

Шалимов М.П., Вотинова Е.Б. Расчетно-экспериментальная методика оценки параметров перехода элементов в металл шва при дуговой сварке и совершенствования состава шихты порошковой проволоки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 28–35. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.04

Shalimov M.P., Votnova E.B. Settlement and experimental method of estimation of parameters of transition elements in the weld metal during arc welding and improving the whole charge flux cored wire. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 28–35. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.04

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 1, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.04
УДК 621.791

М.П. Шалимов, Е.Б. Вотинова

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ),
Екатеринбург, Россия

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДА
ЭЛЕМЕНТОВ В МЕТАЛЛ ШВА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
СОСТАВА ШИХТЫ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ**

Приводится описание методики экспериментов и результаты обработки опытных данных для оценки параметров процесса дуговой сварки порошковой проволокой с применением метода полного материального баланса. Она представляет собой систему из трех уравнений. Первое уравнение описывает взаимосвязь усредненного и парциальных коэффициентов перехода; второе – переход элемента из металлической фазы; третье – восстановление элемента из шлаковой фазы. Приведены усредненные и парциальные коэффициенты перехода элементов в наплавленный металл и металл шва. При сварке порошковой проволокой состав наплавленного металла и его сварочно-технологические свойства зависят от условий плавления ленты и шихты и взаимодействия образовавшихся фаз друг с другом и газом. Итогом этих процессов является формирование сварочной ванны определенной массы и состава. Анализ экспериментальных данных позволил выявить взаимосвязь показателей процесса (коэффициентов перехода элементов) с технологическими параметрами. Приведены полученные регрессионные уравнения. Сравнение опытных и расчетных данных показало их хорошую сходимость, что говорит о возможности применения метода полного материального баланса для оценки коэффициентов перехода элементов при дуговой сварке порошковой проволокой. Полученные данные позволяют прогнозировать состав наплавленного металла или металла шва при произвольных параметрах режима сварки порошковой проволокой, а также оценивать эффективность состава шихты. Аналогичным образом можно определить наиболее экономичный вариант состава покрытия электродов. Для этого необходимо рассчитать себестоимость компонентов покрытия для различных вариантов состава, которые дают близкий по концентрациям легирующих элементов наплавленный металл, что гарантирует необходимые эксплуатационные характеристики.

Ключевые слова: дуговая сварка, порошковая проволока, коэффициент перехода элемента, расчет состава металла шва, моделирование сварочных процессов, оптимизация состава, метод полного материального баланса, прогнозирование, состав наплавленного металла, математическое моделирование.

M.P. Shalimov, E.B. Votnova

Ural Federal University named after the first President of the Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

**SETTLEMENT AND EXPERIMENTAL METHOD OF ESTIMATION OF PARAMETERS
OF TRANSITION ELEMENTS IN THE WELD METAL DURING ARC WELDING
AND IMPROVING THE WHOLE CHARGE FLUX CORED WIRE**

The work describes the methods of the experiments and the results of the empirical data for the evaluation of process parameters of arc welding flux cored wire with the full material balance. The model is a three equation system. The first equation describes the interaction between average and partial transition coefficients; the second equation shows the transition of an element from the metal phase; the third one characterizes the reduction of an element from the slag phase. Are averaged and stiffness ratios of transition elements in deposited metal and weld metal. Flux-cored wire welding weld metal composition and its welding technological properties depend on melting bands and charge and interaction formed phases with each other and gas. The result of these processes is the formation of welding bath a certain mass and composition. Analysis of experimental data allowed us to find the relationship process indicators (ratios of transition elements) with technological parameters. Are obtained by regression equations. Comparing experimental and calculated data showed their good convergence, suggesting the possibility of applying the method of complete material balance for the transition coefficients of elements in arc welding flux cored wire. The data obtained allow to predict the composition of welded metal or weld metal with arbitrary parameters of the welding flux cored wire, as well as to assess the effectiveness of the whole. Similarly a more economical variant of electrode coating composition can be determined. For that the cost of different coating compositions should be calculated that give weld deposit with similar concentrations of alloying elements, that ensures the required operational characteristics and resource saving.

Keywords: arc welder, flux-cored wire, coefficient of transition elements, calculation of the weld metal, the simulation of the welding process, optimization of composition, complete material balance method, forecasting, composition of overlying metal, mathematical modeling.

Введение

При сварке порошковой проволокой состав наплавленного металла и его сварочно-технологические свойства зависят от условий плавления ленты и шихты и взаимодействия образовавшихся фаз друг с другом и газом. Экспериментальные данные, полученные для конкретных условий сварки, не позволяют гарантировать точность прогноза при изменившихся технологических параметрах [1–5]. Разработанная методика определения усредненных и парциальных коэффициентов перехода элементов и их зависимости от параметров режима сварки позволила устранить оба недостатка, однако она была применена для ручной дуговой сварки [6–10]. Анализ работ [11–17], а также собственные исследования [18–19] показали, что физико-химические и металлургические процессы при ручной дуговой сварке и дуговой сварке порошковой проволокой являются подобными. Ввиду этого представляет практический интерес применение метода полного материального баланса и основанной на нем методики расчета коэффициентов перехода элементов для дуговой сварки порошковой проволокой. Полученные данные по коэффициентам перехода элементов позволили оценить эффективность содержания шихты порошковой проволоки по концентрации ферросплавов.

Описание эксперимента

Произведена однослойная наплавка валика порошковой проволокой ПП СП10 ($\varnothing = 2,8$ мм) на пластину из стали Ст3сп толщиной 14 мм и на пластину из стали 30ХГСА толщиной 20 мм. Для оп-

ределения состава наплавленного металла была произведена пятислойная наплавка на аналогичных однослойной наплавке режимах. Наплавка производилась в нижнем положении на рекомендованных в технических условиях режимах. На каждую скорость подачи порошковой проволоки режим наплавки настраивался индивидуально.

Обработка результатов экспериментов позволила получить регрессионные уравнения для расчета параметров процесса и коэффициентов перехода элементов в металл шва. Показано, что разработанная методика позволяет исследовать быстротекущие процессы при сварке порошковой проволокой [20].

Дальнейшая разработка методики позволила применить разработанные уравнения для совершенствования состава шихты порошковой проволоки.

Результаты исследований

Параметры режимов процесса и данные опытов после обработки позволили представить результаты в виде, удобном для дальнейшего использования (табл. 1) [20].

Был проведен анализ расчетных данных и результатов эксперимента [20]. При проведении расчетов удобнее оперировать данными, пересчитанными на 100 г расплавленной порошковой проволоки.

Расчеты с учетом коэффициента заполнения позволили определить содержание металлических и неметаллических компонентов в шихте порошковой проволоки. Общая масса металлических компонентов в 100 г порошковой проволоки составила 17,99 г, а неметаллических – 11,51 г.

Таблица 1

Результаты опытов по наплавке порошковой проволокой ПП СП10

Вычисляемая величина	Формула	Результат		
		$\varnothing = 2,8$ мм, $K_{\text{зап}} = 0,295$		
Скорость подачи проволоки, м/ч	$V_{\text{под}}$	125,0	160,0	182,0
Сварочный ток, А	$I_{\text{св}}$	300	350	400
Напряжение дуги, В	$U_{\text{д}}$	25	27	30
Мощность дуги, Вт	$P_{\text{д}}$	7500	9450	12000
Время наплавки, с	$t_{\text{св}}$	36,0	39,2	29,1
Масса наплавленного металла $m_{\text{напл}}^{\text{ме}}$	$m_{\text{н-шл}} - m_{\text{пл}}$	25,0	38,0	45,0
Масса наплавленного шлака $m_{\text{напл}}^{\text{шлака}}$	$m_{\text{н-бр}} - m_{\text{н-шл}}$	2,8	3,4	4,0
Расход порошковой проволоки $m_{\text{эл}}$	$m_{\text{эл}} - m_{\text{ог}}$	50,0	69,7	58,8
Масса наплавленного шлака на 100 г порошковой проволоки, г (опыт/расчет)	$(m_{\text{напл}}^{\text{шлака}})_{100}$	5,6/5,6	4,9/4,9	6,8/6,8
Масса наплавленного металла на 100 г порошковой проволоки, г (опыт/расчет)	$(m_{\text{напл}}^{\text{ме}})_{100}$	50,0/50,0	54,5/54,5	76,5/76,5

Окончание табл. 1

Вычисляемая величина	Формула	Результат		
		$\varnothing = 2,8 \text{ мм}, K_{\text{зап}} = 0,295$		
Масса испарившихся компонентов неметаллической части шихты на 100 г порошковой проволоки, г	$m_{\text{исп}}$	6,598	6,598	6,598
Масса шихты, потерянной на испарение металлических компонентов и разбрызгивание на 100 г порошковой проволоки, г (опыт/расчет)	$m_{\text{бр}}$	37,8/37,8	34,0/34,3	10,1/10,1
Доля участия основного металла в металле шва при однослойной наплавке, % (опыт/расчет)	$\gamma_{\text{ом}}$	0,33/0,33	0,38/0,38	0,42/0,42
Коэффициент потерь	$K_{\text{пот}}$	0,435	0,384	–
Усредненные коэффициенты перехода элементов в металл шва из основного металла при однослойной наплавке (опыт/расчет)	$\bar{\eta}_{\text{C}}$	0,981/0,980	0,993/0,993	1,0/0,999
	$\bar{\eta}_{\text{Si}}$	0,690/0,690	0,802/0,802	0,886/0,887
	$\bar{\eta}_{\text{Mn}}$	0,854/0,854	0,908/0,908	0,983/0,983
	$\bar{\eta}_{\text{Ni}}$	0,563/0,561	0,824/0,822	0,857/0,861
Усредненные коэффициенты перехода элементов в наплавленный металл при пятислойной наплавке (опыт/расчет)	$\bar{\eta}_{\text{C}}$	0,630/0,630	–/0,770	0,850/0,830
	$\bar{\eta}_{\text{Mn}}$	0,754/0,754	–/0,741	0,731/0,730
	$\bar{\eta}_{\text{Cr}}$	0,549/0,550	–/0,556	0,635/0,635
	$\bar{\eta}_{\text{Ti}}$	0,010/0,010	–/0,013	0,015/0,014
	$\bar{\eta}_{\text{Si}}$	0,338/0,338	–/0,346	0,351/0,351

Количество металлических компонентов в шихте на 100 г порошковой проволоки:

Компонент	Fe	C	Si	Mn	Al	Cr	Ti	Cu
Масса, г	16,123	0,009	0,243	0,945	0,504	0,002	0,163	0,001

Количество неметаллических компонентов в шихте на 100 г порошковой проволоки:

Компонент	Na_2SiF_6	CaCO_3	MgO	SiO_2	CaF_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	ZrO_2
Масса, г	1,030	1,456	0,03	0,205	4,869	3,741	0,020	0,119	0,040

При нагреве и плавлении порошковой проволоки отдельные компоненты, имеющие относительно низкую температуру испарения или диссоциации, удаляются в газ. Расчет показал, что в газ из шихты при нагреве 100 г порошковой проволоки удаляется 6,60 г компонентов [20].

В шлак из шихты порошковой проволоки переходит 4,91 г неметаллических компонентов. По опытным данным масса образовавшегося шлака во всех опытах больше полученного значения. Это свидетельствует об окислении отдельных металлических компонентов шихты и ленты в процессе наплавки [20].

Состав шлака по смешению представлен ниже:

Компонент	CaO	MgO	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	ZrO_2
Содержание, мас. %	15,41	0,61	4,17	76,16	0,41	2,42	0,82

Масса наплавленного металла без учета окисления, испарения и разбрызгивания на 100 г порошковой проволоки составляет 88,49 г. Состав наплавленного металла по смешению [20] представлен ниже:

Компонент	C	Si	Mn	Al	Cr	Ti	Cu
Содержание, мас. %	0,074	0,299	1,367	0,570	0,082	0,184	0,001

В табл. 2 приведены концентрации компонентов в наплавленном металле по данным химического анализа.

Таблица 2

Состав наплавленного металла по данным химического анализа

№ п/п	Компонент	Содержание, мас. %		
		$V_{\text{под}}, \text{м/ч}$		
		125	160	182
1	C	0,047	0,056	0,063
2	Si	0,175	0,180	0,184
3	Mn	1,03	1,015	1,00
4	Al	0,051	0,050	0,049
5	Cr	0,045	0,049	0,052
6	Ti	0,053	0,054	0,055

Полученные экспериментальные данные позволили представить зависимости отдельных показателей процесса в виде регрессионных уравнений [20]:

$$m_{\text{бр}} = 60,050 + 0,797V_{\text{под}} - 16,250P_{\text{д}},$$

где $m_{\text{бр}}$ – масса шихты, потерянной на разбрызгивание и испарение металлических компонентов на 100 г порошковой проволоки, г; $V_{\text{под}}$ – скорость подачи порошковой проволоки, м/ч; $P_{\text{д}}$ – мощность дуги, кВт.

Зависимости для массы наплавленного металла:

$$m_{\text{напл}}^{\text{мс}} = 26,120 - 0,678V_{\text{под}} + 14,484P_{\text{д}}$$

и массы наплавленного шлака:

$$m_{\text{напл}}^{\text{шпл}} = 7,098 - 0,118V_{\text{под}} + 1,767P_{\text{д}}.$$

Доля участия основного металла в металле сварного шва описывается следующим уравнением:

$$\gamma_{\text{ом}} = 0,153 + 0,001V_{\text{под}} + 0,007P_{\text{д}},$$

где $\gamma_{\text{ом}}$ – доля участия основного металла в металле шва.

Описание методики расчета коэффициентов перехода

Определение парциальных коэффициентов перехода заключается в решении системы уравнений с тремя неизвестными [19]:

$$\left\{ \begin{aligned} \eta_{\text{Э}_i} &= a\eta_{\text{Э}_i}^{\text{л}} + b\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ф}} + c\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ш}} = \\ &= a(1 - K_1^{\text{Э}_i}) + b(1 - K_2^{\text{Э}_i}) + cK_3^{\text{Э}_i}, \\ m_{\text{Э}_i} &= m_{\text{пр}}(1 - K_{\text{пот}}) \cdot \left\{ (1 - K_{\text{зап}}) \frac{[\text{Э}_i]_{\text{л}}}{100} (1 - K_2^{\text{Э}_i}) + \right. \\ &+ K_{\text{зап}} \cdot \left(\sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\text{Э}_i]_k}{100} (1 - K_1^{\text{Э}_i}) + \right. \\ &\left. \left. + \left[\sum_{j=1}^j \frac{\% j (\text{Э}_{\text{in}} \text{O}_m)_j}{100} \frac{M_{\text{Э}_i}}{M_{\text{Э}_{\text{in}} \text{O}_m}} K_3^{\text{Э}_i} \right] \right\}, \\ m_{\text{Э}_{\text{in}} \text{O}_m} &= \frac{m_{\text{пр}}(1 - K_{\text{пот}})}{1 - K_{\text{зап}}} \cdot \left\{ \frac{[\text{Э}_i]_{\text{л}}}{100} \frac{M_{\text{Э}_{\text{in}} \text{O}_m}}{M_{\text{Э}_i}} K_2^{\text{Э}_i} + \right. \\ &+ K_{\text{зап}} \cdot \left(\sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\text{Э}_i]_k}{100} \frac{M_{\text{Э}_{\text{in}} \text{O}_m}}{M_{\text{Э}_i}} K_1^{\text{Э}_i} + \right. \\ &\left. \left. + \left(\sum_{j=1}^j \frac{\% j (\text{Э}_{\text{in}} \text{O}_m)_j}{100} \right) (1 - K_3^{\text{Э}_i}) \right\}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где $\eta_{\text{Э}_i}$ – общий, усредненный коэффициент перехода элемента Э_i в наплавленный металл, a, b, c – доли участия ленты порошковой проволоки, ферросплавов и восстановленного из шлака металла в наплавленном металле; $\eta_{\text{Э}_i}^{\text{л}}, \eta_{\text{Э}_i}^{\text{ф}}, \eta_{\text{Э}_i}^{\text{ш}}$ – парциальные коэффициенты перехода элемента Э_i в наплавленный металл из ленты, ферросплавов и шлака, $m_{\text{Э}_i}$ – масса элемента Э_i в данном объеме металла, кг; $m_{\text{пр}}$ – масса порошковой проволоки, кг; $K_{\text{пот}}$ – коэффициент потерь, учитывающий испарение компонентов и разбрызгивание металла; $K_{\text{зап}}$ – коэффициент заполнения; $[\text{Э}_i]_{\text{л}}$ – концентрация компонента Э_i в ленте порошковой проволоки, мас. %; $\% \text{фер}_k$ – концентрация ферросплава k в шихте порошковой проволоки, мас. %; $[\text{Э}_i]_k$ – концентрация компонента Э_i в ферросплаве k , мас. %; $\% j$ – концентрация минерала j в шихте порошковой проволоки, мас. %; $(\text{Э}_{\text{in}} \text{O}_m)_j$ – концентрация оксида $\text{Э}_{\text{in}} \text{O}_m$ в минерале j , мас. %; $M_{\text{Э}_i}$ – атомная масса элемента Э_i , кг/моль; $M_{\text{Э}_{\text{in}} \text{O}_m}$ – молекулярная масса оксида $\text{Э}_{\text{in}} \text{O}_m$, кг/моль; $m_{\text{Э}_{\text{in}} \text{O}_m}$ – масса оксида $\text{Э}_{\text{in}} \text{O}_m$ в шлаке, кг.

При выводе уравнений модели были приняты те же допущения и упрощения, что и для ручной дуговой сварки [6].

Были рассчитаны значения усредненных и парциальных коэффициентов перехода элементов из порошковой проволоки в наплавленный металл и их зависимости от скорости подачи порошковой проволоки и мощности дуги (табл. 3).

Таблица 3

Результаты эксперимента по однослойной наплавке ПП СП 10

Вычисляемая величина	Обозначение	Результат		
		$\varnothing = 2,8 \text{ мм}, K_{\text{зап}} = 0,295$		
		Скорость подачи проволоки $V_{\text{под}}$, м/ч		
		125	160	182
Коэффициенты перехода элементов в наплавленный металл из ленты (опыт/расчет)	$\eta_{\text{C}}^{\text{л}}$	0,640/0,641	-/0,767	0,813/0,813
	$\eta_{\text{Mn}}^{\text{л}}$	0,630/0,630	-/0,532	0,388/0,389
	$\eta_{\text{Cr}}^{\text{л}}$	0,521/0,521	-/0,605	0,665/0,665
	$\eta_{\text{Si}}^{\text{л}}$	0	0	0
Коэффициенты перехода элементов в наплавленный металл из ферросплавов шихты (опыт/расчет)	$\eta_{\text{C}}^{\text{ф}}$	0,642/0,642	-/0,788	0,861/0,860
	$\eta_{\text{Mn}}^{\text{ф}}$	0,795/0,795	-/0,820	0,838/0,838
	$\eta_{\text{Cr}}^{\text{ф}}$	0,563/0,564	-/0,615	0,644/0,643
	$\eta_{\text{Si}}^{\text{ф}}$	0,420/0,420	-/0,437	0,442/0,442
Коэффициенты перехода элементов в наплавленный металл из неметаллических компонентов шихты (опыт/расчет)	$\eta_{\text{Si}}^{\text{ш}}$	0,650/0,648	-/0,457	0,320/0,310

После обработки полученных данных (см. табл. 1, 3) выведены регрессионные уравнения, связывающие усредненные и парциальные коэффициенты перехода элементов в наплавленный металл с мощностью дуги $P_{\text{д}}$, кВт, и скоростью подачи $V_{\text{под}}$, м/ч:

Усредненные коэффициенты перехода элементов в наплавленный металл
$\bar{\eta}_{\text{C}} = 0,140 + 0,005V_{\text{под}} - 0,018P_{\text{д}}$
$\bar{\eta}_{\text{Mn}} = 0,803 - 0,0003V_{\text{под}} - 0,0015P_{\text{д}}$
$\bar{\eta}_{\text{Cr}} = 0,497 - 0,003V_{\text{под}} + 0,057P_{\text{д}}$
$\bar{\eta}_{\text{Ti}} = -0,0004 + 1,49 \cdot 10^{-4} V_{\text{под}} - 0,0011P_{\text{д}}$
$\bar{\eta}_{\text{Si}} = 0,309 + 0,00023V_{\text{под}}$
Парциальные коэффициенты перехода элементов в наплавленный металл
$\eta_{\text{C}}^{\text{л}} = 0,203 + 0,005V_{\text{под}} - 0,025P_{\text{д}}$
$\eta_{\text{Mn}}^{\text{л}} = 1,011 + 6,7 \cdot 10^{-4} \cdot V_{\text{под}} - 0,062P_{\text{д}}$
$\eta_{\text{Cr}}^{\text{л}} = 0,218 + 0,0021V_{\text{под}} - 0,0054P_{\text{д}}$
$\eta_{\text{C}}^{\text{ф}} = 0,131 + 0,005V_{\text{под}} - 0,015P_{\text{д}}$
$\eta_{\text{Mn}}^{\text{ф}} = 0,705 + 6,2 \cdot 10^{-4} \cdot V_{\text{под}} + 0,0017P_{\text{д}}$
$\eta_{\text{Cr}}^{\text{ф}} = 0,385 + 0,0016V_{\text{под}} - 0,0028P_{\text{д}}$
$\eta_{\text{Si}}^{\text{ф}} = 0,361 + 7,3 \cdot 10^{-4} \cdot V_{\text{под}} - 0,0043P_{\text{д}}$
$\eta_{\text{Si}}^{\text{ш}} = 1,340 - 0,0043V_{\text{под}} - 0,0206P_{\text{д}}$

Данные, приведенные в табл. 1 и 3, показывают хорошую сходимость опытных и расчетных значений.

Уравнения (1) позволяют решить и обратную задачу: по данным о коэффициентах перехода оценить эффективность состава шихты порошковой проволоки. Расчеты показали следующие значения:

- содержание ферросилиция по расчету – 1,4 мас. %, в шихтовке – 1,4 мас. %;
- содержание ферротитана по расчету – 1,4 мас. %, в шихтовке 1,7 мас. %;
- содержание ферромарганца по расчету 3,4 мас. %, в шихтовке 3,5 мас. %;
- содержание железного порошка по расчету 40–60 мас. %, в шихтовке 52,8 мас. %;
- содержание алюминиевого порошка по расчету 1–2 мас. %, в шихтовке 1,6 мас. %.

Выводы

Впервые получены данные по усредненным и парциальным коэффициентам перехода элементов в наплавленный металл при сварке порошковой проволокой ПП СП10 и по их зависимостям от параметров режима.

Практически для всех легирующих элементов наблюдается более сильное окисление из ленты, чем из ферросплавов шихты порошковой проволоки. Это, скорее всего, связано с тем, что капли металла, образующиеся при плавлении ленты, непосредственно контактируют при высокой температуре

с компонентами воздуха, а капли ферросплавов падают в зону дуги покрытыми пленкой шлака.

Наиболее интенсивно из шихты порошковой проволоки окисляется алюминий. Об этом свидетельствуют концентрации оксида алюминия в шлаке, которые оказались примерно на порядок больше, чем по смешению, и алюминия в наплавленном металле, которые на порядок меньше, чем по смешению.

Получены зависимости массы металлической и шлаковой ванн от параметров режима сварки порошковой проволокой ПП СП10.

Впервые определены коэффициенты потерь металла при дуговой сварке порошковой проволокой.

Предложенная методика позволяет рассчитывать содержание ферросплавов в шихте порошковой проволоки, а разработанный состав для ПП СП10 близок к эффективному.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, контракт № Н979.42Б.002/17 «Расчетно-экспериментальное исследование процессов взаимодействия и моделирование перехода элементов в металл при сварке порошковыми проволоками для оценки эффективности состава шихты».

Список литературы

1. Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов / под ред. И.К. Походни. – Киев: Наукова думка, 1990. – 223 с.
2. Ерохин А.А. Кинетика металлургических процессов дуговой сварки. – М.: Машиностроение, 1964. – 256 с.
3. Моделирование структуры, свойств и процессов межфазного взаимодействия в системе металл–оксидный расплав–газ / В.Н. Бороненков, М.И. Зиниград, Л.И. Леонтьев [и др.]; под ред. акад. Л.И. Леонтьева; УрО РАН. – Екатеринбург, 2010. – 452 с.
4. Петров Г.Л. Сварочные материалы. – Л.: Машиностроение, 1972. – 280 с.
5. Походня И.К., Головкин В.Н. Роль стадий капли и ванны в окислении марганца и кремния при сварке в углекислом газе порошковой проволокой // Автоматическая сварка. – 1974. – № 10. – С. 5–6.
6. Вотинова Е.Б., Шалимов М.П. Разработка методики расчета состава металла шва при сварке покрытыми электродами или порошковой проволокой // Сварка и диагностика. – 2011. – № 5. – С. 31–35.
7. Вотинова Е.Б., Шалимов М.П., Разиков Н.М. Методика определения парциальных коэффициентов перехода элементов при ручной дуговой сварке // Сварка и диагностика. – 2012. – № 1. – С. 28–31.
8. Шалимов М.П., Вотинова Е.Б., Михайлицын С.В. Определение парциальных коэффициентов перехода элементов в наплавленный металл при сварке рутиловыми электродами // Сварка и диагностика. – 2016. – № 5. – С. 54–57.

9. Вотинова Е.Б., Шалимов М.П. Методика расчета и совершенствования состава покрытия сварочных электродов // Сварка и диагностика. – 2016. – № 6. – С. 46–48.

10. Shalimov M.P., Votina E.B. Application of the Complete Material Balance Method for development of mathematical model of the process interaction of phase in manual arc welding // The Optimization of the Composition, Structure and Properties of Metals, Oxides, Composites, Nano and Amorphous Materials: Proceedings of the sixteenth Israeli – Russian Bi-National Workshop / Ariel University Israel. – 2017. – P. 101–109.

11. Походня И.К. Математическое моделирование процессов взаимодействия металла с газами при дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 2003. – № 2. – С. 3–10.

12. Быков А.Н., Ерохин А.А. Металлургические процессы окисления ферромарганца в электродных покрытиях при их нагреве // Автоматическая сварка. – 1961. – № 9. – С. 10–19.

13. Потаповский А.Г. Влияние составляющих режима сварки тонкой проволокой в среде углекислого газа на интенсивность металлургических реакций // Автоматическая сварка. – 1958. – № 2. – С. 11–18.

14. Петров Г.Л., Минаков И.Т. Характер взаимодействия металла и флюса при автоматической сварке хромоникелевой аустенитной электродной проволокой // Сварка: сб. ст. – Л.: Судпромгиз, 1962. – Вып. 5. – 149 с.

15. Фрумин И.И. Легирование наплавленного металла при износостойкой наплавке. – Киев: Изд-во АН УССР, 1957. – 64 с.

16. Бороненков В.Н., Саламатов А.М. Прогнозирование химического состава металла шва при дуговой сварке методом математического моделирования процессов взаимодействия металла, шлака и газа / Урал. политехн. ин-т. – Свердловск, 1985. – 50 с. Деп. в Черметинформации. № 1591.

17. Мазуровский В.Л. Физико-химические основы разработки современных сварочных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.04. – Екатеринбург, 2004. – 145 с.

18. Вотинова Е.Б., Шалимов М.П. Физическая модель процесса сварки покрытыми электродами или порошковой проволокой // Сварка: наука, практика, образование: сб. докл. науч.-техн. конф. «Сварка. Контроль и диагностика» / УГТУ-УПИ. – Екатеринбург, 2009. – С. 17–19.

19. Вотинова Е.Б., Шалимов М.П. Моделирование процесса дуговой сварки порошковой проволокой // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2015. – Т. 17, № 2. – С. 99–109.

20. Вотинова Е.Б., Шалимов М.П., Табатчиков А.С. Оценка параметров процесса дуговой сварки порошковой проволокой // Металлургия: технологии, инновации, качество: тр. XX Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. / под ред. Е.В. Протопопова; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2017. – Ч. 2. – С. 273–277.

References

1. Metallurgiiia dugovoi svarki. Protssessy v duge i plavlenie elektrodov [Arc welding metallurgy. Arc welding and electrode melting processes]. Ed. I.K. Pokhodni. Kiev: Naukova dumka, 1990, 223 p.

2. Erokhin A.A. Kinetika metallurgicheskikh protsessov dugovoi svarki [Kinetics of metallurgical arc welding processes]. Moscow: Mashinostroenie, 1964, 256 p.
3. Boronenkov V.N., Zinigrad M.I., Leont'ev L.I. et al. Modelirovanie struktury, svoistv i protsessov mezhfaznogo vzaimodeistviia v sisteme metall–oksidnyi rasplav–gaz [Modeling of structure, properties and processes of interphase interaction in the system of metal-oxide melt-gas]. Ed. akad. L.I. Leont'eva; Ural'skoe Otdelenie Rossiiskoi Akademii Nauk. Ekaterinburg, 2010, 452 p.
4. Petrov G.L. Svarochnye materialy [Welding materials]. Leningrad: Mashinostroenie, 1972, 280 p.
5. Pokhodnia I.K., Golovko V.N. Rol' stadii kapli i vannы v okislenii margantsa i kremniia pri svarke v uglekislom gaze poroshkovoi provolokoi [The role of droplet and bath stages in manganese and silicon oxidation during carbon dioxide cored wire welding]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1974, no. 10, pp. 5–6.
6. Votina E.B., Shalimov M.P. Razrabotka metodiki rascheta sostava metalla shva pri svarke pokrytymi elektrodami ili poroshkovoi provolokoi [Development of a method for calculating the weld metal composition when welding with coated electrodes or flux-cored wire]. *Svarka i diagnostika*, 2011, no. 5, pp. 31–35.
7. Votina E.B., Shalimov M.P., Razikov N.M. Metodika opredeleniia partial'nykh koeffitsientov perekhoda elementov pri ruchnoi dugovoi svarke [Methodology for determination of partial element transfer coefficients at manual arc welding]. *Svarka i diagnostika*, 2012, no. 1, pp. 28–31.
8. Shalimov M.P., Votina E.B., Mikhailitsyn S.V. Opredelenie partial'nykh koeffitsientov perekhoda elementov v naplavlennoi metall pri svarke rutilovymi elektrodami [Determination of partial transfer coefficients of elements into the clad metal at welding by rutile electrodes]. *Svarka i diagnostika*, 2016, no. 5, pp. 54–57.
9. Votina E.B., Shalimov M.P. Metodika rascheta i sovershenstvovaniia sostava pokrytiia svarochnykh elektrodov [Methods of calculation and improvement of welding electrode coating composition]. *Svarka i diagnostika*, 2016, no. 6, pp. 46–48.
10. Shalimov M.P., Votina E.B. Application of the Complete Material Balance Method for development of mathematical model of the process interaction of phase in manual arc welding. *The Optimization of the Composition, Structure and Properties of Metals, Oxides, Composites, Nano and Amorphous Materials: Proceedings of the sixteenth Israeli – Russian Bi-National Workshop. Ariel University Israel*, 2017, pp. 101–109.
11. Pokhodnia I.K. Matematicheskoe modelirovanie protsessov vzaimodeistviia metalla s gazami pri dugovoi svarke [Mathematical modeling of the processes of interaction between metal and gases at arc welding]. *Avtomaticheskaia svarka*, 2003, no. 2, pp. 3–10.
12. Bykov A.N., Erokhin A.A. Metallurgicheskie protsessы okisleniia ferromargantsa v elektrodnykh pokrytiakh pri ikh nagreve // *Avtomaticheskaia svarka*. – 1961. – № 9. – S. 10–19.
13. Potap'evskii A.G. Vliianie sostavliaiushchikh rezhima svarki tonkoi provolokoi v srede uglekislogo gaza na intensivnost' metallurgicheskikh reaktsii [Influence of components of the thin wire welding regime in carbon dioxide on the intensity of metallurgical reactions]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1958, no. 2, pp. 11–18.
14. Petrov G.L., Minakov I.T. Kharakter vzaimodeistviia metalla i fluasa pri avtomaticheskoi svarke khromonikelevoi austenitnoi elektrodnoi provolokoi [Character of interaction between metal and flux at automatic welding with chrome-nickel austenitic electrode wire]. *Svarka: sbornik statei*. Leningrad: Sudpromgiz, 1962, iss. 5, 149 p.
15. Frumin I.I. Legirovanie naplavlennogo metalla pri iznosostoikoii naplavke [Clad metal alloying with wear-resistant cladding]. Kiev: Izdatel'stvo Akademii Nauk USSR, 1957, 64 p.
16. Boronenkov V.N., Salamatov A.M. Prognozirovaniie khimicheskogo sostava metalla shva pri dugovoi svarke metodom matematicheskogo modelirovaniia protsessov vzaimodeistviia metalla, shlaka i gaza [Prediction of the chemical composition of the weld metal at arc welding by the method of mathematical modeling of the processes of interaction of metal, slag and gas]. Ural'skii politekhnicheskii institut. Sverdlovsk, 1985. 50 p. Dep. v Chermetinformatsii, no. 1591.
17. Mazurovskii V.L. Fiziko-khimicheskie osnovы razrabotki sovremennykh svarochnykh materialov [Physical and chemical basis for the development of modern welding materials]. Abstract of Ph.D. thesis. Ekaterinburg, 2004, 145 p.
18. Votina E.B., Shalimov M.P. Fizicheskaiia model' protsessа svarki pokrytymi elektrodami ili poroshkovoi provolokoi [Physical model of the welding process with coated electrodes or cored wire]. *Svarka: nauka, praktika, obrazovanie: sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. «Svarka. Kontrol' i diagnostika»*. Ekaterinburg, 2009, pp. 17–19.
19. Votina E.B., Shalimov M.P. Modelirovanie protsessа dugovoi svarki poroshkovoi provolokoi [Modeling of the arc welding process with flux cored wire]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 99–109.
20. Votina E.B., Shalimov M.P., Tabatchikov A.S. Otsenka parametrov protsessа dugovoi svarki poroshkovoi provolokoi [Assessment of the parameters of the arc welding process with flux cored wire]. *Metallurgii: tekhnologii, innovatsii, kachestvo: trudy XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Ed. E.V. Protopopova; Sibirskii gosudarstvennyi industrial'nyi universitet. Novokuznetsk, 2017, ch. 2, pp. 273–277.

Получено 09.10.18

Опубликовано 21.03.19

Сведения об авторах

Шалимов Михаил Петрович (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии сварочного производства Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: shalimovmp@gmail.com.

Вотинова Екатерина Борисовна (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, доцент

кафедры технологии сварочного производства Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: votinovacat@rambler.ru.

About the authors

Mikhail P. Shalimov (Yekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of the Department of Welding Technology, Ural Federal University named after the first President of the Russia B.N. Yeltsin; e-mail: shalimovmp@gmail.com.

Ekatrerina B. Votnova (Yekaterinburg, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Docent, Department of Welding Technology, Ural Federal University named after the first President of the Russia B.N. Yeltsin; e-mail: votinovacat@rambler.ru.