



РАЗРАБОТКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ БЕЙНИТНОГО КЛАССА

В. Н. ШЛЕПАКОВ, д-р техн. наук, **Ю. А. ГАВРИЛЮК**, **С. М. НАУМЕЙКО**, кандидаты техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изложены результаты исследований влияния легирования на формирование структуры и механические свойства металла швов при сварке газозащитными порошковыми проволоками и разработки композиции сердечника проволоки, обеспечивающей получение предела текучести не менее 590 МПа и работу удара более 50 Дж при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для базовой системы легирования С–Si–Mn–Ni–Mo определено оптимальное дополнительное микролегирование цирконием, которое позволяет достичь уменьшения объемной доли и размеров неметаллических включений, а также увеличения доли дисперсных составляющих структуры металла и обеспечить требуемый уровень прочности металла сварного шва и его вязкопластических свойств при низкой температуре.

Ключевые слова: электродуговая сварка, низколегированные стали, порошковые проволоки, свойства металла сварного шва, структура, неметаллические включения, микролегирование

Расширение производства и применения в промышленности и строительстве высокопрочных низколегированных сталей вызвало необходимость создания новых сварочных материалов, отвечающих высоким требованиям, предъявляемым к показателям механических свойств, в частности, прочности и ударной вязкости.

Целью настоящей работы является разработка композиции сердечника проволоки, обеспечивающей получение металла шва с пределом текучести не менее 590 МПа и требуемые значения работы удара при низких температурах (более 50 Дж при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) [1]. Достижение такого уровня показателей при традиционных системах легирования является сложной задачей.

Опыт разработки низколегированных сварочных материалов, в частности, порошковых проволок, свидетельствует о целесообразности использования систем легирования, близких по сос-

таву к системе легирования свариваемой стали с учетом различных условий формирования структуры металла при прокатке и сварке. Основу легирования обычно составляет система С–Si–Mn–Ni–Mo (Cr–Cu). Необходимые показатели прочности достигаются с помощью легирования металла в системе С–Si–Mn–Ni–Mo за счет твердорастворного упрочнения [2, 3]. Регулирование вязкопластических свойств требует выбора системы легирования и микролегирования, обеспечивающих образование дисперсных структурных составляющих, которые имеют высокую сопротивляемость хрупкому разрушению [4, 5].

Исследования проводили на опытных партиях порошковой проволоки диаметром 1,2 мм со шлакообразующей системой рутил-флюоритного типа при сварке пластин из стали марки АБ-1 (размером 400×200 мм, толщиной 20 мм с V-образной разделкой кромок) в среде защитного газа 85 Ar + 15 CO₂ в нижнем положении с погонной энергией сварки 1,3...1,7 кДж/мм (сварочный ток 180...220 А, напряжение дуги 28 В). Перед наложением каждого последующего валика сварив-

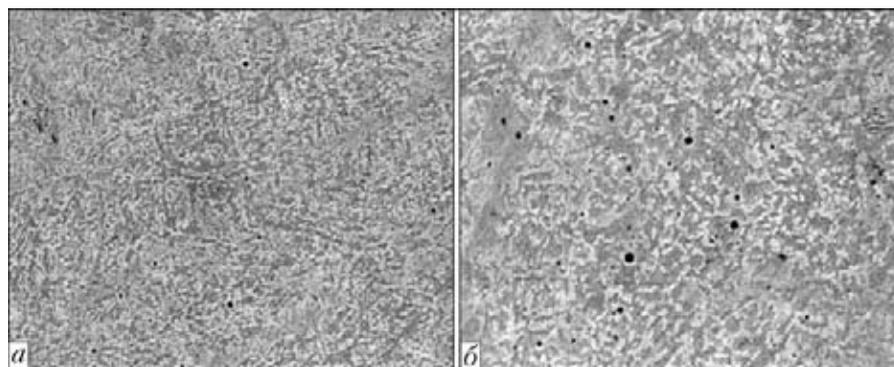


Рис. 1. Микроструктуры металла шва, легированного С–Si–Mn–Ni–Mo: а — $\times 1000$; б — $\times 2000$



Таблица 1. Содержание легирующих элементов и примесей в металле сварных швов, мас. %

№ шва	C	Si	Mn	Ni	Mo	Ti	Al	Zr	S	P
1	0,07...0,09	0,2...0,4	1,0...1,4	2,0...2,4	0,15...0,25	0,01...0,015	0,025...0,035	—	0,011...0,016	0,016...0,020
2								0,007...0,009	0,012...0,016	0,016...0,020
3								0,010...0,015	0,011...0,016	0,016...0,020

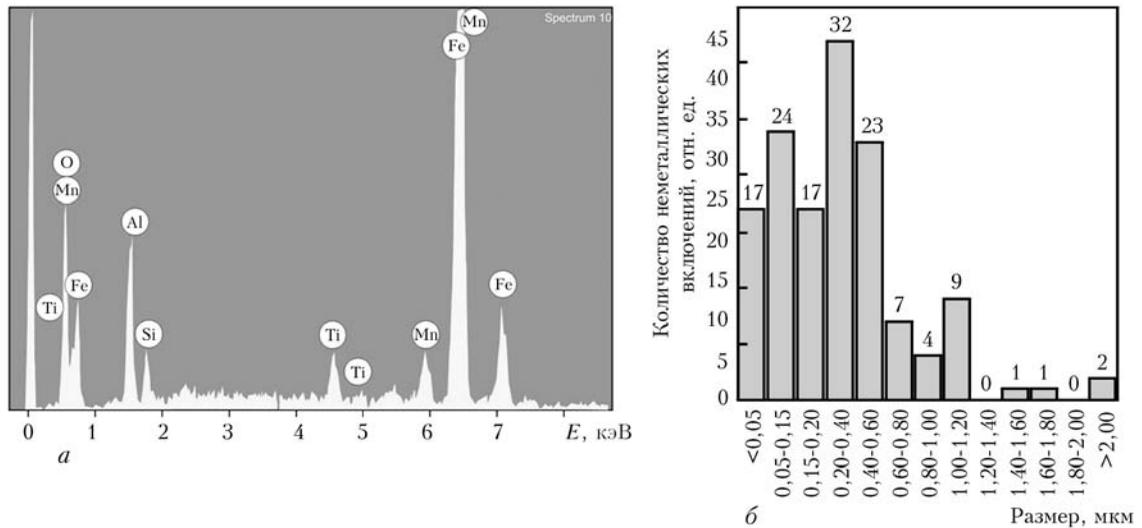


Рис. 2. Элементный состав (а) и распределение неметаллических включений по размерам в металле шва системы С–Si–Mn–Ni–Mo (б)

ваемое соединение охлаждалось до температуры 90...110 °С. Содержание легирующих элементов и примесей в металле шва варьировалось в пределах, указанных в табл. 1. Для получения более высоких значений работы удара металла сварного шва при низких температурах применили микролегирование цирконием путем введения в состав порошковой проволоки ферросплава системы Fe–Si–Zr. Влияние микролегирования исследовали при содержании циркония в металле шва в пределах 0,007...0,015 мас. % (табл. 1). Цирконий выполняет функции раскислителя и модификатора металла сварного шва за счет образования карбидов, нитридов и оксидов, которые оказывают влияние на характер структурных превращений стали. Анализ структуры, состава и распределения неметаллических включений по размерам провели с помощью электронного сканирующего микроскопа JSM-35CF «JEOL», который оснащен энергодисперсионным анализатором.

Структура металла сварного шва без микролегирования цирконием представляет собой бейнит с участками игольчатого

феррита (рис. 1). Распределение неметаллических включений по размерам и их состав приведены на рис. 2 (среднее содержание анализируемых элементов в неметаллических включениях, мас. %: 44,89 O; 0,05 Mg; 14,62 Al; 5,94 Si; 3,58 S; 7,22 Ti; 23,7 Mn). Как показал анализ химического состава неметаллических включений, они состоят

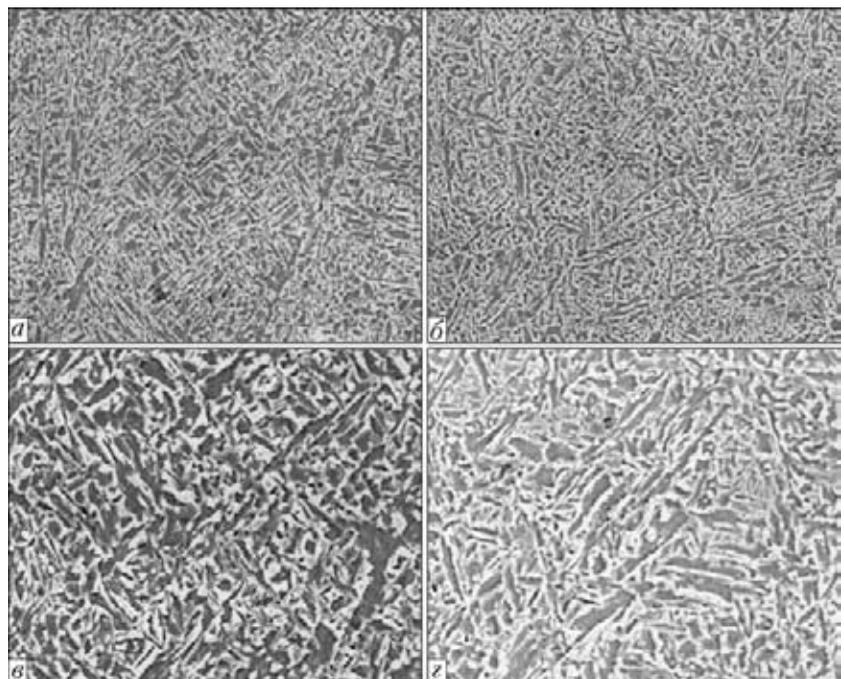


Рис. 3. Микроструктуры металла шва системы легирования С–Si–Mn–Ni–Mo, микролегированного цирконием: а, в — 0,007 мас. %; б, г — 0,015; а, б — $\times 1000$; в, г — $\times 2000$

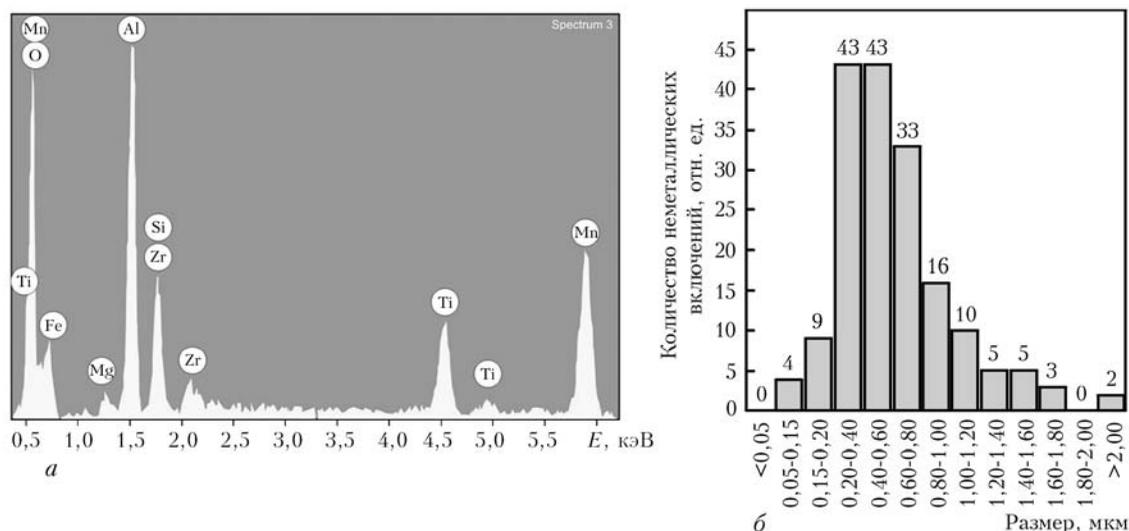


Рис. 4. Элементный состав (а) и распределение неметаллических включений по размерам в металле шва системы С–Si–Mn–Ni–Mo, микролегированном 0,007 мас. % Zr (б)

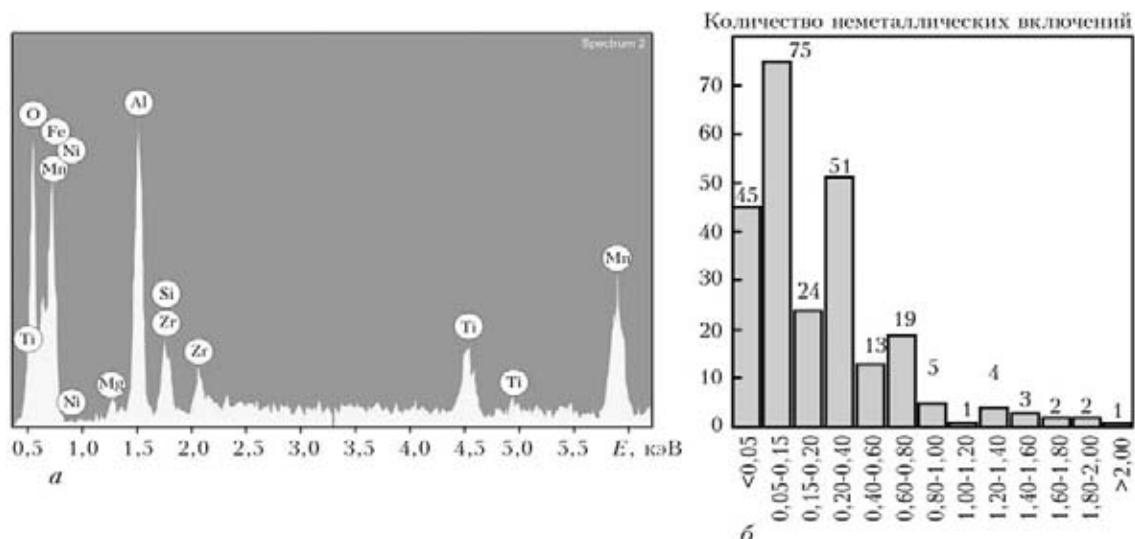


Рис. 5. Элементный состав (а) и распределение неметаллических включений по размерам в металле шва системы С–Si–Mn–Ni–Mo, микролегированном 0,015 мас. % Zr (б)

преимущественно из оксидов марганца, кремния алюминия и титана (рис. 2, а). Во включениях также присутствует небольшое количество оксисульфидов — примерно до 3,6 мас. %.

Значения, полученные при испытаниях, следующие: работа удара $KV_{50} = 30...40$ Дж, что ниже предъявляемых требований (табл. 2).

Структура металла сварного шва, микролегированного цирконием, представляет собой мелкодисперсный феррит различных модификаций: игольчатый с неупорядоченной второй фазой и

полигональный (доэвтектоидный) феррит в виде фрагментов ферритных оторочек (рис. 3). Объемная доля дисперсных составляющих (бейнита) в структуре металла шва, микролегированном цирконием на уровне 0,007 мас. %, составляет порядка 65 %, остальное — полигональный феррит. При повышении микролегирования цирконием до 0,015 мас. % доля дисперсных структур возрастает до 70 об. %, при этом размеры иголок игольчатого феррита уменьшаются в среднем в 1,5 раза в сравнении со структурой металла шва, микролегированного цирконием на уровне 0,007 мас. %. Составы неметаллических включений и распределения их по размерам для сварных швов, микролегированных цирконием, приведены на рис. 4 и 5. Среднее содержание анализируемых элементов в неметаллических включениях металла шва, микролегированном 0,007 мас. % Zr, мас. % — 46,66 O; 1,45 Mg; 20,17 Al; 4,95 Si; 5,79

Таблица 2. Механические свойства металла сварных швов

№ шва	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	KV_{50} , Дж
1	600...630	680...710	18...22	30...40
2	610...640	690...720	24...27	65...75
3	600...630	700...730	22...26	58...70

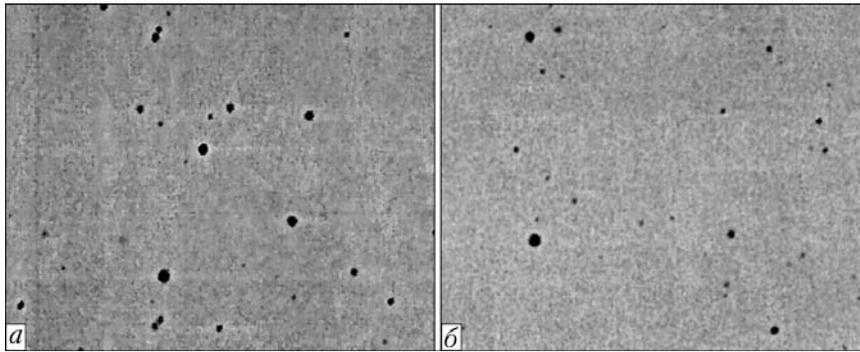


Рис. 6. Типичное распределение неметаллических включений в металле шва системы легирования С–Si–Mn–Ni–Mo ($\times 3400$): *a* — без микролегирования цирконием; *б* — с микролегированием цирконием на уровне около 0,011 мас. %

Ti; 19,08 Mn; 1,9 Zr; микролегированном 0,015 мас. % Zr — 45,64 O; 1,17 Mg; 21,53 Al; 3,14 Si; 6,54 Ti; 16,91 Mn; 5,07 Zr. При микролегировании металла шва цирконием объемная доля неметаллических включений уменьшается примерно в 2 раза за счет образования оксисульфидов циркония, которые удаляются в шлаковую фазу.

При этом также уменьшается средний размер самих включений приблизительно на 15 %. Микролегирование цирконием металла сварного шва способствует более равномерному распределению неметаллических включений (рис. 6). По результатам испытаний показатели работы удара сварного соединения при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляют 65...75 Дж, что отвечает требованиям (см. табл. 1 и 2).

В результате проведенных исследований создана порошковая проволока с сердечником рутил-флюоритного типа, предназначенная для сварки в среде защитного газа металлоконструкций из сталей с пределом текучести не менее 590 МПа, обеспечивающая достижение требуемого уровня вязкопластических свойств металла шва.

Выводы

1. Использование базового легирования С–Si–Mn–Ni–Mo с дополнительным микролегированием цирконием позволяет обеспечить требуемый уровень прочности (предел текучести более 590 МПа) и

ударной вязкости сварного соединения (работа удара более 50 Дж при температуре испытаний $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$).

2. Оптимальное содержание циркония в металле сварного шва, при котором достигается уменьшение объемной доли и размеров неметаллических включений и увеличение доли дисперсных составляющих структуры металла, находится в пределах 0,007...0,009 мас. %.

1. *Высокопрочные* стали для корпусов судов, морских сооружений и глубоководной техники / И. В. Горюнин, В. А. Мальшевский, Ю. Л. Легостаев, Л. В. Грищенко // Прогресс. материалы и технологии. — 1996. — № 2. — С. 23–24.
2. *Thomson S. W., Krauss G.* Austenite decomposition during continuous cooling of HSLA-80 plate steel // Metallurgical and Materials Transactions A. — 1996. — 27, June. — P. 1557–1571.
3. *Taylor D. J., Evans G. M.* Development of MMA electrodes for offshore fabrication // Metal Constr. — 1983. — 15, № 8. — P. 438–443.
4. *Zhang Z., Farrar R. A.* Influence of Mn and Ni on microstructure and toughness of C–Mn–Ni weld metals // Welding J. — 1997. — 76, № 5. — P. 183–190.
5. *Wang W., Liu S.* Alloying and microstructural management in developing SMAW electrodes of HSLA-100 steel // Ibid. — 2002. — 81, № 7. — P. 132–145.
6. *Грабин В. Ф.* Металловедение сварки плавлением. — Киев: Наук. думка, 1982. — 416 с.
7. *Влияние* химической неоднородности на образование игольчатого феррита в высокопрочном наплавленном металле швов / Г. М. Григоренко, В. А. Костин, В. В. Головкин, В. Ф. Грабин // Автомат. сварка. — 2004. — № 4. — С. 3–8.

Given are the results of investigation of the effect of alloying on formation of structure and mechanical properties of the weld metal in gas-shielded flux-cored wire welding, as well as of development of composition of a core of the wire providing the yield strength value of not less than 590 MPa and impact energy of more than 50 J at $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Optimal additional microalloying with zirconium was determined for the basic C–Si–Mn–Ni–Mo alloying system. This microalloying allows decreasing the volume fraction and sizes of non-metallic inclusions, as well as increasing the share of dispersed components in metal structure, and provides the required level of strength of the weld metal and its low-temperature tough-ductile properties.

Поступила в редакцию 05.09.2011