

УДК 621.791.927

В. Г. Салангин, кандидат технических наук, доцент

А. В. Кирсанов, магистрант

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

РАСЧЕТ ЛЕГИРОВАНИЯ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА АКТИВНЫМИ ПРИСАДКАМИ, НАХОДЯЩИМИСЯ В КЕРАМИЧЕСКОМ ФЛЮСЕ

Предложены физическая модель и метод расчета наплавленного металла при сварке и наплавке под керамическими флюсами.

Ключевые слова: дуговая сварка, флюс, присадки, окисление, легирование, моделирование, расчеты.

Применение керамических (легирующих) флюсов при дуговой сварке, содержащих в своем составе частицы металлических присадок в сочетании с выбранной электродной проволокой, позволяют обеспечить изменение химического состава шва в широких пределах. Помимо состава исходных материалов на химический состав наплавленного слоя влияют режимы сварки, определяющие условия плавления и взаимодействия компонентов системы шлак – металл. Все это затрудняет выбор технологических параметров на стадии разработки технологии сварки изделия.

Решению поставленной задачи способствуют расчетные методы определения концентрации элементов в шве при сварке под керамическими флюсами [1]. Анализ показывает, что наиболее универсальными являются методы расчета легирования шва присадками с низким сродством к кислороду, основанные на физической модели процесса [2]. Целью настоящей работы явилось получение расчетных зависимостей, учитывающих окисление активных присадок шлаком.

За основу математической модели расчета принята физическая модель, предполагающая, что при расплавлении флюса частицы легирующего элемента с исходной концентрацией $Me^{фл}$ окисляются и поступают в шлаковую ванну за вычетом потерь на «окисление» кислородом шлака – $Me_{ок}^{шл}$. Находящиеся в шлаке частицы легирующих элементов с концентрацией ($Me^{фл} - Me_{ок}^{шл}$) конвективными потоками выносятся к границе раздела шлак – металл и частично поглощаются последним [3], изменяя концентрацию легирующего элемента в наплавленном металле – $Me^н$. Остающиеся в шлаковой ванне частицы составляют потери элемента на «застывание» в кристаллизующемся шлаке $Me_3^{шл}$. Степень окисления присадок шлаком предлагается оценивать коэффициентом окисленности $k_{ок}$:

$$k_{ок} = Me_{ок}^{шл} / Me^{фл} \tag{1}$$

Исходя из уравнения баланса скоростей поступления присадок с расплавляемым флюсом, перехода их в сварочную ванну, а при кристаллизации в шов и шлак в работе [4] для расчета концентрации элементов с низким сродством к кислороду в металле шва ($Me^ш$) получены выражения:

$$Me^ш = Me^о + \frac{Me^{фл}}{\frac{1}{\phi} + \frac{k_2}{k_3}} \tag{2}$$

$$Me^о = m \times Me^э + (1 - m) \times Me^д \tag{3}$$

$$k_2 = \frac{v_n \times S \times \gamma}{3600 \times m \times I_{св}} = \frac{\alpha_p}{3600 \times m} \tag{4}$$

$$k_3 = k \times k_1 \tag{5}$$

где $Me^о$, $Me^э$, $Me^д$ – исходные концентрации элемента в шве, электроде и детали, %; m – доля электродного металла в шве; ϕ – относительная масса шлака, равная отношению скоростей плавления флюса и металла при сварке; k – коэффициент массопереноса, г/(с см²); k_1 – коэффициент пропорциональности межфазной поверхности взаимодействия металла и шлака в реакционной зоне величине сварочного тока ($I_{св}$), см²/А; k_2 – коэффициент пропорциональности скорости плавления металла величине сварочного тока, (г/А сек); v_n – скорость подачи электрода, см/с; S – площадь поперечного сечения электрода, см²; γ – плотность свариваемого металла, г/см³; α_p – коэффициент расплавления электрода, г/(А час).

Полагая, что при расплавлении частицы легирующих присадок мгновенно окисляются шлаком, исходную концентрацию элементов с высоким сродством к кислороду ($Me_о^{фл}$) в нем можно определить по выражению:

$$Me_о^{фл} = Me^{фл} \times (1 - k_{ок}) \tag{6}$$

Тогда выражение (2) можно записать:

$$Me^ш = Me^о + \frac{Me^{фл} \times (1 - k_{ок})}{\frac{1}{\phi} + \frac{k_2}{k_3}} \tag{7}$$

В случае многослойной наплавки, когда химический состав последующего слоя близок к предыдущему ($Me^о = Me^н$), выражение (7) приводится к виду:

$$Me^н = Me^э + \frac{Me^{фл} \times (1 - k_{ок})}{\frac{1}{\phi} + \frac{k_2}{k_3}} \tag{8}$$

$$k_2' = \frac{\alpha_p}{3600}. \quad (9)$$

Относительная масса шлака при наплавке ϕ' определяется как отношение скоростей плавления флюса и электродной проволоки. Расчеты с применением метода наименьших квадратных отклонений показали, что в диапазоне скоростей сварки от 10 до 30 м/ч величина коэффициента k_3 имеет значение $(5,0) \cdot 10^{-3}$ г/А с.

Выражения (1)–(9) представляют математическую модель процесса легирования металла при сварке под керамическими флюсами. При расчете концентрации в наплавленном металле элементов с низким сродством к кислороду – медь, никель, вольфрам, молибден и др. ($k_{ок} = 0$) – модель показала удовлетворительную точность. Для расширения об-

ласти применения предлагаемых выражений к прогнозированию в шве элементов с высоким сродством кислороду необходимо определить зависимость $k_{ок}$ от условий сварки.

В связи с трудностью определения в шлаке количества окислившегося элемента сведения о количественных соотношениях «окислившегося» и «застывшего» в шлаке компонента ограничены и касаются в основном марганца. Анализ опубликованных экспериментальных данных (см. табл. 1) о влиянии условий сварки на окисление частиц марганца в шлаке показывает (см. табл. 1), что $k_{ок}$ для марганца убывает с увеличением концентрации частиц Mn во флюсе (опыты 1–8), линейного размера частиц (опыты 9–12) и количества железного порошка во флюсе (опыты 18–24).

Таблица 1. Фрагмент массива опытных данных

№ п/п	Содержание Mn во флюсе, %		Коэффициент $k_{ок}$			Содержание Mn в наплавке, %			Относительная масса шлака	Размер частиц	Содержание Fe	Коэффициент активности флюса	Коэффициент K2	Литературный источник
	Исходное	Окислившееся	Опыт	Расчет	Погрешность	Опыт	Расчет	Погрешность						
1	2,50	1,70	0,68	0,61	0,10	0,80	0,96	-0,21	1,00	0,15	0,80	0,064	3,60	[5]
2	3,75	2,20	0,59	0,57	0,03	1,20	1,34	-0,12	1,00	0,15	1,10	0,064	3,60	
3	5,00	2,50	0,50	0,52	-0,04	2,05	1,79	0,13	1,00	0,15	1,40	0,064	3,60	
4	6,20	2,65	0,43	0,48	-0,12	2,70	2,28	0,16	1,00	0,15	1,80	0,064	3,60	
5	8,20	2,70	0,33	0,41	-0,24	4,10	3,30	0,19	1,05	0,15	2,30	0,064	3,60	
6	6,10	2,80	0,46	0,48	-0,05	2,00	2,00	0,00	0,80	0,15	1,80	0,064	3,60	
7	6,30	3,00	0,48	0,48	0,00	2,65	2,38	0,10	1,05	0,15	1,80	0,064	3,60	
8	6,15	2,60	0,42	0,48	-0,14	3,00	2,54	0,15	1,30	0,15	1,80	0,064	3,60	
9	8,20	3,30	0,40	0,46	-0,14	3,15	3,12	0,01	1,10	0,06	2,00	0,064	3,60	
10	8,20	3,10	0,38	0,41	-0,08	3,40	3,37	0,01	1,10	0,15	2,00	0,064	3,60	
11	8,20	2,50	0,30	0,38	-0,25	4,00	3,51	0,12	1,10	0,20	2,00	0,064	3,60	
12	8,20	1,95	0,24	0,21	0,10	5,00	4,36	0,13	1,10	0,50	2,00	0,064	3,60	
13	8,20	0,90	0,11	0,10	0,08	6,00	4,92	0,18	1,10	0,70	2,00	0,064	3,60	
14	8,40	5,50	0,65	0,64	0,03	1,00	2,07	-1,07	0,90	0,15	2,00	0,580	3,60	[6]
15	8,90	4,20	0,47	0,42	0,11	3,30	3,61	-0,09	1,13	0,15	2,10	0,110	3,60	
16	9,40	5,40	0,57	0,59	-0,02	2,45	2,71	-0,11	1,04	0,15	2,10	0,530	3,60	
17	8,90	4,40	0,49	0,51	-0,04	2,95	3,05	-0,04	1,09	0,15	2,10	0,280	3,60	
18	6,10	2,70	0,44	0,48	-0,08	1,60	1,70	-0,06	0,60	0,15	1,70	0,060	3,85	[7]
19	5,30	1,55	0,29	0,39	-0,32	2,10	1,92	0,09	0,70	0,15	27,10	0,066	3,60	
20	5,30	2,30	0,43	0,47	-0,07	2,80	2,14	0,24	1,10	0,15	10,10	0,061	3,60	
21	5,30	1,65	0,31	0,39	-0,24	2,90	2,67	0,08	1,40	0,15	27,10	0,066	3,60	
22	5,30	1,55	0,29	0,35	-0,18	2,95	2,82	0,05	1,40	0,15	35,60	0,070	3,60	
23	5,30	1,40	0,26	0,31	-0,16	3,00	3,05	-0,02	1,50	0,15	44,20	0,075	3,60	
24	5,30	1,35	0,25	0,27	-0,06	3,05	3,19	-0,05	1,50	0,15	53,00	0,083	3,60	

Для практического применения формулы (2) необходимо определить влияние условий сварки на $k_{ок}$. Учитывая линейные зависимости $k_{ок}$ от условий сварки для получения расчетной зависимости $k_{ок}$ марганца от грануляции частиц и концентрации их в шлаке, использовался метод многофакторного планирования эксперимента.

Таблица 2. Значения уровней факторов в опытах

Факторы	Уровни факторов			Интервалы варьирования факторов
	Нижний -1	Основной 0	Верхний +1	
x_1 – содержание Mn во флюсе, Mn ^{фл} , %	5,0	6,6	8,2	1,6
x_2 – линейный размер частиц, d , мм	0,2	0,45	0,7	0,25

Входными параметрами приняты содержание марганца (x_1) и линейный размер частиц (x_2). За от-

клик – Y принимает значение коэффициента окисления – $k_{ок}$. Значения факторов и откликов представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 3. Матрица плана опытов

№ п/п	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	Коэффициент окисленности (Y)
1	+1	-1	-1	+1	0,50
2	+1	-1	+1	-1	0,21
3	+1	+1	-1	-1	0,38
4	+1	+1	+1	+1	0,11

Линейная модель зависимости Y от факторов x_1 и x_2 имеет вид:

$$Y = a_0 + a_1 \times x_1 + a_2 \times x_2, \quad (10)$$

где $a_0 = 0,30$; $a_1 = -0,055$; $a_2 = -0,14$ – коэффициенты, вычисленные по методике [8]. В результате об-

работки данных зависимость $Y = f(x_1, x_2)$ в естественных координатах принимает вид:

$$k_{ок} = 0,30 - 0,055 \times \frac{Mn^{фл} - 6,6}{1,6} - 0,14 \times \frac{d - 0,45}{0,25}, \quad (11)$$

где d – линейный размер частиц во флюсе, мм.

Для учета влияния содержания железа на изменение коэффициента активности флюса введем корректировку в формулу (11). Для этого рассчитаем разность $k_{ок}^{оп}$, полученную по опытным данным табл. 1 с использованием формулы (1) и $k_{ок}$, определенным по выражению (11) для данных с изменяющейся концентрацией Fe порошка во флюсах (%Fe): $\Delta k_{ок} = k_{ок}^{оп} - k_{ок}$. В результате обработки данных (см. опыты 18–24) получена линейная зависимость вида:

$$\Delta k_{ок} = 0,055 \times \%Fe. \quad (12)$$

Аналогично был вычислено изменение $k_{ок}^{оп}$, полученного из опытов, и $k_{ок}$, рассчитанного по выражению (11) от изменения окислительной способности флюса. Окислительная способности флюса, определяемая коэффициентом его активности – $A_{ф}$, определялась по выражениям, предложенными Н. Н. Потаповым [9]. Полученная в результате обработки данных (см. опыты 14–17, табл. 1) зависимость для $\Delta k_{ок}$ может быть аппроксимирована по методу средних погрешностей [10] выражением вида:

$$\Delta k_{ок} = 0,45 \times A_{ф}^{0,5} - 0,1. \quad (13)$$

Учитывая, что с увеличением %Fe и уменьшением $A_{ф}$ величина $\Delta k_{ок}$ уменьшается, итоговое уравнение для расчета $k_{ок}$ в зависимости от условий сварки принимает вид:

$$k_{ок} = 0,2 - 0,055 \times \frac{(Mn_{фл} - 6,6)}{1,6} - 0,14 \times \frac{d - 0,45}{0,25} - 0,005 \times \%Fe + 0,45 \times A_{ф}^{0,5}. \quad (14)$$

Коэффициент окисленности элемента может быть рассчитан из выражения (8), минуя процедуру количественного химического анализа окисленного шлаком элемента:

$$k_{ок} = \left(Me^{фл} - (Me^H - Me^э) \times \left(\frac{1}{\phi'} + \frac{k'}{k_3} \right) \right) / Me^{фл}. \quad (15)$$

Сопоставление результатов расчета $k_{ок}$ по формулам (14) и (15) показывает, что среднее отклонение $\Delta k_{ок}$ составляет в пределах 5 % (см. табл. 1). Полу-

ченный результат позволяет рекомендовать выражение (17) для расчета коэффициента окисленности без определения количества окисленного элемента в шлаке, используя данные химического анализа металла шва. Это является актуальной задачей для практического применения предлагаемой методики расчета легирования шва элементами с высоким сродством к кислороду – Ti, V, Cr и др., т. к. надежные методы химического анализа потерь элементов на окисление шлаком затруднительны.

Используя выражение (16), по формуле (8) были рассчитаны концентрации Mn в наплавленном металле по результатам 67 опытов (см. фрагмент массива данных в табл. 1). Анализ полученных результатов показывает, что в исследованном диапазоне предлагаемая математическая модель отражает закономерности изменения химического состава шва от условий сварки. Средняя погрешность проведенных расчетов не превышает 10 %, что приемлемо для применения предлагаемого метода на практике.

Библиографические ссылки

1. Багрянский К. В. Электродуговая сварка и наплавка под керамическими флюсами. – Киев : Техника, 1976. – 184 с.
2. Буки А. А. Моделирование физико-химических процессов дуговой сварки. – М. : Машиностроение, 1991. – 288 с.
3. Степанов В. В., Буки А. А., Салангин В. Г. Влияние условий сварки на концентрацию легирующих добавок в шлаке // Сварочное производство. – 1977. – № 3. – С. 9–11.
4. Салангин В. Г., Буки А. А. Расчет процесса легирования через керамические флюсы // Теория и практика сварочного производства : межвузовский сборник № 1. – Свердловск, 1977. – С. 24–32.
5. Бесхлебный В. А., Багрянский Л. И., Лаврик П. Ф., Лецинский Л. К. Легирование металла при наплавке под керамическим флюсом // Сварочное производство. – 1968. – № 6. – С. 11–13.
6. Бесхлебный В. А., Лецинский Л. К. Потери легирующих элементов при наплавке (сварке) под керамическим флюсом // Сварочное производство. – 1971. – № 9. – С. 12–14.
7. Бесхлебный В. А., Багрянский К. В., Лецинский Л. К. Особенности легирования металла при наплавке под керамическим флюсом с железным порошком // Автоматическая сварка. – 1968. – № 8. – С. 18–20.
8. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента. – М. : Машиностроение, 1980. – 304 с.
9. Потапов Н. Н. Основы выбора флюсов при сварке сталей. – М. : Машиностроение, 1979. – 168 с.
10. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М. : Наука, 1964. – 608 с.

V. G. Salangin, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU
A. V. Kirsanov, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU

Calculation of alloying the weld with active addition metal in ceramic flux

The physical model and calculation technique for the melt in welding and depositing under ceramic fluxes are proposed.

Keywords: arc welding, flux, additives, oxidation, alloying, modeling, calculations.