

УДК 621.791.01:536.2

НАГРЕВ И ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ С ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСЬЮ В ПОКРЫТИИ

А. Ф. ВЛАСОВ, Н. А. МАКАРЕНКО, А. М. КУЩИЙ

Донбасская гос. машиностроительная академия

84313, г. Краматорск Донецкой обл., ул. Шкадинова, 72. E-mail: dgma@dgma.donetsk.ua

Известно, что повысить производительность ручной электродуговой сварки возможно введением в состав электродного покрытия экзотермических смесей. При этом недостаточно изучено распределение тепла между электродом и изделием. В работе исследованы тепловые характеристики нагрева и плавления электродов с различным содержанием экзотермической смеси в покрытии. Показано, что введение смеси в количестве до 53,4 мас. % приводит к увеличению коэффициента расплавления стержня с 8,7 до 11,6 г/(А·ч), коэффициента наплавки с 8,1 до 13 г/(А·ч), а также росту эффективного КПД нагрева основного металла. Библиогр. 10, табл. 2, рис. 1.

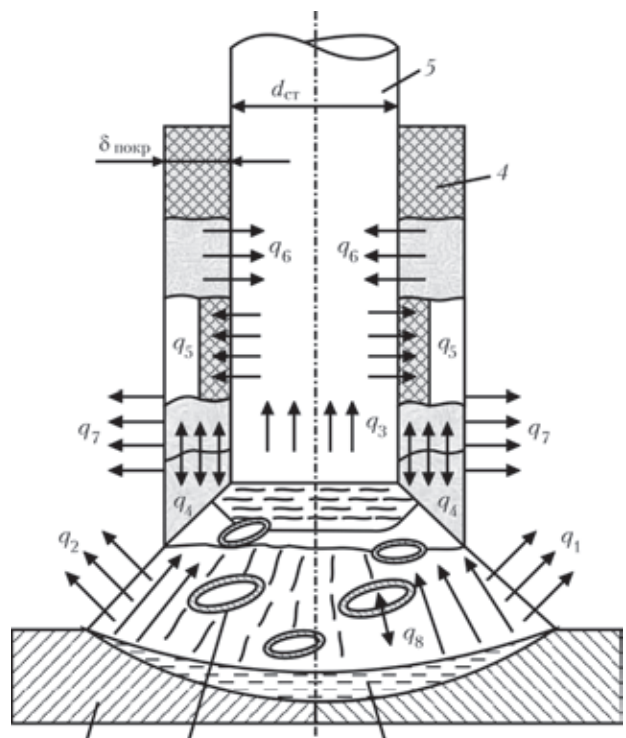
Ключевые слова: дуговая сварка, покрытые электроды, экзотермическая смесь, нагрев и плавление электрода, тепловые характеристики

Повышение производительности процессов и изыскание новых видов сырья для изготовления сварочных и наплавочных материалов является одной из главных задач, стоящих перед разработчиками. Одним из направлений решения этой задачи может быть использование эффекта экзотермических реакций при введении в состав используемых материалов экзотермических смесей в виде соответствующих окислителей (окалины, гематита, марганцевой руды) и раскислителей (ферротитана, ферросилиция, алюминиевого порошка) [1–4], при нагреве и плавлении которых экзотермический процесс протекает до расплавления электродного стержня. При недостаточном количестве в покрытии электродов оксидов железа и элементов-раскислителей экзотермический процесс протекает на стадии формирования и переноса капли. Проведенные исследования [5] показали, что при изменении от 35 до 64 % содержания экзотермической смеси в покрытии электродов, состоящей из окалины и алюминиевого порошка, прирост температуры составляет 1280 °С и является достаточным для полного расплавления покрытия. Однако исследователями до настоящего времени недостаточно изучено распределение тепла между электродом и изделием, выделяемого при экзотермической реакции.

Целью данной работы является исследование влияния количества экзотермической смеси в покрытии электродов на тепловые характеристики их плавления.

Для исследования изготавливали электроды, содержащие в покрытии мрамор, плавиковый шпат, рутиловый концентрат, ферромарганец, ферротитан, железную окалину и алюминиевый порошок. При диаметре стержня 5 мм и различном содер-

жание в покрытии экзотермической смеси коэффициент массы покрытия был постоянным. Этими электродами на пластины размером 10×80×120 мм с хвостовиками, предварительно установленными на теплоизолированную подставку, производили наплавку валиков на постоянном токе обратной полярности. В качестве источника питания использовали сварочный преобразователь ПС-500 с балластными реостатами типа РБ-300. Наплавку каждого образца проводили в течение 20 с. Время



Модель нагрева и плавления электрода с экзотермической смесью в покрытии: 1 — основной металл; 2 — капля электродного металла; 3 — сварочная ванна; 4 — покрытие; 5 — стержень; обозначения — см. текст

© А. Ф. Власов, Н. А. Макаренко, А. М. Куций, 2014

плавления электрода устанавливали секундомером, средние значения сварочного тока и напряжения на дуге определяли по самопишущим приборам, а температуру нагрева воды — термометром с точностью до 0,05 °С. Для каждого состава электродов выполняли по 3...5 замеров.

Как показано на рис. 1, в процессе нагрева электрода током тепло, выделяемое в металлическом стержне диаметром $d_{ст}$, расходуется на повышение температуры стержня (q_3) и слоя покрытия (q_5) и передается через боковую поверхность в окружающую среду (q_7). На торец электрода действует тепловой поток дуги q_1 , теплота излучения и конвективной теплопередачи q_2 . При температуре 1000 °С (при содержании в покрытии электродов свыше 35 % экзотермической смеси) протекает экзотермическая реакция с выделением теплоты q_4 , одна часть которой расходуется на нагрев и плавление покрытия (q_5), а другая передается стержню электрода (q_6). В этом процессе имеет значение теплота от конвективной теплопередачи через боковую поверхность электрода в окружающую среду (q_7) и теплота, теряемая с каплями расплавленного металла (q_8).

Мгновенный тепловой баланс

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8$$

или $Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = q_5 + q_6 + q_7 + q_8$.

Электрод нагревается от трех источников. Во-первых, это сосредоточенный источник — сварочная дуга, тепло которой вводится через пятно нагрева на рабочем торце электрода (q_1). Во-вторых, это теплота излучения и конвективной теплопередачи (q_2) и распределенный по объему источник — тепло, выделяемое электрическим током по закону Ленца–Джоуля по всей длине электродного стержня от токоподводящего контакта до дуги (q_3). В-третьих, это тепло, выделяемое при протекании экзотермической реакции (q_4).

Было исследовано распределение температур $T(x)$ в стержне электрода при нагреве источником тепла на торце в зависимости от количества экзотермической смеси в покрытии электрода. Источник тепла на торце электрода можно рассматривать как подвижный, перемещающийся со скоростью плавления электрода. Используя урав-

нение предельного состояния процесса распространения тепла от подвижного плоского источника в стержне в области перед источником (при начальном коэффициенте теплоотдачи для стержня $b = 0$), можно получить распределение температур $T(x)$ в стержне электрода при нагреве источником на торце. Подставив заданные величины в известное уравнение [6] при $x \geq 0$ и $t \rightarrow \infty$, получаем уравнение:

$$T - T_T = (T_K - T_T)e^{wx/a},$$

где T_T — температура подогрева электродного стержня током, °С; x — расстояние от торца плавящегося электрода, температура конца которого равна средней температуре каплей T_K , см; w — скорость плавления электрода, см/с.

Температуру каплей, отделяющихся от плавящегося электрода, определяли по известной формуле [7] с учетом данных работы [8] по среднему значению энтальпии каплей ($\Delta H = 1850$ Дж/г) при расплавлении проволоки Св-08А и $I_{св} = 290$ А (полярность обратная):

$$T_{к.ср} = 1798 + (\Delta H - 1330)/0,92 = 1798 + 520/0,92 = 565 + 1798 = 2363 \text{ К} = 2090 \text{ °С}.$$

В табл. 1 приведены данные, характеризующие влияние количества экзотермической смеси в покрытии электродов на температуру участка x , нагреваемого дугой при $T_K = 2100$ °С; $T_T = 20$ °С; $w = 0,475 \dots 0,645$ см/с; $a = 0,08$ см²/с. Температура 1000 °С, при которой эффективно протекает экзотермическая реакция, достигается на расстоянии около 1 мм от торца электрода.

Была определена температура нагрева покрытия электрода ЭТ-2 [9] диаметром 5 мм через 60 с после начала горения дуги на постоянном токе 290 А. Начальная температура электрода $T_0 = 20$ °С. Расчет выполняли с учетом научных рекомендаций [6] следующим образом:

плотность тока в электроде

$$j = \frac{4I}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 290}{\pi \cdot 0,5^2} = 14,8 \text{ А/мм}^2,$$

где I — сварочный ток, А; d — диаметр стержня, см;

коэффициенты

$$\omega_0 = 2,4 \cdot 10^{-2} j^2 = 2,4 \cdot 10^{-2} \cdot 14,8^2 = 5,26 \text{ град/с};$$

Т а б л и ц а 1. Температура участка x электрода, нагреваемого дугой, и количество экзотермической смеси в покрытии при различной скорости плавления электрода

Длина участка x , см	Количество экзотермической смеси (%) при T (°С) и w (см/с)								
	0	10,0	17,5	26,2	35,2	42,5	44,4	47,5	53,4
	0,475	0,505	0,525	0,55	0,575	0,6	0,615	0,63	0,645
0,09	1230	1190	1164	1131	1099	1069	1051	1034	1017
0,1	1159	1117	1090	1056	1023	992	973	955	938
0,2	640	595	565	531	499	469	451	435	419
0,5	108	89,5	79	67,5	57,7	49,4	44,1	41	37,3
1,0	5,6	3,8	2,97	2,3	1,6	1,2	0,96	0,8	0,7

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные значения характеристик плавления электродов с экзотермической смесью в покрытии при $I_{св} = 290$ А

Показатель	Количество экзотермической смеси, %								
	0	10,5	17,5	26,2	35,2	42,5	44,4	47,5	53,4
$\alpha_{пл.ст}$, г/(А·ч)	8,7	9,4	9,7	10,2	10,4	10,9	11,2	11,4	11,6
$\alpha_{п}$, г/(А·ч)	8,1	9,1	9,7	10	10,9	11,4	12	12,2	13
$U_{д}$, В	25	25,7	26	26,5	27	27,3	27,5	27,7	28
$Q_{д}$, Дж/с	7250	7453	7540	7685	7830	7917	7975	8033	8120
$Q_{хим}$, Дж/с	0	45,2	138,7	274,6	442,5	619,5	701,6	777,3	926,5
w , см/с	0,475	0,52	0,525	0,55	0,58	0,6	0,615	0,63	0,645
$v_{пл.покр}$, г/с	0,40	0,42	0,44	0,47	0,50	0,54	0,56	0,58	0,59
$Q_{кал}$, Дж/с	5220	5610	5716	6046	6405	6700	6886	7090	7373
$m_{пл}$, Г	7,5	7,43	7,37	7,3	6,7	6,4	6,2	6,3	6,3
$m_{ст}$, Г	14	15	15,8	16,7	17,1	18,5	19,2	19,6	20
$m_{н.м}$, Г	10,5	12,1	13,5	15	17,5	18,5	19,5	20	20,8
$\eta_э$	0,28	0,3	0,315	0,34	0,365	0,385	0,392	0,405	0,415
$\eta_{о.м}$	0,715	0,735	0,745	0,76	0,773	0,79	0,795	0,805	0,815
$Q_э$, Дж/с	2030	2236	2375	2613	2858	3048	3126	3253	3370

$$b_0 = \frac{0,96 \cdot 10^{-2}}{d} = \frac{0,96 \cdot 10^{-2}}{5} = 0,192 \cdot 10^{-2} \text{ 1/град};$$

$$nt = [5 \cdot 10^{-3} \cdot 5,26 + 0,192 \cdot 10^{-2} (1 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 20)] \cdot 60 = 1,68;$$

$$\beta(\omega_0/b_0 + T_0) = 5 \cdot 10^{-3} (5,26/0,192 \cdot 10^{-2} + 20) = 13,8.$$

По известной номограмме [6] коэффициенты $\beta T = 3,5$; $\beta = 5 \cdot 10^{-3}$ 1/град. Тогда максимальная температура подогрева исследуемых электродов оптимальным током составляет $T = 3,5 / 5 \cdot 10^{-3} = 700$ °С.

Тепловой эффект экзотермической реакции от взаимодействия элементов-раскислителей с оксидом железа определяли по известному уравнению [10]

$$Q_{хим} = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{G_{р.ст}}{t} K_m \frac{Q_{i \text{ э.с}}}{100} q_{i \text{ э.с}},$$

где $G_{р.ст}$ — количество расплавленного стержня, г; K_m — коэффициент массы покрытия; $Q_{i \text{ э.с}}$ — количество экзотермической смеси в покрытии электрода при взаимодействии i -го элемента-раскислителя (Al, Ti, Si, Mn) с оксидом железа, %; $q_{i \text{ э.с}}$ — тепловой эффект экзотермической смеси при взаимодействии 1 % закиси железа с элементами-раскислителями, Дж/с.

Показатели влияния количества экзотермической смеси в покрытии электродов на характеристики их плавления приведены в табл. 2.

Полученные результаты показали, что введение в покрытие электродов экзотермической смеси увеличивает количество расплавленного стержня в пределах 14–20 г и покрытия от 8 до 11,8 г при постоянном коэффициенте массы покрытия. Это происходит в основном за счет теплоты, выделяющейся при протекании экзотермической реакции, и снижения затрат теплоты на плавление покрытия вследствие соответствующего уменьшения содержания газошлакообразующей части покрытия и увеличения металлической составляющей. Введение в состав покрытия до 53,4 % экзотермической смеси изменяет коэффициент нагрева электрода 0,280 до 0,415, причем изменение носит прямо пропорциональный характер. Увеличение количества наплавленного металла в пределах 10,5...20,8 г при почти одинаковом количестве шлака на пластине показывает, что дополнительный нагрев пластины происходит в основном за счет увеличения количества электродного металла, переносимого за одно и то же время. Электроды с экзотермической смесью в покрытии максимально эффективно могут использоваться для сварочных и наплавочных работ, при выполнении которых необходим предварительный и сопутствующий нагрев и замедленное охлаждение.

Выводы

1. Введение в покрытие электрода до 53,4 % экзотермической смеси увеличивает коэффициент расплавления стержня ($\alpha_{\text{пл.ст}} = 8,7 \dots 11,6 \text{ г/(А}\cdot\text{ч)}$) и наплавки ($\alpha_{\text{н}} = 8,1 \dots 13,0 \text{ г/(А}\cdot\text{ч)}$), эффективные КПД нагрева основного металла ($\eta_{\text{о.м}} = 0,715 \dots 0,815$) и электрода ($\eta_{\text{э}} = 0,280 \dots 0,415$).

2. Введение в покрытие электрода экзотермической смеси повышает скорость расплавления электродов за счет увеличения тепловой мощности дуги; тепла, выделяющегося при протекании экзотермической реакции; снижения затрат на плавление газшлакообразующей части покрытия; улучшения технологических характеристик дуги.

3. Установлено, что максимальная температура подогрева исследуемых электродов проходящим оптимальным током составляет 700 °С.

4. Температура 1000 °С, при которой эффективно протекает экзотермическая реакция, была получена на расстоянии около 1 мм от торца электрода.

1. Карпенко В. М., Власов А. Ф., Билык Г. Б. Показатели плавления сварочных электродов с экзотермической смесью в покрытии // Свароч. пр-во. – 1980. – № 9. – С. 23-25.
2. Иоффе И. С. Влияние титанотермитной смеси, входящей в электродное покрытие, на повышение производительности сварки // Там же. – 1980. – № 3. – С. 26–28.
3. Зареченский А. В. и др. Особенности плавления порошковых лент с термитными смесями // Там же. – 1985. – № 8. – С. 39–41.
4. Чигарев В. В., Зареченский Д. А., Белик А. Г. Особенности плавления порошковых лент с экзотермическими смесями в наполнителе // Автомат. сварка. – 2007. – № 2. – С. 53–55.
5. Власов А. Ф., Карпенко В. М., Леценко А. И. Экспериментальное определение экзотермического процесса, протекающего при нагреве и плавлении электродов // Вісник ДДМА. – 2006. – 4, № 2. – С. 65–68.
6. Теоретические основы сварки / Под ред. В. В. Фролова. – М.: Высш. шк., 1970. – 592 с.
7. Ando K., Nishiguchi K. Mechanism of formation of pencil point-like wire tip in MIG welding // IIW Doc. 212-156-68–69.
8. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.
9. А. с. 737175 СССР. МКИ В 23К, 35/36. Состав электродного покрытия / А. Ф. Власов, Ю. Н. Опарин, В. М. Белая, А. А. Перепелица. – Заявл. 10.11.77. Оpubл. 30.05.80; Бюл. № 20.
10. Власов А. Ф., Куций А. М. Технологические характеристики электродов с экзотермической смесью в покрытии для наплавки инструментальных сталей // Свароч. пр-во. – 2011. – № 4. – С. 10–15.

Поступила в редакцию 16.04.2014

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com



ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВАЯ СВАРКА БУРОВЫХ ДОЛОТ. / О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков, А. А. Бондарев, Л. А. Кравчук, Ю. А. Архангельский. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2012. – 116 стр. Мягкий переплет, 165×235 мм.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований свариваемости высокопрочных среднелегированных сталей 14ХН3А, 40ХН и 14ХН3МА, из которых традиционно изготавливаются буровые долота, а также анализа влияния основных параметров режима ЭЛС, технологических приемов, развертки пучка и модифицирующих вставок, применяемых для управления структурообразованием, предупреждения кристаллизационного растрескивания и повышения прочностных характеристик сварных соединений. Приведены технические характеристики разработанного оборудования и описаны компьютерные технологические программы ЭЛС с применением модификаторов металла шва. Книга предназначена для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий и институтов, специализирующихся в области высоких технологий и современного сварочного оборудования.

Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка»