



ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАРГАНЦА МЕЖДУ СТРУКТУРНЫМИ СОСТАВЛЯЮЩИМИ НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ШВОВ

В. Ф. ГРАБИН, канд. техн. наук, **В. В. ГОЛОВКО**, д-р техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучено влияние кислородного потенциала и легирующей способности сварочных флюсов на распределение марганца в металле швов между неметаллическими включениями MnO и твердым раствором $Mn_{т.р.}$. Соотношение $(MnO)/[Mn_{т.р.}]$ может быть использовано для дифференцированной оценки эффективности легирования сварных швов марганцем с учетом различного характера его воздействия на упрочнение твердого раствора и состав неметаллических включений, а также на структуру и механические свойства металла швов.

Ключевые слова: дуговая сварка под флюсом, низколегированная сталь, легирование металла шва, макроструктура, распределение марганца, механические свойства

Стали при изготовлении сварных сооружений и аппаратов остаются самым распространенным видом конструкционных материалов. Такая ситуация сохранится еще на ближайшие 20–30 лет. В последние годы наиболее интенсивное развитие получили низколегированные стали повышенной и высокой прочности. Большой объем исследований, выполненных в металлургии, а также создание новых технологий изготовления сталей этого класса позволили существенно улучшить их прочностные свойства и показатели вязкости и пластичности. Добиться такого сочетания свойств удалось благодаря снижению содержания углерода в металле и рафинированию его по кислороду, сере и фосфору.

Уменьшение содержания углерода в низколегированных сталях сопровождается некоторым снижением их прочностных свойств, которое, как правило, компенсируется повышением содержания других легирующих элементов. Наиболее часто для этих целей используют марганец. Имеется большое количество публикаций о влиянии данного элемента на структуру и прочность низколегированных сталей [1–3]. Результаты последних исследований [4] выявили, что повышенное содержание марганца в металле швов с ферритно-перлитной структурой может привести к увеличению содержания перлитной составляющей, а в некоторых случаях способствовать его охрупчиванию. В работе [5] показано, что в зависимости от распределения легирующих элементов в металле их влияние на условия формирования структуры и свойства швов может быть различным. Исходя из результатов этих исследований видно, что для адекватной оценки влияния марганца на

структуры и свойства металла швов необходимо дифференцировать его содержание в твердом растворе и неметаллических включениях. Полученные данные могут помочь определить оптимальный диапазон содержания этого легирующего элемента в металле сварных швов низколегированных сталей.

Для проведения исследований выбрали образцы металла швов, полученные при сварке под флюсами, которые отличались индексом основности BI и содержанием MnO (табл. 1), в сочетании с проволоками Св-08А и Св-08ГА. Сварку стыковых соединений выполняли на режимах и по методике стандарта ISO 14171 (получение наплавленного металла) [6].

Из наплавленного металла отбирали образцы для химического анализа металла и металлографических исследований. Химический состав определяли методом спектрального анализа на установке «Vaird», оборудованной компьютером IBM PC для обработки результатов анализа. Для каждого образца проводили от трех до пяти измерений, затем результаты усредняли. В ходе металлографических исследований определяли долю отдельных составляющих микроструктуры металла, содержание легирующих элементов в твердом растворе и элементный состав неметаллических включений. Микроструктуру исследовали методами оптической и электронной металлографии с использованием светового микроскопа «Неофот-32» и растрового электронного микроскопа JSM-840 фирмы «Jeol», оборудованного платой захвата изображений MicroCapture с последующей регистрацией изображения на экране компьютера. Содержание микроструктурных составляющих определяли в соответствии с методикой МИС [7], а легирующих элементов в твердом растворе, состав неметаллических включений — микрорентгеноспектральным методом с помощью энергодисперсионного спектрометра «Link 860/500» фирмы



«Link System» и волнодисперсионного спектрометра «Ortec» фирмы «Ortec».

В табл. 2 приведен химический состав металла исследуемых швов, а в табл. 3, 4 — соответственно состав структурных составляющих металла шва и его механические свойства. Из представленных данных видно, что содержание марганца в металле исследуемых швов изменялось примерно в 6 раз (от 0,30 до 1,84 мас. %). При этом содержание углерода и кремния в металле швов № 1–8 изменялось в узких пределах (соответственно 0,032...0,062 и 0,130...0,279 мас. %). Металл швов № 9–11 содержал повышенную массовую долю кремния (0,421...0,630 %). Для выяснения характера влияния марганца на условия формирования структуры и механические свойства металла швов его легировали кремнием. Содержание серы и фосфора в металле всех швов изменялось соответственно в пределах 0,007...0,027 и 0,004...0,027 мас. %.

Микроструктура металла исследуемых швов приведена на рис. 1. Оценку стойкости металла швов против разрушения проводили с помощью показателя истинного сопротивления разрыву S_k , рассчитанному в соответствии с ГОСТ 1497 по формуле

$$S_k = P_k / F_k$$

где P_k — нагрузка в момент разрыва образца; F_k — площадь минимального поперечного сечения образца после разрыва.

На рис. 2 видно, что если между уровнем легирования металла швов марганцем и его прочностными свойствами существует определенная зависимость, то для показателя стойкости против разрушения образцов металла швов такую зависимость установить невозможно.

Легирование металла швов углеродистых и низколегированных сталей может оказывать заметное влияние на содержание в них ПФ [1–3]. Результаты исследования структуры металла швов, приведенные на рис. 3, свидетельствуют об отсутствии подобной зависимости в исследуемых образцах. На наш взгляд, это может быть объяснено тем, что марганец оказывает неоднозначное влияние на металл сварных швов. Как было показано в работе [5], в зависимости от условий взаимодействия марганец, переходящий в металл сварочной ванны из шлака, может концентрироваться

на металл сварных швов. Как было показано в работе [5], в зависимости от условий взаимодействия марганец, переходящий в металл сварочной ванны из шлака, может концентрироваться

Таблица 1. Химический состав (мас. %) и основность B_I сварочных флюсов, использованных в исследованиях

Обозначение флюса	B_I	Na ₂ O	CaO	MgO	CaF ₂	MnO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Другие элементы
А	0,60	2,7	3,1	2,7	5,8	30,2	3,8	0,9	46,8	4,0
Б	0,74	3,1	5,6	3,8	6,4	30,9	2,1	0,7	45,3	2,1
В	0,83	2,0	4,1	9,8	19,5	—	33,7	0,1	25,8	5,0
Г	2,09	—	17,0	—	40,0	10,0	15,9	0,2	15,5	4,0
Д	2,22	2,3	4,5	29,4	19,0	—	33,2	—	8,0	4,0
Е	2,12	2,0	4,1	20,0	19,1	11,0	30,6	—	8,6	5,0

Таблица 2. Химический состав (мас. %) металла швов

№ образца	Обозначение флюса	Сварочная проволока	C	Si	Mn	S	P
1	Г	Св-08А	0,041	0,156	0,30	0,015	0,015
2	Д		0,062	0,132	0,37	0,015	0,015
3	Г	Св-8ГА	0,051	0,226	0,63	0,013	0,004
4	А	Св-08А	0,034	0,209	0,77	0,025	0,007
5	Д	Св-8ГА	0,057	0,130	0,85	0,007	0,006
6	А		0,032	0,279	0,99	0,027	0,006
7	Б	Св-08А	0,040	0,251	1,00	0,028	0,028
8	Е	Св-8ГА	0,045	0,250	1,13	0,013	0,007
9	Б		0,036	0,421	1,41	0,022	0,027
10	В	Св-08А	0,045	0,486	1,45	0,018	0,021
11	В	Св-8ГА	0,041	0,630	1,84	0,018	0,026

Таблица 3. Содержание (об. %) структурных составляющих в металле швов

№ образца	ПФ	П	ИФ	ФУВ	ФНУВ	Б	МАК	$V_{н.в}$
1	77,0	23,0	0	0	0	0	0	0,44
2	84,0	11,3	0	0	0	0	4,7	0,40
3	51,0	5,0	0	22	25	0	1,3	0,37
4	90,0	10,0	0	0	0	0	0	2,20
5	21,0	11,0	5	21	30	0	1,2	0,45
6	90,0	10,0	0	0	0	0	0	2,50
7	80,9	19,1	0	0	0	0	0	0,59
8	25,0	9,0	7	41	20	13	2,5	0,39
9	50,0	6,0	11	14	11	0	1,5	1,26
10	87,0	12,9	0	0	0	0	0	0,74
11	23,0	8,0	60	15	10	0	2,5	0,44

Примечание. ПФ — полигональный феррит; П — перлит; ИФ — игольчатый феррит; ФУВ — феррит с упорядоченной второй фазой; ФНУВ — феррит с неупорядоченной второй фазой; Б — бейнит; МАК — МАК-фаза; $V_{н.в}$ — содержание неметаллических включений.

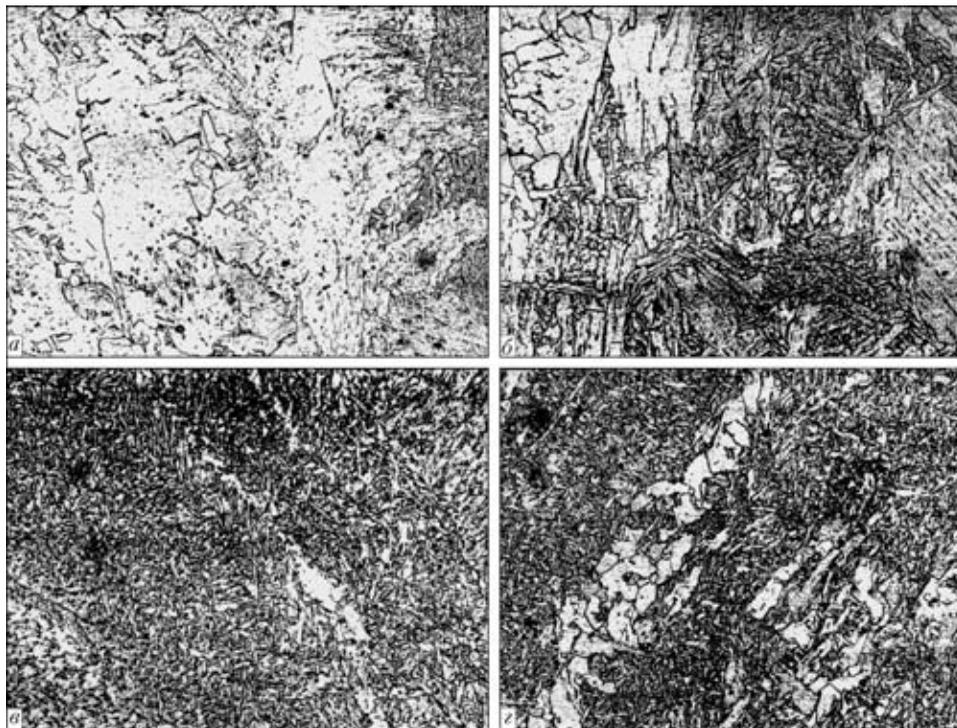


Рис. 1. Микроструктура (X400) металла исследуемых швов на образцах № 2 (а), 4 (б), 8 (е), 9 (з) по табл. 2

в неметаллических включениях или входит в твердый раствор. Исходя из этих предположений влияние марганца на структуру и свойства металла швов целесообразно оценивать с помощью показателя, учитывающего содержание марганца как в неметаллических включениях MnO, так и в твердом растворе [Mn_{т.р.}]. В качестве такого показателя может быть использовано, например, соотношение (MnO)/[Mn_{т.р.}]. С целью получения таких зависимостей нами в соответствии с описанной выше методикой исследования определены химический состав неметаллических включений и содержание марганца в твердом растворе. Результаты исследований представлены в табл. 5.

Исходя из полученных данных рассчитаны зависимости, приведенные на рис. 4. Как видно из

рисунка, при изменении соотношения (MnO)/[Mn_{т.р.}] от 60 до 90 происходит существенное снижение значений истинного сопротивления разрыву образцов металла сварных швов, что связано с резким возрастанием объемной доли ПФ. Использование для описания влияния легирования металла швов марганцем на его структуру и механические свойства соотношения (MnO)/[Mn_{т.р.}] дает возможность более подробно изучить этот процесс. Так, из рис. 4 можно сделать вывод, что при низком (30...60) соотношении (MnO)/[Mn_{т.р.}] легирование твердого раствора марганцем способствует упрочнению металла шва, в результате чего его прочностные свойства повышаются. При высоком (90...150) значении этого соотношения марганец в металле швов вхо-

Таблица 4. Механические свойства металла швов

№ образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	S_k , МПа
1	329,1	407,5	30,4	63,9	1128,8
2	325,6	402,4	28,0	58,7	974,3
3	367,1	466,3	34,2	74,1	1800,4
4	314,6	433,6	26,3	63,8	1197,8
5	348,5	490,6	36,0	74,9	1954,6
6	351,2	454,5	25,3	65,7	1325,1
7	344,4	432,9	28,5	59,7	1074,2
8	356,8	473,2	32,0	74,8	1877,8
9	385,4	508,0	29,2	64,9	1447,3
10	418,1	523,8	25,0	58,7	1268,3
11	437,4	589,0	22,9	62,9	1587,6

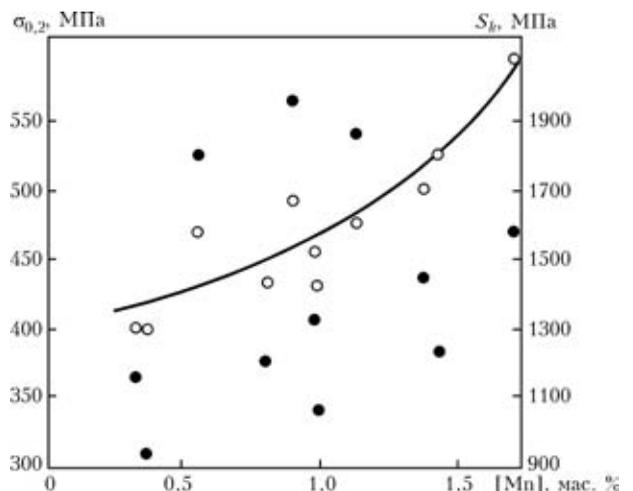


Рис. 2. Влияние легирования металла швов марганцем на временное $\sigma_{0,2}$ (○) и истинное S_k (●) сопротивление разрыву

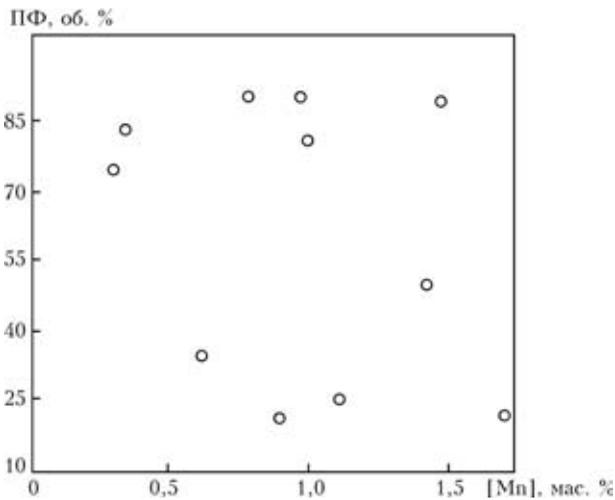


Рис. 3. Влияние легирования металла швов марганцем на долю ПФ в его структуре

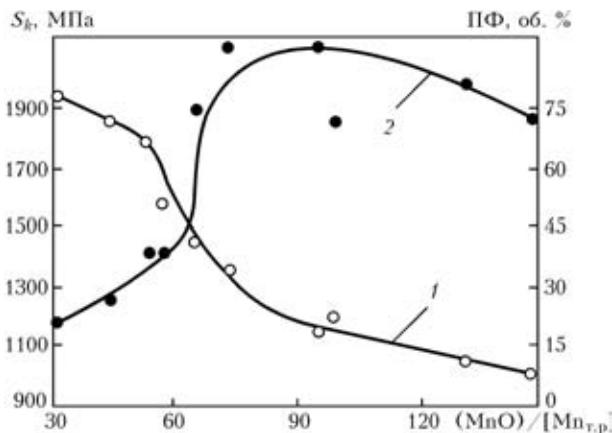


Рис. 4. Влияние соотношения $(MnO)/[Mn_{т.р.}]$ на истинное сопротивление разрыву S_k (1) и содержание ПФ (2) в структуре металла швов

дят преимущественно неметаллические включения. В таких случаях структура металла швов отличается высоким содержанием ПФ, а твердый раствор недостаточно легирован марганцем, что приводит к снижению истинного сопротивления разрыву.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность использования соотношения $(MnO)/[Mn_{т.р.}]$ для оценки влияния содержания марганца в металле сварных швов на его структуру и механические свойства.

The effect of oxygen potential and alloying ability of welding fluxes on distribution of manganese in the weld metal between non-metallic inclusions MnO and solid solution Mns.s. has been studied. The $(MnO)/[Mn_{s.s.}]$ ratio can be used for differential evaluation of the efficiency of alloying the welds with manganese, allowing for a differing character of its effect on hardening of solid solution, composition of non-metallic inclusions, and structure and mechanical properties of the weld metal.

Таблица 5. Содержание неметаллических включений и марганца (мас. %) в твердом растворе

№ образца	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	[Mn _{т.р.}]
1	16,09	34,78	48,82	0,30
2	35,27	23,64	38,82	0,25
3	19,42	29,10	42,61	0,82
4	0,32	45,64	51,47	0,52
5	60,63	4,73	31,53	1,03
6	1,05	41,39	61,18	0,85
7	1,26	33,33	64,07	0,47
8	13,99	22,39	58,25	1,30
9	1,32	29,82	68,15	1,02
10	9,37	30,66	65,15	1,30
11	6,23	21,74	76,71	1,38

Учет влияния $(MnO)/[Mn_{т.р.}]$ на свойства металла позволяет провести дифференцированную оценку эффективности легирования сварных швов марганцем с учетом различного характера его воздействия на упрочнение твердого раствора и состав неметаллических включений, а также на структуру и механические свойства металла швов.

1. Грабин В. Ф., Денисенко А. В. *Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей*. — Киев: Наук. думка, 1978. — 272 с.
2. Лившиц Л. С., Хакимов А. Н. *Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений*. — М.: Машиностроение, 1989. — 334 с.
3. Court S. A., Pollard G. The effects of Mn and Si on the microstructure and properties of SMA steel weld metal. — S.I., [1989]. — 14 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. II-A-789-89).
4. Анализ структурного состава металла швов, выполненных сварочными проволоками ферритно-перлитного класса / В. Ф. Грабин, В. В. Головкин, Т. Г. Соломийчук и др. // *Автомат. сварка*. — 2003. — № 8. — С. 18-20.
5. Головкин В. В. Взаимодействие металла со шлаком при сварке под агломерированными флюсами низколегированных сталей: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Киев, 2006. — 32 с.
6. ISO 14171 *International Standard. Welding consumables — wire electrodes and wire-flux combinations for submerged arc welding of non alloy and fine grain steels — classification*. — Введ. 01.02.2007.
7. Guidelines for the classification of ferritic steel weld metal microstructural constituents using the light microscope // *Welding in the World*. — 1986. — 24, № 7/8. — P. 144-148.

Поступила в редакцию 15.02.2007