проволока ППС-АН5 уступает проволоке ППС-АН1. С погружением в воду ситуация меняется. Уже на глубине 0,5 м при сварке проволокой ППС-АН1 появляются характерные возмущающие факторы - короткие замыкания и обрывы дуги. Они наблюдаются в области низких значений напряжения в момент короткого замыкания (Ук.з) и в области высоких значений напряжения - всплесков, обусловленных индуктивностью источника питания и сварочной цепи (Uобр). Следует отметить, что обрывы дуги при сварке проволокой ППС-АН5 появляются лишь на глубинах 20...50 м, а при сварке ППС-АН1 - сразу же при погружении в воду (0,5 м).

Количественно оценить долю времени, приходящуюся на горение дуги, достаточно сложно, однако, ориентируясь на площадь распределения напряжения горения дуги, можно заметить, что для глубины 50 м, по сравнению со сваркой на воздухе, она уменьшается для проволоки ППС-АН1 примерно в четыре и для ППС-АН5 - в три раза. Из этого можно сделать вывод, что с глубиной резко сокращается "чистое" время горения дуги за счет обрывов и коротких замыканий и для глубины 50 м оно составляет лишь 25...30% от общего времени сварки. Тем не менее, проволока плавится в соответствии установленной скоростью подачи. Сокращение времени горения дуги компенсируется увеличением силы тока. Сочетание интенсивного плавления проволоки и крупных капель приводит к обрывам дуги и неустойчивости процесса в целом. В исследованном диапазоне глубин проволока ППС-АН5 горит более стабильно, чем проволока ППС-АН1.

Как уже отмечалось выше, основной составляющей парогазового пузыря при мокрой сварке под водой составляет водород, обладающий высокой теплопроводностью и потенциалом ионизации ( $U_i = 13,5$  В). Он, по-видимому, вызывает контрагирование столба дуги, что, в свою очередь, способствует увеличению электродинамической силы, действующей на каплю и удерживающей ее на торце электрода.

Введение в состав порошковой проволоки ППС-АН5 органических соединений стабилизирует размеры парогазового пузыря и способствует измельчению капель за счет увеличения мощности газового потока. Кроме органических соединений в проволоку ППС-АН5 вводится церий и лантан в количестве 0,15%, являющиеся хорошими стабилизаторами дугового разряда.