



ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА В НИЗКОЛЕГИРОВАННОМ МЕТАЛЛЕ ШВА НА ПОРООБРАЗОВАНИЕ ПРИ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ

И. А. ГОНЧАРОВ, инж., А. П. ПАЛЬЦЕВИЧ, канд. техн. наук, В. С. ТОКАРЕВ, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Определено содержание диффузионного и остаточного водорода в наплавленном металле и металле шва методом газовой хроматографии при сварке под плавными марганцево-силикатными флюсами марок АН-348А, АН-60 и АН-60СМ. Установлено, что критическое содержание водорода в шве при сварке под флюсом, при котором образуются поры для всех трех флюсов составляет $12...14 \text{ см}^3 \text{ H}_2/100 \text{ г}$ металла шва, что равно растворимости водорода в δ -железе при температуре плавления и давлении 10^5 Па .

Ключевые слова: плавный флюс, наплавленный металл, металл шва, поры, диффузионный водород, остаточный водород

Обеспечение плотных швов — одно из главных требований, предъявляемых к сварочным флюсам. Для оценки устойчивости швов к порообразованию К. В. Любавским была предложена методика, заключающаяся в наплавке валика на пластину с V-образной канавкой, в которую предварительно засыпали порцию ржавчины [1]. Критерием оценки является минимальное количество ржавчины (в граммах на 100 мм шва), при котором образуются наружные поры.

Благодаря своей простоте методика Любавского получила распространение при испытаниях сварочных флюсов. Однако, как отмечал ее автор, состав ржавчины изменяется в зависимости от условий ее получения и хранения. Естественно, при этом изменяется критическое количество ржавчины, вызывающее образование пор в швах. Кроме того, в зависимости от размеров пластин, канавки, марки стали, диаметра проволоки и режима сварки существенно изменяется устойчивость к образованию пор при сварке [2, 3]. Из табл. 1 видно, что результаты испытаний флюсов по методике Любавского, проведенных нами при разных режимах наплавки, носят сравнительный характер и пригодны для оценки в пределах одной серии опытов с едиными режимами сварки, размерами образцов и составом ржавчины. Фактически по этой методике оцениваются свойства флюса и особенности технологии сварки с точки зрения предотвращения пористости, вызываемой водородом.

Из литературы известно [3, 4], что основной причиной пористости швов при сварке под флюсом является повышенное содержание водорода и резкое падение его растворимости при кристаллизации металла. Наиболее достоверные данные о растворимости водорода в области температуры плавления $T_{\text{пл}}$ железа приведены в работах [5, 6] и для твердого железа составляют $12...14$, для жидкого железа — $27...28 \text{ см}^3/100 \text{ г}$.

Данные о содержании водорода и образовании пор в швах при сварке под флюсом немногочисленны и противоречивы. Авторы работы [3] показали, что плотными являлись швы при содержании водорода до 6,5, пористыми — при $7,6 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. По данным работы [7], образцы для анализа водорода при сварке под флюсом АН-30 содержали $[\text{H}]_{\text{диф}} + [\text{H}]_{\text{ост}} > 17,3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. Следует отметить, что флюс перед сваркой прокаливали при температуре $300 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 3 ч и о дефектах в образцах не было упоминания. Противоречивость данных обусловлена несовершенством методов отбора проб и анализа. Кроме того, низкие значения диффузионного водорода в наплавленном металле при сварке под флюсом ($0,8...2,8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$), приведенные в работах [8, 9], объясняются несовершенством метода анализа и неточной терминологией, поскольку по сути речь идет о металле шва, когда авторы получают «карандашную» пробу сливом металла сварочной ванны в медный кокиль.

Для получения объективных данных о содержании водорода в наплавленном металле и металле шва при сварке под флюсом и сопоставления их с растворимостью водорода в железе при температуре плавления нами использован хроматографический метод анализа $[\text{H}]_{\text{диф}}$ по ГОСТу 23338–91 с применением газоанализатора ОБ-2178. Образцы для анализа были изготовлены из стали типа Х-70. Сварочную проволоку марки Св-10ГН диаметром 4 мм зачищали от омеднения и обезжиривали перед сваркой. Наплавку выполняли на режиме: $I_{\text{св}} = 550...600 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 32...34 \text{ В}$, $v_{\text{св}} = 36 \text{ м/ч}$. Содержание водорода в швах изменяли путем введения различного количества ржавчины в канавки на образцах размерами $2,5 \times 2,5 \text{ мм}$.

После измерения содержания $[\text{H}]_{\text{диф}}$ в наплавленном металле и металле шва из сварных швов вырезали образцы диаметром 4...5 мм длиной 15 мм для определения содержания $[\text{H}]_{\text{ост}}$ методом газовой хроматографии с использованием установки, описанной в работе [10]. Дегазацию образцов проводили при температуре $800 \text{ }^\circ\text{C}$ до прекращения выделения остаточного водорода.



Таблица 1. Результаты испытаний сварочных флюсов по методике Любавского

Режим наплавки (ток постоянный, обратной полярности)	Количество вводимой ржавчины, г/100 мм шва	Наличие пор в швах при наплавке под флюсом		
		АН-348А	АН-60СМ	АН-60
Сталь 09Г2, проволока Св-08ГА, Ø 3 мм, $v_{св} = 70$ м/ч, $U_d = 34$ В, $I_{св} = 450$ А	0,1	Нет	—	—
	0,15	Цепочка	—	—
	0,2	»	Нет	Нет
	0,3	—	Цепочка	Единичные
	0,4	—	—	Цепочка
Сталь 10Г2, проволока Св-08А, Ø 4 мм, $v_{св} = 36$ м/ч, $U_d = 32$ В, $I_{св} = 600$ А	0,2	Нет	—	—
	0,3	Единичные	—	—
	0,4	Цепочка	Нет	—
	0,5	Сплошные	Единичные	—
	0,6	—	Цепочка	—
	0,7	—	—	Нет
	0,8	—	—	Единичные
	0,9	—	—	Цепочка
	—	—	—	—
Ст3, проволока Св-08А, Ø 4 мм, $v_{св} = 24$ м/ч, $U_d = 38$ В, $I_{св} = 650$ А	0,7	Нет	—	—
	0,8	Цепочка	—	—
	1,3	—	Нет	—
	1,4	—	Цепочка	—
	1,8	—	—	Нет
	2,0	—	—	Единичные

Для исследований использовали флюсы АН-60, АН-348А и АН-60СМ, которые близки по химическому составу и относятся к одной шлаковой системе $MnO-SiO_2-CaF_2$, но при этом отличаются механизмом предотвращения поглощения водорода сварочной ванной. При сварке под пемзовидным флюсом АН-60 выделяется значительное количество тетрафторида кремния, связывающего водород в зоне сварки в нерастворимый в стали HF. При сварке под стекловидным флюсом АН-348А поверхность зерен меньше развита и выделение SiF_4 менее интенсивно. В результате водород в зоне сварки связывается гораздо слабее. Флюс АН-60СМ, имеющий стек-

локристаллическое строение зерен, при нагреве в процессе сварки выделяет меньшее количество SiF_4 по сравнению с флюсом АН-348А. При одинаковых условиях отбора проб воздуха из зоны сварки выделение тетрафторида кремния у флюса АН-60СМ составляло 0,51, у флюса АН-348А — 0,73 мг/м³. В работе [11] нами установлено, что флюс АН-60СМ отличается от флюсов АН-348А и АН-60 меньшим содержанием потенциального водорода и более низкой температурой его десорбции в процессе нагрева.

В табл. 2 приведены результаты измерений содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и металле шва, а также остаточного водорода при сварке под флюсами АН-60, АН-348А и АН-60СМ. Из приведенных данных видно, что критическое содержание водорода в сварном шве, при котором начинают образовываться поры для всех трех флюсов, приблизительно одинаково и составляет 12... 14 см³/100 г

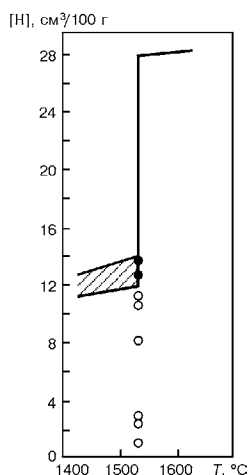
металла шва.

Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными работы [12], в которой установлено, что критическая концентрация водорода для образования пор в чистом железе составляет 13 см³/100 г железа, а также работы [13], где отмечено, что при сварке покрытыми электродами фтористокальциевого типа поры в сварных швах появляются при 12... 14 см³/100 г металла шва.

Для наглядности на рисунке совмещены полученные нами данные с фрагментом диаграммы рас-

Таблица 2. Содержание водорода при сварке под флюсом

Флюс	Количество вводимой ржавчины, г/100 мм шва	Наличие пор в шве	Содержание [H] _{диф} в наплавленном металле, см ³ /100 г	Содержание водорода в металле шва, см ³ /100 г		
				[H] _{диф}	[H] _{ост}	[H] _{сум}
АН-348А	0	Нет	<u>9,3; 11,0; 9,1</u> 9,8	<u>2,8; 3,3; 2,6</u> 2,9	0,2	3,1
	0,2	»»	<u>37,2; 41,0; 37,3</u> 38,5	<u>9,7; 11,3; 10,3</u> 10,4	0,2	10,6
	0,3	Много	<u>50,9; 40,5; 28,3</u> 39,9	<u>16,6; 14,6; 10,0</u> 13,7	0,3	14,0
АН-60СМ	0	Нет	<u>2,4; 2,3; 3,2</u> 2,6	<u>1,0; 0,8; 1,0</u> 0,9	0,1	1,0
	0,3	»»	<u>34,8; 35,7; 31,9</u> 34,1	<u>9,4; 12,8; 10,8</u> 11,0	0,2	11,2
	0,4	Единичные	<u>38,4; 35,9; 43,4</u> 38,0	<u>11,6; 12,4; 13,8</u> 12,6	0,3	12,9
АН-60	0	Нет	<u>6,1; 6,2; 5,6</u> 6,0	<u>2,1; 2,1; 2,0</u> 2,1	0,3	2,4
	0,4	»»	<u>19,6; 19,2; 16,8</u> 18,5	<u>9,3; 7,7; 7,0</u> 8,0	0,2	8,2
	0,5	Много	<u>43,5; 35,1; 30,4</u> 36,3	<u>15,4; 13,2; 12,6</u> 13,7	0,3	14,0



Влияние концентрации водорода в металле шва при температуре плавления на образование пор в швах: ○ — плотный металл; ● — поры в металле

творимости Fe-H₂ в области температуры плавления твердого железа. Как видим, при сварке под флюсом поры образуются в металле, если в момент кристаллизации содержание водорода в нем равно пределу растворимости.

Знание этого факта позволяет в качестве критерия устойчивости швов к образованию пор при сварке под флюсом использовать разность между критическим содержанием водорода в шве, вызывающим образование пор (12 см³/100 г), и содержанием водорода в шве при сварке под данным флюсом. По данным табл. 2 при сварке под флюсом АН-60СМ запас устойчивости швов к образованию пор наибольший (12,0 - 1,0 = 11,0 см³/100 г). Швы, сваренные под флюсом АН-60 (12,0 - 2,4 = 9,6 см³/100 г), занимают промежуточное положение. Наименее устойчивы к порообразованию швы, сваренные под флюсом АН-348А (12,0 - 3,1 = 8,9 см³/100 г).

Кроме возможности оценки по содержанию водорода в сварном шве стойкости последнего к образованию пор, полученные данные о содержании диффузионного водорода в наплавленном металле позволяют применить к сварочным флюсам стандартную классификацию МИСа по уровням водорода в сварных швах, разработанную применительно к сварке электродами [14]. Флюс АН-60СМ обеспечивает достаточно низкий уровень водорода (до 5 см³/100 г наплавленного металла), а флюсы АН-60 и АН-348А относятся к материалам, дающим низкий уровень водорода (5... 10 см³/100 г наплавленного металла).

Выводы

1. Критическое содержание водорода в шве при сварке под флюсом, при котором образуются поры, для марганцево-силикатных флюсов составляет 12... 14 см³ H₂/100 г металла шва, что равно раст-

воримости водорода в δ-железе при температуре плавления и давлении 10⁵ Па.

2. Предложено в качестве критерия устойчивости швов при сварке под флюсом использовать разность между критическим содержанием водорода в шве, вызывающим образование пор (12 см³/100 г), и содержанием водорода в шве при сварке под исследуемым флюсом. При сварке под флюсом АН-60СМ запас устойчивости швов к образованию пор наибольший. Швы, сваренные под флюсом АН-60, занимают промежуточное положение. Наименее устойчивы к порообразованию швы, сваренные под флюсом АН-348А.

1. Любавский К. В. *Металлургия автоматической сварки малоуглеродистой стали под флюсом* // *Вопр. теории сварочных процессов*. — М.: ЦНИИТМАШ, 1948. — С. 86-214.
2. Фрумин И. И. *Предупреждение пор при сварке и наплавке под флюсом* // *Автомат. сварка*. — 1956. — № 6. — С. 1-30.
3. Фрумин И. И., Курдо И. В., Подгаецкий В. В. *Образование пор в сварных швах и влияние состава флюса на склонность к порам* // *Автоген. дело*. — 1949. — № 10. — С. 1-11.
4. Підгаєцький В. В. *Пори, включения і тріщини в зварних швах*. — К.: Техніка, 1970. — 236 с.
5. Шаповалов В. И., Трофименко В. В. *Растворимость водорода в дельта-железе* // *Изв. вузов. Черн. металлург.* — 1979. — № 8. — С. 89-91.
6. Галактионова Н. А. *Водород в металлах*. — М.: Металлургия, 1967. — 303 с.
7. Потапов Н. Н., Любавский К. В. *Водород в наплавленном металле при сварке под флюсом* // *Свароч. пр-во*. — 1970. — № 7. — С. 4-5.
8. Ковач Я., Петров Г. Л. *Исследование гидратации и дегидратации кислых флюсов для автоматической дуговой сварки сталей* // *Сварочные флюсы и шлаки*. — Киев: Наук. думка, 1974. — С. 47-55.
9. *Влияние общего содержания водорода во флюсе АН-17М на концентрацию диффузионного водорода в наплавленном металле* / Б. С. Касаткин, Ю. Н. Вахнин, А. К. Царюк, Н. Н. Калинюк // *Автомат. сварка*. — 1988. — № 2. — С. 14-16.
10. Пальцевич А. П. *Хроматографический способ определения содержания водорода в компонентах электродных покрытий* // *Автомат. сварка*. — 1999. — № 6. — С. 45-48.
11. Гончаров И. А., Токарев В. С., Пальцевич А. П. *О влиянии способа производства сварочных флюсов на их качество* // *Тез. докл. междунар. науч.-техн. семинара «Сварка под флюсом сегодня и завтра»*, Запорожье, 3-6 сент. 1998 г., Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 1998. — С. 21-23.
12. Uda, Dan, Ohno. *Effect of hydrogen on blowhole formation in pure iron during solidification* // *J. of the Iron and Steel of Japan*. — 1976. — 1, № 1, Jan. — P. 62-71.
13. Пальцевич А. П. *Экспериментальное исследование образования пористости швов, вызванных водородом, при сварке электродами с покрытием основного вида* // *Тез. докл. Всесоюз. конф. по сварочным материалам*, Череповец, 1-14 окт. 1983 г., Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1983. — С. 19-20.
14. *Weld metal hydrogen levels and the definition of hydrogen-controlled electrodes*. S. 1., [1973]. — 8 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. 11-682-73).

The content of diffusive and residual hydrogen in the deposited and weld metal was determined using the method of a gas chromatography in welding with fused fluxes of AN-348A, AN-60 and AN-60SM grades. It was established that the critical content of hydrogen in weld during submerged arc welding, at which the pores are formed, does not depend on the flux grade and amounts to 12...14 cm³ H₂/100 g of weld metal, that is equal to the hydrogen solubility in δ-iron at melting temperature and 10⁵ Pa pressure.

Поступила в редакцию 09.02.2001