

УДК 621.791.927.5

Катренко В. Т., Волков Д. А., Синельник В. В.

РАСЧЕТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕТАЛЛА ПРИ НАПЛАВКЕ САМОЗАЩИТНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

В настоящее время для наплавки различного инструмента все большее применение находит самозащитная порошковая проволока [1, 2]. Состав шихты самозащитной порошковой проволоки и кристаллическая структура составляющих компонентов влияет на сварочно-технологические свойства при наплавке [3]. Особенно это проявляется на равномерном плавлении сердечника порошковой проволоки и оболочки. Это влияет на общее химическое взаимодействие между легирующими элементами и компонентами шихты. Для расчета состава шихты сердечника порошковой проволоки необходимо значение коэффициента перехода η легирующих элементов, которые характеризуют конечный результат отдельных реакций, протекающих на различных этапах перехода легирующего элемента и сварочного материала в наплавленный металл.

Для получения количественных зависимостей между концентрацией легирующих элементов в наплавленном металле и составом сварочных материалов рекомендуется использовать статические методы обработки экспериментальных данных.

Целью данной работы является исследование влияния состава газослакообразующей и легирующей части сердечника на коэффициенты перехода углерода, марганца, кремния, хрома, ванадия, молибдена, вольфрама, железа при наплавке самозащитной порошковой проволокой, построенной на основе плавиковый шпат-перовскитовый концентрат-мрамор.

Для изучения влияния состава газослакообразующих компонентов сердечника на коэффициенты перехода η легирующих элементов были изготовлены опытные порошковые проволоки диаметром 3 мм с содержанием легирующих элементов (%): С 2,0–2,3, Мп 3,3–3,7, Si 0,73–0,83, Cr 7,6–8,8, V 1,25–1,45, Mo 1,05–1,22, W 1,32–1,52. Общее содержание газослакообразующих компонентов составляло 9,9–11,4 %. Коэффициенты перехода находили по уточненной формуле [3] с учетом потерь металла.

Наплавку производили обратной полярности в медную форму автоматом А-874 от источника питания ВДГ – 500 на режиме $I_{СВ} = 280–300$ А, $U_{д} = 25–27$ В, $V_{СВ} = 18$ м/ч, вылет проволоки 30 мм. Для определения потерь металла параллельно осуществлялась наплавка на пластины из стали Ст 3 на том же режиме, а так же было выполнено несколько многослойных валиков для сравнения химического состава металла. Максимальная и относительная погрешности концентрации легирующих элементов в металле, наплавленном в медную форму и в шестом слое многослойного валика, составляла для кремния 8,7 %, для остальных элементов не превышало 4,3 %.

Для получения математических зависимостей между составом газослакообразующих компонентов сердечника порошковой проволоки и коэффициентами перехода η использовали симплексно-решетчатое планирование, что позволило значительно уменьшить количество экспериментов.

Условия опытов и их результаты приведены в табл. 1, по результатам первых 7 опытов были построены уравнения регрессии вида:

$$y = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3, \quad (1)$$

коэффициенты которых, вычисленные по формулам [5], приведены в табл. 2, адекватность полученных моделей проверяли в контрольных точках (табл. 1, опыты 8–16) по критерию

Стюдента. Проверка показала, что неполные кубические модели вида (1) адекватно описывают экспериментальные результаты с вероятностью 95 %, за исключением уравнения регрессии для η_{Si} . По данным опытов 8, 9, 10 это уравнение было дополнено тремя членами видов $b_{ijk}X_i^2X_jX_k$ вместо седьмого слагаемого уравнения (1). Проверка модели неполной четвертой степени по контрольным опытам 7, 11–16 подтвердила ее адекватность.

Средняя относительная погрешность, оцениваемая отношением модуля разности экспериментальных и расчетных коэффициентов перехода η к экспериментальным η , составляет для: $\eta_C - 4,3\%$; $\eta_{Mn} - 4,6\%$; $\eta_{Si} - 6,6\%$; $\eta_{Cr} - 2,5\%$; $\eta_V - 3,15\%$; $\eta_{Mo} - 2,9\%$; $\eta_W - 2\%$; $\eta_{Fe} - 0,42\%$. На основании полученных моделей были построены их графические представления (рис. 1). Как видно из рис. 1 увеличение содержания мрамора в сердечнике за счет плавикового шпата при постоянном количестве перовскитового концентрата приводит к значительному снижению коэффициента перехода углерода, кремния, хрома, ванадия, молибдена, вольфрама, железа в связи с повышением окислительного потенциала газовой фазы [3]. Если же рост содержания мрамора в шихте происходит за счет уменьшения количества перовскитового концентрата при постоянном количестве плавикового шпата, то коэффициенты перехода указанных элементов, за исключением железа снижаются менее интенсивно, а η_C , η_V , η_{Mo} , η_W при малом содержании мрамора даже растут, что связано с некоторым повышением основности шлака при уменьшении перовскитового концентрата.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

№ опыта (индекс проволоки)	Содержание компонентов			Коэффициент перехода η легирующих элементов, %							
	Плавленый шпат	Мрамор	Перовскитов концентрат								
				X ₁ ,	X ₂	X ₃	C	Mn	Si	Cr	V
1	1	0	0	74,7	81,0	85,7	89,5	87,4	95,5	95,8	98,8
2	0,5	0,5	0	68,3	80,5	33,8	85,9	88,5	92,0	93,6	97,9
3	0	1	0	51,0	70,9	21,0	81,1	74,1	82,1	82,9	95,0
4	0	0,5	0,5	60,8	78,1	34,1	84,1	84,9	88,7	89,2	97,7
5	0	0	1	61,6	67,1	52,0	87,8	85,5	85,5	90,0	98,7
6	0,5	0	0,5	72,5	72,7	70,3	90,4	87,4	91,0	92,2	98,8
7	0,33	0,33	0,33	72,1	82,3	36,4	89,4	84,6	89,6	91,1	98,2
8	0,5	0,25	0,25	69,0	86,1	44,9	87,7	80,5	93,8	94,4	99,0
9	0,25	0,5	0,25	73,8	75,7	34,9	89,9	86,1	83,5	88,2	97,3
10	0,25	0,25	0,5	70,2	75,8	42,6	92,0	77,9	92,8	93,0	99,2
11	0,75	0,25	0	67,3	79,2	51,7	86,2	87,7	89,2	93,2	98,8
12	0,25	0,75	0	57,8	77,5	24,1	81,5	83,5	88,0	91,8	97,2
13	0	0,75	0,25	56,0	70,9	23,5	80,9	84,4	88,4	87,7	96,6
14	0	0,25	0,75	63,9	71,2	40,7	85,3	87,4	86,5	92,2	98,8
15	0,25	0	0,75	67,1	70,2	58,2	87,1	85,5	88,7	92,2	99,5
16	0,75	0	0,25	77,3	80,0	80,2	89,0	87,4	91,7	95,2	99,0

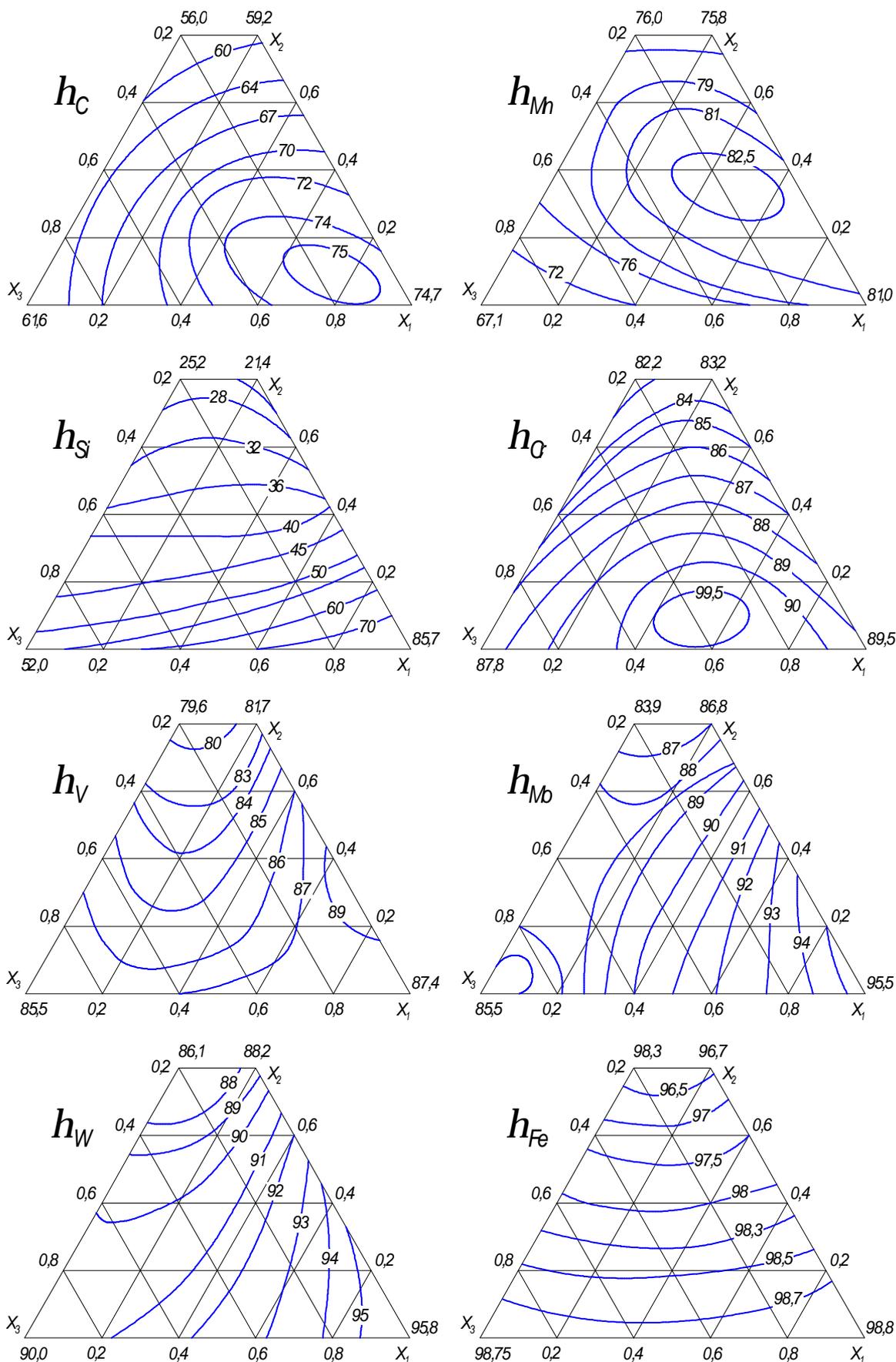


Рис. 1. Зависимость коэффициентов перехода η легирующих элементов от соотношения газшлакообразующих компонентов в шихте порошковой проволоки

При увеличении содержания мрамора в шихте за счет, как плавикового шпата, так и перовскитового концентрата образуется максимум для η_{Mn} . По-видимому, сначала большое влияние оказывает основность шлака, а при значительном содержании мрамора в шихте – окислительный потенциал газовой фазы. Повышение содержания перовскитового концентрата в шихте порошковой проволоки за счет плавикового шпата увеличивает кислотность образующегося шлака, что способствует окислению легирующих элементов и снижению их коэффициентов перехода. Возрастания η_{Si} не наблюдается в связи с наличием в шлаке значительного количества активных окислов железа, хрома, молибдена, вольфрама.

Таблица 2

Расчет коэффициентов уравнений регрессии

Коэффициент регрессии	Коэффициенты уравнений регрессии для							
	η_C	η_{Mn}	η_{Si}	η_{Cr}	η_V	η_{Mo}	η_W	η_{Fe}
b_1	74,7	81,0	85,7	89,5	87,4	95,5	95,8	98,8
b_2	51,0	70,9	21,0	81,1	74,1	82,1	82,9	95,0
b_3	61,6	67,1	52,0	87,8	85,9	85,5	90,0	98,75
b_{12}	21,8	18,2	-78,2	2,4	31,0	12,8	17,0	4,0
b_{13}	17,4	-5,4	5,8	7,0	3,0	2,0	-2,8	0,1
b_{23}	18,0	36,4	-9,6	-1,4	19,6	19,6	11,0	3,3
b_{123}	89,4	103,5	-	64,2	-103,2	-51,9	-34,2	-3,75
b_{1123}	-	-	-467,2	-	-	-	-	-
b_{1223}	-	-	470,4	-	-	-	-	-
b_{1233}	-	-	-360,0	-	-	-	-	-

Из проведенных исследований следует, что для получения высоких коэффициентов перехода легирующих элементов в наплавленный металл содержание мрамора в газошлакообразующей части шихты должно быть не выше 25–30 %, а перовскитового концентрата 40–50 %.

С учетом стабильности протекания дугового процесса, надлежащей кроющей способности и отделимости шлаковой корки при многослойной наплавке, хорошего формирования сварного шва, высоких значений коэффициентов перехода легирующих элементов, минимального разбрызгивания установлено оптимальное соотношение газообразующих компонентов сердечника исследованной порошковой проволоки, а именно – плавиковый шпат: перовскитовый концентрат: мрамор = 5 : 3 : 2.

В дальнейшем была изучена зависимость концентрации легирующих элементов в наплавленном металле от их содержания в порошковой проволоке при оптимальном соотношении газошлакообразующих компонентов сердечника.

Исследовали следующий диапазон содержания легирующих элементов в проволоке (%): $0,94 \leq C \leq 4,43$; $1,12 \leq Mn \leq 8,3$; $0,5 \leq Si \leq 3,34$; $2,12 \leq Cr \leq 17,2$; $0,96 \leq V \leq 4,6$; $0,56 \leq Mo \leq 5,47$; $0 \leq W \leq 8,55$. Было изготовлено 46 проволок с различным сочетанием легирующих элементов в указанном диапазоне. Наплавку выполняли проволокой диаметром 3 мм на режимах:

$$I_{CB} = 200-400 \text{ А}; U_D = 25-30 \text{ В}; I_{CB} = 16-22 \text{ м/ч.}$$

После обработки экспериментальных данных методом многомерного регрессионного анализа [6, 7] по специально разработанной программе на ПЭВМ были получены следующие уравнения регрессии:

$$C_H = 10^{-2} (24,325 C - 0,375 C^2 + 2,666 MnC + 13,171 Si^{0,5}C + 1,864 CrC + 4,24 VC + 0,8682 MoC + 2,4073 WC); \quad (2)$$

$$Mn_H = 10^{-2} (66,634 Mn + 2,9388 Mn^{1,5} + 2,3228 CMn + 11,9585 Mn-Si^{0,5} + 0,373 MnCr); \quad (3)$$

$$Si_H = 10^{-2} (-67,65 Si + 10,7397 CSi + 6,017 SiMn^{0,5} + 55,842 Si^{1,5} - Cr^{0,5}); \quad (4)$$

$$Cr_H = 10^{-2} (95,63 Cr + 0,3755 CCr + 0,5851 SiCr); \quad (5)$$

$$V_H = 10^{-2} (91,95 V + 1,586 CV - 0,912 MoV); \quad (6)$$

$$Mo_H = 0,98 Mo; \quad (7)$$

$$W_H = 0,977 W, \quad (8)$$

где $C_H \dots W_H$ – процентное содержание легирующих элементов в наплавленном металле.

Значения множественного коэффициента корреляции R , дисперсии адекватности S^2_0 , остаточного среднего квадратичного отклонения S_0 , средней относительной погрешности Δ_0 , числа степеней свободы f_0 для этих уравнений, дисперсии воспроизводимости опытов σ^2 (для числа степеней свободы $f = 16$) и расчетная величина критерия Фишера F приведены в табл. 3. Для уравнений (2)–(8) $F < F_{0,05} = 2,16$, что не противоречит гипотезе адекватности.

Таблица 3

Расчетные величины критерия Фишера

Расчетные величины	C	Mn	Si	Cr	V	Mo	W
R	0,9929	0,9987	0,9863	0,9985	0,9979	0,9983	0,9997
S^2_0	0,00489	0,00428	0,00426	0,0158	0,00140	0,0020	0,00139
S_0	0,070	0,065	0,065	0,126	0,037	0,045	0,029
Δ_0	4,58	2,24	9,78	0,96	1,65	1,85	2,0
f_0	38	41	41	43	43	45	45
σ_2	0,00303	0,00268	0,00348	0,0142	0,00098	0,00096	0,00082
F	1,61	1,60	1,22	1,11	1,43	2,08	1,70

Уравнения (2)–(8) позволяют рассчитывать состав наплавленного металла по известному содержанию легирующих элементов Me в порошковой проволоке.

Для определения состава порошковой проволоки по известному содержанию легирующих элементов в наплавленном металле Me_H решали систему уравнений (2)–(8) методом итераций. В качестве начального приближения выбирали Me_H .

При решении системы уравнений с точностью до 0,01 % по содержанию элементов Me в проволоке задача решается за 5–10 итераций, при точности до 0,005 % – за 12–20 итераций. По известному составу ферросплавов и коэффициенту заполнения K_3 находили состав шихты сердечника порошковой проволоки. Все расчеты осуществляли по разработанной программе на ЭВМ.

Например, задача получить наплавленный металл состава (%): C 1,9; Mn 3,8; Si 0,6; Cr 10; V 1,8; Mo 1,5; W 1,7 – была решена за десять итераций. При $K_3 = 0,37$ определено следующее

содержание ферросплавов в шихте (%): FeMn 10,0; FeSi 4,6; Cr 25,0; FeV 9,1; FeMo 5,8; W 4,3; графит 5,55. При наплавке порошковой проволокой на режиме: $I_{СВ} = 280300$ А; $U_{Д} = 25-27$ В; $V_{СВ} = 18$ м/ч – получено следующее содержание легирующих элементов в шестом слое наплавки (%): С 1,84; Mn 3,91; Si 0,53; Cr 9,84; V 1,83; Mo 1,52; W 1,67.

Проведенные исследования позволили разработать составы наплавленного металла и (при соответствующей корректировке состава газшлакообразующих компонентов сердечника) самозащитные порошковые проволоки для наплавки штампового инструмента холодного и горячего деформирования металла [8, 9].

ВЫВОДЫ

1. Для обеспечения высоких коэффициентов перехода легирующих элементов при наплавке комплексно легированной самозащитной порошковой проволокой, построенной на основе плавиковый шпат – мрамор – перовскитовый концентрат, содержание мрамора в газшлакообразующей части шихты сердечника должно быть не выше 25–30 %, а перовскитового концентрата – не выше 40–50 %.

2. Найденные зависимости содержания легирующих элементов в наплавленном металле от их содержания в порошковой проволоке позволяют рассчитывать методом итераций необходимые составы самозащитных порошковых проволок.

3. Разработан состав наплавленного металла и самозащитные порошковые проволоки для наплавки штампового инструмента холодного и горячего деформирования металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.*
2. Юзвенко Ю. А. Порошковые проволоки для наплавки / Ю. А. Юзвенко // *Автоматическая сварка. – 1972. – № 5. – С. 67–70.*
3. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением / А. А. Ерохин. – М. : Машиностроение, 1973. – 448 с.
4. Мусияченко В. Ф. Расчет оптимального легирования металла шва при сварке высокопрочных низколегированных сталей / В. Ф. Мусияченко, О. Г. Касаткин // *Автоматическая сварка. – 1977. – № 11. – С. 17–22.*
5. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. – М. : Наука, 1976. – 390 с.
6. Рабинович И. Я. Статические характеристики и их применение для анализа и классификации систем автоматического регулирования дуговой сварки / И. Я. Рабинович // *Автоматическое регулирование дуговой сварки. – М. : АН СССР, 1953. – С. 10–30.*
7. Каспржак Г. М. Структурная классификация и сравнительный анализ систем автоматического регулирования процесса дуговой сварки / Г. М. Каспржак, В. М. Щитова // *Автоматическое регулирование дуговой сварки. – М. : АН СССР, 1953. – С. 31–56.*
8. Патон Б. Е. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки / Б. Е. Патон, В. К. Лебедев. – М. : Машиностроение, 1966. – С. 75–115.
9. Алевин Л. Е. Полная структурная схема дугового автомата типа АРДС / Л. Е. Алевин // *Труды МВТУ. – 1970. – № 136. – С. 67–117.*
10. Новиков О. Я. Проблемы устойчивости системы электрическая дуга-источник титания / О. Я. Новиков // *Изв. СО АН СССР. – 1975. – Вып. 1. – № 3. – С. 87–103.*
11. Трофимов Н. М. Электрическая схема замещения дуги постоянного тока с неплавящимся электродом / Н. М. Трофимов // *Электричество. – 1977. – № 8. – С. 40–44.*
12. Соколов О. И. Динамические характеристики свободной и сжатой сварочных дуг постоянного тока с неплавящимся электродом / О. М. Соколов, Э. А. Гладков // *Сварочное производство. – 1977. – № 4. – С. 6.*
13. Потапьевский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом / А. Г. Потапьевский. – М. : Машиностроение, 1974. – 27 с.
14. Вагнер Ф. А. Расчет времени образования капли электродного металла / Ф. А. Вагнер // *Автоматическая сварка. – 1977. – № 9. – С. 21–22.*