

УДК 621.791.75

Куций А. М.\*

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СОСТАВА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ**

Условия современного промышленного производства требуют интенсификации технологических процессов и повышения производительности труда. Повышение производительности ручной дуговой сварки может быть достигнуто введением в состав покрытия электродов до 70 % железного порошка при одновременном увеличении его толщины. Увеличение массы покрытия с железным порошком повышает значения коэффициентов наплавки и расплавления электрода [1]. Введение в электродные покрытия значительного количества железного порошка приводит к снижению их пластичности, вследствие чего для их качественного изготовления требуется принятие соответствующих мер: применение сильных пластификаторов, железного порошка определенной грануляции, комбинированного жидкого стекла и др. Кроме того, недостатком подобных электродов является затруднение процесса сварки из-за неравномерности плавления стержня и покрытия, образование так называемого «козырька», при котором неудовлетворительно формируется сварочный шов и гаснет дуга.

Еще одним из эффективных способов повышения производительности и равномерности плавления стержня и покрытия электрода является введение в состав покрытия экзотермической смеси в виде окислов железа и алюминиевого порошка. В результате протекания экзотермической реакции при плавлении электродного покрытия с экзотермической смесью, образующееся восстановленное железо поступает в шов, повышая производительность процесса сварки, а выделяющееся тепло способствует ускорению плавления покрытия и электрода в целом [2].

Основной составляющей экзотермических смесей, применяемых в сварочном и металлургическом производстве, является окалина, которая обычно составляет 70–95 массовых процентов экзотермической смеси и от её физико-химических свойств зависит, в конечном счете, качество металла шва или наплавленного металла.

Целью работы является исследование влияния экзотермической смеси на производительность ручной дуговой сварки и наплавки, сварочно-технологические свойства электродов, физико-химические и механические свойства металла шва и наплавленного металла.

На машиностроительных и металлургических заводах окалина является отходом кузнечно-прессового и прокатного производства. Исследования [3] показали, что окалина, образовавшаяся при прокатке металла, практически состоит из 2-х слоёв – вюстита  $\text{FeO}$  (92–95 %) и магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (5–8 %). Вюстит (фаза близкая к  $\text{FeO}$ ) растёт главным образом за счет диффузии железа, отличается пористым строением, малой, по сравнению с другими окислами, прочностью и меньшей, по сравнению с основным металлом, плотностью.

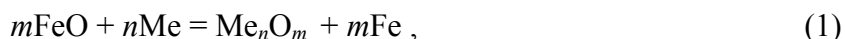
Легирующие элементы: никель, хром, кремний, молибден, вольфрам сосредотачиваются в наружном слое окалины, примыкающему к неокисленному железу и повышают устойчивость стали против окисления при высоких температурах. Примеси Cr, W, Mn и Si содержатся в окалине в виде оксидов, никель – в металлическом состоянии, а количество образующейся окалины уменьшается с увеличением содержания углерода в стали из-за её обезуглероживания и установления у поверхности восстановительной атмосферы, препятствующей образованию оксидов железа.

---

\* Работа выполнена по материалам и под руководством канд. техн. наук, доцента кафедры ОиТСП ДГМА Власова А. Ф.

Проведенные исследования [4] показали, что состав окалины в зависимости от марки проковываемой стали изменяется в достаточно узких пределах, а величина суммарного кислорода, рассчитанного по его содержанию в  $\text{FeO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4$ , колеблется в пределах 23,0 ... 23,8 %. Степень окисленности легирующих элементов устанавливали сравнением расчетных пределов содержания оксида при условии полного окисления образующего его элемента (значения переводных коэффициентов брались из данных химического анализа). Такие элементы, как Mn и Si, окисляются практически полностью и содержание их оксидов в окалине находится в расчетных пределах, а содержание оксидов Ni, Cr, Mo, V меньше их нижнего предела. Следовательно, эти элементы в процессе нагрева иковки окислялись не полностью, в окалине они находятся также и в неокисленном виде. Таким образом, окалины, взятые послековки заготовок из легированных сталей, могут быть рационально использованы при наплавке и сварке низко и высоколегированных сталей при необходимости легирования металла шва указанными элементами без введения соответствующего их количества в виде ферросплавов или металлических порошков. Результаты химического анализа исследуемых окалинок показали, что с уменьшением размера частиц от 0,28 до 0,10 мм увеличивается содержание суммарного кислорода, оксида железа, двуокиси хрома, окиси никеля, серы и фосфора; уменьшается количество закиси железа и практически не изменяется концентрация оксидов марганца. Дополнительная прокатка приводит к увеличению суммарного кислорода на 3,0... 4,5 %. Приведенные данные согласуются с результатами работы [5], в которой указывается, что равновесный вюстит и  $\text{Fe}_{\text{мет}}$  легко окисляется кислородом воздуха при температуре выше 220 °С, а содержание влаги в искусственной ржавчине не превышает 0,1...0,3 %. Таким образом, для изготовления электродов для сварки и наплавки с экзотермической смесью в покрытии может быть использована окалина от любой проковываемой низколегированной конструкционной стали, прошедшая через сито с 567 отв/см<sup>2</sup> и оставшаяся на сите с 3460 отв/см<sup>2</sup> без дополнительной прокатки. Смесью окислов железа с раскислителем, получаемую с учетом стехиометрических коэффициентов её составляющих, представляет собой экзотермическую смесь. В связи с тем, что в составе покрытия исследуемых электродов имеются: газшлакообразующий компонент (мрамор), а также окись железа, содержащаяся в окалине и рутиловом концентрате, которые диссоциируют на стадии нагрева и плавления покрытия с выделением, соответственно,  $\text{CO}_2$  и свободного кислорода, то часть раскислителей (в основном алюминий и титан) будет взаимодействовать с ними, не образуя экзотермической смеси. Непрореагировавшая же часть элементов-раскислителей с закисью железа представляет собой экзотермическую смесь.

В общем виде взаимодействие элементов-раскислителей с закисью железа можно представить в виде уравнения:



где  $m$  и  $n$  – стехиометрические коэффициенты.

Для электродов, содержащих в покрытии экзотермическую смесь на основе окалины были рассчитаны основные показатели производительности электродов, а именно: коэффициент наплавки  $\alpha_n$  (который для существующих марок электродов, не содержащих железный порошок в покрытии, составляет 8–9,5 г/А·ч) и скорость плавления электродов.

Коэффициенты  $\alpha_n$ ,  $\alpha_{p.э}$ ,  $V_{пл}$ ,  $V_{нок}$  рассчитывались по нижеприведенным формулам:

$$\alpha_{p.э} = \frac{G_э \cdot 3600}{I_n \cdot t} \quad (2)$$

где  $\alpha_{p.э}$  – коэффициент расплавления электрода, г/А·ч;

$G_э$  – сумма масс расплавленного электродного стержня и металлических составляющих покрытия, г;

$I_n$  – величина тока наплавки, А;  
 $t$  – время горения электрода, с.

$$V_{пл} = L_э / t, \quad (3)$$

где  $V_{пл}$  – линейная скорость плавления электрода, мм/с;

$L_э$  – длина расплавленного электрода, мм.

$$V_{пок} = G_{р.пок} / t, \quad (4)$$

где  $V_{пок}$  – массовая скорость плавления покрытия электрода, г/с;

$G_{р.пок}$  – масса расплавленного покрытия, г.

$$\alpha_n = \frac{G_{н.м} \cdot 3600}{I_n \cdot t}, \quad (5)$$

где  $\alpha_n$  – коэффициент наплавки, г/А·ч;

$G_{н.м}$  – масса наплавленного металла, г.

Состав исследуемого электродного покрытия приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав электродного покрытия

Название компонента	Содержание, %
Мрамор	5–15
Плавиковый шпат	5–15
Нефелиновый концентрат	5–20
Ферромарганец	5–10
Ферротитан	3–10
Железная окалина	32–60
Алюминиевый порошок	8–15
Алюминат натрия	22

Исследования показали, что оптимальное количество экзотермической смеси в разработанных электродах для сварки и наплавки штамповых сталей составляет 25...40 % от массы покрытия при отношении содержаний в нем окислы и алюминиевого порошка, равному 2,5... 3,0; при этом  $\alpha_n$  составлял 13,5 ... 15 г/А·ч. При содержании в покрытии электродов окислы в пределах 45 % по сравнению с электродами, содержащими такое же количество железного порошка, скорость плавления электродов увеличилась на 20...22 %, массовая скорость плавления покрытия – на 34...36 %, а коэффициент расплавления электрода – на 13...16 %. Для определения влияния толщины покрытия электродов с экзотермической смесью на показатели их расплавления изготавливались электроды с диаметром стержня 5,0 мм и толщиной покрытия 0,5...2,5 мм, что соответствовало изменению коэффициента массы покрытия от 0,17 до 1,14. Количество экзотермической смеси в исследуемых электродах составляло 35 % от массы покрытия. Проведенные исследования показали, что с увеличением толщины покрытия электродов повышаются значения коэффициента наплавки ( $\alpha_n = 11,4...14,6$  г/А·ч), выхода наплавленного металла ( $K_n = 0,82...1,24$ ) и к снижению коэффициента расплавления стержня ( $\alpha_{р.ст} = 12,8...10,5$  г/А·ч), выхода годного металла ( $K_2 = 0,71...0,58$ ) и потерь металла на разбрызгивание ( $\psi_{разбр} = 18...6,1$  %). Уменьшение  $\alpha_{р.ст}$  с увеличением толщины покрытия электродов происходит из-за того, что теплота, выделяющаяся при протекании экзотермической реакции, расходуется в основном на плавление

покрытия, увеличивая его массовую скорость плавления (0,18...1,03 г/с). Кроме того, часть тепла покрытию передается от стержня, вследствие чего снижается подогрев стержня и его скорость плавления. Во всех составах электродов процентное содержание экзотермической смеси было одинаково, а изменялось её массовое количество, то происходило лишь увеличение восстанавливаемого железа из его оксидов и повышение производительности расплавления покрытия электродов.

Общий коэффициент потерь электродного металла определялся из выражения:

$$\psi = \psi_{\text{разбр}} + \psi_{\text{ок}}^{\text{р}} + \psi_{\text{исп}}, \quad (6)$$

где  $\psi_{\text{исп}}$  – коэффициент потерь электродного металла на испарение, в расчетах принимался равным 0,5 %

Использование окалины в покрытиях электродов для ручной дуговой сварки и наплавки показало, что она на качество наплавленного металла и металла шва отрицательного влияния не оказывает, так как содержание оксидов  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  в ней не превышает 1–1,5 % при содержании в электродных покрытиях до 50 масс. % окалины.

Исследования также были направлены на усовершенствование связующего для электродного покрытия, т. к. применяемое жидкое стекло обладает недостаточной вязкостью и плотностью. Как показывают исследования и практика изготовления электродов, алюминат натрия обладает удовлетворительными связующими свойствами и его можно использовать вместо жидкого стекла. Однако в этом случае наблюдается недостаточная механическая прочность покрытия. При изготовлении предлагаемых в данной работе электродов с окалиной в покрытии приводит к тому, что давление при опрессовке возрастает до 25 МПа, в головке пресса после опрессовки остается до 70 % обмазочной массы. Прочность покрытия после прокалки незначительна, наблюдается осыпание покрытий после транспортировки электродов. Для устранения отмеченных недостатков при использовании алюмината натрия в качестве связующего для электродов, содержащих в покрытии окалину, в настоящей работе была выяснена возможность повышения связующих свойств алюмината путем растворения в последнем крахмала. В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что нагревание алюмината натрия с крахмалом вызывает протекание реакции между ингредиентами. Полученное в результате реакции связующее представляет собой щелочной раствор продуктов взаимодействия алюмината с крахмалом. При сушке при комнатной температуре и последующем прокаливании при 250 °С в течение одного часа такого связующего, образуется плотная, имеющая гладкую поверхность масса, представленная плотно упакованными кристаллическими новообразованиями, обеспечивающими ее механическую прочность. Таким образом, кипячение алюмината с крахмалом позволяет получать связующее с высокими значениями плотности и пониженными значениями вязкости, по сравнению с исходным алюминатом, что обеспечивает удовлетворительные условия опрессовки и требуемую механическую прочность покрытий. Газовый состав наплавленного металла и механические свойства покрытий приведены соответственно в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Газовый состав наплавленного металла

Содержание газов					
в см <sup>3</sup> на 100 г металла			в процентах		
Окись углерода	Азот	Водород	Кислород	Азот	Водород
82,5–86,7	13,5	4,0–4,2	0,059–0,062	0,0169	0,00036

Таблица 3

## Механические свойства электродных покрытий

	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость при 20 °С, Дж/см <sup>2</sup>
I	532–548	433–403	21,0–27,3	61,6–63,6	152–164
II	535–542	407–413	22,6–23,3	60,5	130–147
III	520–527	354–414	22,6–25,7	60,0–68,1	146–165

## ВЫВОДЫ

Для эффективного повышения производительности ручной дуговой сварки и наплавки целесообразно введение в состав покрытия электродов экзотермической смеси на основе окалины от легированных сталей, являющейся отходом прокатного производства, и алюминиевого порошка.

Разработаны электроды с экзотермической смесью в покрытии, обеспечивающие хорошую защиту сварочной ванны от кислорода и азота воздуха ( $O_2$  0,059–0,062 %,  $N_2$  0,0169 %), высокую производительность ( $\alpha_n = 13,5$ – $15,0$  г/А·ч при сварке электродами  $d = 5,0$  мм и  $\delta = 1,6$  мм на сторону), увеличение скорости плавления электродного покрытия в 1,5–1,8 раза по сравнению с известным.

При использовании разработанных электродов обеспечивается получение шва с гладкой мелкочешуйчатой поверхностью без подрезов, легкое удаление шлаковой корки при сварке угловых соединений, отсутствие пор при сварке по окисленной поверхности.

Использование алюмината натрия, прокипяченного с крахмалом, в качестве связующего для составляющих электродного покрытия приводит к уменьшению степени выгорания легирующих элементов, повышению пластичности электродного покрытия, улучшению условий опрессовки при изготовлении электродов и повышению механической прочности покрытия.

Повышение производительности ручной дуговой сварки и наплавки при использовании разработанных электродов по сравнению с существующими электродами аналогичного назначения происходит в 1,3...1,7 раза.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко В. М. Показатели плавления сварочных электродов с экзотермической смесью в покрытии / В. М. Карпенко, А. Ф. Власов, Г. Б. Билык // Сварочное производство. – 1980. – № 9. – С. 23–25.
2. Власов А. Ф. Технологические характеристики плавления электродов с экзотермической смесью в покрытии для наплавки инструментальных сталей / А. Ф. Власов, А. М. Куций // Сварочное производство. – 2011. – № 4. – С. 10–15.
3. Гончаров Ю. В. Микроструктура и механические свойства печной и воздушной окалины / Ю. В. Гончаров // Обработка металлов давлением : научные труды Днепропетровского металлургического института. – М. : Металлургия, 1967. – С. 208–220.
4. Власов А. Ф. Экспериментальное определение экзотермического процесса, протекающего при нагреве и плавлении электродов / А. Ф. Власов, В. М. Карпенко, А. И. Леценко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 2 (4). – С. 65–68.
5. Физико-химические свойства валковых сталей 9ХФ, 9Х2МФ, и 60Х2СМФ / Власов А. Ф., Карпенко В. М., Билык Г. Б., Веремей О. В. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 643–646.