



# ВЛИЯНИЕ КИСЛОРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ НА ЛЕГИРОВАНИЕ ТВЕРДОГО РАСТВОРА МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ШВОВ

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

С помощью расчетно-экспериментальной методики выполнен прогноз уровня легирования ферритной матрицы назолегированного металла шва. Показаны результаты сопоставления расчетов, выполненных по предложенной методике, с данными экспериментов, которые показали хорошую достоверность полученных прогнозов. Сделан вывод о возможности использования предложенной методики как для расчета уровня легирования твердого раствора, так и для определения оптимального уровня окислительного потенциала сварочных материалов.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, низколегированные стали, сварочные флюсы, металл шва, ферритная матрица, уровень легирования, окислительный потенциал, расчетно-экспериментальная методика

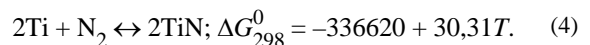
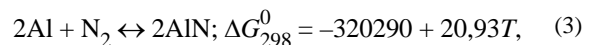
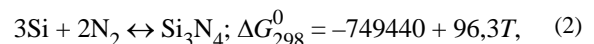
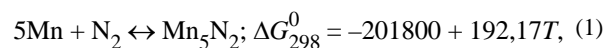
Металлургическая активность агломерированных флюсов определяется их способностью в зависимости от состава легировать или окислять металл шва, интенсифицировать металлургические реакции в газовой, шлаковой или металлической фазах. В статье приведены результаты компьютерного моделирования экспериментов по изучению способности агломерированных флюсов легировать металл шва или связывать в оксиды и нитриды легирующие и другие примеси, которые были введены тем или иным путем в сварочную ванну.

Легирование твердого раствора позволяет существенно изменить как структуру металла швов, так и их механические свойства. Такому влиянию традиционно уделяется большое внимание. Взаимосвязь между легированием феррита, его структурой и механическими свойствами описаны в работах [1–3], на основании которых можно сделать вывод об актуальности работ в области прогноза (а следовательно, и целенаправленного управления) содержания легирующих элементов в твердом растворе.

При выполнении исследований процесс легирования ферритной матрицы обычно рассматривают как цепь последовательных реакций. Такой подход хорошо проиллюстрирован в работе [4], где приведена схема (рис. 1), из которой видно, что при охлаждении сварного шва вначале происходит окисление легирующих элементов, затем та их часть, которая не вступила в реакцию с кислородом, образует нитриды, а то количество легирующих элементов, которое осталось несвязанным ни с кислородом, ни с азотом, растворяется в ферритной матрице. Такая последовательность реакций в сварочной ванне и металле ос-

тывающего шва в определенной мере формализована, однако удобна для расчетов.

Компьютерное моделирование процессов окисления позволяет определить количество легирующих элементов, не связанных в оксиды [5], которое вступает в реакции нитридообразования. В этом случае расчеты, связанные с образованием нитридов, базируются на результатах, полученных при компьютерном моделировании процессов окисления легирующих элементов, и с учетом того, что шлаковая фаза, как правило, не является источником поступления азота в сварочную ванну. Исключение могут составлять сварочные материалы, которые имеют в своем составе азото-содержащие компоненты, например азотистый ферромарганец или нитрид бора. Такие случаи достаточно редки и в данной работе не рассматриваются. Образование нитридов можно представить в виде следующих реакций [6]:



Исходя из результатов измерений, рассмотренных в работе [7], принимаем температуру сварочной ванны 2043 К. Для этой температуры

$$\Delta G_1^0 = 191, \Delta G_2^0 = -553, \Delta G_3^0 = -277, \Delta G_4^0 = -275 \text{ кДж.}$$

Из расчетов видно, что процесс образования нитрида марганца начнется только при температурах ниже 1050 К.

Количество азота, израсходованное на образование нитридов, можно определить из выражения

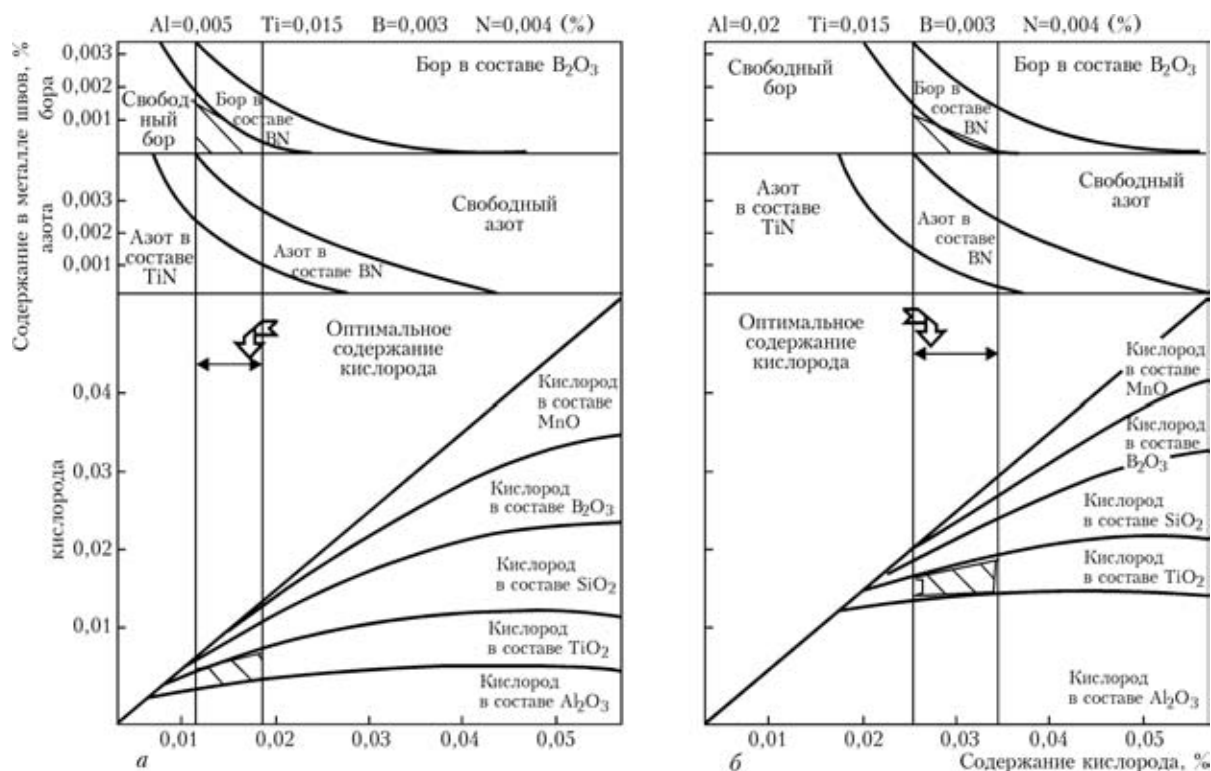


Рис. 1. Схема расчета оптимального содержания кислорода в металле низколегированного шва [4] при низком (а) и высоком (б) содержании в металле алюминия

Таблица 1. Содержание элементов-раскислителей в составе опытных агломерированных флюсов

№ эксперимента	Кислородный потенциал флюса $\pi_0$ , кДж/моль	Содержание элементов-раскислителей в шихте флюса, мас. %		
		Al	Ti	Si
1A	-369	0,5	—	—
1T		—	0,4	—
1AT		0,5	0,2	—
2A	-337	0,5	—	—
2S		—	—	0,5
2SS		—	—	1,0
3S	-307	—	—	0,5
3SS		—	—	1,0
3AT		0,5	0,2	—

$$\Sigma n_N = 2/5n_{Mn} + n_{Ti} + 4/3n_{Si} + n_{Al}$$

где  $\Sigma n_N$  — суммарное количество азота (г/моль), связанного в нитриды;  $n_{Mn}$ ,  $n_{Ti}$ ,  $n_{Si}$ ,  $n_{Al}$  — количество азота (г/моль), вступившего в реакцию соответственно с марганцем, титаном, кремнием и алюминием.

Зная содержание азота в металле шва, значение свободной энергии реакций нитридообразования, и используя методику расчетов, приведенную для случая реакций окисления [5], можно определить количество легирующих элементов, вступивших в реакцию с азотом.

Для проверки соответствия расчетных данных опытным результатам были проведены эксперименты, в ходе которых изготавливали стыковые соединения из низколегированной стали толщиной 20 мм по методике EN 1597-1 [8], предусматривающей получение образцов из чистого наплавленного металла. Сварку выполняли под опытными агломерированными флюсами в сочетании с проволокой Св-08ГА диаметром 4 мм.

Опытные флюсы базировались на шлаковой системе  $MgO-Al_2O_3-SiO_2-CaF_2$ . Путем вариации соотношения между компонентами обеспечивалась возможность изменения кислородного потенциала флюсов. Последний определяли измерением парциального давления кислорода над расплавом шлака  $P_0$  с последующим расчетом в соответствии с формулой  $\pi_0 = RT \ln(P_0)$ . С целью изучения влияния различных элементов-раскислителей на уровень легирования твердого раствора в состав шихты опытных флюсов вводили алюминий, титан и кремний в соответствии с программой, приведенной в табл. 1. Эксперименты выполняли с использованием флюсов повышенной основности ( $\pi_0 = -369$ ), нейтрального (-337) и кислого типа (-307 кДж/моль).

Из металла, наплавленного под опытными флюсами, изготовлены шлифы для металлографического анализа. В процессе исследования с помощью электронной микроскопии изучали структуру металла швов, а также состав твердого раствора.



Т а б л и ц а 2. Результаты расчета количества легирующих элементов, вступивших в реакцию окисления и нитридообразования

№ эксперимента	Доля легирующих элементов (мас. %), содержащаяся в							
	металле шва				оксидах			
	Mn	Si	Ti	Al	Mn	Si	Ti	Al
1A	0,86	0,24	0,025	0,025	0,405	0,12	0,001	0,01
1T	0,70	0,22	0,025	0,019	0,224	0,109	0,012	0,008
1AT	0,75	0,29	0,01	0,029	0,279	0,153	0,0002	0,011
2A	0,73	0,38	0,01	0,02	0,229	0,291	0,0008	0,001
2S	0,85	0,30	0,013	0,01	0,208	0,234	0,0001	0,009
2SS	0,84	0,26	0,01	0,01	0,164	0,181	0,0071	0,009
3S	0,98	0,45	0,012	0,02	0,236	0,342	0,007	0,01
3SS	0,86	0,40	0,023	0,01	0,144	0,323	0,014	0,0069
3AT	0,88	0,44	0,017	0,02	0,169	0,381	0,0072	0,0134

Окончание табл. 2

№ эксперимента	Доля легирующих элементов (мас. %), содержащаяся в							
	нитридах				твердом растворе			
	Mn	Si	Ti	Al	Mn	Si	Ti	Al
1A	0	0,082	0,022	0,014	0,451	0,048	0,001	0,0001
1T	0	0,064	0,013	0,01	0,466	0,027	0,001	0,0002
1AT	0	0,087	0,005	0,017	0,471	0,026	0,0028	0,0002
2A	0	0,045	0,008	0,01	0,51	0,034	0,0032	0
2S	0	0,025	0,009	0	0,64	0,031	0,0033	0,001
2SS	0	0	0	0	0,68	0,039	0,0039	0,001
3S	0	0	0,002	0,005	0,744	0,078	0,0041	0,002
3SS	0	0	0,005	0	0,746	0,071	0,0049	0,003
3AT	0	0	0,002	0,002	0,751	0,064	0,0092	0,0056

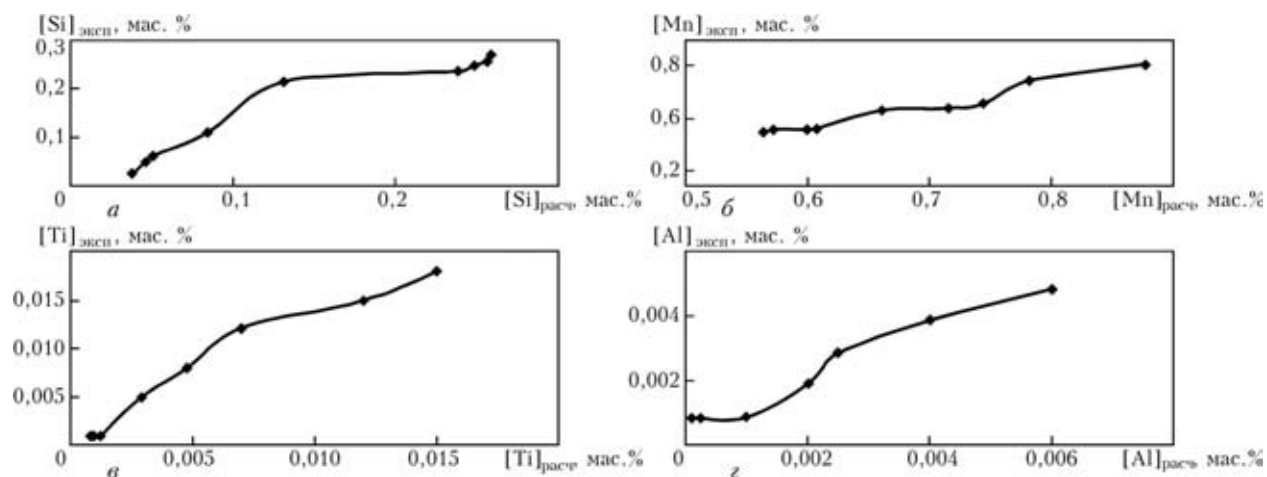


Рис. 2. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных содержания кремния (а); марганца (б); титана (в); алюминия (г) в твердом растворе

Результаты расчетов для некоторых составов металла швов приведены в табл. 2. На рис. 2 приведены результаты сопоставления расчетного содержания легирующих элементов в твердом растворе (данные табл. 2) и содержания легирующих

элементов в твердом растворе, полученного при анализе микрошлифов наплавленного металла на электронном микроскопе, снабженном рентгеноспектральной приставкой «Link». Как видно из приведенных данных, расчетные значения содер-



**Таблица 3.** Содержание микроструктурных составляющих в образцах наплавленного металла, полученных при сварке под опытными флюсами

№ образца	Объемная доля структурной составляющей, %					
	ПФ	ВФ	ИФ	ФУВ	ФНУВ	МАК-фаза
3/1	15...20	9...11	31...37	14...15	24...27	5,4
3/4	15...18	9...12	25...34	16...27	20...23	5,0
3/7	15...20	6...7	30...40	24...25	20...27	3,4
2/1	13...20	3...5	40...45	17...20	23...25	4,0
2/4	13...20	3...9	46...49	13...19	16...18	5,0
2/7	13...23	5...9	43...46	13...18	6...14	2,3
1/1	6...12	2...4	50...55	16...27	17...21	2,5
1/4	5...12	3...5	48...50	12...25	32...37	3,5
1/7	4...10	1...3	44...50	11...15	36...38	2,4

Примечание. ПФ — полигональный феррит; ВФ — феррит Видманштетта; ИФ — игольчатый феррит; ФУВ — феррит с упорядоченной, ФНУВ — неупорядоченной второй фазой.

жания легирующих элементов в феррите достаточно хорошо совпадают с результатами экспериментов. Следовательно, допустимо рассматривать расчетные значения как величины, которые позволяют с определенной степенью точности оценивать уровень легирования твердого раствора. Для проверки сделанного допущения выполнены дополнительные эксперименты по количественной оценке состава микроструктурных составляющих образцов наплавленного металла.

В табл. 3 приведены результаты определения содержания микроструктурных составляющих в наплавленном металле опытных швов. Данные, приведенные в таблице, сопоставляли с результатами расчета содержания легирующих элементов в твердом растворе.

Анализ как расчетных, так и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что если при сварке под флюсами кислого типа ( $\pi_0 = -307$  кДж/моль) твердый раствор легируется в основном марганцем и кремнием, то в случае использования флюсов повышенной основности ( $\pi_0 = -369$  кДж/моль), в твердом растворе присутствуют заметные количества алюминия и титана. Такие различия в легировании феррита несомненно должны сказаться на условиях формирования его структуры.

На рис. 3–5 приведены результаты сопоставления расчетных значений содержания легирующих элементов в твердом растворе с количеством определенных структурных составляющих металла швов.

Исследование влияния легирования твердого раствора на структуру металла швов не являлось целью настоящей статьи, поэтому здесь приведены только некоторые из полученных данных, которые должны показать возможность использования расчетно-экспериментального метода прогнозирования содержания легирующих элементов в твердом растворе для изучения подобных проблем. Так, из данных, приведенных на рис. 3–5, видно, что увеличение содержания в структуре металла швов ИФ связано с возрастанием содержания титана в твердом растворе, а увеличение содержания марганца и кремния вызывает изменение количества ПФ и ВФ соответственно.

Эти данные соответствуют результатам специальных исследований [8–10], поэтому можно сделать вывод, что предложенный расчетно-экспериментальный метод позволяет адекватно оценивать как уровень легирования твердого раствора, так и уровень кислородного потенциала сварочного флюса, при котором можно снизить интенсивность процессов растворения определенных легирующих элементов в феррите с целью получе-

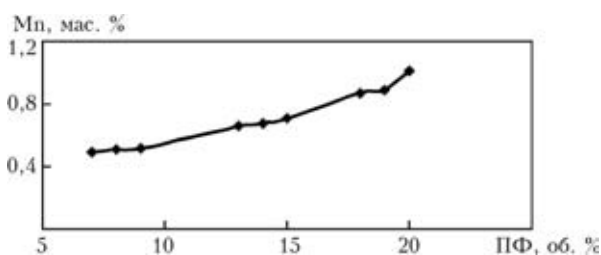


Рис. 3. Взаимосвязь между содержанием марганца в твердом растворе и содержанием полигонального феррита (ПФ) в структуре металла швов

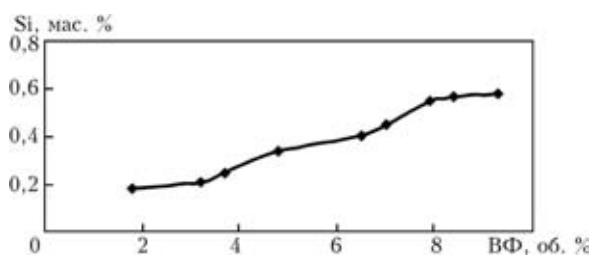


Рис. 4. Взаимосвязь между содержанием кремния в твердом растворе и содержанием феррита Видманштетта (ВФ) в структуре металла швов

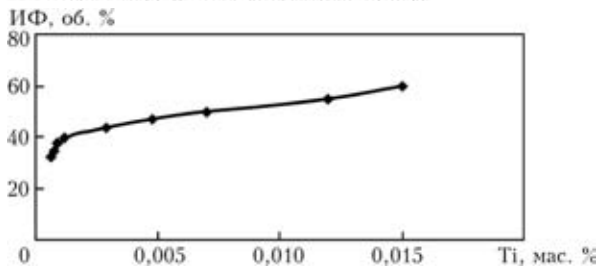


Рис. 5. Взаимосвязь между содержанием титана в твердом растворе и игольчатого феррита (ИФ) в структуре металла швов

ния заданной морфологии структурных составляющих металла швов.

Метод прогнозирования, позволяющий определить пороговое значение кислородного потенциала флюса, при котором начинается легирование твердого раствора, дает возможность установить оптимальный уровень раскисления сварочной ванны. Выше этого предела в металле швов образуется большое количество неметаллических включений и чем больше кислородный потенциал флюса, тем более высокая доля силикатов марганца и/или алюминия будет в составе этих включений. Такие случаи были рассмотрены в работе [5]. Ниже этого предела получают развитие процессы легирования феррита алюминием и титаном, и, как было показано в данном исследовании, чем ниже кислородный потенциал флюса, тем более высокий уровень этого легирования.

Для различных составов флюсов этот предел может быть различным в зависимости от уровня требований к сварочно-технологическим свойствам флюса, его санитарно-гигиеническим характеристикам, регламентированным свойствам металла сварных швов и сварных соединений. Оптимальный уровень раскисления может быть рассчитан на основе компьютерных методов моделирования в случае установления конкретных требований к количеству и составу неметаллических включений, уровню механических свойств металла швов и соответствующей доле ИФ в их структуре.

Results of application of the calculation-experimental method, allowing prediction of the ferritic matrix alloying level, are given. Results of comparison of the calculations made by using the suggested method with the experimental data are presented, showing high reliability of the predictions. A conclusion is made on the possibility of using the suggested method both for calculation of the solid solution alloying level and for evaluation of the optimal level of the oxidation potential of welding consumables.

## Выводы

1. На базе компьютерного моделирования предложен расчетно-экспериментальный метод, который позволяет прогнозировать уровень легирования ферритной матрицы.

2. Сопоставление результатов расчетов, выполненных по предложенной методике, с экспериментальными показали хорошую достоверность полученных прогнозов. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование предложенной методики как для расчета уровня легирования твердого раствора, так и для определения оптимального уровня окислительного потенциала сварочных материалов.

1. *Поволоцкий Д. Я.* Алюминий в конструкционной стали. — М.: Металлургия, 1970. — 270 с.
2. *Лякишев Н. П., Плинер Ю. Л., Лапко С. И.* Легирующие сплавы и стали с титаном. — М.: Металлургия, 1985. — 232 с.
3. *Hannerz N. E.* The influence of silicon on the mechanical properties and on the weldability of mild and high tensile structural steels. Literature survey and own experimental studies. — 55 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-1169-80).
4. *Ohkita S., Horii Y.* Recent development in controlling the microstructure and properties of low alloy steel weld metals // ISIJ Intern. — 1995. — **35**, № 10. — P. 1170-1182.
5. *Головкин В. В.* Моделирование состава неметаллических включений в металле сварных швов ВПНЛ сталей // Автомат. сварка. — 2001. — № 5. — С. 3-7.
6. *Термодинамические свойства неорганических веществ: Справочник / Под ред. А. П. Зефинова.* — М.: Атомиздат, 1965. — 458 с.
7. *Походня И. К., Фрумин И. И.* О температуре сварочной ванны // Автомат. сварка. — 1955. — № 5. — С. 14-24.
8. *EN 1597-1.* Schweißzusätze-ruefung zur Einteilung — Teil 1: Prufstück zur Entnahme von Schweißan Stahl, Nickel und Nickel-legierungen.
9. *Evans G. M.* Effect of manganese on the microstructure and properties of all-weld metal deposits // Welding J. — 1980. — **59**, № 3. — S. 67-75.
10. *Evans G. M.* The effects of silicon on microstructure and properties of C-Mn all-weld metal deposits // Metal Const. — 1986. — **18**, № 7. — P. 438-444.
11. *Davis M. L. E., Pargeter R. J., Bailey N.* Effects of titanium and boron additions to submerged arc welding fluxes // Ibid. — 1983. — **15**, № 6. — P. 338-344.

Поступила в редакцию 17.10.2005