

ELECTRODES HEATING AND BURNING OFF IN THE PRESENCE
OF EXOTHERMIC MIXTURE IN THE COATINGНАГРЕВ И ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ НАЛИЧИИ
ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СМЕСИ В ПОКРЫТИИ**Anatoly F. Vlasov**Anatoly_Vlasov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-8132-2807

Nataliia O. MakarenkoNatalia_Makarenko@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3231-3568

А. Ф. Власов,

канд. техн. наук, доц.;

Н. А. Макаренко,

д-р техн. наук, проф.

Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk*Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск*

Abstract. The method of the productivity improvement of the manual arc welding is discussed. The aim of research is to establish the regularities of the influence of the amount of exothermic mixture and coating thicknesses of the electrodes which ensure the intensification of their melting process. The amount of exothermic mixture and coating thickness of the electrodes on the technological characteristics (surfacing and melting indices; melting rate of the electrode and coating; the efficiency of heating of electrode and product) is experimentally studied. The effect of the performance improvement of the electrodes melting is established in the result of the exothermic reactions behaviour in the electrode coating when it is heated above 1100 °C. Also, the effect of increase of the arc heat energy is established. The research results can be used in the development of the welding electrodes of enhanced productivity. The set dependences of the indices of the electrodes melting on the amount of exothermic mixture and thickness of electrodes coating allow using the influence of the exothermic reaction effect on the increase of the productivity of the manual arc welding.

Keywords: exothermic mixture, electrode coating, electrode, indices of the electrodes melting.

Аннотация. Выполнен анализ существующих способов повышения производительности электродов для ручной дуговой сварки. Установлены зависимости тепловых и других показателей плавления электродов от количества экзотермической смеси и толщины покрытия электродов.

Ключевые слова: экзотермические смеси, электродное покрытие, электрод, показатели плавления электродов.

Анотація. Виконано аналіз існуючих способів підвищення продуктивності електродів для ручного дугового зварювання. Установлено залежності теплових та інших показників плавлення електродів від кількості екзотермічної суміші й товщини покриття електродів.

Ключові слова: екзотермічні суміші, електродне покриття, електрод, показники плавлення електродів.

REFERENCES

- [1] Vlasov A.F., Oparin Yu.N., Belaya V.M., Perepelitsa A.A. *Sostav elektrodnoho pokrytiya* [The composition of the electrode coating] USSR authors cert., no. 737175, 1977.
- [2] Vlasov A.F., Kushchuy A.M. Tekhnologicheskie kharakteristiki elektrodov s ekzotermicheskoy smesy v pokrytii dlya naplavki instrumentalnykh staley [Technological characteristics of electrodes with exothermic mixture in a coating for the surfacing of tool steels]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 2011, no. 4, pp.10–15.
- [3] Ioffe I.S. [et al.]. Vliyanie titanotermitnoy smesi, vkhodyashchey v elektrodnoe pokrytie, na povyshenie proizvoditelnosti svarki [Influence of titanium and thermite mixture which is included into the electrode coating on the increase of welding productivity]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1980, no. 3, pp. 26–28.
- [4] Yerokhin A.A. *Kinetika metallurgicheskikh protsessov dugovoy svarki* [Kinetics of metallurgical processes of arc welding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964. 256 p.
- [5] Zarechenskiy A.V., Leshchinskiy L.K., Chigarev V.V. Osobennosti plavleniya poroshchkovykh lent s termitny-mi smesyami [Specific features of melting of powder tapes with thermite mixtures]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1985, no. 8, pp. 39–41.

- [6] Pokhodnya I.K. *Gazy v svarnykh shvakh* [Gases in welds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 256 p.
- [7] Frolov V.V. *Teoreticheskie osnovy svarki* [Theoretical fundamentals of welding]. Moscow, Vyssh. shkola Publ., 1970. 592 p.
- [8] Chigarev V.V., Zarechenskiy D.A., Belik A.G. Osobennosti plavleniya poroshkovykh lent s ekzo-termicheskimi smesyami v napolnitele [Specific features of melting of powder tapes with exothermic mixtures in the filler]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic Welding*, 2007, no. 2, pp. 53–55.
- [9] Vlasov A.F., Karpenko V.M., Leshchenko A.I. Eksperimentalnoe opredelenie ekzotermicheskogo protsessa, protekayushchego pri nagreve i plavlenii elektrodov [Experimental determination of the exothermic process which proceeds under the heating and melting of electrodes]. *Visnyk DDMA* [Bulletin of the DSEA], 2006, no. 2, issue 4, pp. 65–68.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время ручная дуговая сварка покрытыми электродами остается одним из основных технологических процессов при изготовлении, монтаже и ремонте большинства сварных стальных конструкций.

Для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей промышленностью выпускается множество марок электродов, производительность которых довольно низка (коэффициенты наплавки и скорости их плавления не превышают, соответственно, 8,5...10,0 г/А·ч и 13...16 м/ч). Повышение производительности сварочных процессов и изыскание новых видов сырья для их изготовления является одной из главных задач, стоящих перед разработчиками сварочных и наплавочных материалов.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Одним из основных путей увеличения производительности ручной дуговой сварки является введение в состав покрытия электродов железного порошка. При содержании в электродах железного порошка в пределах значений 15...25 % улучшаются их сварочно-технологические свойства без существенного изменения коэффициента наплавки. Наибольшая производительность достигается при содержании в покрытии электродов 60...70 % железного порошка при коэффициенте массы покрытия в пределах 100...200 %.

Однако удельный вес применяемых в нашей стране «высокопроизводительных» электродов очень мал (вследствие необходимости использования в этом случае источников питания с напряжением холостого хода 80 В, дефицитности железного порошка, сложности обеспечения качественного их изготовления в поточных линиях «электродный пресс – конвейерная прокалочная печь», возможности выполнения сварочных операций только в нижнем или незначительно наклонном положении и других причин). Дальнейший рост производства прогрессивных марок электродов также ограничивается дефицитом (как на мировом рынке, так и в нашей стране) таких сырьевых материалов, как рутиловый концентрат, слюда – мусковит, целлюлоза и др.

Одним из направлений решения данной задачи является использование эффекта экзотермических реакций путем введения в состав используемых материалов экзотермических смесей в виде ряда окислителей (окалины, гематита, марганцевой руды и др.) и раскислителей (ферротитана, ферросилиция, алюминиевого порошка и др.) [2, 3, 5, 8], при нагреве и плавлении которых экзотермический процесс протекает до расплавления электродного стержня. При недостаточном количестве в покрытии электродов оксидов железа и элементов-раскислителей для образования экзотермической смеси экзотермический процесс протекает на стадии формирования и переноса капли.

Однако до настоящего времени недостаточно исследовано влияние экзотермической смеси на показатели плавления электродов и распределение тепла, выделяемого при экзотермической реакции, которая проходит между электродом и изделием [1–3, 5, 8, 9].

Проведенными исследованиями установлено, что при изменении содержания в покрытии электродов экзотермической смеси, состоящей из окалины и алюминиевого порошка (в количестве от 35 до 64 %), прирост температуры составил 1280 °С и является достаточным для полного его расплавления [4, 6, 9].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – определение влияния количества экзотермической смеси и толщины покрытия электродов на их *нагрев и плавление*.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Распределение температур $T(x)$ в стержне электрода от нагрева источником теплоты на торце в зависимости от количества экзотермической смеси в покрытии электрода рассчитывалось по уравнению [7]

$$T - T_{\tau} = (T_k - T_{\tau})e^{-\frac{wx}{a}} \text{ при } x \geq 0 \text{ и } t \rightarrow \infty, \quad (1)$$

где x – расстояние от торца электрода, см, температура конца которого равна средней температуре каплей T_k ; w – скорость плавления электрода, см/с; T_{τ} – температура подогрева электродного стержня током, °С.

Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Данные зависимости температуры участка (x) электрода, нагреваемого дугой, от количества экзотермической смеси в покрытии электродов

Участок (x) электрода, нагреваемый дугой, см	Температура, °C								
	Количество экзотермической смеси в покрытии электродов, %								
	0	10,0	17,5	26,2	35,2	42,5	44,4	47,5	53,4
0,09	1230	1190	1164	1131	1099	1069	1051	1034	1017
0,10	1159	1117	1090	1056	1023	992	973	955	938
0,15	862	815	785	749	714	682	663	645	627
0,20	640	595	565	531	499	469	451	435	419
0,25	476	434	407	396	348	322	307	293	280
0,30	353	316	293	267	243	221	209	198	187
0,50	108	89,5	79,0	67,5	57,7	49,4	44,1	41	37,3
1,00	5,6	3,8	2,97	2,3	1,6	1,2	0,96	0,8	0,7
$V_{пл.э}, \text{ см/с}$	0,475	0,505	0,525	0,550	0,575	0,60	0,615	0,630	0,645

Температуры подогрева исследуемых электродов диаметром 5 мм при пропускании тока (290 А) по длине расплавляемого электрода $L_э$, см, определенные по данным работы [7], приведены в табл. 2.

Определение влияния количества экзотермической смеси и толщины покрытия электродов с экзотермической смесью на нагрев изделия и плавление электрода производилось методом калориметрирования электродов. Для исследований изготавливались электроды [1], содержащие в покрытии мрамор, пла-

виковый шпат, рутиловый концентрат, ферромарганец, ферротитан, железную окалину и алюминиевый порошок, с диаметром стержня 5,0 мм в двух вариантах: в одном – с различным содержанием в покрытии экзотермической смеси при постоянном значении коэффициента массы покрытия ($K_m = 0,6$), а в другом – с различной толщиной покрытия (0,5...6,0 мм, что соответствовало изменению коэффициента массы покрытия K_m от 0,17 до 1,14) при неизменном количестве в покрытии экзотермической смеси (44,4 %).

Таблица 2. Исходные и расчетные данные температуры подогрева исследуемых электродов

$j, \text{ А/мм}^2$	$\beta, \text{ 1/град}$	$\beta \left(\frac{\omega_0}{b_0} + T_0 \right)$	nt	$\omega_0, \text{ град/с}$	b_0	βT	$L_э, \text{ см}$	$T, \text{ °C}$
14,8	$5 \cdot 10^{-3}$	13,8	0,28	5,26	$0,192 \cdot 10^{-2}$	0,33	6,15	66
			0,57			0,65	12,3	130
			0,84			1,20	18,5	240
			1,14			1,80	24,6	360
			1,42			2,70	30,8	540
			1,68			3,5	37,0	700

На пластины (10×80×120 мм) с хвостовиками, предварительно установленные на теплоизолированную подставку, исследуемыми электродами производилась наплавка валиков на постоянном токе обратной полярности. В качестве источника питания использовался сварочный преобразователь ПС-500 с балластными реостатами типа РБ-300. Наплавка каждого образца производилась в течение 20 с. Время плавления электрода определялось с помощью секундомера. Средние значения сварочного тока и напряжения дуги определялись по самопишущим приборам, а температура нагревания воды – термометром с точностью до 0,05 °C. На каждый состав электродов производилось 3–5 замеров.

Тепловой эффект экзотермической реакции от взаимодействия элементов-раскислителей с закисью железа определялся по уравнению [2]

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

где $Q_{э.с} - Q_{Fe.c}^{Al}, Q_{э.с}^{Ti}, Q_{э.с}^{Si}, Q_{э.с}^{Mn}$ – количество экзотермической смеси в покрытии электрода при взаимодействии i -го элемента-раскислителя с закисью железа, %; $q_{iэ.с}$ – тепловые эффекты (Дж/с) экзотермических реакций от взаимодействия 1 % закиси железа с элементами-раскислителями.

Для реакции алюминия с закисью железа величина энтальпии

$$\Delta H_{298}^{Al} = 1674,4 - 3 \cdot 264,5 = 881,0 \text{ кДж/моль},$$

$$3FeO + 2Al = Al_2O_3 + 3Fe + 881,0 \text{ кДж/моль},$$

где 1674,4 и 264,5 – энтальпия оксидов, соответственно, Al_2O_3 и FeO , кДж/моль.

Тепловой эффект от 1 г экзотермической смеси (алюминия и закиси железа)

$$q^{Al} = \frac{881000}{269,51} = 3268 \text{ Дж/г,}$$

где 269,51– сумма молекулярных масс исходных веществ, г.

Рассчитанные аналогичным образом тепловые эффекты на 1 г экзотермической смеси для реакций титана, кремния и марганца с закисью железа состав-

ляют:

$$q^{Ti} = 2171,1 \text{ Дж/г; } q^{Si} = 2224,7 \text{ Дж/г; } q^{Mn} = 950,8 \text{ Дж/г.}$$

Значения эффективных КПД нагрева электрода η_3 и основного металла η_{II} и связанных с ними характеристик в зависимости от количества экзотермической смеси и толщины покрытия электродов приведены на рис. 1 и 2.

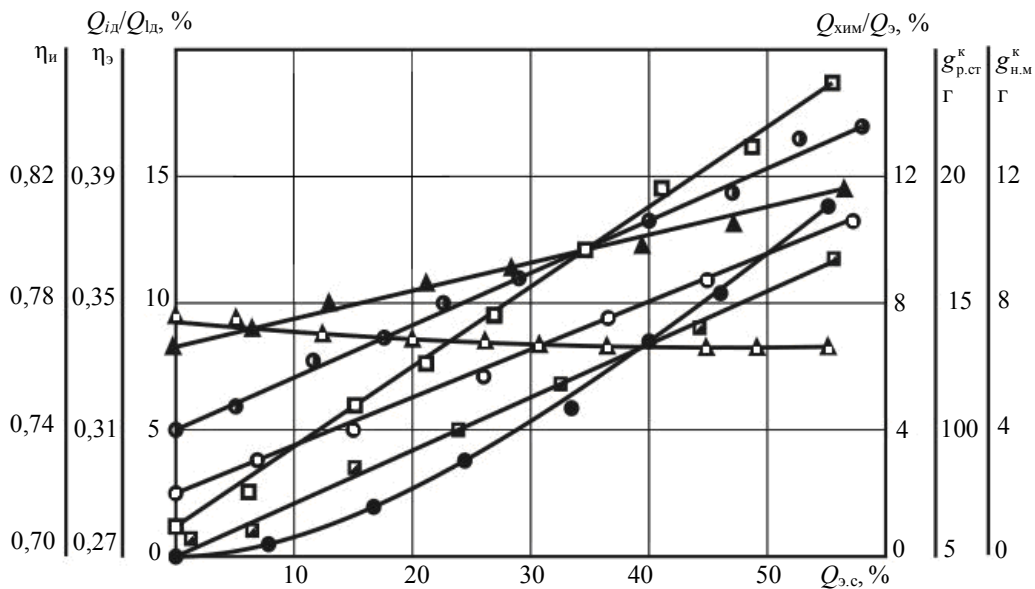


Рис. 1. Влияние количества экзотермической смеси в покрытии электродов Q_{3c} на тепловые и другие характеристики их плавления: $\circ - \eta_{II}$; $\square - \eta_3$; $\triangle - \frac{Q_{ill}}{Q_{iz}}$; $\bullet - g_{н.м}^k$; $\blacktriangle - g_{р.ст}^k$; $\triangle - g_{шл}^k$; $\bullet - \frac{Q_{хим}}{Q_3}$

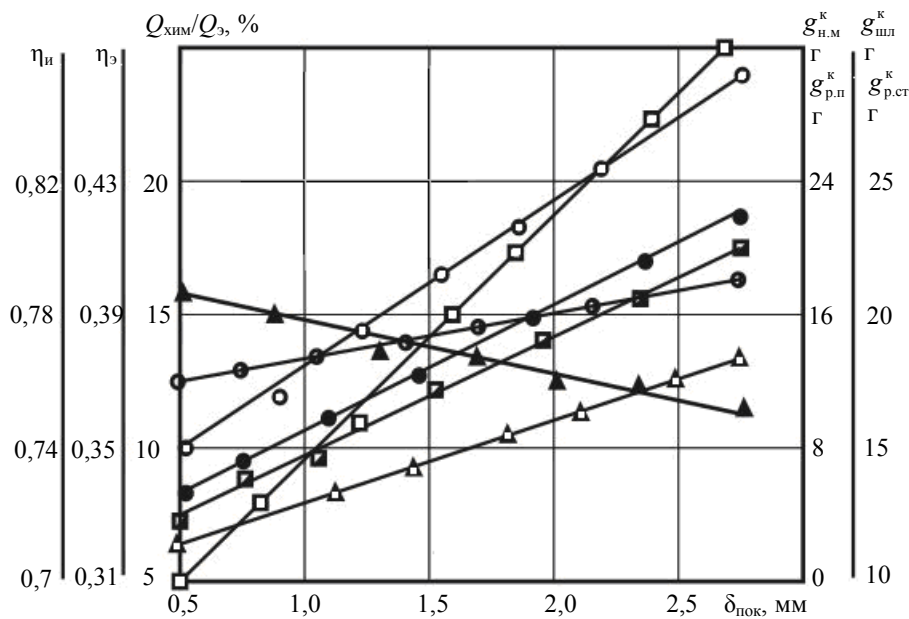


Рис. 2. Влияние толщины покрытия электродов $\delta_{пок}$ на тепловые и другие характеристики их плавления: $\circ - \eta_{II}$; $\square - \eta_3$; $\triangle - g_{р.п}^k$; $\bullet - g_{н.м}^k$; $\blacktriangle - g_{р.ст}^k$; $\triangle - g_{шл}^k$; $\bullet - \frac{Q_{хим}}{Q_3}$

Введение в покрытие электродов экзотермической смеси при одном и том же коэффициенте массы покрытия увеличивает количество расплавленного стержня ($g_{\text{р.ст}}^k$ от 14,0 до 19,0 г) и покрытия ($g_{\text{р.ст}}^k$ от 8,5 до 11,4 г) в основном за счет теплоты, выделяющейся при протекании экзотермической реакции, и снижения затрат теплоты на плавление покрытия (из-за соответствующего уменьшения содержания газшлакообразующей части покрытия и увеличения металлической составляющей).

Введение в состав покрытия электродов экзотермической смеси до 53,4 % (см. рис. 1) изменяет $\eta_{\text{н}}$ в пределах от 0,71 до 0,815 и $\eta_{\text{с}}$ в пределах от 0,28 до 0,415, при этом изменение носит прямо пропорциональный характер. Увеличение количества наплавленного металла (от 10,5 до 21 г) при почти одинаковом количестве шлака на пластине показывает, что дополнительный нагрев пластины происходит в основном за счет увеличения количества электродного металла, переносимого за один и тот же промежуток времени.

Изменение толщины покрытия электродов от 0,5 до 2,6 мм приводит к повышению содержания экзотермической смеси, увеличению количества теплоты ($Q_{\text{хим}}/Q_{\text{с}}$ от 8 до 17 %) и восстановленного железа при протекании экзотермической реакции, а количество наплавленного металла и шлака на основном металле при калориметрировании повышается соответственно с 17,5 до 21,0 и от 2,0 до 13,0 г, что приводит к из-

менению $\eta_{\text{н}}$ от 0,74 до 0,84. Кроме того, пропорционально повышается $\eta_{\text{с}}$ (от 0,31 до 0,47), несмотря на снижение скорости плавления электродов, что происходит из-за увеличения тепловой мощности дуги и удельных затрат теплоты на плавление электрода (см. рис. 2).

Проведенные исследования показали, что электроды с экзотермической смесью в покрытии наиболее эффективно могут быть использованы при сварочных и наплавочных работах, выполнение которых предусматривает предварительный и сопутствующий подогревы с последующим замедленным охлаждением.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлено, что введение в покрытие электродов экзотермической смеси повышает скорость плавления электродов за счет: увеличения тепловой мощности дуги; тепла, выделяющегося при протекании экзотермической реакции; снижения затрат на плавление газшлакообразующей части покрытия и улучшения технологических характеристик дуги.

2. Увеличение в покрытии количества экзотермической смеси до 53,4 % приводит к возрастанию КПД нагрева электрода $\eta_{\text{с}}$ до 0,415 и КПД нагрева основного металла $\eta_{\text{н}}$ до 0,815. С увеличением толщины покрытия до 2,6 мм указанные показатели достигают значений: $\eta_{\text{с}} = 0,47$ и $\eta_{\text{н}} = 0,84$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А. с. 737175 СССР, М.Кл² В 23К, 35/36. Состав электродного покрытия [Текст] / А. Ф. Власов [и др.]. – № 2541967/25-27 ; заявл. 10.11.77 ; опубл. 30.05.80, Бюл. № 20.
- [2] Власов, А. Ф. Технологические характеристики электродов с экзотермической смесью в покрытии для наплавки инструментальных сталей [Текст] / А. Ф. Власов, А. М. Куций // Сварочное производство. – 2011. – № 4. – С. 10–15.
- [3] Влияние титанотермитной смеси, входящей в электродное покрытие, на повышение производительности сварки [Текст] / И. С. Иоффе [и др.] // Сварочное производство. – 1980. – № 3. – С. 26–28.
- [4] Ерохин, А. А. Кинетика металлургических процессов дуговой сварки [Текст] / А. А. Ерохин. – М. : Машиностроение, 1964. – 256 с.
- [5] Особенности плавления порошковых лент с термитными смесями [Текст] / А. В. Зареченский [и др.] // Сварочное производство. – 1985. – № 8. – С. 39–41.
- [6] Походня, И. К. Газы в сварных швах [Текст] / И. К. Походня. – М. : Машиностроение, 1972. – 256 с.
- [7] Фролов, В. В. Теоретические основы сварки [Текст] / В. В. Фролов. – М. : Высш. школа, 1970. – 592 с.
- [8] Чигарев, В. В. Особенности плавления порошковых лент с экзотермическими смесями в наполнителе [Текст] / В. В. Чигарев, Д. А. Зареченский, А. Г. Белик // Автоматическая сварка. – 2007. – № 2. – С. 53–55.
- [9] Экспериментальное определение экзотермического процесса, протекающего при нагреве и плавлении электродов [Текст] / А. Ф. Власов [и др.] // Вісник ДДМА. – 2006. – № 2(4). – С. 65–68.

© А. Ф. Власов, Н. О. Макаренко

Надійшла до редколегії 14.05.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Квасницький