



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ДУГИ И ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ E6013

А. ГАРСИЯ-РОДРИГЕС, К. Р. ГОМЕС ПЕРЕС, Р. КУИНТАТА ПУЧОЛ, инженеры
(Центральный ун-т «Марта Абрэ», провинция Лас-Вильяс, Санта Клара, Вилья Клара, Куба)

Дана оценка характеристик продолжительности и частоты коротких замыканий, а также электропроводимости при повторном зажигании дуги при сварке двумя типами покрытых электродов E6013. Определены режимы, при которых гарантируется наибольшая стабильность процесса дуговой сварки и влияние на него состава покрытия.

Ключевые слова: дуговая сварка, покрытый электрод, электрический заряд, перенос металла, зажигание дуги, стабильность процесса

Использование неорганических компонентов покрытий, которые при высоких температурах образуют тонкие поверхностные оксидные слои полупроводниковых элементов, позволяет выполнять сварку на прямой полярности и переменном токе, поскольку эти слои постоянно обеспечивают новые участки эмиссии заряженных частиц на конце электрода [1].

Тепловая энергия от прохождения электронов по металлическому сердечнику в электрическом поле расходуется на разложение компонентов покрытия. Она также приводит к испарению металлических и неметаллических компонентов и обеспечивает взаимодействие химических элементов в газообразном состоянии, частично ионизируя их и создавая плазму для зажигания сварочной дуги и дает необходимую энергию для надлежащего хода процесса [2].

Электрическая функция покрытия позволяет инициировать зажигание дуги и ее повторное зажигание, а также поддерживать горение дуги, сначала снижая работу выхода электронов из металла проволоки-электрода, а затем вводя элементы, которые распадаются в газообразном состоянии с низкой энергией ионизации. Поскольку распад и ионизация представляют собой эндотермические процессы, для газовой фазы, образующейся при распаде покрытия, с большим потенциалом ионизации требуется больше энергии для того, чтобы перевести ее в состояние плазмы.

Энтальпии элементов, вовлеченных в реакции рекомбинации, будут больше в составах, которые содержат элементы с большим потенциалом ионизации, необходимые для создания условий, гарантирующих надлежащее зажигание и поддержание горения дуги, и, в свою очередь, высокую эф-

фективность процесса переноса тепла. Химический и минералогический состав покрытия, содержание составляющих элементов и методики, методы и технологии изготовления электродов определяют их электрические характеристики.

Классификация электродов E6013 согласно спецификации ANSI/AWS A5.1 относит покрытие электрода как композицию с высоким содержанием оксида титана, а для стабилизации дуги в основном используется калий. Такие электроды демонстрируют хорошие рабочие характеристики и могут использоваться для сварки как на переменном, так и постоянном токе прямой и обратной полярности во всех положениях [3]. Электроды разных классификаций удовлетворяют определенным требованиям спецификаций в отношении химического состава наплавленного металла и механических свойств, уровней содержания влаги в покрытии, положений сварки, типа и полярности сварочного тока и т. д.

Целью настоящей работы является оценка характеристик электропроводимости при повторных зажиганиях, продолжительности и частоты коротких замыканий как показателей процессов переноса металла и электрического заряда, которые создаются при гравитационной сварке двумя типами покрытых электродов E6013 с различным химическим составом покрытия на переменном токе 160 А с одним и тем же углом наклона по отношению к свариваемой пластине.

Различия электрических характеристик покрытых электродов при различном химическом составе покрытия позволяют оценить влияние компонентов покрытия на работоспособность электрода и согласовать соответствующие методы для оценки электрических свойств электродов при разработке, изготовлении и тестировании этих сварочных расходных материалов, а также определить соотношение их цены и свойств.

Материалы и методы. Рассмотрим два типа электродов E6013 со средним диаметром сердеч-



ника 3,9 мм: один испанского производства торговой марки WURTH с покрытием бело-серого цвета, средней толщиной 5,83 мм, который обозначим символом Е, и электрод Е6013 марки ACI-NOX, изготовленный на Кубе, с покрытием темно-серого цвета и средней толщиной 5,77 мм, который обозначим символом С. Оба типа электродов имеют среднюю длину 349,6 мм. Группы электродов измеряли посредством случайной выборки без замены по 18 образцов каждого типа, извлеченных из герметичной промышленной упаковки.

Состав покрытия определяли в соответствии с сертифицированными методиками [4, 5] и их результаты представлены в табл. 1.

Образцы электродов для определения характеристик произвольно выбирали из промышленной упаковки. Промышленные электроды выпускают сериями, а в упаковке запаковывают электроды одной серии, что гарантирует в установленных пределах практически одинаковый состав как покрытия электродов, так и металлического сердечника. Результаты химического анализа оцениваемых сварочных материалов показывают различия в химическом составе по некоторым компонентам покрытия, что определяет основную переменную для сравнительных испытаний. Во время сварочных экспериментов использовали устройство для гравитационной сварки, гарантирующее условия, при которых изменения стабильности горения дуги вызываются только характеристиками покрытого электрода [6]. Для цифрового отбора значений напряжения и тока использовали установку, состоящую из сварочного трансформатора, преобразователя сигналов сварочного тока и напряжения в диапазоне $-5...+5$ В для ввода в компьютер, где аналоговые сигналы оцифровываются 12-битовым аналого-цифровым преобразователем платы сбора данных типа Advantech PCI-1710 с частотой выборки до 100 кГц, запрограммированным на получение 5 тыс. образцов в секунду во время эксперимента [7, 8].

Последовательность операций при проведении эксперимента. Для исследования влияния режима сварки выбрали две группы по девять электродов типа Е и С соответственно (Е6013 [3] диаметром 4 мм) для сварки на переменном токе 125, 140 и 160 А. С помощью случайной выборки без замены отбирали 18 электродов. Все они подвергались идентификации, определению размеров и визуальной оценке, для того, чтобы гарантировать отсутствие таких дефектов, как трещины, отколы и недопустимые отклонения эксцентриситета покрытия, а также отличия в массе и размерах от средних, указанных производителем. Для определения размеров использовали прибор типа «Foot of King» с разрешением 0,05 мм, а для определения массы — сертифицированные цифровые ве-

сы марки SARTORIUS с точностью измерения 0,1 г.

Эксперимент включает две схемы: в первой схеме независимой переменной является значение сварочного тока, которое варьировалось на трех уровнях (125, 140 и 160 А) для определения наиболее стабильного режима сварки для обоих типов электродов; во второй схеме независимой переменной выступал химический состав покрытия, который варьировался на двух уровнях для сравнения поведения электродов этих двух типов при сварке на наиболее стабильном режиме. Для каждой отличной независимой экспериментальной единицы (электрода) и для каждого уровня тока были сделаны по два повторных испытания, всего было выполнено 18 наплавов при гравитационной сварке. Наплавки выполняли на пластины из углеродистой стали Ст3 размером 200×50×10 мм в соответствии с российскими и украинскими нормами национальных стандартов.

Сравнительный статистический анализ выполняли между группами и внутри групп с учетом методов дисперсионного анализа (ANOVA) [9], но основываясь на непараметрических критериях проверки статистической гипотезы.

Все электроды, используемые в эксперименте, подвергали процессу просушки (в течение 1 ч при температуре до 120 °С) [10].

Определение наиболее стабильного режима. Базовая методика определения наиболее стабильного режима работы для обоих типов электродов описана в работах [6, 8]. Методика, примененная в этой работе, основывается на непараметрическом типе обработки, в котором для проведения анализа между группами (различные уровни тока)

Таблица 1. Химический состав покрытий электродов типа Е и С, мас. %

Объект определения	Е	С
SiO ₂	28,63	31,95
Al ₂ O ₃	0,63	0,63
Fe ₂ O ₃	3,3	3,32
TiO ₂	38,34	30,30
CaO	6,23	8,63
MgO	0,24	0,19
Na ₂ O	0,18	0,96
K ₂ O	4,37	5,52
P ₂ O ₅	0,04	0,03
MnO	5,34	3,07
SO ₃	0,13	0,13
PP1*	10,10	12,04
<i>Всего</i>	97,53	96,77

* Потеря зажигания при 1000 °С.



применяется критерий Муда. Этот критерий подтверждает гипотезу, что медиана (среднее значение) девяти распределений является одинаковой при выполнении подсчета количества наблюдений в каждом образце в любую сторону от «генеральной медианы» (общего среднего). Если для критерия Chi-квадрат $P \leq 0,05$, медиана образцов (среднее значение) значительно отличается с уровнем определенности (достоверности) 95 %, т. е. распределения чувствительны к изменениям режима.

Критерий Краскела–Уоллиса использовали для анализа внутри групп (повторные испытания на одном значении тока), подтверждая гипотезу, что медианы образцов, взятые при одинаковом значении тока, аналогичны. Данные объединяли и отсортировывали от меньшего к большему, показывая средний диапазон для каждого распределения. Если $P \geq 0,05$, можно утверждать, что между средними значениями любой из трех отобранных групп нет значительных различий, что указывает на то, что на заданном уровне тока получают статистически одинаковые распределения с достоверностью 95 %. По результатам анализа оценок отклонения абсолютного отклонения от медианы (АОМ) и интерквартильной широты IQR совпадение в обеих группах электродов представляет более стабильное поведение на режиме 160 А, что согласуется с результатами из [8], теоретическими расчетами и экспериментальными данными.

Поведение двух типов электродов при наиболее стабильном режиме (160 А). Перенос металла при коротких замыканиях. Определение продолжительности и частоты коротких замыканий [8, 11, 12], которое используется в данном исследовании, отличается от методологий, традиционно используемых при оценке стабильности переноса металла при коротких замыканиях [7, 13–16]. Используя специальные программы для выделения подобных параметров, начиная с напряжения и сварочного тока, с помощью статистической обработки можно получить вероятностные распределения каждого из них (рис. 1, 2).

С помощью критериев Шапиро–Вилка [17, 18] при определении степени отклонения от нормального распределения обоих параметров установлено, что данные распределения не могут считаться нормальными. Для определения показателей среднего значения и отклонения обоих параметров используют непараметрический метод. С помощью медианного критерия Муда [19] средние значения определяют в соответствии с гипотезой, что распространения одинаковы. Поскольку P — величина для критерия Chi-квадрат больше 0,05, медиана образцов статистически одинакова с достоверностью 95 %.

При определении частоты коротких замыканий критерий Муда применили к шести экспериментам в соответствии с P параметром, где медианы аналогичны при уровне определенности 95 %. В качестве показателя отклонения для каждого параметра X использовали оценку по абсолютному отклонению медиан (АОМ) [20]:

$$\text{АОМ} = \text{медиана}(\text{ABS}(X - \text{медиана}(X)))$$

Оценка продолжительности коротких замыканий электродов типа С1(22) по АОМ составляет 1,4 мс; С2(23) — 1,8; С3(33) — 1,6 (среднее значение 1,6), а для электродов типа Е1(22) и Е2(23) — 1,4; Е3(33) — 1,6 (среднее значение 1,46). Оценка периодичности коротких замыканий для электродов типа С1(22) составляет 48,4 мс; С2(23) — 42; С3(33) — 43 (среднее значение 44,46), а для электродов типа Е1(22) — 38,1; Е2(23) — 43,2; Е3(33) — 39,7 (среднее значение 40,33).

При оценке продолжительности коротких замыканий для электродов типа С наблюдается большое отклонение (на 8,33 %) по сравнению с электродами типа Е. В случае с периодичностью коротких замыканий наблюдается разница на 9,28 % при сравнении обоих параметров. Большая нестабильность при переносе металла при коротких замыканиях наблюдается при сварке электродами типа С.



Рис. 1. Вероятностное распределение продолжительности коротких замыканий для шести экспериментов

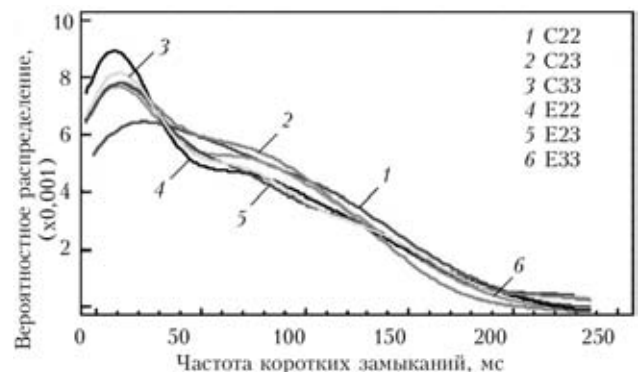


Рис. 2. Вероятностное распределение частоты коротких замыканий

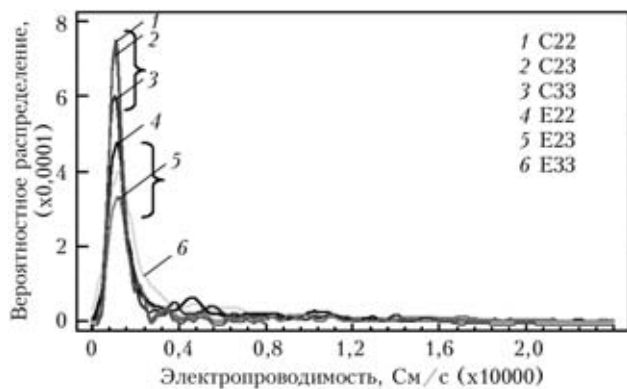


Рис. 3. Вероятностное распределение электропроводности при пиках повторного зажигания дуги для шести экспериментов при 160 А

Перенос электрического заряда. Для оценки стабильности процесса переноса электрического заряда используют значения удельной электропроводности во время пиков повторного зажигания дуги [21]. Применяют программы для определения возникновения пиков [17], их продолжительности и средней электропроводности и исследуют вероятностное распределение параметров (рис. 3). Степень регулярности электропроводности определяли путем расчета медианного критерия Муда.

Значение параметра P указывает, что распределения статистически различны, средние медианы отличаются на 14,32 %. Коэффициент Краскела–Уоллиса использовали для определения различия между группами или внутри распределений при испытании электродов одного типа [20] (табл. 2).

Коэффициент Краскела–Уоллиса поддерживает гипотезу о том, что распределения внутри групп одинаковы. Если $P > 0,05$, предполагается, что распределения каждого типа электрода статистически не различаются, т. е. различия в характере проводимости отсутствуют при повторном зажигании внутри групп электродов, которые оцениваются, и следовательно, имеют место различия между такими группами. Для оценки дисперсии использовали АОМ. Видно, что для электродов типа С этот параметр имеет большое отклонение.

Оценка проводимости по АОМ при токе 160 А для электродов типа С1(22) составляет 1022,75 См/с; С2(23) — 979,5; С3(33) — 812,4 (среднее значение 938,22); а для электродов типа Е1(22) — 683,5; Е2(23) — 515; Е3(33) — 739,2 (среднее значение 645,9), разница составляет 31,16%.

Сварочный ток и напряжение. Для сравнения электродов были взяты 84 тыс. зафиксированных значений напряжения и тока, синхронизированных во времени при расчете среднеквадратического значения (СКЗ).

Установлено, что стандартное отклонение тока и напряжения составляет не больше 1 % среднего

Таблица 2. Результаты определения коэффициента Краскела–Уоллиса для межгруппового анализа проводимости для электродов типа С и Е

Эксперименты	Категория	Статистическая проверка E-Test	P значение
C1(22)	321,67	1,23874	0,538283
C2(23)	324,62		
C3(33)	306,00		
E1(22)	375,00	2,9751	0,225925
E2(23)	344,17		
E3(33)	370,40		

значения трех экспериментов, тогда как различие в 5,65 % обнаружено для СКЗ напряжения электродов типа Е и С. Это связано с различием измеренной глубины козырька H_c на конце огарка электрода по окончании наплавки. Для электрода типа Е1 $H_c = 2$ мм; Е2 — 2,05; Е3 — 1,95 (среднее значение 2 мм), а для электродов типа С1 $H_c = 1,2$ мм; С2 — 1,05; С3 — 1,15 (среднее значение 1,13).

Глубина козырька при сварке электродами типа Е больше, чем при сварке электродами типа С, что изменяет длину дуги и напряжение при гравитационной сварке, поддерживаемое на кромке образованного козырька на конце использованного электрода.

Обсуждение результатов. При дуговой сварке металлов покрытыми электродами наблюдаются различные виды переноса металла: перенос металла при коротких замыканиях, каплями (глобулярный перенос), струйный и перенос при взрыве перемишки расплавленного металла, образующейся при коротких замыканиях [1, 19]. Такие параметры, как продолжительность и частота коротких замыканий дают информацию только о процессе переноса металла в этом режиме. В экспериментах, проведенных ранее [13, 22], как и в данном исследовании, рассматривали только короткие замыкания продолжительностью более 2 мс. При обработке эмпирических данных установлено, что короткие замыкания занимают приблизительно 10 % средней продолжительности наплавки (58 с), т. е. не весь металл наплавляется таким образом.

Процессы переноса электрического заряда проявляются как во время пиков повторного зажигания, так и в периоды горения дуги. Однако, как правило, проводимость за единицу времени учитывается только во время пиков повторного зажигания. Из-за условий, накладываемых использованием переменного тока, температура дуги понижается, снижая степень ионизации и проводимость дуги. При таких условиях увеличивается падение напряжения и имеют место пики повторного зажигания. Повторное зажигание дуги



возможно, если градиент напряжения на поверхности конца электрода обеспечивает достаточное количество энергии для разблокировки электронной эмиссии и тогда восстанавливается электрическая стабильность процесса сварки.

Можно предположить, что для стабильного процесса необходимо меньшее количество пиков повторного зажигания и они должны быть меньшей амплитуды. Однако в электрической цепи проявляются и другие типы пиков в периоды горения дуги, в начале и в конце коротких замыканий, в соответствии с развитием процессов переноса металла и электрического заряда.

Наплавки были представлены экспертам, которые признали их более показательными, чем те, которые получают при ручной дуговой сварке. Они были получены с помощью устройства гравитационной сварки, которое позволяет избежать влияние оператора или системы принудительной подачи на электрические характеристики процесса для оценки определенной реакции электрода при заданных условиях эксперимента.

Результаты анализа переноса металла. Вероятностные распределения продолжительности коротких замыканий (см. рис. 1) для всех экспериментов представляют собой кривые, близкие по форме для всех случаев. Это указывает на то, что исследуемый процесс переноса металла короткими замыканиями, который оценивали при сварке на токе 160 А, происходит одинаково у электродов обоих типов. Критерий Муда для этих параметров показывает, что медианы не имеют статистического различия. Однако среднее значение медианы указывает на наличие разницы в 7,5 % для продолжительности коротких замыканий у электродов типа С по сравнению с электродами типа Е, что вызвано меньшей глубиной козырька на конце электродов типа С по сравнению с электродами типа Е. Такое различие в глубине козырька для режима и угла подачи в основном объясняется различием физических и химических свойств покрытия (см. табл. 1).

Важными компонентами покрытия электродов типа С и Е являются оксиды TiO_2 , SiO_2 и CaO . Изучено распределение температуры плавления в системе $CaO-SiO_2-TiO_2$ как функции состава системы [23]. Систему оксидов, входящую в состав покрытия, в первом приближении можно оценивать по хорошо известной системе для анализа тенденции некоторых важных свойств.

Трехкомпонентная диаграмма состояния демонстрирует различные фазы, образовавшиеся из составов различных концентраций исследуемых компонентов при разных температурах. Принимая во внимание, что покрытие состоит только из CaO , SiO_2 и TiO_2 , и основываясь на составах покрытия (см. табл. 1), в диаграмме для покрытия электрода типа С при 1550 °С определена кристаллитная

фаза, состоящая, %: 12,8 CaO , 45,07 SiO_2 , 42,75 TiO_2 , и рутиловая фаза при 1600 °С для покрытия электрода типа Е 8,50 CaO , 39,16 SiO_2 , 52,34 TiO_2 , %.

Поскольку температура плавления покрытия электродов типа С меньше температуры плавления покрытия электродов типа Е, наличие наименьшей глубины козырька подтверждается у электродов типа С, так как для них требуется меньше энергии для расплавления при более низкой температуре в одинаковых тепловых условиях.

Отклонение продолжительности коротких замыканий выше у электродов типа С, что указывает на более стабильный (8,33 %) процесс переноса металла, чем у электродов типа Е.

Продолжительность и частота коротких замыканий являются параметрами, которые описывают один и тот же процесс переноса металла. Вероятностное распределение периодов коротких замыканий (см. рис. 2) имеет одинаковую характеристику для шести экспериментов при 160 А, указывая на высокую степень повторяемости и воспроизводимости полученных результатов, как и с продолжительностью коротких замыканий.

Результаты оценки по критерию Муда показывают, что все шесть экспериментов имеют статистически одинаковые медианы, поэтому между ними нет значительных различий. Средние значения соотносятся с реальными значениями измерений частоты коротких замыканий для этих типов электродов при 160 А, полученных с помощью оптических методик. Это указывает на то, что полученные результаты имеют важное физическое значение, подтверждая возможность использования процесса.

Отклонение периодичности коротких замыканий больше у электродов типа С, чем у электродов типа Е (9,28 %), что еще раз подтверждает результаты оценки стабильности процессов переноса металла при коротких замыканиях при сварке электродами этих типов.

Результаты оценки переноса электрического заряда. Распределения проводимости для всех шести экспериментов при сварке на токе 160 А (рис. 3) различны, хотя природа их вариаций отвечает типичной феноменологии процесса. Характерные статистические различия были обнаружены в медианных значениях всех шести экспериментов согласно критериям Муда. Коэффициент Краскела-Уоллиса (см. табл. 2) определяет различия, имеющие место между электродами обоих типов, что указывает на то, что статистические модели для каждого типа электродов можно легко распознать с помощью этого параметра.

Факт того, что средние значения у электродов типа С были выше (на 14,32 %), чем у электродов типа Е, можно объяснить, если учесть, что вза-



имосвязь между пиками тока и напряжения повторного зажигания дуги для одного момента времени при заданных различиях в указанной глубине козырька и необходимом большем времени для зажигания дуги при сварке электродами типа С увеличивает значение параметра, если сравнивать с другим типом электрода.

Исходя из степени отклонения параметра проводимости, можно утверждать, что он более нестабильный (на 31,16 %) при сварке электродами типа С, что связано с очевидно большей сложностью процессов зажигания и повторного зажигания дуги при проведении испытаний электродов этого типа.

Согласно оценке экспертов практически электрические характеристики электродов Е типа намного лучше, чем у типа С. Наблюдаются меньшие потери покрытия в процессе зажигания и установления дуги и меньшие потери на разбрызгивание.

Количество энергии за единицу времени, затрачиваемое на ионизацию покрытия электродов типа Е, согласно выполненным расчетам, составило 149,64 Дж, тогда как энергия, необходимая для ионизации покрытия электродов С типа, составила 149,89 Дж, т. е. не существует никакой разницы в энергии, поглощаемой обоими составами. Ионизационная энтальпия газов не является основанием энергетических различий между обоими процессами, однако энергия, поглощенная атомами кальция, натрия и калия для ионизации покрытия электродов типа Е, составила 39,98 Дж, тогда как та же энергия для покрытия электродов типа С составила 56,50 Дж при заданных концентрациях атомов и степенях ионизации при температуре 6000 К. Энергия, поглощенная при ионизации этих элементов с низким потенциалом ионизации, у электродов типа С была больше на 70,7 %, что указывает на большую затрудненность процесса зажигания, который происходит при сварке электродами типа С. Соответственно элементы с низким потенциалом ионизации имеют значительный атомный радиус, что приводит к увеличению вероятности соударения с последующими энергетическими потерями, что может способствовать дестабилизации переноса заряда в процессе горения дуги.

Выводы

1. Сравнимые типы электродов не демонстрируют значительной статистической разницы в отношении средних значений характерных параметров процесса переноса металла при коротких замыканиях. Однако точный расчет степени отклонений указывает на большую нестабильность процесса сварки электродами типа С по сравнению с электродами типа Е.

2. Отклонение параметра электрической проводимости во время пиков повторного зажигания демонстрирует высокую репрезентативность при различии в 31,16 % в электрическом поведении обоих типов электродов, однако, оно указывает только на стабильность процесса переноса электрического заряда во время пиков повторного зажигания.

3. Электроды типа С показывают большую неопределенность при зажигании дуги и поддержании процесса горения дуги в сравнении с электродами типа Е. Это экспериментально проверено и еще раз подтверждено характером поведения проводимости и тем фактом, что для электродов типа С энергия, необходимая для ионизации элементов покрытия с более низким потенциалом ионизации, согласно расчетам, была больше на 29,24 %.

1. *Lancaster J. F. et al.* The physics of welding. — [1986]. — 340 p. — Intern. Inst. of Welding. Second ed.
2. *Schellhase M.* Der Schweißlichtbogen-ein technologisches Werkzeug. — Berlin: Editora Tecnica de Berlin, 1985. — 236 S.
3. *ANSI/AWS.* Specification for carbon steel electrodes for shielded metal arc welding, Standard 5.1-91. American National Standards Institute/American Welding Society. — Miami, Florida: AWS, 1991.
4. *Geotecnologia.* Reporte de resultados. Certificado de Ensayo No 54. Laboratorio de analisis quimicos. — Geominera del Centro. — Santa Clara, 2006.
5. *Geotecnologia.* Reporte de resultados. Certificado de Ensayo, No.6M Laboratorio de analisis mineralogico.Geominera del Centro. — Santa Clara, 2006.
6. *Garcia-Rodriguez A. et al.* Valoracion del desempenio de un dispositivo de autoalimentacion diseñado para la evaluacion operativa de electrodos revestidos // Soldagem & Inspecao. — 2009. — 14, № 1. — P. 68–73.
7. *Sanchez-Roca A., Carvajal F. H.* Nuevo criterio para el analisis de estabilidad del proceso de soldadura GMAW, empleando tecnicas de Emision Acustica e Inteligencia Artificial. Tesis doctoral. — Santiago de Cuba, 2006. — 105 p.
8. *Garcia-Rodriguez A.* Comportamiento del tiempo de duracion, la frecuencia de los cortocircuitos y la conductividad electrica durante el pico de reencendido del arco // Soldagem & Inspecao. — 2009. — 14, № 1. — P. 58–65.
9. *Guerra C. W., Menendez E., Barreras R.* Estadistica. — Habana: Felix Varela, 2003. — 376 S.
10. Colectivo. Guia de autopreparacion para la clase practica No 4. Asignatura de tecnologia de soldadura. Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, 2006.
11. *Garcia-Rodriguez A.* Procesamiento digital de las secales del arco electrico en la soldadura SMAW. [CD-ROM. COMEC. Conf. intern. de ingenieria mecanica]. — Feijoo, 2008.
12. *Garcia-Rodriguez A., Gomez Perez CR.* Criterios sobre algunas metodologias de caracterizacion operativa de electrodos revestidos en la soldadura en modo de transferencia metalica por cortocircuitos // Soldadura & Inspecao. — 2008. — 13, № 2. — P. 141.
13. *Farias J. P.* Metallic Mg as a coating component in C–Mn–Ni electrode. — Tesis Doctoral. — Universidad Federal de Santa Catarina, 1993. — 225 p.
14. *Souza M.* Validacion de un sistema computarizado para el control de la calidad de electrodos revestidos. — Tesis de Maestria. — Universidad Federal de Uberlandia, 1995.
15. *Risone N.M.R. et al.* ANSI/AWS A5.1-91 E6013 Rutile electrodes: The Effect of calcite // Welding J. Supplement. — 2002. — P. 113–124.
16. *Farias J. P., Scotti A., Surian E.* The effect of wollastonite on operational characteristics of AWS E6013 electrodes // J.



- of the Brazilian Society of Mechanical Sci. and Eng. — 2004. — 26, № 3. — P. 17.
17. *Molinero L. M.* Y si los datos no siguen una distribución normal? Asociación de la sociedad española de hipertensión arterial, 2003.
18. *Shapiro S. S., Wilk M. B.* An analysis of variance test for normality (complete samples) // *Biometrika*. — 1965. — 52, № 3, 4. — P. 591–611.
19. *Mood A. M.* Introduction to the theory of statistics. — 3-d ed. — McGraw-Hill, 1974. — 540–541 p.
20. *Ripley B. D.* Robust Statistics. — Springer-Verlag, 2004. — 11 p.
21. *Ponomarev V.* Arc welding process statistical analysis. Methodical approaches, analysis conceptions, experiences, 1997.
22. *Sanchez-Roca A., Carvajal F. H.* New stability index for short circuit transfer mode in GMAW process using acoustic emission signals // *Sci. and Technology of Welding and J.* — 2007. — 12, № 5. — P. 460–466.
23. *Metallurgy.* Slag atlas. Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Verlag Stahleisen M.B.H. Duesseldorf, 1981. — 282 S.

The paper gives an assessment of the characteristics of duration and frequency of short-circuiting, as well as electrical conductivity at arc re-ignition in welding with two types of coated electrodes E6013. Modes, in which the highest stability of the process is guaranteed, and influence of coating composition on it are determined

Поступила в редакцию 24.01.2012

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ И МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ ГИБРИДНЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Научно-исследовательская работа по указанной теме была завершена в 2011 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона (руководитель темы — д-р техн. наук Ю. С. Борисов).

Для проведения исследований созданы лазерно-плазменные экспериментальные стенды с соосным и перекрестным взаимодействием плазменной струи и лазерного луча, оснащенные дуговым плазмотроном МП-4 (2,5 кВт), интегрированным лазерно-дуговым плазмотроном ИЛДП-01 (5 т) и СО₂-лазером (10 кВт). Калориметрическими измерениями установлено, что в случае соосного взаимодействия луча СО₂-лазера и Ar-плазменной струи в плазмотроне ИЛДП-01 степень поглощения струей энергии лазера достигает 15 %, при перекрестном пересечении Ar-плазменной струи лазерным лучом она оставляет 20...30 %. Это приводит к образованию зоны оптического разряда и повышению температуры струи Ar-плазмы до (15...25)·10³ К. Показано, что в их условиях создается возможность протекания газофазных (CVD) процессов нанесения покрытий. Установлено, что при подаче в Ar-плазменную струю газовой смеси 96Н₂ + 4СН₄ на поверхности подложек из молибдена и кремния, нагретых до 700...800 °С, по данным рамановской спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии формируются алмазные структуры. Установлено, что при обработке такой струей образцов из стали и Ti-сплава, нагретых до 200...300 °С, на поверхности формируется слой алмазоподобного углерода толщиной 0,3...3 мкм с твердостью на стали — до 35 ГПа, на Ti-сплаве — до 20 ГПа.

Исследованы процессы, происходящие в условиях активированного лазерно-микроплазменного напыления покрытий из порошка титана и продуктов распыления Ti-проволоки при использовании в качестве активных газов N₂, СН₄, 96Н₂ + 4СН₄. Установлено, что в процессе напыления в результате активации реакций взаимодействия поверхности Ti-частиц с газовой фазой идет образование TiC, TiN, TiCN, которые формируют в покрытии дисперсные упрочняющие фазы, повышающие его твердость до 13...17 ГПа.

Выполнены эксперименты по плазменному нанесению тонких оксидных покрытий из TiO₂ и Al₂O₃ с использованием нанодисперсных суспензий и продуктов разложения прекурсоров — металлоорганических соединений.

Исследован процесс гибридного лазерно-плазменного нанесения покрытий, формирующихся из продуктов лазерной абляции мишени материала покрытия (Ni, Al₂O₃), переносимых на подложку ламинарной струей Ar-плазмы. Установлена возможность получения таким путем покрытий Al₂O₃ толщиной 10...20 мкм при исключении образования парокapельной фазы.

Проведен анализ областей практического применения разработанных процессов, к основным из которых относятся лазерно-плазменное упрочнение деталей ДВС (в частности, работы ИЭС с заводом им. Малышева), оборудования полиграфической и деревообрабатывающей промышленности, металлургического оборудования, штамповой оснастки; нанесение алмазоподобных покрытий на литейные и прессформы пластиковой промышленности, детали холодильных компрессоров, плунжера ДВС, инструмент и приборную технику.