

# МОКРАЯ ПОДВОДНАЯ СВАРКА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

С. Ю. МАКСИМОВ, И. В. ЛЯХОВАЯ

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

Условия сварки непосредственно в водной среде в значительной степени ограничивают возможность получения качественных сварных соединений низколегированных сталей повышенной прочности. Это обусловлено тем, что механические свойства металла шва уступают свойствам основного металла, а в зоне термического влияния (ЗТВ) возможно появление холодных трещин. Исследование структуры металла шва показало, что в зависимости от степени легирования участки швов, примыкающие к линии сплавления, могут иметь различные структуры переходных составов. Полученные результаты позволили установить требования к составу наплавленного металла с позиции предотвращения образования в ЗТВ хрупкой прослойки с повышенной твердостью, которая является местом зарождения холодных трещин. Сварные соединения из стали 17Г1С толщиной 14 и 40 мм, выполненные под водой разработанными электродами со стержнями из высоколегированной стали, обеспечивают механические свойства металла шва, соответствующие требованиям класса А Спецификации по подводной сварке AWS/ANSI D3.6, и стойкость сварного соединения против образования трещин. Электроды могут быть использованы при ремонте и строительстве металлоконструкций ответственного назначения, изготовленных из низколегированных сталей повышенной прочности толщиной до 40 мм. Библиогр. 8, рис. 6, табл. 1.

*Ключевые слова:* мокрая подводная сварка, низколегированные стали повышенной прочности, шов, структура, химический состав, трещины, механические свойства

Мокрая сварка очень привлекательна благодаря оперативности и простоте выполнения [1, 2]. Однако она вызывает значительные трудности металлургического характера. Водородно-кислородная атмосфера парагазового пузыря способствует окислению легирующих элементов и насыщению металла сварочной ванны водородом, а ускоренное охлаждение окружающей водой приводит к его фиксации в металле шва и образованию закалочных структур в металле ЗТВ [3]. В результате существенно повышается риск образования холодных трещин, особенно при сварке низколегированных сталей повышенной прочности типа 17Г1С или Х60. Проблема может быть решена путем применения электродных материалов, обеспечивающих образование аустенитной структуры металла шва и тем самым уменьшающих количество водорода, диффундирующего в ЗТВ [4].

Предварительные опыты по сварке порошковой проволокой с оболочкой из никелевой ленты [5] с одной стороны подтвердили возможность получения качественного сварного соединения на низколегированной стали повышенной прочности типа Х60 (без трещин в металле ЗТВ), а с другой — выявили трудности обеспечения требуемого уровня механических свойств металла сварного шва. Большое количество водорода повышает сопротивление металла шва пластической деформации и уменьшает предельные характеристики

его пластичности. Такой результат согласуется с известной склонностью никеля к водородной хрупкости [6]. Это явление становится более заметным при наличии в качестве примеси кислорода и повышенной скорости охлаждения [6], что характерно для условий сварки под водой. По мнению авторов, присутствие в никеле кислорода облегчает межзеренное разрушение, которое в этом случае происходит при меньших концентрациях водорода, поскольку к давлению водорода добавляется давление паров воды, образующихся при восстановлении оксидов никеля. Трещины, возникающие по границам зерен, приводят к разрушению образцов при испытании на растяжение уже при незначительной деформации.

В связи с изложенным выше представляют интерес результаты изучения водородной хрупкости сплавов никеля с железом и хромом. Авторы работы [6] установили, что водородная хрупкость сплавов никеля с железом и хромом уменьшается с повышением содержания последних. Такой характер влияния химического состава они связывают с изменением электронного состояния сплавов. Поэтому применение для сварки под водой электродных материалов, обеспечивающих получение металла шва на основе легирования Fe–Ni–Cr, по нашему мнению может оказаться весьма успешным. Однако в свое время электроды со стержнем из нержавеющей стали [7] были признаны неперспективными именно из-за опасности образования трещин в металле шва вблизи линии сплавления, что объяснили разбавлением элект-



родного металла основным металлом. Тем не менее, авторы работы [8] сообщают о разработке электродов со стержнем из проволоки Св-10Х16Н25АМ6 для сварки под водой высокопрочных сталей, обеспечивающих получение качественных сварных соединений с высокими механическими свойствами и стойкими против образования холодных трещин.

Целью данной работы было изучить структуру, химический состав и механические свойства сварных соединений из стали 17Г1С толщиной 14 и 40 мм, выполненных под водой электродами со стержнями из высоколегированной стали, и выбрать состав металла шва, обеспечивающий его механические свойства на уровне свойств основного металла и стойкость сварного соединения против образования трещин.

С учетом возможного разбавления металла шва основным металлом на уровне 40 % для предварительных опытов в качестве электродных стержней выбрали проволоки с эквивалентом хрома  $Cr_{\text{экв}} \cong 21...33$  % и эквивалентом никеля  $Ni_{\text{экв}} \cong 19...32$  %. Из этих стержней изготовили опытные электроды диаметром 4 мм с покрытием рутил-флюоритного типа. Сварку стыковых образцов выполняли водолазом-сварщиком в лабораторном бассейне на глубине 1 м на режимах:  $I_{\text{св}} = 140...160$  А,  $U_{\text{д}} = 26...28$  В, постоянным током обратной полярности. В качестве основного металла использовали пластины толщиной 14 и 40 мм из стали типа 17Г1С (мас. %: 0,18 С, 0,36 Si, 1,67 Mn).

Спектральным анализом установлено, что в корневых швах величина  $Cr_{\text{экв}}$  изменялась в пре-

делах 12,0...15,5 %, а  $Ni_{\text{экв}}$  — 10,8...22,7 %. В соответствии с положением полученных составов на структурной диаграмме Шеффлера металл всех швов является высоколегированным хромоникелевым аустенитом. Однако участки швов, примыкающие к линии сплавления, представлены набором структур переходных составов. Из них наибольший интерес и опасность представляют аустенитно-мартенситные и мартенситные прослойки ввиду их повышенной твердости и хрупкости и возможности возникновения в них трещин при сварке или в условиях эксплуатации. Ширина и протяженность этих прослоек, а также значения их твердости зависят с одной стороны от степени легирования металла швов (запаса аустенитности), а с другой — степени проплавления основного металла, т. е. от изменения состава шва при перемешивании основного (перлитного) и наплавленного металла (аустенитного).

Металлографические исследования выявили разнообразие структур узкой зоны металла шва, прилегающей к линии сплавления. Условно можно выделить четыре типа структур:

так называемая перистая структура, образуемая металлом шва, затекшим между оплавленными зернами основного металла (рис. 1, а);

участки с четко выявляемой линией сплавления. Для них характерно отсутствие переходной зоны. Структура металла шва резко отличается от структуры основного металла (рис. 1, б);

так называемые затеки («языки») (рис. 1, в) основного несплавленного металла, вклинивающиеся в шов и зачастую также отличающиеся

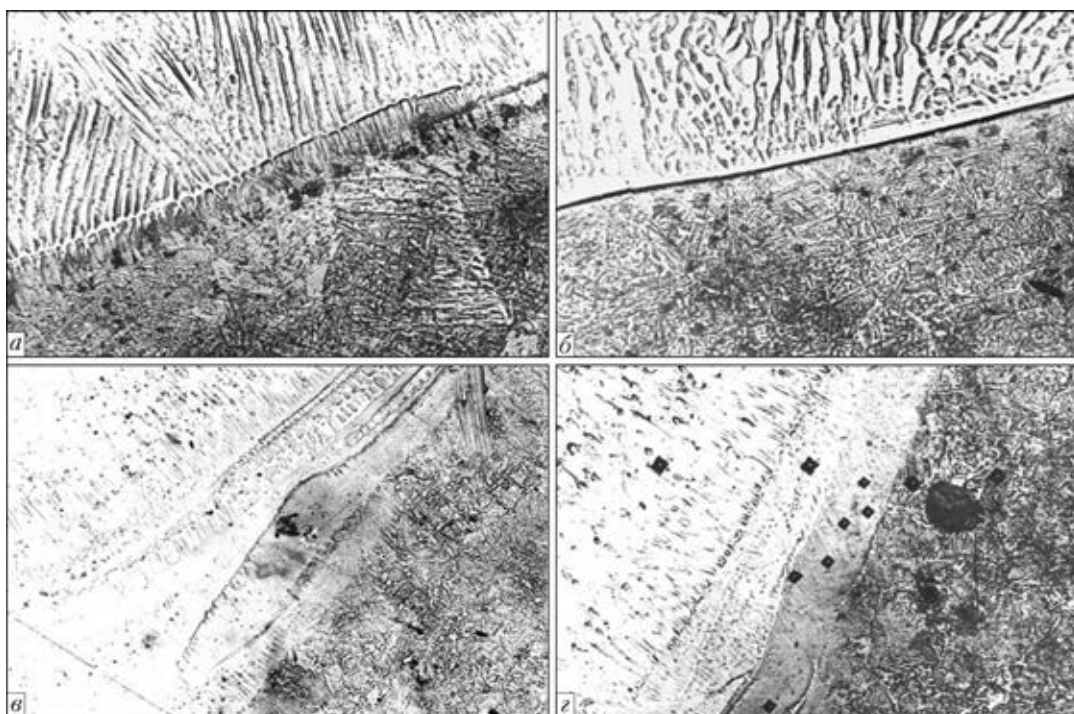


Рис. 1. Микроструктуры ( $\times 650$ ) участков зоны сплавления с перистой структурой (а), с явно выраженной линией сплавления (б), с затеканием основного металла (в) и с параллельной границей (г)

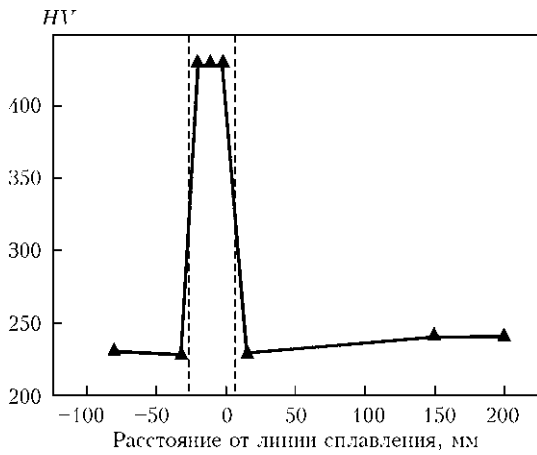


Рис. 2. Распределение микротвердости при наличии мартенситной прослойки

повышенной твердостью. Появление этих структур связано с перемешиванием основного металла под непосредственным воздействием сварочной дуги. Чем менее устойчив режим сварки, тем больше может быть доля этих включений;

структура с наличием со стороны металла шва так называемой параллельной границы (рис. 1, 2), когда между основным металлом и металлом шва располагается тонкая прослойка с повышенной твердостью. Примерный график распределения микротвердости при наличии такой прослойки представлен на рис. 2.

Зависимости между химическим составом металла шва, расположением шва в многослойном соединении и типом структуры не выявлено. Наиболее опасной является структура с параллельной границей, в которой при высокой твердости возможно образование холодных трещин. Особенно это характерно для корневых швов. В заключительных швах твердость таких структур значительно ниже даже при меньшем количестве легирующих элементов.

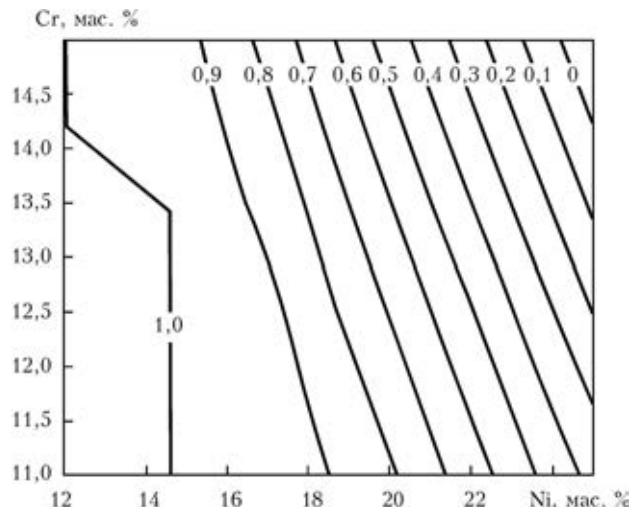


Рис. 3. Влияние легирования аустенитного металла шва на долю мартенсита в прослойке

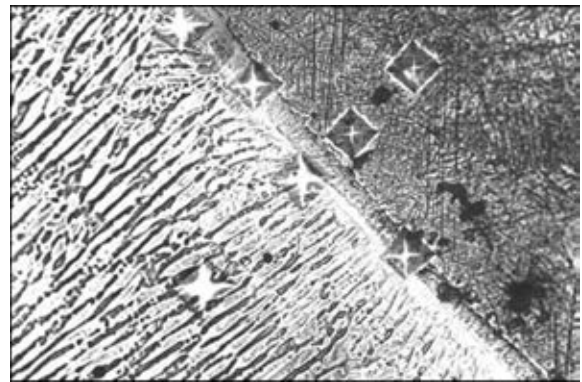


Рис. 4. Параллельная граница с прослойкой низкой твердости (×650)

Для определения условий предотвращения образования в металле шва хрупкой прослойки численным методом исследовали влияние степени легирования на долю образующегося мартенсита. Для этого имитировали легирование металла шва никелем в пределах 12...25 % и хромом в пределах 11...15 %. Результаты вычислений (рис. 3) показали, что для минимизации доли мартенсита, который образуется в прослойке металла шва близ линии сплавления в условиях сварки под водой, никелевый и хромовый эквиваленты последнего должны лежать выше линии на диаграмме состояния, параллельной линии, разделяющей область с аустенитной и аустенитно-мартенситной структурой, и проходящей через точку с координатами  $Ni_{экв.} = 24,2 \%$  и  $Cr_{экв.} = 14,3 \%$ . При

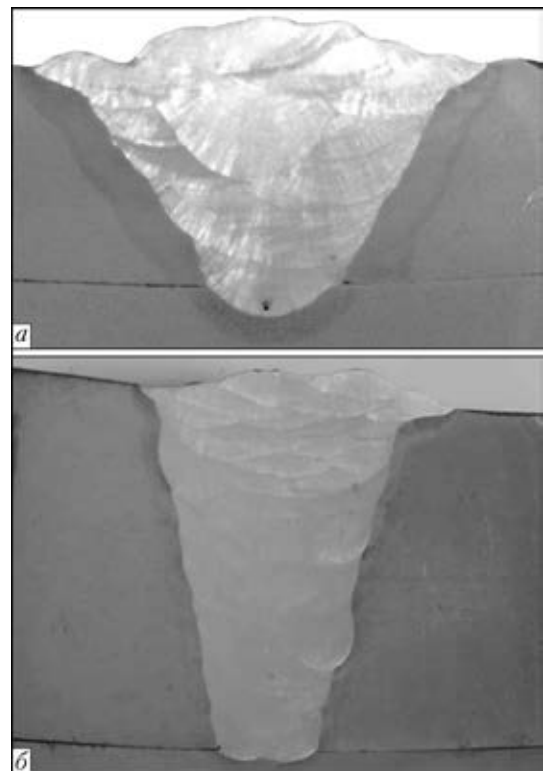


Рис. 5. Макрошлифы сварных соединений толщиной 14 (а) и 40 мм (б)



## Механические свойства металла шва и основного металла

Материал	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$KCV_{-20}$ , Дж/см <sup>2</sup>	Угол загиба, град, $R = 2t$
Шов, 14 мм	$\geq 410$	$\geq 620$	$\geq 32$	$\geq 38$	$\geq 108$	180
Шов, 40 мм	$\geq 460$	$\geq 600$	$\geq 29$	$\geq 47$	$\geq 105$	180
Сталь 17Г1С	340	510	23	—	—	—

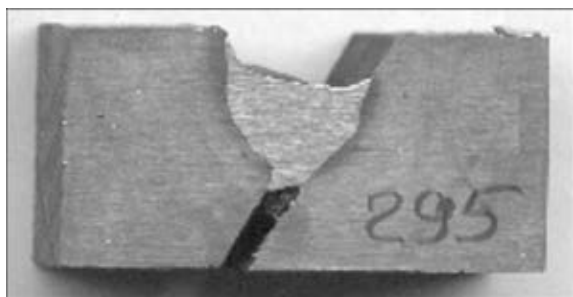


Рис. 6. Макрошлиф технологической пробы Теккен

этих условиях твердость прослойки находится на уровне твердости окружающего металла (рис. 4).

Исходя из установленных требований к химическому составу металла шва разработали электроды со стержнями из проволоки Св-10Х16Н25АМ6 и дополнительным легированием через покрытие. Для определения механических свойств сваривали стыковые образцы толщиной 14 и 40 мм с V-образной разделкой кромок. Испытания проводили в соответствии с требованиями класса А Спецификации по подводной сварке AWS/ANSI D3.6. Полученные результаты представлены в таблице. Макрошлифы, вырезанные из сварных образцов, представлены на рис. 5.

Металлографические исследования макрошлифов пробы Теккен, выполненной разработанными электродами, показали отсутствие трещин в сварном соединении (рис. 6).

Таким образом, применение разработанных электродов с системой легирования Cr-Ni-Mn обеспечивает получение под водой сварных соединений низколегированных сталей повышенной прочности без трещин в металле ЗТВ и с механическими свойствами, удовлетворяющими требованиям класса А Спецификации по подводной сварке AWS/ANSI D3.6.

В заключение следует отметить, что при мокрой подводной сварке низколегированных сталей

повышенной прочности в результате проведенных исследований было установлено:

— вблизи линии сплавления со стороны металла шва в результате перемешивания с основным металлом образуются хрупкие прослойки с повышенной твердостью (до 4500 МПа), склонные к образованию холодных трещин;

— с позиций предотвращения образования трещин необходимый и достаточный диапазон легирования совместно хромом и никелем должен определяться следующими величинами:  $C_{\text{экв}} = 17,5...23$  %,  $Ni_{\text{экв}} = 18...28$  %;

— механические свойства сварных соединений толщиной 14 и 40 мм, выполненные разработанными электродами, соответствуют требованиям класса А Спецификации по подводной сварке AWS/ANSI D3.6.

1. McKeown D., Abson D. Wet welding repairs // Shipping World and Shipbuilder. — 2006. — 207, № 5. — P. 24–26, 28.
2. Rowe M., Liu S. Recent developments in underwater wet welding // Sci. and Technology of Welding & Joining. — 2001. — 6, № 6. — P. 387–396.
3. Dariusz F., Grzegorz R. Effect of shielded-electrode wet welding conditions on diffusion hydrogen content in deposited metal // Welding International. 2011. — 25, № 3. — P. 166–171.
4. Arc welding with austenitic filler metal for underwater application / J. Bartzsch, S. Daniel, B. Bouaifi, U. Draugelates // OMAE 1997 — 16th Intern. conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engin. — Yokohama, Japan. — 13–17 Apr., 1997. — P. 243–250.
5. Оценка влияния условий подводной сварки на формирование сварного соединения стали типа X70 / С. Ю. Максимов, И. М. Савич, С. М. Захаров и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 4. — С. 19–22.
6. Мороз Л. С., Чечулин Б. Б. Водородная хрупкость металлов. — М.: Металлургия, 1967. — 255 с.
7. Bailey N. Welding under water — a metallurgical appraisal // First Intern. Offshore and Polar Engin. conf. — Edinburg, UK, 11–16 Aug., 1991. — P. 331–338.
8. Масленников П. С., Руссо В. Л. Новые электроды для подводной сварки // Свароч. пр-во. — 2000. — № 11. — С. 26–27.

Поступила в редакцию 28.05.2013