



(при этом  $a_1(a - a_1)$  достигает максимума). Тогда первое условие (3) можно привести к простому виду

$$\sqrt{B} - \sqrt{b} < \alpha, \tag{7}$$

где

$$B = \frac{M}{L} \sup E(t), \quad b = \frac{M}{L} \inf E(t). \tag{8}$$

Неравенство (7) с учетом (4), (6), (8) и обозначений  $E_s = \sup E(t)$ ,  $E_i = \inf E(t)$  запишем в окончательном виде

$$\sqrt{E_s} - \sqrt{E_i} < \frac{S_a - S_s + R}{\sqrt{ML}}. \tag{9}$$

Таким образом, установлен следующий факт: если выполняется условие (9), то процесс дуговой сварки плавящимся электродом с изменяющейся напряженностью электрического поля в указанных границах  $E_s$  и  $E_i$  асимптотически устойчив.

Неравенство (9) можно представить также в несколько ином виде

$$\mu > -1 + \eta, \tag{10}$$

где

$$\mu = \frac{S_a - S_s}{R}, \quad \eta = \frac{\sqrt{ML}}{R} (\sqrt{E_s} - \sqrt{E_i}). \tag{11}$$

Достаточное условие асимптотической устойчивости (10) отличается от необходимого и достаточного условия

$$\mu > -1,$$

полученного в работе [2] для случая  $E = \text{const}$ , лишь дополнительным членом  $\eta$ , характеризующим влияние изменений электрического поля  $E$  в столбе дуги на устойчивость процессов, протекающих в сварочной цепи.

На рис. 1 показана область устойчивости в плоскости безразмерных параметров  $\mu$  и  $\eta$ , построенная по формуле (10). Исходя из этого рисунка и выражения (10) можно сделать вывод, что с увеличением  $\eta$  область устойчивости сужается.

Из второго соотношения (11) следует, что значения  $\eta$  возрастают при увеличении разности между значениями  $\sqrt{E_s}$  и  $\sqrt{E_i}$  и индуктивности  $L$ . На рис. 2 приведена кривая зависимости  $\eta = \eta(L)$ , построенная по формуле (11) при  $E_s = 4$  В/мм,  $E_i = 1$  В/мм,  $M = 0,4$  мм/(А·с),  $R = 0,02$  Ом. Из рисунка видно, что при малых (до 1 мГн) значениях  $L$  значения  $\eta$  остаются в пределах единицы. Это означает, что влияние флуктуаций электрического поля в столбе дуги на устойчивость процесса, протекающего в сварочной цепи, столь мало, что им можно пренебречь. При достаточно же больших значениях  $L$  (десятки миллигенри) значения  $\eta$  возрастают ( $\eta > 3$ ). При этом, как видно из рис. 1, область устойчивости значительно сужается.

Таким образом, влияние указанных флуктуаций на устойчивость процесса при больших значениях существенно, поэтому крутизну вольт-амперной характеристики источника сварочного тока  $S_s$  следует выбирать с учетом критерия (9), а именно, чтобы обеспечивалось условие  $S_s < S_a + R - \sqrt{ML}(\sqrt{E_s} - \sqrt{E_i})$ .

1. Меркин Д. Р. Введение в теорию устойчивости движения. — М.: Наука, 1976. — 320 с.
2. Цыбульский Г. А. К вопросу об устойчивости процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. — 2002. — № 5. — С. 17–19.

A sufficient condition has been derived, guaranteeing the asymptotic stability of the consumable-electrode arc welding process in the case, when the electric field intensity in the arc column varies within certain known limits.

Поступила в редакцию 26.02.2002

УДК 621.9.048

## ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ГРАФИТОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ-ИНСТРУМЕНТОВ ПРИ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ

**В. М. БОКОВ**, канд. техн. наук (Кировоград. гос. техн. ун-т),  
**Л. И. МАРКАШОВА**, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Экспериментально доказано образование на торцевой поверхности электрода-инструмента (ЭИ) в процессе размерной обработки электрической дугой (РОД) двухфазного металлографитового постоянно возобновляющегося слоя, воспринимающего тепловой удар от горения дуги. Описан физический механизм электроэрозионной стойкости графитовых ЭИ в условиях процесса РОД.

*Ключевые слова:* обработка металла, электрическая дуга, износ, электроды-инструменты

В современном машиностроении электрическая дуга как источник тепла широко применяется не только для соединения металлов, например в сварочных процессах, но и для их разъединения, в частности, при реализации способа размерной обработки электрической дугой (РОД).

Формообразование торцевой поверхности электрода-заготовки (ЭЗ) при РОД происходит в результате отражения формы торцевой поверхности электрода-инструмента (ЭИ) и поэтому его точность зависит от электроэрозионной стойкости ЭИ, которую принято оценивать его относительным линейным износом  $\gamma$  [1]. Последний определяется как отношение абсолютного линейного износа ЭИ к глубине обработки и выражается в процентах.

Технология РОД осуществляется в мощном поперечном гидродинамическом потоке рабочей жидкости, который оказывает влияние не только на процесс эвакуации продуктов эрозии из межэлектродного промежутка, но и на энергетическое состояние дуги [2], изменяя плотность технологического тока и напряженность электрического поля в ней. Так, с уменьшением скорости потока зафиксировано уменьшение плотности технологического тока и напряженности электрического поля в дуге, что приводит к интенсификации переноса материала ЭЗ на ЭИ.

Как следует из работ [3, 4], перенос материала ЭЗ на ЭИ при электроэрозионной обработке в свою очередь приводит к компенсации факельного разрушения ЭИ, а следовательно, к уменьшению его относительного линейного износа. Перенос материала, как установлено, усиливается с повышением продолжительности и уменьшением скважности импульса, что приводит к подавлению факельной составляющей теплопереноса.

В условиях РОД продолжительность горения электрической дуги на одном месте может превышать длительность горения

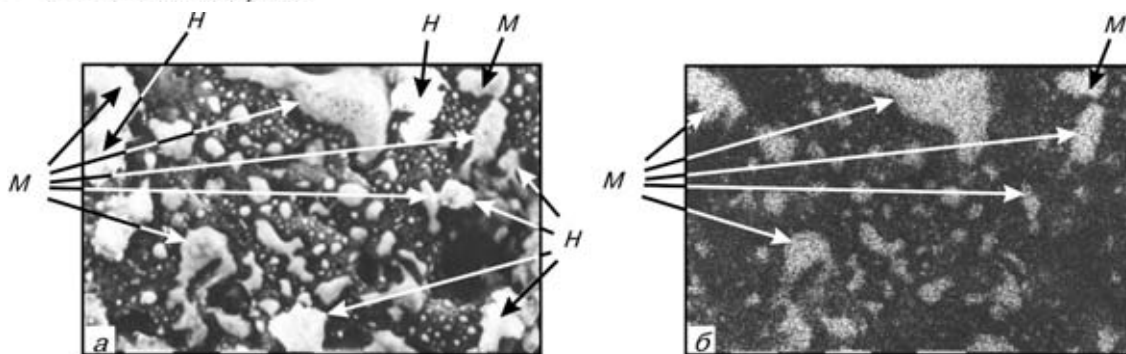


Рис. 1. Фрактография структуры поверхности графитового ЭИ после РОД (*а*,  $\times 580$ ) и соответствующая ей картина распределения железа (*б*,  $\times 580$ )

на одном месте нестационарных электрических разрядов (электроискрового и электроимпульсного). По этой причине при реализации процесса РОД следует ожидать более интенсивного массопереноса материала ЭЗ на ЭИ по сравнению с электроимпульсной обработкой.

Использование графитовых ЭИ в органической рабочей среде и при электроимпульсной обработке [1], и при РОД [2, 5] обеспечивает возможность реализации малоизносной ( $\gamma_n < 1\%$ ) обработки. Согласно данным работы [6], в основе физической модели стойкости ЭИ лежит гипотеза о самовосстановлении графитовых ЭИ за счет осаждения на их торцевой поверхности защитной пленки преимущественно из графита, получаемого из продуктов пиролиза рабочей жидкости. Пленочная защита гарантируется при соблюдении трех основных условий:

на поверхности участка ЭИ температура превышает или равна некоторой критической температуре пленкообразования и меньше температуры плавления;

наличие в достаточном количестве жидких и газообразных продуктов пиролиза рабочей жидкости;

времени пленкообразования достаточно для отложения на данном участке пленки требуемой толщины.

Сравнительный анализ механизмов эрозии ЭИ после РОД и электроимпульсной обработки показал, что с физической точки зрения данные процессы во многом подобны. Прежде всего их объединяет тепловая природа разрушения электродов и возможность применения графитовых ЭИ в органической рабочей среде. Именно поэтому можно предположить, что все три условия пленочной защиты вполне удовлетворяются и при формообразовании способом РОД.

Экспериментальную проверку гипотезы о наличии на торцевой поверхности графитового ЭИ после РОД двухфазного металлографитового защитного слоя осуществляли посредством следующих операций:

производили РОД торцевых поверхностей образцов кубической формы со стороной куба 10 мм в специальном приспособлении, позволяющем прокачивать рабочую жидкость в ламинарном (режим Рейнольдса не превышает 400...1000) плоскопараллельном режиме (с постоянной скоростью потока). Материал ЭИ — графит МП7, материал ЭЗ — сталь 45. Полярность обработки — обратная (ЭЗ — минус). Рабочая жидкость — органическая среда (масло промышленное И-20 А ГОСТ 20790-75 — 70 %; керосин осветительный ГОСТ 4953-68 — 30 %); кинематическая вязкость  $\nu = 9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Технологический ток  $I = 12,5 \text{ А}$ ; напряжение на дуге  $U = 45 \text{ В}$ ; статическое давление на входе потока в межэлектродный зазор 1,2 МПа;

методом аналитической растровой электронной микроскопии (установка Philips-СЭМ 515, фирма «Philips», Голландия) анализировали структурно-фазовое состояние поверхности графитового ЭИ после РОД. В отраженных электронах изучали общую картину структуры и ее отдельных фрагментов (рис. 1, *а*). Как видно из рисунка, картина распределения для данного режима обработки — «островковая» и неоднородная. Далее в характеристическом излучении на фоне общей анализируемой площади получали картину локального распределения железа — основного компонента материала ЭЗ, перенесенного на ЭИ (рис. 1, *б*). Сравнивая рис. 1, *а* и рис. 1, *б*, можно сделать вывод, что «островки» на поверхности графитового ЭИ имеют сложный фазовый состав, т. е. представляют собой композиты, причем, кроме металлической Fe-фазы *М*, они включают неметаллическую фазу *Н*, которая видна (рис. 1, *а*) и не видна (на рис. 1, *б*). Данным методом выполнена количественная оценка концентрации металлической фазы в структурных «островковых» образованиях. На рабочей поверхности ЭИ выявлены «островковые» участки с повышенным содержанием железа (примерно 91...98 ат. %). Наряду с ними присутствуют и «островковые» зоны примерно с 1...6 ат. %;

методом микродифракционной просвечивающей (трансмиссионной) электронной микроскопии (электронный микроскоп JEM-200 СХ, фирма «Джеол», Япония, ускоряющее напряжение 200 кВ) исследовали структуру образца графитового ЭИ после РОД на различной глубине от рабочей (внешней) поверхности вплоть до не нарушенных по структуре слоев. С этой целью делали тонкий (немного более 1000 мкм) срез слоя с образца ЭИ, параллельный рабочей поверхности, и, защищая рабочую поверхность специальной заглушкой, производили ионное утонение среза до образования прозрачных (для электронного пучка) участков на поверхности. Для получения информации о структуре подповерхностных слоев графитового образца срезы на поверхности и на глубине подготавливали методом двустороннего ионного утонения (скорость утонения ~5 мкм/ч). В результате прямых исследований структурно-фазового состояния на просвет на рабочей поверхности ЭИ выявлены «островки» неправильной геометрической формы размерами примерно  $0,6 \times 1,0 \text{ мкм}$ , имеющие сравнительно однородную внутреннюю структуру (рис. 2, *а*), а также «островки» с неоднородным составом во внутренних объемах (рис. 2, *б*). Размеры последних составляют примерно  $3 \times (1,5...2,0) \text{ мкм}$ , а внутренних образований, просматриваемых на темнопольных изображениях (рис. 2, *з*) в виде светлых пятен различных размеров — 0,03...0,07 мкм (рис. 2, *б*). На микродифракционном отражении (рис. 2, *в*) на фоне колец, присущих углероду, зафиксированы рефлексы точечного типа, характерные для железа;

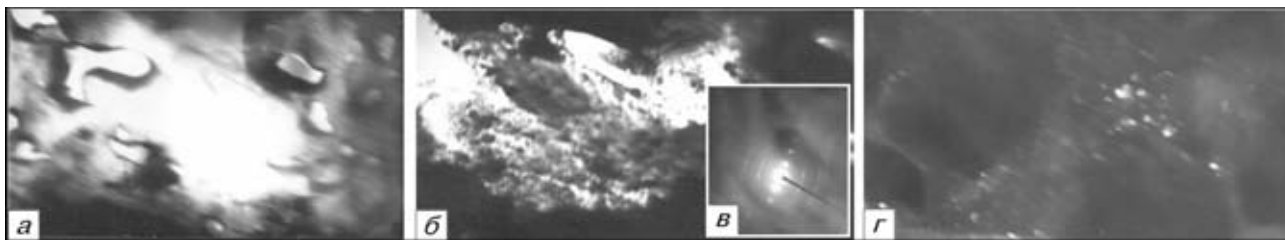


Рис. 2. Структуры «островков» на поверхности графитового ЭИ после РОД: *а* — плотные, мелкие и простые по составу ( $\times 20000$ ); *б* — более крупные и сложные по составу ( $\times 30000$ ); *в* — соответствующая им микродифракционная картина с кольцевыми отражениями от углерода и точечными от железа ( $\times 55000$ ); *з* — темнопольное изображение внутренних образований структуры сложных по составу «островков» ( $\times 30000$ )

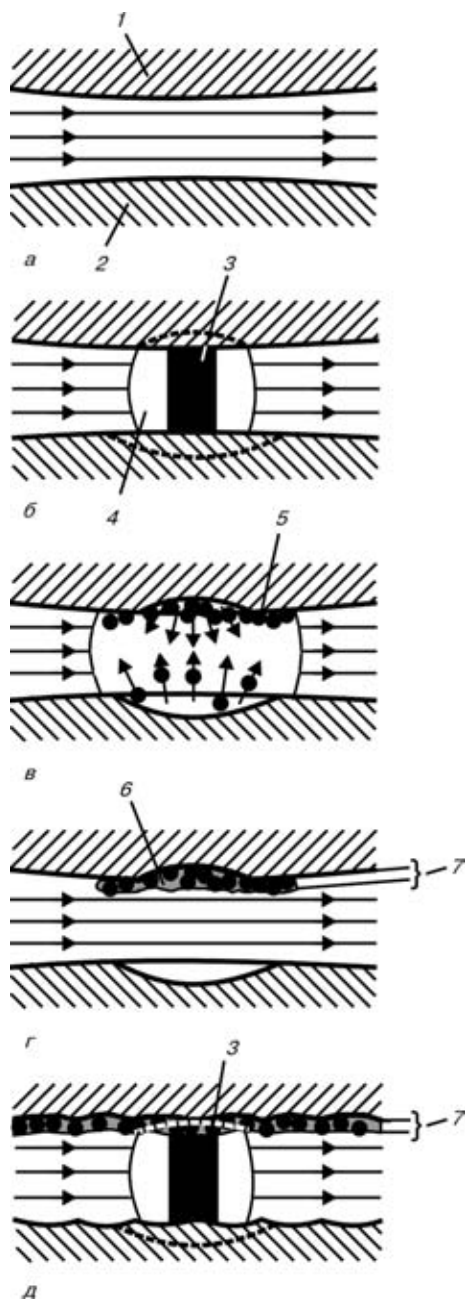


Рис. 3. Последовательность (а – г) механизма образования защитного двухфазного металлографитового слоя на ЭИ, воспринимающего тепловой удар от горения дуги: 1 – ЭИ; 2 – ЭЗ; 3 – дуга; 4 – газовая полость; 5 – материал ЭЗ; 6 – графитный слой; 7 – защитный слой

с помощью метода электронной Оже-спектроскопии (система LAS-2000 фирмы «Riber», Франция) изучали поверхность графитового ЭИ после РОД с использованием спектрометра типа «цилиндрическое зеркало». Спектры регистрировались с энергетическим разрешением 3,4 эВ на самописце и в дальнейшем обрабатывались на ЭВМ для расчета профилей по глубине. В результате исследования обнаружено, что неметаллические «островки» на рабочей поверхности графитового ЭИ имеют концентрацию углерода в пределах 71,5... 100,0 ат. %, причем слой со 100 ат. % углерода зафиксирован до глубины 12 нм; с 90 ат. % – до глубины 120 нм; а с 80 ат. % – до 540 нм; методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (система LAS-2000) производили оценку энергии связи электронных оболочек, входящих в состав образцов элементов, и осуществляли элементный количественный анализ непроводящих поверхностей исследуемых образцов. В результате выявлена следующая интегральная концентрация элементов в поверхностном слое графитового ЭИ: углерода – 97,82 ат. %; кислорода – 1,86 ат. %; железа – 0,32 ат. %. Обнаружены «островки», содержащие железо на глубине 600 нм и глубже.

Карбиды не выявлены. Кроме того, установлено, что блоки разных структур обволакиваются тонкой (толщиной до 30 нм) пленкой неизвестного соединения [С–Н], находящейся в особом (нетокопроводном) состоянии, что подтверждается эллиптическими кольцами на микродифракционном отражении (рис. 2, в), характерными для нетокопроводных материалов. Следует отметить, что обнаруженные кольца микродифракционного отражения внутренних структур графитовых «островков» на ЭИ (концентрические, не искаженные). Последнее свидетельствует о токопроводности внутреннего графита.

Для уточнения элементного состава поверхности графитового ЭИ после РОД и определения типа присутствующих химических соединений образцы исследовали методом вторичной ионной масс-спектрометрии (система LAS-2000) с использованием квадрупольного масс-спектрометра с регистрацией масс-спектров с помощью ЭВМ. В результате анализа получена масс-спектрограмма рабочей поверхности ЭИ после РОД, содержащая наряду с другими ионами ионы углерода  $C^+$  и железа  $Fe^+$ , что подтверждает наличие двухфазного металлографитового слоя.

Анализ результатов исследования показал, что в условиях процесса РОД может быть справедлив следующий механизм образования защитного металлографитового слоя на ЭИ (рис. 3): происходит сближение электродов 1, 2 при прокатке рабочей жидкости между ними под технологическим давлением в плоскопараллельном режиме (рис. 3, а);

возбуждается первая дуга 3, приводящая к образованию газовой полости 4 (рис. 3, б);

в момент горения дуги и спустя некоторое время после перехода ее на новый участок происходит плавление, испарение и взрывообразный термический выброс материалов ЭИ и ЭЗ из лунок. Вследствие этого на торцевой поверхности ЭИ откладывается материал ЭЗ5 (рис. 3, в, позиция 5). Продолжается дальнейшее расширение газовой полости;

разрушается (схлопывается) газовая полость. На горячие участки ЭИ и на перенесенный на него материал ЭЗ осаждается графит 6 как результат пиролиза органической рабочей жидкости. Образуется двухфазный металлографитовый слой 7 на ЭИ (рис. 3, в);

возбуждается новая дуга 3 в этом же месте, но между защитным слоем и ЭЗ (рис. 3, д).

Следует отметить, что благодаря образованию именно двухфазного защитного металлографитового слоя на ЭИ удовлетворительно решается проблема его стойкости. При этом металлическая фаза, отличающаяся относительно небольшим удельным электрическим сопротивлением (для железа  $\rho_e = 9,71 \cdot 10^{-8}$  Ом·м), относительно низкой температурой плавления (для железа  $t_{пл} = 1535$  °С), сравнительно повышенной теплопроводностью (для железа  $\lambda = 75$  Вт/(м·К)) и каркасной пространственной структурой, выполняет тройную функцию: во-первых, эффективно (с относительно небольшим расходом энергии на теплообразование) подводит электрический ток в момент горения дуги к графитовой фазе, удельное электрическое сопротивление которой в 80... 140 раз больше (для углерода  $\rho_e = (4... 14) \cdot 10^{-6}$  Ом·м); во-вторых, эффективно отводит (рассивает) тепло в тело ЭИ и тем самым уменьшает его температуру, а следовательно, и степень разрушения защитного слоя; в-третьих, создает предпосылки для прочного сцепления с графитовой фазой за счет развитой поверхности.

В то же время графитовая фаза, характеризуемая высокой температурой плавления-сублимации (для углерода –  $t_{пл} = 3950$  °С), эффективно воспринимает тепловой удар от горения электрической дуги и тем самым обеспечивает электроэрозионную стойкость ЭИ.

Толщина защитного слоя  $S$  на ЭИ, как показано выше, зависит от плотности технологического тока в дуговом разряде и с ее повышением снижается. Поскольку плотность технологического тока в условиях процесса РОД зависит от гидродинамического фактора, то с уменьшением скорости потока  $v$  толщина слоя  $S$  увеличивается, а слой уплотняется. Если на малых скоростях защитный слой сплошной, то при повышении скорости он может иметь дискретную (пористую) структуру. Увеличение толщины защитного слоя указывает на нарушение равновесия между скоростями его образования и разрушения, вследствие чего зафиксировано такое явление, как отрицательный износ ЭИ. В результате интенсивного повышения массопереноса не только на ЭИ, но и на ЭЗ, на торцевую поверхность которой при весьма низких скоростях потока осаждается гра-



фитовый слой, процесс дестабилизируется и сопровождается интенсивным шлакованием межэлектродного зазора, короткими замыканиями, что приводит к понижению производительности обработки.

Если процессы образования и разрушения защитного слоя сбалансированы, то износ ЭИ может быть минимальным и приближаться к нулю. В реальных условиях процесс разрушения защитного слоя немного опережает процесс его образования, в результате этого защитный слой может быть сплошным, но тонким (толщина слоя меньше глубины лунки) или иметь дискретную структуру. Износ ЭИ в этом случае является положительным.

Таким образом, в условиях процесса РОД доминирующими факторами, определяющими износ ЭИ, являются массоперенос материала ЭЗ на ЭИ с дальнейшим осаждением на нем графитовой пленки и образованием двухфазного металлографитового слоя, сдерживающего факельный механизм эрозии. Безыносный режим обусловлен возможностью горения электрической дуги между ЭЗ и перенесенным на ЭИ защитным слоем, т. е. без термического контакта с материалом ЭИ.

### Выводы

1. С использованием методов аналитической растровой и микродифракционной просвечивающей электронной микроскопии, а также методов электронной Оже-спектроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и вторичной ионной масс-спектроскопии подтверждена предложенная авторами гипотеза о наличии на торцевой поверхности графитового ЭИ после

РОД двухфазного (Fe-C) защитного слоя, воспринимающего тепловой удар от горения электрической дуги.

2. Описан физический механизм электроэрозионной стойкости графитовых ЭИ в условиях процесса РОД, позволивший объяснить возможность осуществления безыносного режима РОД.

1. *Левит М. Л., Падалко О. В.* Материалы и методы для изготовления фасонных электродов-инструментов электроэрозионных координатно-прошивочных станков. — М.: НИИМАШ, 1975. — 143 с.
2. *Носуленко В. Г.* Розмірна обробка металів електричною дугою: Дис. ... д-ра техн. наук. — Кіровоград, 1998. — 389 с.
3. *Meshcheriakov G. N.* Electro-physical processes in electropulse machining // Process and Metal Transfer. — 1970. — Vol. 18. — P. 491-499.
4. *Мицкевич М. К.* Разработка научных основ технологии электроэрозионного формообразования деталей разделительных штампов, создание комплекса технологических процессов и специализированного оборудования: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Минск, 1985. — 37 с.
5. *Боков В. М.* Размерная обработка электрической дугой фасонных полостей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1986. — 14 с.
6. *Электроэрозионная и электрохимическая обработка.* Расчет, проектирование и применение электродов-инструментов. Ч. 1 / Под ред. А. Л. Лившица, А. Роша. — М.: НИИМАШ, 1980. — 224 с.

It has been experimentally proved that a two-layer metal-graphite, continuously regenerating layer, which takes up a thermal shock due to arc burning, is formed on the end surface of a tool electrode (TE) during the dimensional arc treatment (DAT) process. Physical mechanism of electric-erosion resistance of graphite TEs under the DAT process conditions is described.

Поступила в редакцию 02.10.2001,  
в окончательном варианте 28.02.2002

УДК 621.791(088.8)

## ПАТЕНТЫ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА\*

### ГЕРМАНИЯ

**Паяльное устройство** содержит резервуар с припоем и кожух для создания атмосферы защитного газа для пайки плоских групп, которые во время их транспортировки через кожух приводят в контакт с волной припоя в резервуаре. Кожух имеет вход для узлов на входной стороне и выход для них на выходной стороне, запираемые по меньшей мере одной откидной створкой, в основном закрывающей входное и выходное отверстия кожуха. Створка снабжена направляющими элементами, которые по меньшей мере временно вступают в контакт с узлами и несущей их рамой, в результате чего створки закрываются. Патент 19912718. S. Bergheim, J. Tauchmann (Messer Griesheim GmbH).

**Способ сварки алюминия переменным током и вольфрамовым электродом в инертном газе**, при котором сварку проводят в смеси 83...95 об. % гелия и преимущественно аргона в качестве остатка. Патент 19837039. A. Farwer (То же).

**Способ сварки гофрированных труб.** Предложен способ изготовления сварного шва между гофрированной трубой с охватывающей ее, воспринимающей давление оплеткой и концом трубы в атмосфере защитного газа. Патент 19833229. P. Spiess.

### ЕВРОПЕЙСКИЙ ПАТЕНТ

**Переносная токарно-сварочная машина** содержит шпиндель, на котором закрепляют расточной резец или сварочную горелку и два независимых электродвигателя постоянного тока, один

из которых приводит шпиндель во вращение, а второй перемещает шпиндель в осевом направлении в обе стороны по командам с панели управления. Электродвигатели смонтированы в кожухе, который изготовлен за одно целое с основным кожухом, имеющим ручку для переноса машины. На панели управления установлен блок, регулирующий частоту вращения электродвигателей и длину хода подачи шпинделя. Патент 979702. R. Seracusa (Sir Meccanica S.R.L.).

**Сварочный генератор с активным фильтром** содержит выпрямитель А, который подключен к сети переменного тока; инвертор В, который соединен с выпрямителем; выходной диодный блок С, который соединен с инвертором, а также активный фильтр D, который подключен параллельно входу выпрямителя. Фильтр пропускает ток  $I_2$  и накладывает его на ток  $I_1$  выпрямителя. Результирующий ток  $I_3$  имеет синусоидальную форму. Патент 978344. G. Montecchi (Selco S.R.L.).

**Станок для лазерно-плазменной обработки** содержит головку, имеющую объектив, фокусирующий излучение, генерируемое лазером, а также головку, смонтированную на торце другой головки, образующую плазменную струю, которая направляется на поверхность заготовки коаксиально лазерному лучу в зону обработки. Головка содержит сопла, которые соединены с помощью кабелей с источником питания, а также связаны с помощью трубопровода с источником плазмообразующего газа. Патент 976487. G. A. F. Fournier, J.O.A.A. Vigneau (Societe Nationale D'Etude EtDe).

**Мягкий припой (и)**, имеющие оптимальную температуру плавления, повышенные механические свойства и хорошую смачиваемость паяемой поверхности, изготавливают из сплавов Sn-

\*Приведены сведения о патентах, опубликованных в бюллетене «Изобретения стран мира», 2001. — Вып. 18, № 2.