



СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПОД ВОДОЙ ПОРОШКОВЫМИ ПРОВОЛОКАМИ

В. Я. КОНОНЕНКО («Экотехнология», г. Киев), А. О. КОРСУН, кандидаты техн. наук

Изучено влияние содержания никеля на механические свойства соединений, полученных мокрой сваркой под водой самозащитными порошковыми проволоками. Установлено, что введение никеля повышает механические свойства металла швов. Исследования состава неметаллических включений позволили установить отсутствие в некоторых из них адгезионной связи между неметаллическим включением и ферритной матрицей. Это объясняется повышением концентрации водорода, который в процессе формирования структуры собирается на границе неметаллического включения и матрицы. Наличие таких «ловушек» может снижать скорость массопереноса водорода при сварке под водой. Установлено, что при массовой доле никеля более 1,2 % формируется смешанная ферритная структура металла швов с химической микронеоднородностью.

Ключевые слова: мокрая сварка, порошковые проволоки, механические свойства, неметаллические включения, структура металла швов

Известно, что металл в процессе формирования швов, выполненных мокрой сваркой под водой плавящимся электродом, подвергается следующим воздействиям окружающей среды: интенсивному охлаждению (в 2–9 раз выше чем при сварке на воздухе [1–5]), высокой концентрации в парогазовом пузыре кислорода и водорода [6, 7], повышенному давлению, переходу в металл солей, растворенных в воде при испарении последней в реакционной зоне.

Если интенсивное охлаждение способствует упрочнению металла швов, выполненных мокрой сваркой под водой, то благодаря высокой концентрации кислорода в реакционной зоне происходит практически полное выгорание основных легирующих элементов (углерода, кремния, марганца) [6–8]. В этих условиях повышение механических и пластических свойств металла соединений может быть достигнуто путем правильного выбора системы легирования.

Одним из элементов, успешно применяемых для легирования ряда сталей, является никель [9]. Благодаря его введению увеличивается прочность межатомных связей в кристаллической решетке железа. Он также способствует ослаблению связи углерода в решетке аустенита и увеличивает его коэффициент диффузии [9]. При легировании стали никелем понижается ее склонность к хрупкому разрушению [10].

Известны примеры легирования металла швов никелем при создании самозащитных порошковых проволок для мокрой сварки под водой [11–13]. Никель использовали в системе легирования порошковой проволоки ППС-АН5 [12]. Однако при сварке этой проволокой сталей 09Г2 и 09Г2С наблюдали снижение пластических свойств металла швов.

Цель настоящей работы — установление влияния никеля на механические свойства и структуру

металла соединений низколегированных сталей, полученных в условиях сварки под водой порошковыми проволоками с системой легирования Mn–Al–Ce–Ni.

При проведении эксперимента предполагалось выполнить сварку тремя порошковыми проволоками рутилового типа (аналог ППС-АН5), в состав которых последовательно вводили 0,8, 1,2 и 1,6 мас. % Ni за счет уменьшения содержания железного порошка. Массовую долю остальных шлакообразующих и легирующих компонентов не изменяли. Порошковые проволоки были изготовлены в лабораторных условиях. Коэффициент их заполнения составлял 31...33 %, диаметр — 1,6 мм. В нижнем положении на глубине 0,6 м в пресной воде этими проволоками на рекомендованных режимах были выполнены стыковые соединения. При этом использовали источник питания дуги АСУМ-400 с жесткой внешней вольт-амперной характеристикой. Общая длина сварочной цепи сечением 70 мм² составляла 80 м. Основным металлом являлась сталь 09Г2 (0,093 % С; 1,48 % Mn; 0,27 % Si; 0,025 % S; 0,027 % P) толщиной 12 мм. Из полученных стыковых соединений были вырезаны по восемь продольно расположенных пятикратных образцов (диаметр их рабочей части составлял 3 мм) для испытания металла швов на разрыв, а также поперечные шлифы. Испытание образцов на растяжение до разрушения выполняли на жестких разрывных машинах УММ-5 и «Instron-1250»

Таблица 1. Содержание легирующих элементов (мас. %) в металле швов, полученное с помощью локального спектрального анализа

Номер эксперимента	Массовая доля никеля в шихте, %	Fe	Mn	Ni	S
938	0,8	99,16	0,193	0,515	0,120
939	1,2	98,70	0,173	0,913	0,210
940	1,6	98,05	0,228	1,536	0,088

Примечание. Массовая доля кремния в металле швов составляет 0,01...0,02 %; алюминий и церий — следы.



Таблица 2. Влияние температуры на механические свойства металла швов, полученных сваркой под водой порошковыми проволоками с различным содержанием никеля

T, °C	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
<i>Массовая доля никеля 0,8 %</i>				
+20	373	451	14,2	46,2
-60	430	521	16,5	55,1
-120	572	603	11,1	60,3
-160	631	634	9,8	59,9
-170	634	642	7,4	40,2
-180	722	724	7,9	12,9
-196	713	713	0,2	0,7
<i>Массовая доля никеля 1,2 %</i>				
+20	375	458	12,5	31,1
-60	416	515	15,5	49,6
-120	560	606	13,9	61,6
-160	639	668	9,3	45,2
-170	651	656	2,3	11,6
-180	722	724	5,8	6,6
-196	713	723	0,2	0,7
<i>Массовая доля никеля 1,6 %</i>				
+20	378	464	7,2	27,2
-50	416	515	21,3	41,7
-120	475	557	15,4	51,5
-170	662	679	8,4	46,7
-180	682	693	4,3	24,3
-185	713	719	6,3	36,0

(фирма «Instron», Великобритания), оснащенных специально разработанными приставками, позволяющими термостатировать образцы при температуре от -196 до +20 °C. В процессе испытания на растяжение диаграммы записываются в координатах усилие-время. Благодаря обработке диаграмм нагружения и замерам сечения образцов до и после разрушения были определены условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление σ_b , а также относительное поперечное сужение ψ . Анализ микроструктуры металла швов и изломов осуществляли с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JSM-840 (фирма «Jeol», Япония) и просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) «JEM-200сх» (фирма «Jeol», Япо-

ния). Микроанализ выполняли на спектральных и энергодисперсионных спектрометрах, которыми оснащен РЭМ «Superprobe-733» (фирма «Jeol», Япония). Распределение элементов на поверхности образцов анализировали с помощью программы «Digimap». Концентрацию водорода определяли на масс-спектрометре «XAS-2000» (фирма «Riber», Франция).

Результаты локального спектрального анализа металла швов приведены в табл. 1, а результаты механических испытаний образцов — в табл. 2.

Из данных табл. 1 следует, что весь введенный в состав проволоки никель переходит в металл шва.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показал, что с увеличением содержания никеля в металле швов наблюдается улучшение прочностных свойств металла швов, однако его пластические свойства при этом несколько ухудшаются.

Проведен металлографический анализ структуры металла швов с различным содержанием никеля. Определено, что введение никеля, помимо измельчения ферритного зерна (рис. 1, а, б и 1, д, е) приводит также к увеличению объемной доли игольчатой структурной составляющей (рис. 1, д, е). Увеличение содержания никеля в швах способствует образованию определенной структурной неоднородности — областей с игольчатой ферритной структурой.

Анализ характера и распределения неметаллических включений (НВ) в металле швов показал, что большая часть НВ не связана с ферритной матрицей, а отделена от нее микрополостями, что хорошо видно на рис. 2. Это объясняется тем, что в пограничной области между НВ и матрицей резко уменьшается концентрационное содержание элементов (рис. 3).

Это подтверждается результатами исследований, проведенных на масс-спектрометре «XAS-2000». Установлено, что в структурных областях с повышенным содержанием НВ с микрополостями зафиксировано большее содержание водорода, чем

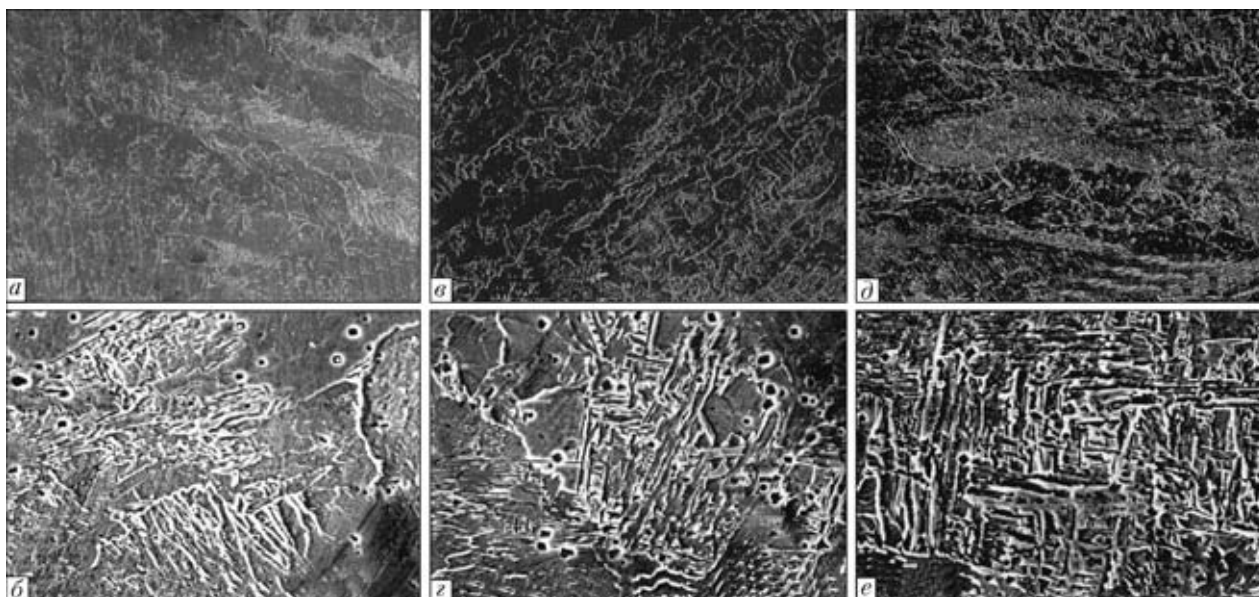


Рис. 1. Микроструктура (а, в, д, $\times 200$; б, з, е, $\times 1000$) металл швов с различным содержанием никеля: а, б — 0,5; в, з — 1,0; д, е — 1,5 мас. % Ni

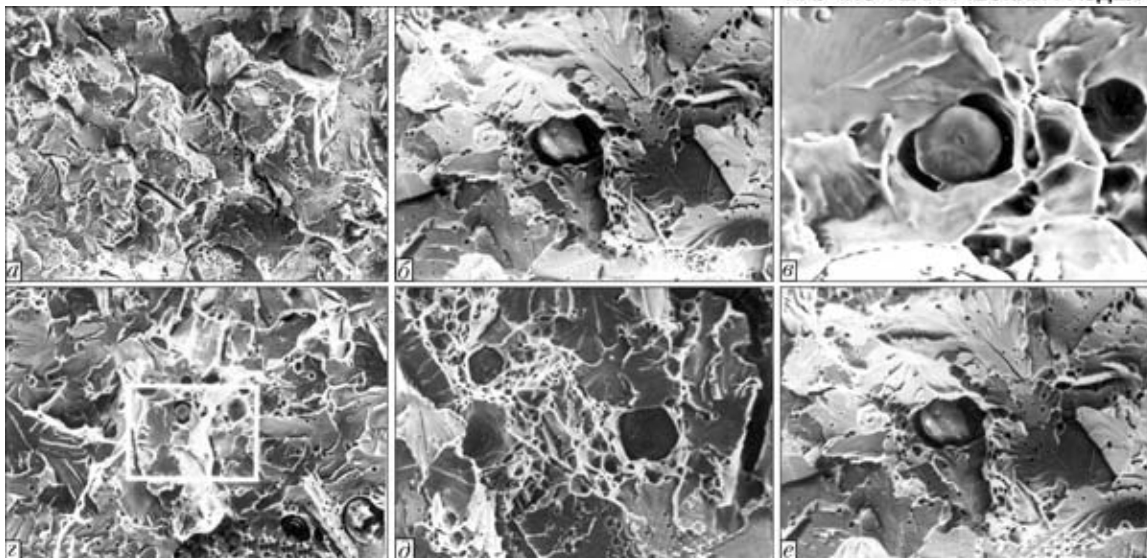


Рис. 2. Фрактографическая картина поверхности разрушения сварных швов, выполненных сваркой под водой: а, $\times 500$, б, $\times 1400$; в, $\times 5000$; г, $\times 900$, д, $\times 1500$; е, $\times 1700$

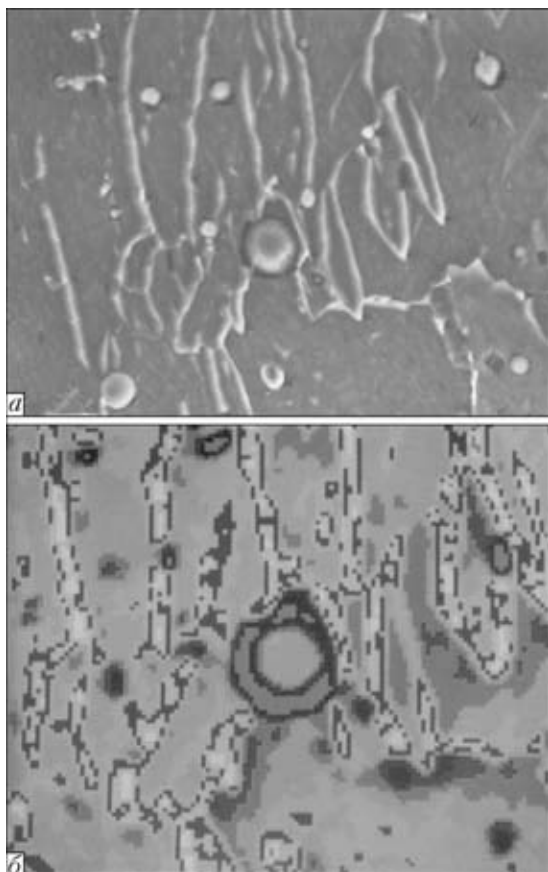


Рис. 3. Распределение никеля в металле шва, полученного порошковой проволокой с 1,5 мас. % Ni ($\times 4500$): а — исследуемая структура; б — концентрационная карта

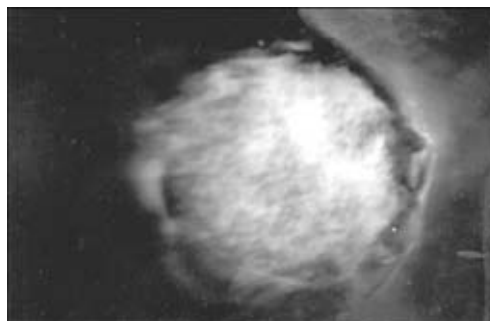


Рис. 4. НВ в матрице ферритного зерна, $\times 50000$

в структурных областях с меньшим содержанием НВ. Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод, что значительное количество НВ отделено от матрицы микрополостями, заполненными водородом. Такие «ловушки», как и при сварке на воздухе электродами рутилового типа, могут изменить скорость массопереноса водорода в металле швов [13]. С увеличением количества «ловушек» массоперенос в условиях мокрой сварки под водой замедляется.

Исследования НВ при больших увеличениях позволяют установить наличие по их краю структурных областей, отличающихся фазовым составом (рис. 4, 5). Наиболее вероятно, что это области осаждения серы.

Как следует из результатов анализа (рис. 6–8), структура металла швов состоит из ферритной матрицы и фазы с повышенным содержанием углерода.

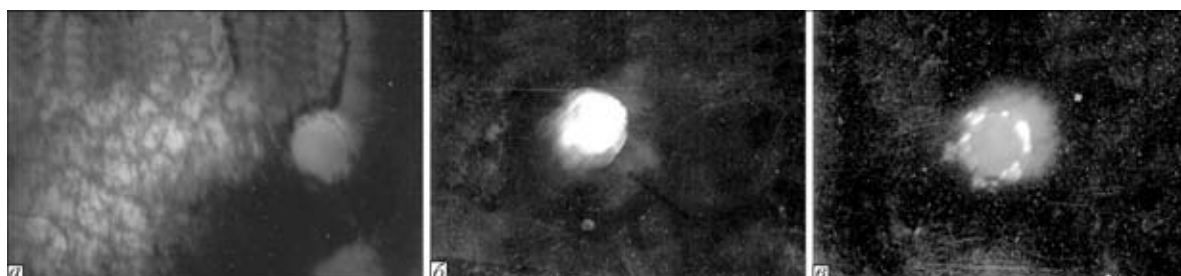


Рис. 5. Светло- (а) и темнопольное (б, в) изображение ($\times 15000$) НВ в металле швов, выполненных сваркой под водой



Рис. 6. Дифракционные картины ($\times 55000$) матрицы (а), карбидной фазы (б) и структуры зерен (в) металла швов, выполненных сваркой под водой

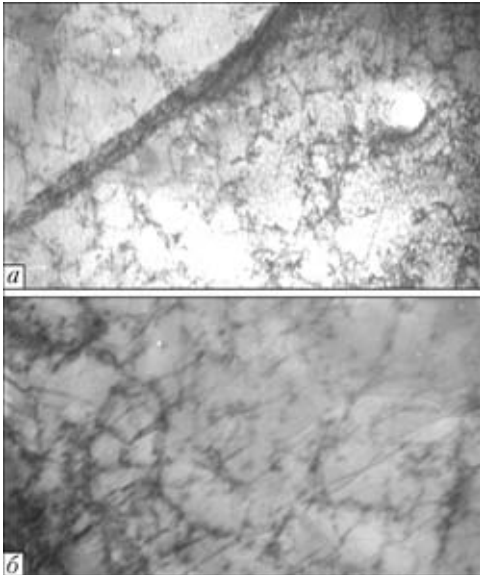


Рис. 7. Микроструктура зерен в металле швов, выполненных сваркой под водой: а, $\times 30000$; б, $\times 8000$

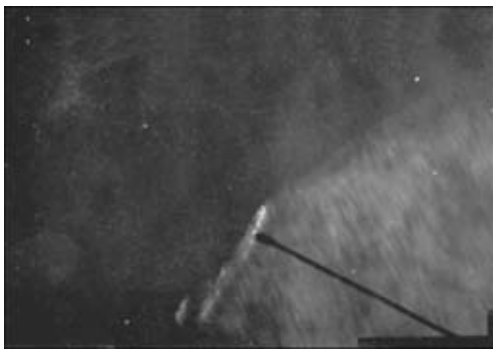


Рис. 8. Темнопольное изображение ($\times 55000$) карбидной фазы в структуре металла швов, выполненных сваркой под водой

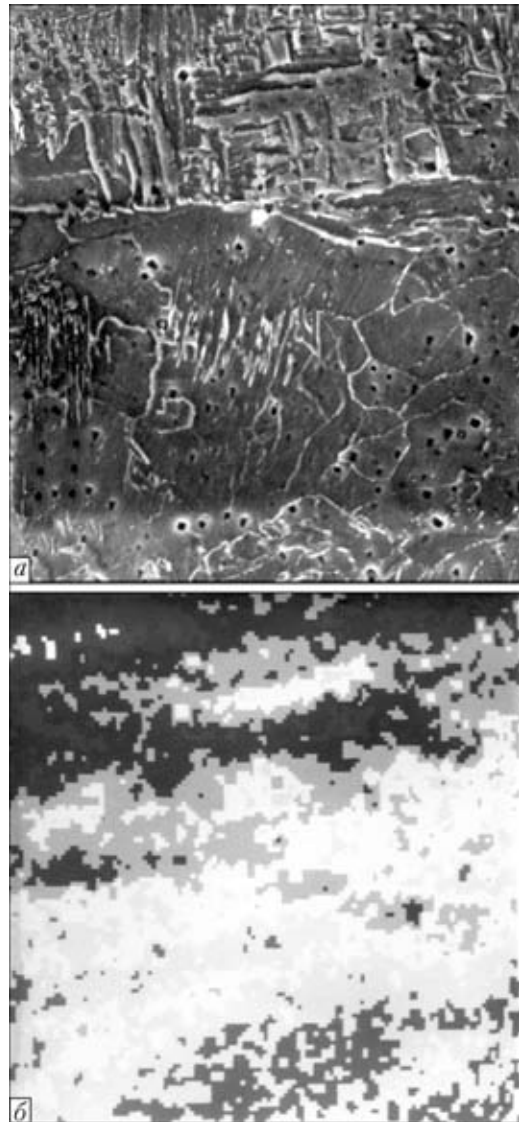


Рис. 9. Распределение никеля между ферритными зёрнами различной формы в металле швов, полученных при сварке под водой проволокой с 1,5 мас. % Ni: а, б — см. рис. 3

Существенное влияние на форму ферритного зерна оказывает и характерное распределение по его телу основного легирующего элемента — никеля. На рис. 3, 9, 10 представлены зона анализа и характер распределения никеля между ферритными зёрнами различной формы. Как следует из экспериментальных результатов, приведенных на этих рисунках, при содержании никеля в швах более 1,2 % формируются ферритные зёрна игольчатой формы.

Можно предположить, что наличие смешанной структуры в данном случае связано с химической микронеоднородностью распределения никеля. Так, в ферритных зёрнах игольчатой формы наблюдается увеличение его содержания, в полиго-

нальных ферритных зёрнах — наоборот, уменьшение.

Следовательно, для того чтобы обеспечить повышенные механические свойства соединений, полученных мокрой сваркой под водой, необходимо устранить или максимально уменьшить в структуре металла швов концентрационные перепады никеля. Это осуществимо за счет ограничения содержания

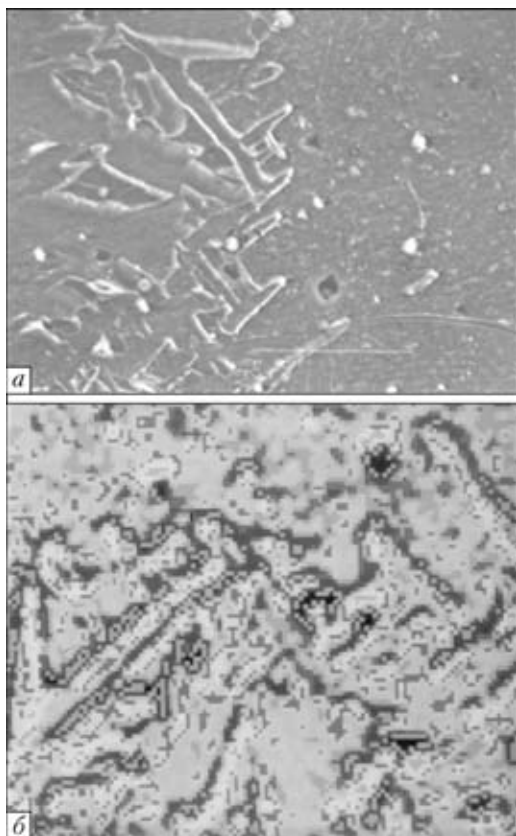


Рис. 10. Распределение никеля между игольчатым и полигональным ферритом в металле швов, полученных при сварке под водой проволокой с 1,5 мас. % Ni: а, б — см. рис. 3

последнего или повышения массовой доли марганца в наплавленном металле.

Выводы

1. С увеличением содержания никеля возрастают прочностные показатели металла швов, выполненных сваркой под водой, а пластические свойства металла швов несколько снижаются.
2. У некоторых НВ отсутствует адгезия между включением и матрицей, что, вероятно, вызвано повышенной концентрацией водорода, который собирается на границе НВ и матрицы. Наличие таких «ловушек» для водорода может снизить скорость

его массопереноса в процессе формирования сварных соединений при сварке под водой.

3. При содержании никеля более 1,2 мас. % формируется смешанная структура металла швов с химической микронеоднородностью. Уменьшить ее уровень можно путем изменения соотношения легирующих элементов.

1. Савич И. М., Мельник Ю. П., Глухова Е. В. Определение температуры капель электродного металла при сварке порошковой проволокой под водой // Автомат. сварка. — 1978. — № 9. — С. 12–14.
2. Савич И. М., Кононенко В. Я., Гусаченко А. И. Структура металла шва и околошовной зоны при сварке в воде различной солености // Там же. — 1984. — № 4. — С. 50–52.
3. Hasui A., Suga Y. On cooling of underwater welds // Trans. JWS. — 1980. — № 1. — P. 21–28.
4. Yara H., Kikuta Y., Matsuda H. The TRC test for high-strength steel in wet underwater welding // Ibid. — 1988. — № 1. — P. 75–80.
5. Christensen N. The metallurgy of underwater welding // Underwater welding: Proc. Intern. conf. (Trondheim, Norway, June 27–28, 1983). — Oxford: s. l., 1983. — P. 71–94.
6. Кононенко В. Я. Влияние электрических параметров дугового процесса при механизированной сварке под водой на состав парогазового пузыря и содержание в металле шва кислорода и водорода // Автомат. сварка. — 1993. — № 11. — С. 18–21.
7. Кононенко В. Я. Металлургические особенности сварки в водной среде порошковыми проволоками // Там же. — 1996. — № 9. — С. 22–26.
8. Влияние скорости охлаждения на искажения кристаллической решетки металла при сварке под водой и на воздухе / И. М. Савич, Н. Л. Карета, А. А. Гришанов, В. Н. Сладкова // Там же. — 1982. — № 5. — С. 27–28.
9. Гольдштейн Я. Е. Низколегированные стали в машиностроении. — М.: Машгиз, 1968. — 240 с.
10. Георгиев М. Н. Вязкость малоуглеродистых сталей. — М.: Металлургия, 1973. — 224 с.
11. Аснис А. Е., Игнатушенко А. А., Дьяченко Ю. В. Меры снижения содержания водорода в зоне термического влияния при механизированной подводной сварке // Автомат. сварка. — 1983. — № 8. — С. 1–4.
12. Кононенко В. Я. Технология механизированной сварки в морской воде низколегированных сталей с G_T до 350 МПа самозащитными порошковыми проволоками: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1987. — 17 с.
13. Грецкий Ю. Я., Максимов С. Ю. Влияние никеля на структуру и свойства швов при подводной сварке порошковой проволокой // Автомат. сварка. — 1995. — № 8. — С. 56–57.
14. Походня И. К. Проблемы сварки высокопрочных низколегированных сталей // Сучасне матеріалознавство: XXI сторіччя / Под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 1998. — С. 31–69.

Effect of the content of nickel on mechanical properties of the joints produced by wet underwater welding using self-shielded flux-cored wire has been studied. As established, an addition of nickel improves mechanical properties of the weld metal. Investigations of the composition of non-metallic inclusions proved the absence of adhesion between an inclusion and matrix in some of them. This is related to increase in the concentration of hydrogen accumulated at the non-metallic inclusion - matrix interface during the structure formation process. The presence of such "traps" may decrease the rate of hydrogen mass transfer in underwater welding. It has been found that a mixed ferritic structure of the weld metal characterised by chemical heterogeneity is formed at a nickel content above 1.2 wt. %.

Поступила в редакцию 27.05.2003,
в окончательном варианте 02.06.2003