



СВОЙСТВА АУСТЕНИТНОГО МЕТАЛЛА ШВА, ВЫПОЛНЕННОГО ПОД ВОДОЙ

Н. В. ЗАЙЦЕВА, канд. техн. наук, **С. М. ЗАХАРОВ**, инж. (Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины), **С. Ю. МАКСИМОВ**, канд. техн. наук, **И. В. ЛЯХОВАЯ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы сварные соединения низколегированной стали повышенной прочности, выполненные под водой электродами со стержнем из хромоникелевого сплава. Оценено влияние окружающей среды на газонасыщенность и плотность наплавленного металла, структуру и свойства различных зон соединения. Показано, что применение высоколегированных электродов позволяет повысить пластичность и прочность металла шва до уровня свойств основного металла.

Ключевые слова: подводная сварка, покрытые электроды, сварное соединение, хромоникелевый металл шва, структурные составляющие, газонасыщенность

Несмотря на имеющуюся потребность в ремонте металлоконструкций из сталей повышенной прочности под водой применение мокрой сварки до последнего времени было ограничено из-за неудовлетворительного качества сварных соединений. За рубежом для этой цели используют покрытые электроды [1]. Разработка в 1999 г. электродов Hurdoweld FS [2] позволила рекомендовать ручную мокрую сварку при восстановлении несущей способности конструкций ответственного назначения, изготовленных из углеродомарганцовистых сталей с $C_{\text{экв}} \leq 0,4$. Задача сварки сталей повышенной прочности с большим углеродным эквивалентом на сегодня остается нерешенной. Основные усилия для ее решения предпринимаются в направлении создания электродов со стержнем из сплавов на никелевой основе, однако информация о получении положительных результатов отсутствует. Предварительные опыты по сварке порошковой проволокой с оболочкой из никелевой ленты [3], с одной стороны, подтвердили возможность получения сварного соединения низколегированной стали повышенной прочности типа X60 без трещин в металле ЗТВ, с другой — выявили трудности, связанные с обеспечением требуемого уровня механических свойств. Наличие большого количества водорода приводит к увеличению сопротивления пластической деформации металла шва и уменьшению предельных характеристик его пластичности. Такой результат согласуется с известной склонностью никеля к водородной хрупкости [4]. Кроме того, это явление становится более заметным при наличии в качестве примеси кислорода и повышенной скорости охлаждения [4], 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. При этом возникновение

трещин по границам зерен приводит 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. В работе [4] установлено, 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 с системой легирования Fe-Ni-Cr, может быть более перспективным. Ранее электроды со стержнем из нержавеющей стали [5] признаны неперспективными из-за опасности образования трещин в металле шва вблизи линии сплавления в результате перемешивания с основным металлом. Тем не менее, авторы работы [6] 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 была оценка структуры и механических свойств сварных соединений стали 17Г1С, выполненных под водой электродами, обеспечивающими аустенитный хромоникелевый наплавленный металл. Исследования проводили методами оптической и растровой электронной микроскопии, рентгенофазового и флуоресцентного рентгеновского анализа (ФРА), волюметрии, газового анализа, оптической спектроскопии, а также испытывали на одноосное растяжение и измеряли твердость.

Таблица 1. Химический состав стали 17Г1С и наплавленного металла, мас. % (ФРА)

Анализируемая зона	Fe	Ni	Mn	Cr	Mo	Si	C
Центр наплавки	62,80	14,70	5,00	14,20	2,80	0,50	—
Зона сплавления	77,78	8,74	3,85	7,32	1,86	0,45	—
Основной металл*	97,59	0,10	1,67	0,10	—	0,36	0,18

*Оптический спектральный анализ.

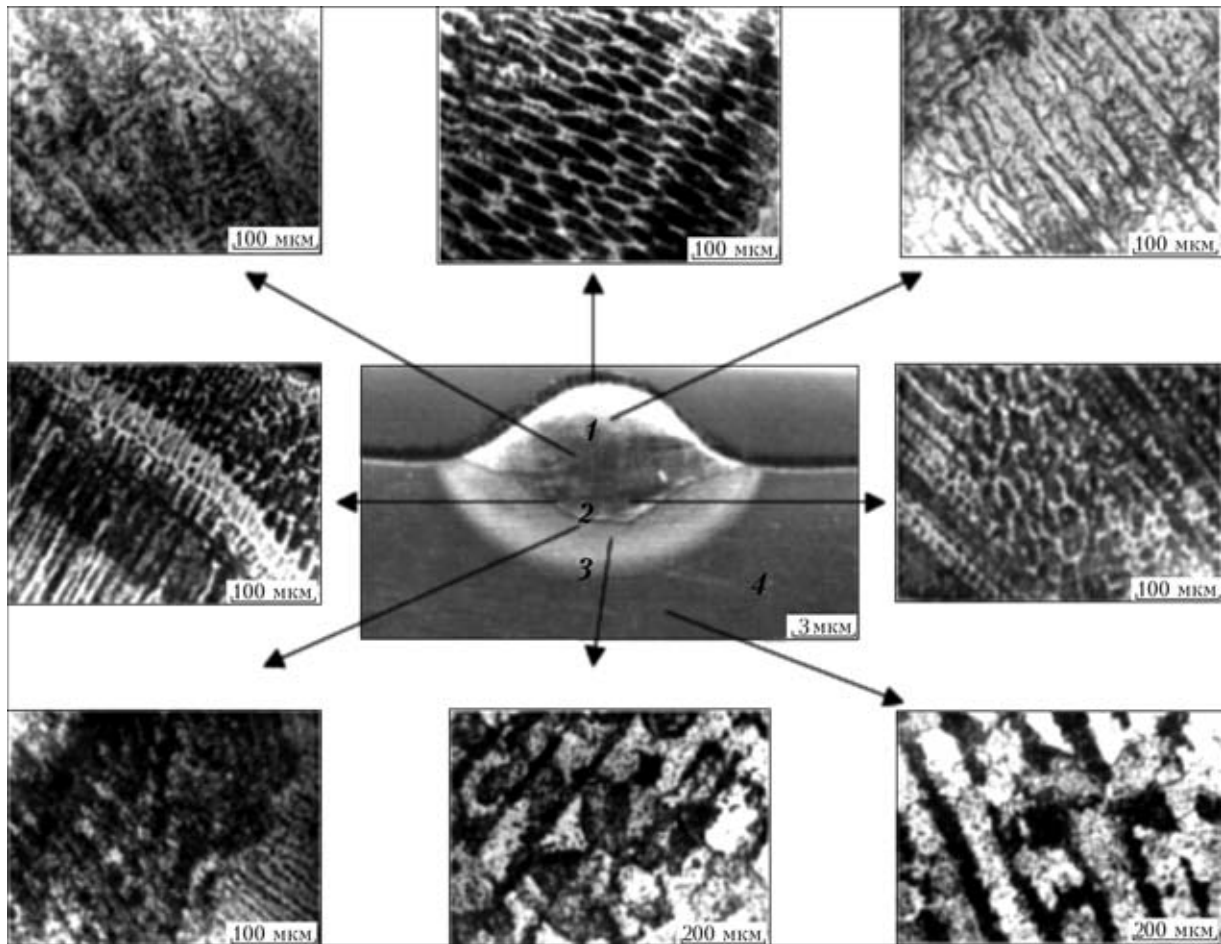


Рис. 1. Микроструктуры различных участков наплавки на сталь 17Г1С, выполненной под водой: 1 — наплавленный металл; 2 — переходная зона; 3 — металл ЗТВ; 4 — основной металл

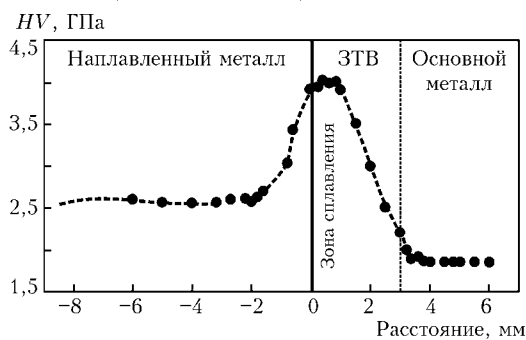


Рис. 2. Распределение микротвердости HV по сечению наплавки вблизи зоны сплавления

Для исследований изготовлены опытные электроды диаметром 4 мм со стержнем из нержавеющей стали. Наплавку выполняли в лабораторном бассейне на глубине 1 м на режимах: $I_{св} = 140...160$ А, $U_d = 26...28$ В, на токе обратной полярности. В качестве основного металла использовали пластины толщиной 14 мм из стали 17Г1С, химический состав которой указан в табл. 1.

Наплавленный металл отличается достаточно однородной структурой и химическим составом. В результате кристаллизации преимущественно формируется структура столбчатых кристаллитов. Центральное ядро выделяется заметно слабее, чем в шве на основе никеля [3]. Кристаллизационные трещины, крупные поры или усадочные раковины не обнаружены. В пределах разрешения оптического микроскопа распределенная пористость также не наблюдается. В микроструктуре наплавленного металла (рис. 1) преобладают дендриты и ячейки, что свидетельствует о существенных концентрационных переохлаждениях при кристаллизации наплавленного металла [7].

В зоне сплавления и металле ЗТВ наблюдается деградация строчечной ферритно-перлитной структуры, характерной для горячекатаной стали 17Г1С, в колониальную с более однородным распределением цемента, что вызывает повышение твердости этой зоны (рис. 2). Трещины в металле ЗТВ не обнаружены.

Рентгенофазовый анализ регистрирует преимущественно однородный ГЦК твердый раствор переменного по сечению наплавки состава, что соответствует данным химического анализа (см. табл.1) и тройной Fe-Ni-Cr диаграмме

Таблица 2. Содержание газов и значение плотности наплавленного металла

Система легирования	Содержание газа, мас. %·10 ⁻²		Плотность, г/см ³		$\Delta\rho = \rho_p - \rho_{п.}$ г/см ³	$\Delta\rho/\rho_p, \%$
	[O]	[H]	измеренная ρ_n	расчетная ρ_p		
Никель	0,71	0,36	8,3789	8,5711	0,1922	2,242
Никель + хром	4,80	0,36	7,9545	8,0011	0,0466	0,580

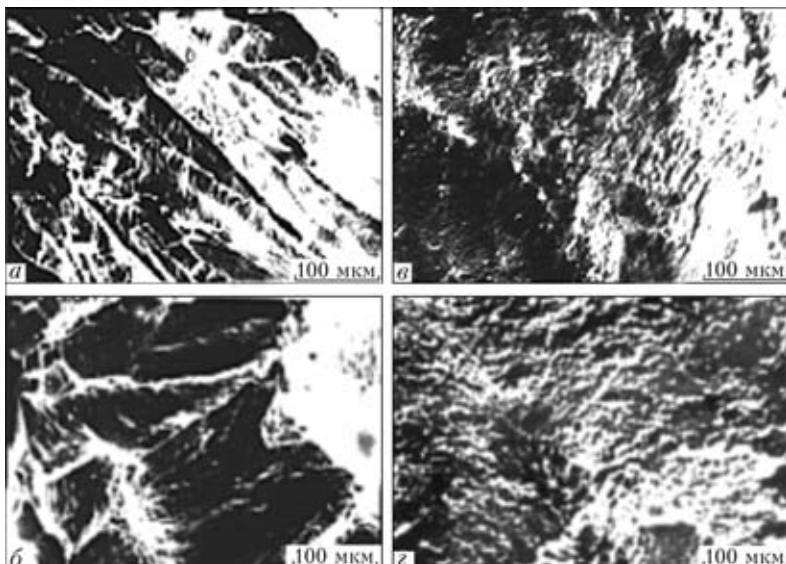


Рис. 3. Фрактограммы изломов после растяжения металла швов, выполненных под водой: а, б — легирование никелем; в, г — легирование хромом и никелем

Таблица 3. Механические свойства металла шва и основного металла

Материал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	E, МПа
Шов	410	626	34	38	15384
Сталь 17Г1С [7]	340	510	23	—	17000

фазовых равновесий [8]. Рефлексы карбидных фаз достоверно не фиксируются, что вместе с результатами анализа микроструктуры позволяет пренебречь влиянием карбидного упрочнения.

По сравнению с никелевым металлом шва [3] в исследуемом образце содержание кислорода увеличилось в несколько раз, а содержание остаточного водорода сохранилось на прежнем уровне (табл. 2). При этом плотность наплавленного металла заметно повысилась. Отсутствие макродефектов подтверждают результаты металлографических исследований.

Полученные данные дают основание предполагать, что совместное легирование никелем и хромом положительно скажется на механических свойствах металла шва, для определения которых были выполнены стыковые соединения на приведенных выше режимах.

Welded joints in low-alloy steels of increased strength made under water using electrodes with chrome-nickel alloy rods have been studied. The effect of environment on the gas saturation level and density of deposited metal, structure and properties of different zones in a welded joint has been evaluated. It is shown that the use of austenitic electrodes makes it possible to increase ductility and strength of the weld metal up to a level of those of the base metal.

Разрушение исследованного образца после достижения остаточной деформации более 30 % (табл. 3) сопровождается образованием шейки. Фрактографическая картина характеризует излом как вязкий (рис. 3), что подтверждает общее заключение об отсутствии в этом случае крупных дефектов — инициаторов разрушения. Для сравнения на том же рисунке приведены фрактограммы изломов образца никелевого металла шва, на которых доля скола превышает 50 %. Механические свойства наплавленного металла находятся в хорошем соответствии с механическими свойствами основного металла (табл. 3), что необходимо для соблюдения эксплуатационной надежности сварного соединения.

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение электродов со стержнем из хромоникелевого сплава обеспечивает однородную аустенитную структуру наплавленного металла без макроскопических дефектов и способствует повышению пластичности и прочности металла шва до уровня свойств основного металла — низколегированной стали повышенной прочности.

1. Ibarra S., Grubbs C.E., Liu S. State-of-the-art and practice of underwater wet welding of steel // Intern. workshop on underwater welding of marine structures. (New Orleans, 7-9 Dec., 1994). — New Orleans, 1994. — P. 49-112.
2. Pett M. Wet (underwater) welding becomes a viable option // Welding Met. Fabr. — 1998. — 66, № 4. — P. 12-14.
3. Структура и свойства металла, наплавленного под водой порошковой проволокой с никелевой оболочкой / С. Ю. Максимов, И. М. Савич, С. М. Захаров и др. // Автомат. сварка. — 2003. — № 4. — С. 19-23.
4. Мороз Л. С., Чечулин Б. Б. Водородная хрупкость металлов. — М.: Металлургия, 1967. — 255 с.
5. Bailey N. Welding under water — a metallurgical appraisal // First (1991) Intern. offshore and polar engineering conf. (Edinburg, 11-16 Aug., 1991). — Edinburg, 1991. — Vol. 4. — P. 331-338.
6. Масленников П. С., Руссо В. Л. Новые электроды для подводной сварки // Свароч. пр-во. — 2000. — № 11. — С. 26-27.
7. Прохоров Н. Н. Физические процессы в металлах при сварке. — М.: Металлургия, 1968. — Т. 1. — 695 с.
8. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: Справочник / Под ред. О. А. Баных. — М.: Металлургия, 1986. — 449 с.

Поступила в редакцию 18.03.2003