

## **ВЛИЯНИЕ РАСКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДОМ НА ОБРАЗОВАНИЕ ПОР В МЕТАЛЛЕ ШВОВ**

### **1. Постановка проблемы**

Возможность уменьшения пористости металла швов рутиловых электродов, вызываемой водородом, путем введения в зону сварки кислорода и интенсификация выделения водорода за счет введения в покрытие материалов, содержащих кристаллизационную влагу общеизвестно, и используется при создании электродов серии АНО [1]. Для снижения пористости нужно ускорить дегазацию сварочной ванны, что возможно при использовании повышенного содержания углерода в проволоке или покрытии. Однако, введение углерода в сварочную проволоку, применяемую для изготовления сварочных электродов экономически не оправдано, и технологически не приемлемо, а использование углерода в виде графита приводит к повышению его содержания в металле шва и, как следствие, к увеличению его прочности и снижению пластичности. Кроме того, углерод в сварочной ванне интенсифицирует кремневосстановительный процесс. Кремний тормозит десорбцию водорода, дегазация ванны идет медленно и в металле шва образуются поры [2].

### **2. Методика исследований**

Для исследования влияния раскисления графитом и Fe-C сплавом металла швов на образование пористости были испытаны опытные электроды (см. табл. 1). Содержание водорода в наплавленном металле определяли путем наплавки на составной образец по методу А [1]. Сварку производили постоянным током обратной полярности со скоростью 10,5 м/ч,  $I_{св} = 180$  А;  $U_0 = 26-28$  В. Содержание диффузионного водорода определяли в эквидиометрах под водным раствором глицерина, остаточного водорода, кислорода и азота – методом вакуум-плавки. На этом же режиме производилась восьмислойная наплавка. Содержание С, Mn и Si определялось методом химического анализа.

### **3. Результаты исследований**

Результаты исследований приведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 1 показывает, что в металле, наплавленном ильменитовыми электродами вариантов 1ч...6ч, содержащими чугунный порошок в покрытии содержится значительно меньшее количество кислорода, чем в металле электродов содержащих эквивалентное количество графита (варианты 1г...6г).

Введение чугунного порошка в покрытие электродов приводит сначала к снижению содержания водорода в металле шва, достигающего минимальных значений при содержании углерода в наплавленном металле 0,08 %. При дальнейшем увеличении содержания углерода

количество водорода в металле шва повышается. При введении углерода в виде графита также наблюдается некоторое снижение содержания водорода в наплавленном металле первого варианта электродов, однако, затем с увеличением содержания углерода количество водорода повышается. Общее содержание водорода в металле швов выполненных опытными электродами превышает растворимость его в железе [3]. Содержание азота в металле, наплавленном электродами всех опытных вариантов, не превышает значений 0,048-0,049 %, соответствующих растворимости азота в твердом железе при температуре плавления. С увеличением содержания углерода в покрытии опытных электродов содержание азота в металле швов уменьшается, причем в случае использования чугунного порошка это снижение более существенно.

**Таблица 1** – Результаты химического и газового анализов металла шва

Вариант электр.	[C], в %	[Mn], в %	[Si], в %	[H] диф ф, в см <sup>3</sup> /10 0 г	[H] ост., в см <sup>3</sup> /10 0 г	[H] сум., в см <sup>3</sup> /10 0 г	[N], в %	[O] <sub>общ</sub> , в %
0	0,0	0,53	0,0	6,3	20,5	26,8	0,02	0,056
1ч	6	0,55	8	6,1	20,2	26,3	6	0,051
2ч	0,0	0,57	0,0	6,0	19,4	25,4	0,02	0,048
3ч	6	0,63	9	5,8	19,1	24,9	2	0,044
4ч	0,0	0,68	0,1	5,7	18,9	24,6	0,02	0,031
5ч	6	0,69	0	6,2	21,1	27,3	0	0,026
6ч	0,0	0,70	0,1	6,9	22,3	29,2	0,01	0,025
7ч	7	0,71	0	7,3	23,4	30,7	9	0,024
1г	0,0	0,54	0,1	6,1	20,4	26,5	0,01	0,056
2г	8	0,56	1	6,2	21,2	27,4	8	0,055
3г	0,1	0,58	0,1	6,8	21,7	28,5	0,01	0,053
4г	0	0,65	1	7,1	22,0	29,1	7	0,047
5г	0,1	0,71	0,1	7,5	22,2	29,7	0,01	0,045
6г	2	0,73	2	7,9	23,8	31,7	6	0,044
	0,1		0,1				0,01	
	4		2				6	
	0,0		0,1				0,02	
	7		0				6	
	0,0		0,1				0,02	
	8		1				5	
	0,1		0,1				0,02	
	0		1				5	
	0,1		0,1				0,02	
	2		2				4	
	0,1		0,1				0,02	
	5		3				4	
	0,1		0,1				0,02	
	8		4				3	

Примечание. Каждое значение содержания элементов и газов в наплавленном металле

соответствует среднему значению трех опытов.

На основании экспериментальных данных оценивали роль отдельных газов в образовании пор. Расчет скрытых парциальных давлений CO, N<sub>2</sub> и H<sub>2</sub> выполняли по уравнениям [1]. Результаты расчетов показывают (табл. 2), что пористость ильменитовых электродов содержащих углерод в покрытии вызывает в основном водород.

$$[C][O] = \frac{P_{CO}}{K_{CO} \varphi_O \varphi_C},$$

$$P_{N_2} = \left( \frac{[N]}{S_{N_{жк}}} \right)^2 \text{ ат},$$

$$P_{H_2} = \left( \frac{[H]}{S_{H_{жк}}} \right)^2 \text{ ат}.$$

**Таблица 2** – Результаты расчета скрытого давления газов

Вариант электрода	Давление газов, 10 <sup>5</sup> Па (ат.)		
	P <sub>CO</sub>	P <sub>N</sub>	P <sub>H</sub>
0	0,22	0,42	0,98
1	0,20	0,30	0,95
2	0,19	0,25	0,88
3	0,20	0,22	0,85
4ч	0,16	0,20	0,83
5ч	0,17	0,18	1,02
6ч	0,19	0,16	1,17
7ч	0,22	0,16	1,29
1г	0,26	0,42	0,96
2г	0,29	0,39	1,03
3г	0,35	0,39	1,11
4г	0,37	0,36	1,16
5г	0,44	0,36	1,21
6г	0,52	0,33	1,38

При этом у электродов с чугунным порошком давление водорода, превышающее атмосферное, наблюдается при эквивалентном содержании углерода 0,32 % и более, а у электродов с графитом начиная с содержания 0,16 %.

Давление CO у электродов с чугунным порошком находится, практически на одном уровне, в то время как у электродов с графитом скрытое давление CO в металле шва увеличивается с повышением содержания углерода. Это объясняется тем, что в первом случае с увеличением содержания углерода в наплавленном металле происходит снижение содержания растворенного кислорода и произведение [C]·[O] остается постоянным. У электродов с графитом при повышении содержания углерода в наплавленном металле снижение содержания кислорода менее существенно и [C]·[O] увеличивается. Поэтому наряду с увеличенным давлением водорода, наблюдается и повышение скрытого давления CO до 0,52·10<sup>5</sup> Па, что может служить причиной повышенного выделения CO и, как

следствие, образования пористости швов.

Параллельно с определением химического состава и содержания газов проводилась оценка склонности опытных электродов к пористости при сварке тавровых швов и наплавке. Результаты опытов представлены в табл. 3.

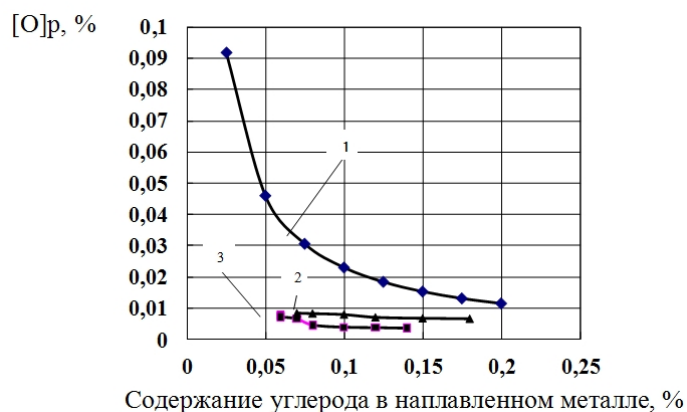
Приведенные результаты расчетов совпадают с результатами технологических испытаний опытных электродов и дают основание утверждать, что причиной пористости электродов с чугунным порошком является водород, а у электродов с графитом, кроме водорода дополнительный вклад в повышение скрытого давления газов вносит CO.

Скрытое давление азота в металле шва всех вариантах электродов было ниже  $0,42 \cdot 10^5$ , что позволяет сделать вывод о хорошей газошлаковой защите металла шва и о том, что азот не играет ведущей роли в образовании пор при раскислении углеродом.

При содержании растворенного кислорода  $[O]_p = 0,15 [O]_{общ}$ , для температуры 1820 К, и концентрации углерода в металле 0,05-0,20 % произведение  $[C] \cdot [O]$  составляет 0,0023 [1].

**Таблица 3** – Результаты технологических испытаний опытных электродов

Вариант электродов	Пористость	
	в наплавленном металле	в тавровом шве
0	Нет пор	Нет пор
1ч	То же	То же
2ч	- « -	- « -
3ч	- « -	- « -
4ч	- « -	- « -
5ч	- « -	Мелкие нитевидные поры
6ч	Мелкие поры в кратере	Поры в корне шва
7ч	Наружные свищи	Свищи по линии сплавления
1г	Нет пор	Нет пор
2г	То же	Мелкие поры
3г	Мелкие поры в кратере	Поры в корне шва
4г	Свищи	Свищи по линии сплавления
5г	Наружные поры-свищи	То же
6г	То же	- « -



**Рис. 1** – Зависимость содержания растворенного

кислорода от содержания углерода в  
наплавленном металле опытных электродов: 1 –  
равновесное содержание  $[C][O] = \text{const}$ ; 2 – с  
графитом; 3 - с Fe-C

Сопоставление экспериментальных данных с равновесной кривой на рис. 1 не обнаружило четкой связи между содержанием кислорода, углерода и пористостью.

Это еще раз подтверждает вывод о том, что пористость ильменитовых электродов, содержащих в качестве раскислителя углерод, вызывает в основном водород. Причиной этого является снижение окислительного потенциала покрытия и развитие кремневосстановительного процесса, особенно при раскислении графитом, что способствует снижению скорости десорбции водорода и образованию пор.

### **Выводы**

1. Пористость швов ильменитовых электродов зависит от количества и вида вводимого углерода в электродное покрытие, а причины порообразования имеют некоторое различие.

2. При использовании углерода в виде графита, за счет течения реакций раскисления углеродом в газовой и шлаковой фазе дуги, снижается окислительный потенциал покрытия, что приводит к развитию кремневосстановительного процесса в металле шва и, как следствие, к снижению скорости выделения газов и к образованию пористости. При этом наряду с ведущей ролью водорода в образовании пор проявляется и повышенное выделение CO, растущее с увеличением содержания графита в покрытии. Выделение CO приводит к кипению сварочной ванны и образованию пор и свищей при быстром охлаждении шва.

3. Раскисление электродного металла сплавом Fe-C происходит, в основном, на стадии капли и в сварочную ванну переходит металл с низким содержанием углерода, кислорода и кремния, поэтому кремневосстановительный процесс в ванне незначителен. Отсутствие избыточного углерода (выше 0,08 %) не приводит к выделению CO и причиной пористости швов является, как и у рутиловых электродов – водород. При вводе чугунного порошка в количествах превышающих оптимальное содержание, для данной шлаковой системы, возможно науглероживание наплавленного металла и, как следствие, образование пористости по схеме, аналогичной для графита.

### **Список использованных источников:**

1. Походня И. К. Газы в сварных швах / И. К. Походня. – М. : Машиностроение, 1972. – 256 с.
2. Новожилов Н. М. Основы металлургии дуговой сварки в газах / М. Н. Новожилов. – М. : Машиностроение, 1979. – 231 с.
3. Галактионова Н. А. Водород в металлах / Н. А. Галактионова. – М. : Металлургия, 1967. – 144 с.

*Калин Н.А., Изотова Е.А.* «Влияние раскисления углеродом на образование пор в металле швов».

В статье показано, что пористость ильменитовых электродов, содержащих в качестве раскислителя углерод, вызывает в основном водород. Причиной этого является снижение окислительного потенциала покрытия и развитие кремневосстановительного процесса,

особенно при раскислении графитом.

**Ключевые слова:** электрод, раскислитель, углерод, чугунный порошок.

**Калин М.А, Изотова К.О.** «Вплив розкислення вуглецем на утворення пор у металі швів».

У статті показано, що пористість ільменитових електродів, що містять у якості розкислювача вуглець, викликає в основному водень. Причиною цього є зниження окисного потенціалу покриття й розвиток кремневідновлювального процесу, особливо при розкисленні графітом.

**Ключові слова:** электрод, розкислювач, вуглець, чавунний порошок.

**Kalin N.A., Izotova E.A.** “Effect of deoxidization of carbon on formation of pores in the metal seams”.

The article shows that the porosity of ilmenite electrode containing carbon as deoxidizers, is mainly hydrogen. the reason for this is to reduce the oxidative capacity of the coating and process development Silicon recovery especially when steel is deoxidized iron.

**Key words:** electrode, deoxidizer, carbon, cast-iron powder.

Стаття надійшла до редакції 11 лютого 2013 р.