

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА

В. В. ЧИГАРЕВ, д-р техн. наук, **А. Г. БЕЛИК**, инж., **Ю. В. СЕРГИЕНКО**, канд. техн. наук
(Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Дана оценка степени взаимодействия расплавленного металла оболочки и сердечника порошковой ленты. Рассмотрены факторы и энергетические характеристики, оказывающие влияние на характер плавления порошковой ленты.

Ключевые слова: дуговая наплавка, порошковая лента, сердечник, оболочка, капля, комплексные лигатуры, однородность

При наплавке порошковыми лентами происходит раздельное плавление ее оболочки и сердечника, что может привести к химической неоднородности металла наплавленного слоя и в дальнейшем сказываться на его служебных характеристиках и сварочно-технологических свойствах. В зависимости от доли взаимодействия расплавленного металла оболочки и сердечника обеспечивается уровень однородности наплавленного металла.

Проводить теоретические расчеты и непосредственное измерение реагирующей массы сердечника на стадии капли не представляется возможным в связи с отсутствием знаний о всех факторах, влияющих на процесс плавления порошковой ленты, и механизмах превращений на торце электрода. В ряде работ [1–4] изложены особенности легирования металла при наплавке или сварке различными электродными материалами и предлагаются аналитические зависимости количественной оценки взаимодействия составляющих на различных стадиях плавления электродных материалов. Учитывая значительное влияние конструктивных параметров порошковой ленты, относительной массы ее сердечника и его состава, а также наличие термомодеформационных явлений и раздельного плавления оболочки и сердечника, наиболее приемлемым является расчетно-экспериментальный метод определения массопереноса при плавлении порошковой ленты. Решение такой задачи возможно при определении энергетических характеристик плавления порошковой ленты и использовании доступных и характерных методик получения необходимых экспериментальных данных.

В основу расчетной схемы процесса плавления порошковой ленты положено уравнение Н. Н. Рыкалина [5]

$$q_3 = \nu F_3 \gamma (S_k - S_1), \quad (1)$$

где q_3 — тепловая энергия, вводимая дугой в электрод за единицу времени; ν — скорость плавления электрода; F_3 — площадь сечения электрода; γ — плотность электродного металла; S_k — теплосодержание капли электродного металла или удельные энергозатраты на плавление электрода; S_1 — теплосодержание электродного металла при подогреве проходящим током.

Применительно к порошковым электродам аналитическую зависимость (1) корректировали с учетом следующих допущений:

значения тепловой энергии $q_{пл}$, выделяемой дугой на электроде, и удельные энергозатраты S_0 на плавление оболочки остаются постоянными, не зависящими от массы и состава сердечника порошкового электрода;

при их изменении происходит лишь перераспределение теплоты между оболочкой и сердечником, в результате изменяется скорость плавления электрода;

энергия, выделяемая на электроде, затрачивается только на плавление сердечника и оболочки, потерями на испарение пренебрегаем;

часть сердечника, взаимодействующего с металлом оболочки при плавлении порошкового электрода, представляется в виде некоторого эффективного слоя, составляющего долю ε общей его толщины.

С учетом принятых допущений уравнение процесса расплавления порошковой ленты может быть представлено в следующем виде:

$$q_{пл} = \nu \delta \Pi \gamma S_0 + \nu \varepsilon h b a S_c \quad [\text{Дж/с}], \quad (2)$$

где δ — толщина оболочки; Π — периметр оболочки; h , b — соответственно толщина и ширина сердечника; a — насыпная масса компонентов сердечника; S_c — теплосодержание или удельные энергозатраты на плавление сердечника.

В уравнении (2) левая часть отражает количество теплоты, вводимой дугой в порошковую

ленту, правая — суммарные затраты теплоты на плавление оболочки и сердечника.

Представим мгновенную производительность процесса расплавления оболочки в виде зависимости

$$g_{об} = \nu \delta \Pi \gamma. \quad (3)$$

Производительность плавления сердечника составляет

$$g_c = \nu h b a. \quad (4)$$

Учитывая, что относительная масса сердечника порошковой ленты определяется как

$$K_{п} = g_c / g_{об}, \quad (5)$$

уравнение (2) с учетом (3)–(5) преобразуем следующим образом:

$$g_{пл} = g_{об} S_o + \varepsilon g_c K_{п} S_c. \quad (6)$$

Проанализировав уравнение (6), следует отметить, что при $K_{п} = 0$ (в случае отсутствия сердечника) зависимость характеризует расплавление порошковой ленты (1)

$$g_3 = g_{об} S_o. \quad (7)$$

С учетом принятых допущений $g_{пл} = g_3$ и, подставляя результаты расчетов (6) в (7), получаем соотношение

$$g_{об} S_o = g_{об} S_o + \varepsilon g_c K_{п} S_c. \quad (8)$$

Энергетические условия на электроде при его плавлении наиболее полно можно выразить через коэффициент расплавления, который определяют с помощью известных уравнений. С учетом перехода от значений $q_{об}$, $q_{пл}$, q_c , $K_{п}$ через коэффициенты расплавления соответственно оболочки и порошковой ленты $\alpha_p^{об}$ и α_p , т. е. $g_{об} = \alpha_p^{об} I$, выражение (8) после преобразования примет вид

$$\alpha_p^{об} = \alpha_p \left(1 + \varepsilon K_{п} \frac{S_c}{S_o} \right). \quad (9)$$

Величина ε принята в качестве количественного критерия, с помощью которого оценивается доля сердечника порошковой ленты, расплавляемого совместно с металлической оболочкой на стадии капли. Процесс плавления порошковой ленты, характеризующий полный переход через стадию капли ее оболочки и сердечника, отвечает условию $\varepsilon = 1$.

Решив уравнение (9) относительно ε , получим

$$\varepsilon = \frac{(\alpha_p^{об} / \alpha_p - 1) S_o}{K_{п} S_c}. \quad (10)$$

Уравнение (10) устанавливает в общем виде связь между основными параметрами порошковой

ленты и степенью перехода ее составляющих через стадию капли при плавлении. Из (10) следует, что при известных энергозатратах на плавление оболочки S_o основными параметрами, определяющими долю взаимодействия ε порошковой ленты, сердечника и оболочки при плавлении последней, являются тугоплавкость S_c сердечника и относительная его масса $K_{п}$, которую находим из следующего соотношения:

$$K_{п} = K_3 / (1 - K_3). \quad (11)$$

Значение $\alpha_p^{об} / \alpha_p - 1$ определяется экспериментально. Оно характеризует соотношение энергий, идущих на плавление сердечника и оболочки порошковой ленты на стадии капли, как

$$\mu = \frac{\alpha_p^{об}}{\alpha_p}, \quad (12)$$

где μ — коэффициент распределения энергии на стадии капли при плавлении порошковой ленты.

Подставив результаты расчетов уравнений (11) и (12) в (10), а также учитывая степень взаимодействия сердечника и оболочки на стадии капли при плавлении порошковой ленты, определяем

$$\varepsilon = \frac{\mu S_o (1 - K_3)}{K_3 S_c}. \quad (13)$$

При анализе уравнения (13) следует отметить, что снижение значений коэффициентов заполнения K_3 порошковой ленты, энергозатрат на плавление сердечника и распределения энергии μ способствует увеличению степени взаимодействия металла оболочки и сердечника при их плавлении.

Для получения значений ε необходимо определить μ , S_o , S_c и K_3 . Коэффициент распределения энергии μ при плавлении порошковой ленты выполняется расчетно-экспериментальным методом через показатели плавления порошковой ленты. Для этого находят значения коэффициента расплавления α_p порошковой ленты (при наличии сердечника) и $\alpha_p^{об}$ оболочки (при отсутствии сердечника), т. е. коэффициент заполнения $K_3 = 0$. Значение удельных энергозатрат плавления оболочки S_o в расчетах принимается постоянным и независимым от параметров порошкового электрода и режимов наплавки. Исходя из результатов многочисленных исследований для оболочки порошкового электрода из низкоуглеродистой стали $S_o = 2095$ Дж/г [5–9].

Удельные энергозатраты S_c на плавление компонентов сердечника порошковой ленты могут быть определены расчетно-экспериментальным методом из уравнения (13) при $\varepsilon = 1$ или других полученных его значениях:

Таблица 1. Расчетно-экспериментальные данные о характеристиках плавления порошковых лент

Состав сердечника	K ₃	α _p , г/(А·ч)	μ	S _c , Дж/г	Ni ^c , %	Ni ^k , %	ε	
							по (13)	по (15)
Комплексный сплав	0,30	16,5	0,37	1851,98	6,2	1,82	0,94	1,00
	0,36	15,2	0,48	1822,65	6,2	2,22	0,90	0,90
	0,40	14,1	0,58	1772,37	6,2	2,52	0,90	0,93
	0,48	12,2	0,85	—	6,2	2,90	0,95	0,92
	0,57	11,3	0,93	—	6,2	2,98	0,78	0,78
	0,58	11,2	0,96	—	6,2	2,99	0,70	0,65
	0,57	11,0	1,06	—	6,2	2,97	0,78	0,72
Механическая смесь компонентов	0,29	15,9	0,42	2241,65	6,0	1,24	0,90	0,95
	0,34	14,7	0,55	2208,13	6,0	1,85	0,93	0,87
	0,40	13,2	0,71	2220,70	6,0	2,30	0,91	0,95
	0,45	14,2	0,82	2157,85	6,0	2,52	0,89	0,85
	0,50	11,6	0,95	—	6,0	2,70	0,83	0,79
	0,53	10,9	1,08	—	6,0	2,60	0,84	0,79
	0,55	10,7	1,00	—	6,0	2,60	0,70	0,65

Примечание. α_p^{об} = 22,6 г/(А·ч).

$$S_c = \frac{\mu S_o(1 - K_3)}{K_3} \quad (14)$$

Для определения влияния значения S_c на ε проведены эксперименты, в которых применяли порошковые электродные ленты с легирующей шихтой, состоящей из механической смеси компонентов и комплексно-легированного сплава, а следовательно, имеющие разную удельную энергоёмкость. Коэффициент заполнения порошковых лент составлял от 0,30 до 0,53. Указанными порошковыми лентами выполняли наплавку для определения α_p, α_p^{об}, а «беззванным способом» отбирали капли электродного металла по методике, изложенной в работах [7, 10].

Доля взаимодействия ε при наплавке порошковой ленты определяли из условий энергетического баланса, уравнений (10) и (13) и отношения содержания никеля в капле электродного металла Ni^k к его содержанию в сердечнике Ni^c. Содержание никеля в каплях определяли путем химического анализа.

Расчет из условия материального баланса выполняем с помощью уравнения

$$\varepsilon = \frac{Ni^k(1 - K_3)}{(Ni^c - Ni^k)K_3} \quad (15)$$

Результаты экспериментально-расчетных данных приведены в табл. 1. Как показали результаты исследований, расчетно-экспериментальный метод определения ε дает хорошие совпадения с экспериментальными данными о составе сердечника. Следует отметить, что тугоплавкость сердечника

порошковых лент оказывает существенное влияние на завершенность процесса легирования на стадии капли. Так, у порошковых лент с использованием сердечника из механической смеси компонентов при коэффициенте заполнения K₃ = 0,58 и S_c = 2191,37 Дж/г обеспечивается ε = 0,65, а у порошковых лент с сердечником из комплексного сплава при K₃ = 0,57 и S_c = 1814,27 Дж/г ε = 0,78.

Необходимо отметить, что на ε оказывает влияние коэффициент заполнения. С увеличением его значения снижается количество компонентов, переходящих через стадию капли, что согласуется с результатами работы [2].

Проведены исследования по определению влияния толщины δ оболочки на долю взаимодействия ε сердечника порошковой ленты на стадии капли. Для этого изготавливали порошковые ленты с оболочкой из низкоуглеродистой стали разной толщины, в качестве сердечника использовали комплексно-легированный сплав, содержащий хром, углерод, кремний, никель, марганец с добавкой 1 % (от общей массы сердечника) алюминиево-магниевого порошка. Энергоёмкость

Таблица 2. Зависимость доли взаимодействия ε металла сердечника и оболочки от ее толщины δ и коэффициента заполнения K₃ при плавлении порошковой ленты

δ, мм	K ₃	μ	S _c , Дж/г	ε
0,2	0,52	0,58	1822,65	0,57
	0,55	0,53	1969,30	0,50
	0,62	0,54	1998,63	0,38
0,4	0,50	0,97	2053,10	1,00
	0,56	1,03	1780,75	0,85
	0,61	0,95	1801,70	0,66

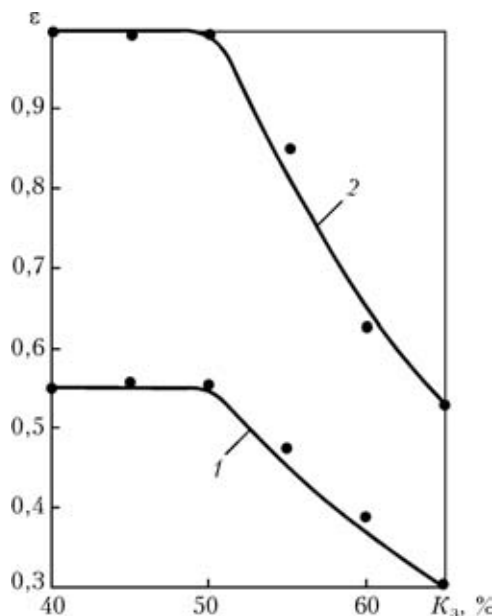


Рис. 1. Влияние толщины оболочки δ на долю ее взаимодействия ϵ с сердечником при плавлении порошковой ленты: 1 — $\delta = 0,2$; 2 — $0,4$ мм

сердечника $S_c = 1722,09$ Дж/г. Указанный состав порошковой ленты обеспечивался наличием в наплавленном слое сплава сормайт-1. Поскольку материал сердечника имеет постоянные теплоэнергетические характеристики, то это позволяет оценить влияние толщины оболочки и относительной массы сердечника на ϵ . Наплавку осуществляли на пластины из стали Ст3 на постоянном режиме. Расчет значений ϵ выполняли по уравнению (13). Результаты исследований приведены в табл. 2 и на рис. 1 и 2.

Из представленных данных следует, что максимальная доля взаимодействия сердечника и оболочки при плавлении порошковой ленты обеспечивается в случае использования сердечника из комплексного сплава.

Таким образом, с помощью расчетно-экспериментального метода можно оценить долю взаимодействия сердечника и оболочки на стадии капли при плавлении порошковых лент.

1. Зареченский А. В., Колечко А. А. Муратов В. А. Повышение производительности плавления ленточных порошко-

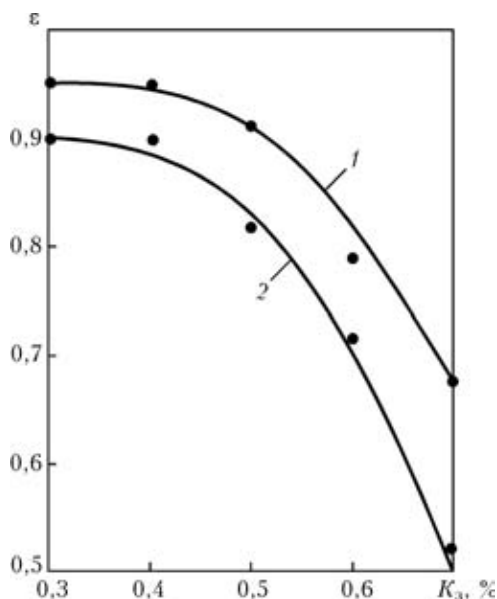


Рис. 2. Влияние коэффициента заполнения K_3 сердечника из комплексного сплава (1) и механической смеси компонентов (2) на долю взаимодействия ϵ с оболочкой при плавлении порошковой ленты

вых электродов // Автомат. сварка. — 1980. — № 7. — С. 72–73.

2. Пацкевич И. Р., Хейфец Л. А. Особенности легирования металла при наплавке порошковой лентой // Там же. — 1970. — № 2. — С. 13–15.
3. Ерохин А. А., Котов Г. Н. Основные параметры электродов, определяющие степень химической макронеоднородности наплавленного металла при легировании через покрытие // Физика и химия обраб. материалов. — 1968. — № 1. — С. 54–60.
4. Котов Г. Н., Ерохин А. А. Влияние толщины покрытия и металлических присадок в нем на скорость плавления электрода // Автомат. сварка. — 1968. — № 8. — С. 16–17.
5. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
6. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
7. Ерохин А. А. Кинематика металлургических процессов дуговой сварки. — М.: Машиностроение, 1964. — 254 с.
8. Безбах Д. К., Бенуа Ф. Ф. Теплосодержание и гранулометрический состав капель электродного металла при некоторых способах сварки // Свароч. пр-во. — 1971. — № 10. — С. 12–14.
9. Походня И. К., Сунтель А. М. Теплосодержание капель электродного металла при дуговой сварке в защитных газах // Автомат. сварка. — 1967. — № 2. — С. 13–18.
10. Ерохин А. А. Методика определения основных измерителей процесса расплавления электрода при дуговой электросварке // Автоген. дело. — 1949. — № 10. — С. 1–11.

An estimate is given of the degree of interaction of the molten metal of the sheath and core of the flux-cored surfacing strip, and factors and energy characteristics are considered, which influence the nature of its melting.

Поступила в редакцию 22.05.2006