

В.М. Боков, Л.И. Маркашова*

ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ МАЛОИЗНОСНОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДУГОЙ

*Кировоградский государственный технический университет,
пр. Правды, 70-А, г. Кировоград, 25006, Украина*

**Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
ул. Боженко, 11, г. Киев, 252650, Украина*

Формообразование торцевой поверхности электрода-заготовки (ЭЗ) при РОД осуществляется путем отражения формы торцевой поверхности ЭИ. Именно поэтому точность формообразования торцевой поверхности ЭЗ зависит от электроэрозионной стойкости ЭИ.

Общепринято в электроэрозионной обработке количественно оценивать стойкость ЭИ его относительным линейным износом γ_l [1–3], который определяется как отношение абсолютного линейного износа ЭИ к глубине обработки и выражается в процентах.

В условиях процесса РОД электрическая дуга горит в межэлектродном зазоре в мощном поперечном гидродинамическом потоке рабочей жидкости, который оказывает влияние не только на процесс эвакуации продуктов эрозии из межэлектродного промежутка, но и, как известно [4], на энергетическое состояние дуги, изменяя плотность технологического тока и напряженность электрического поля в ней. Так, с уменьшением скорости потока наблюдается уменьшение плотности технологического тока и напряженности электрического поля в дуге, что приводит к интенсификации процесса переноса материала ЭЗ на ЭИ.

Из работ [5, 6] известно, что 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 максимально возможна и может превышать продолжительность горения на одном месте нестационарных электрических разрядов (электроискрового и электроимпульсного), а скважность – минимальна ($q = 1$). По этой причине при реализации процесса РОД следует ожидать более интенсивного массопереноса материала ЭЗ на ЭИ по сравнению с электроимпульсной обработкой.

Кроме того, широко известно, что использование графитовых ЭИ в органической рабочей среде и при электроимпульсной обработке [3] и при РОД [4, 7] обеспечивает возможность реализации малоизносной ($\gamma_l < 1\%$) обработки. По данным работы [8] «...в основе физической модели стойкости ЭИ лежит гипотеза о самовосстановлении графитовых ЭИ за счет выпадения на их торцевой поверхности защитной пленки в основном из графита, получаемого из продуктов пиролиза рабочей жидкости...». Показано, что пленочная защита гарантируется при соблюдении трех основных условий: на поверхности участка ЭИ температура превышает или равна некоторой критической температуре пленкообразования и меньше температуры плавления; вблизи нагретого выше критической температуры участка имеются в достаточном количестве жидкие и газообразные продукты пиролиза рабочей жидкости, являющиеся «строительным материалом» для пленки; время пленкообразования достаточно для того, чтобы на данном участке отложилась пленка требуемой для данного режима и условий защиты толщины.

Сравнительный анализ механизмов эрозии процессов РОД и электроимпульсной обработки показывает, 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 следует предположить, что все три условия пленочной защиты вполне удовлетворяются и при формообразовании способом РОД.

Таким образом, теоретической предпосылкой объяснения физического механизма малоинерционных режимов процесса РОД графитовыми электродами является их самовосстановление за счет массопереноса материала ЭЗ на ЭИ, с одной стороны, и образование защитной графитовой пленки на ЭИ из продуктов пиролиза органической рабочей жидкости, с другой стороны. В связи с изложенным следует ожидать двухфазного металлографитового отложения (слоя) на ЭИ.

Экспериментальную проверку высказанной гипотезы о наличии на торцевой поверхности графитового ЭИ после РОД двухфазного защитного слоя осуществляли в следующей последовательности:

– производили РОД торцевых поверхностей образцов кубической формы (сторона куба равна 10 мм) в специальном приспособлении (рис. 1), позволяющем прокачивать рабочую жидкость в ламинарном (критерий Рейнольдса Re не превышает 400–1000) плоскопараллельном потоке (с постоянной скоростью потока в МЭЗ). Материал ЭИ – графит МПГ7, материал ЭЗ – сталь 45. Полярность обработки – обратная (ЭЗ – минус). Рабочая жидкость – органическая среда (масло индустриальное И-20 А ГОСТ 20790-75 – 70%; керосин осветительный ГОСТ 4953-68 – 30%; кинематическая вязкость $\nu = 9 \cdot 10^{-6}$ м²/с). Режим РОД: сила технологического тока $I = 12,5$ А; напряжение на дуге $U = 45$ В; статическое давление на входе потока в межэлектродный зазор – 1,2 МПа;

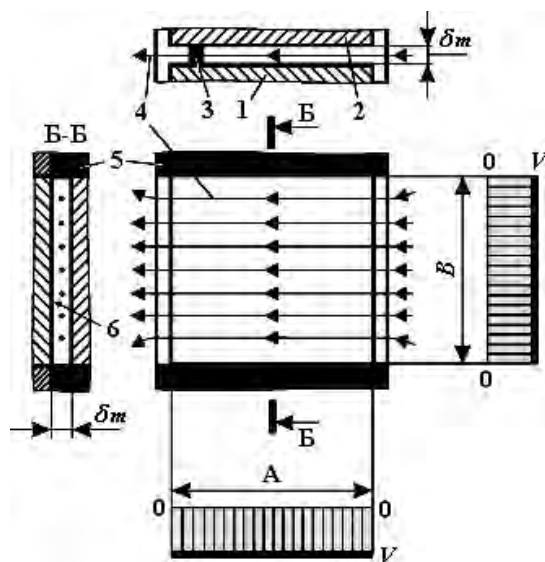


Рис. 1. Технологическая схема РОД образцов в условиях постоянной скорости потока в торцевом МЭЗ: 1 – ЭИ; 2 – ЭЗ; 3 – электрическая дуга; 4 – линия течения рабочей жидкости; 5 – боковое (резиновое) уплотнение; 6 – исследуемая поверхность ЭИ.

– методом аналитической растровой электронной микроскопии (установка Philips – СЭМ 515, фирма Филлипс, Голландия) выполняли анализ структурно-фазового состояния поверхности графитового ЭИ после РОД. В отраженных электронах изучали общую картину структуры и ее отдельных фрагментов (рис. 2,а). Как видим, картина распределения для данного режима обработки – «островковая» и не однородна. Далее, в характеристическом излучении на фоне общей анализируемой площади получали картину локального распределения железа – основного компонента материала ЭЗ, перенесенного на ЭИ (рис. 2,б). Сравнивая рис. 2,а с рис. 2,б, можно сделать вывод, что «островки» на поверхности графитового ЭИ имеют сложный фазовый состав, то есть представляют собой композиты, причем кроме металлической Fe-фазы M они включают в себя и не металлическую фазу H , которая видна на рис. 2,а и не видна на рис. 2,б. Данным методом выполнена количественная оценка концентрации металлической фазы в структурных «островковых» образованиях. На рабочей поверхности ЭИ выявлены «островковые» участки с повышенным содержанием Fe (порядка 91–98 ат.%). Наряду с ними присутствуют и «островковые» зоны с содержанием Fe примерно 1–6 ат.%;

– методом микродифракционной просвечивающей (трансмиссионной) электронной микроскопии (электронный микроскоп JEM-200 СХ, фирма ДЖЕОЛ, Япония, ускоряющее напряжение

20 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 срез слоя с образца ЭИ, параллельный рабочей поверхности, толщиной немногим более 1000 мкм и, защищая рабочую поверхность специальной заглушкой, проводили ионное утонение среза до получения прозрачных (для электронного пучка) участков на поверхности. Для получения информации о структуре подповерхностных слоев графитового образца срезы на поверхности и на глубине подготавливали методом двухстороннего ионного утонения (скорость утонения ~ 5 мкм/час). В результате прямых исследований структурно-фазового состояния на просвет выявлены на рабочей поверхности ЭИ «островки» неправильной геометрической формы размерами примерно 1,0 x 0,6 мкм, имеющие сравнительно однородную внутреннюю структуру (рис. 3,а), а также «островки» с неоднородным составом во внутренних объемах (рис. 3,б). Размеры последних составляют ~ (3 x 1,5–2) мкм, а размеры внутренних образований – (0,03–0,07) мкм (рис. 3,б), которые просматриваются на темнопольных изображениях (рис. 2,з) в виде светлых пятен различных размеров. На микродифракционном отражении (рис. 2,в) на фоне колец, характерных для углерода, наблюдаются рефлексы точечного типа, характерные для железа;

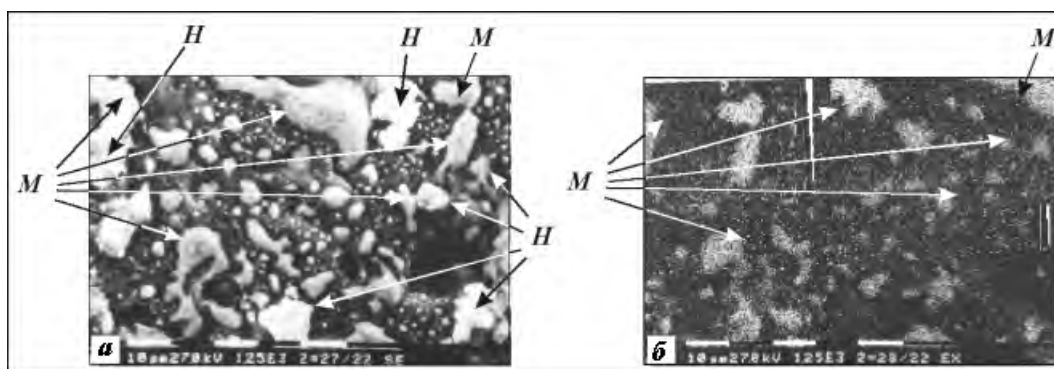


Рис. 2. Фрактография структуры поверхности графитового ЭИ после РОД и соответствующая ей картина распределения железа. а – x580; б – x580.

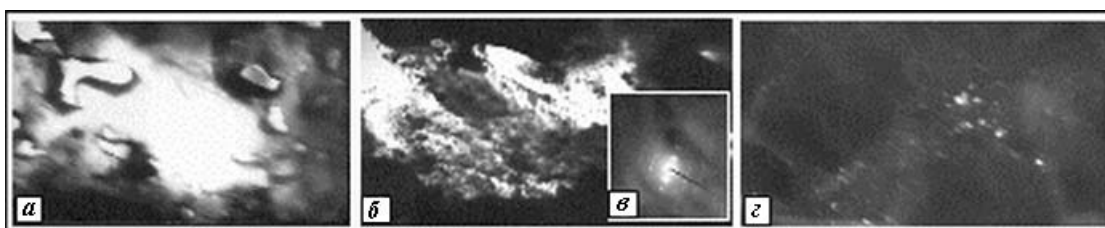


Рис. 3. Структуры «островков» на поверхности графитового ЭИ после РОД: а – плотные, мелкие и простые по составу «островки»; б – более крупные и сложные по составу «островки» и соответствующая им микродифракционная картина с кольцевыми отражениями от углерода и точечными от железа (в, 55000); г – темнопольное изображение внутренних образований структуры сложных по составу «островков». а – x20000; б – x30000; в – x55000; г – x30000.

– с помощью метода электронной оже-спектроскопии (система LAS-2000 фирмы Riber, Франция) изучалась 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. Расчет количественного элементарного состава поверхностных слоев осуществлялся по формуле

$$C_i = \frac{I_i}{K_i} / \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{K_i}, \quad (1)$$

где C_i – концентрация i -го элемента в атомных процентах; I_i – интенсивность линий i -го элемента; K_i – коэффициент объемной чувствительности i -го элемента; n – количество элементов. Энергия пер-

вичного электронного пучка составляла 3 кэВ, а сила тока зонда – $5 \cdot 10^{-7}$ А. Информация снималась с поверхности 1000×1000 мкм. Для изучения распределения элементов по глубине поверхность исследуемых образцов подвергалась бомбардировке ионами аргона (ионное травление) с энергией 4 кэВ.

Скорость травления составляла 30 \AA в минуту. В результате исследования обнаружено (табл. 1), что неметаллические «островки» на рабочей поверхности графитового ЭИ имеют концентрацию углерода в пределах 71,5–100 ат. %, причем 100 ат. % слой углерода наблюдается до глубины 120 \AA , 90 ат. % слой – до глубины 1200 \AA , а 80 ат. % слой – до глубины 5400 \AA ;

Таблица 1. Содержание элементов в поверхностном слое графитового ЭИ после РОД (в ат. %)

Время травления, мин	C	O	Fe	S
0,0	100,0	0,0	0,0	0,0
0,5	100,0	0,0	0,0	0,0
1,0	100,0	0,0	0,0	0,0
3,0	100,0	0,0	0,0	0,0
4,0	100,0	0,0	0,0	0,0
6,0	99,9	0,0	0,0	0,1
8,0	99,9	0,0	0,0	0,1
13,0	95,8	0,0	3,7	0,5
20,0	92,5	0,0	7,1	0,4
30,0	89,8	0,0	10,0	0,2
40,0	89,8	0,0	10,1	0,1
50,0	86,6	0,0	13,3	0,2
60,0	85,7	0,0	14,1	0,2
70,0	81,9	0,0	17,5	0,6
80,0	79,2	0,0	20,6	0,2
90,0	80,3	1,1	18,5	0,2
100,0	81,2	1,0	17,8	0,1
110,0	79,1	0,3	20,2	0,4
120,0	79,6	0,2	19,9	0,2
150,0	79,2	0,4	20,2	0,1
180,0	81,1	0,2	18,6	0,1
Светлые зерна	80,3	0,1	19,4	0,2
Светлые зерна	83,7	0,6	15,4	0,3
Светлые зерна	71,5	0,5	27,9	0,1
Серый участок	82,4	0,6	17,1	0,0
Темный участок	95,9	0,2	3,4	0,6

– методом рентгеновской фотоэлектрической спектроскопии (XPS система LAS-2000) проводилась оценка величины энергии связи электронных оболочек, входящих в состав образцов элементов и осуществлялся элементный количественный анализ не проводящих поверхностей исследуемых образцов. Формула расчета количественного состава аналогична формуле расчета для оже-спектроскопии

$$C_i = \frac{\frac{S_i}{K_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{K_i}}, \quad (2)$$

где S_i – площадь под пиком для i -го элемента. При этом было использовано мягкое MgK_{α} рентгеновское излучение. Исследуемая рабочая поверхность графитового ЭИ после РОД предварительно

очищалась ионным травлением до глубины 120 нм. Информация снималась с поверхности размерами 3 x 3 мм. В результате выявлена следующая интегральная концентрация элементов в поверхностном слое графитового ЭИ: С – 97,82 ат.%; О – 1,86 ат.%; Fe – 0,32 ат.%. Обнаружены Fe-содержащие «острова» на глубине 6000 Å и глубже. Карбидов не обнаружено. Кроме того, установлено, что блоки разных структур обволакиваются тонкой (толщиной до 300 Å) пленкой неизвестного [С-Н]-соединения. Пленка находится в особом (нетокопроводном) состоянии, что подтверждается эллиптическими кольцами на микродифракционном отражении (рис. 3,в), характерными для нетокопроводных материалов. Следует отметить, что наблюдаемые кольца микродифракционного отражения внутренних структур графитовых «островков» на ЭИ всегда круглые (концентрические, не искаженные). Последнее свидетельствует о токопроводности внутреннего графита;

– для уточнения элементного состава поверхности графитового ЭИ после РОД и определения типа присутствующих химических соединений исследование образцов проводилось методом вторичной ионной масс-спектрометрии (система LAS-2000) с использованием квадрупольного масс-спектрометра с регистрацией масс-спектров с помощью ЭВМ. Первичный пучок однозарядных ионов аргона с энергией 5 кэВ в режиме травления имел плотность 100 мкА/см² и подвергал травлению поверхность размерами 1200 x 1200 мкм, что обусловило установление скорости травления образцов в 30 Å в минуту. Диаметр ионного зонда при этом составил 150 мкм. Для устранения влияния краевого эффекта на результат, съем информации производился с площадки меньших размеров – 300 x 250 мкм. Для анализа элементного состава рабочей поверхности графитового ЭИ после РОД и определения типа химических соединений проводилась съемка масс-спектров в режиме «бар граф» на глубине 120 нм от ее исходного (не травленого) состояния. Скорость травления при анализе была примерно на порядок меньше, чем при снятии поверхностного слоя, и составляла 3 Å в минуту. Результатом анализа является масс-спектрограмма, приведенная на рис. 4. Как видно, наряду с другими ионами масс-спектрограмма рабочей поверхности ЭИ после РОД содержит ионы углерода С⁺ и железа Fe⁺, что подтверждает наличие на рабочей поверхности ЭИ двухфазного металлографитового слоя.

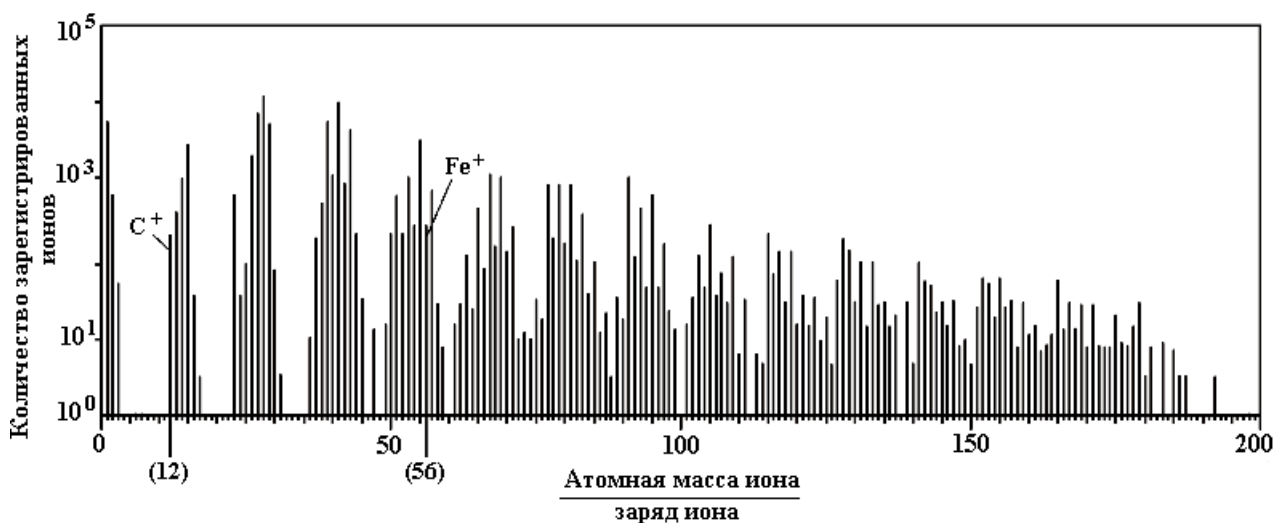


Рис. 4. Масс-спектрограмма рабочей поверхности ЭИ после РОД.

Анализ результатов исследования показал, что в условиях процесса РОД может быть справедлив следующий механизм образования защитного металлографитового слоя на ЭИ (рис. 5):

- а) происходит сближение электродов 1, 2 при прокачке рабочей жидкости между ними под технологическим давлением в плоскопараллельном потоке;
- б) возбуждается первая дуга 3, приводящая к образованию газовой полости 4;
- в) 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 ЭЗ 5. Продолжается дальнейшее расширение газовой полости;
- г) 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;
- д) возбуждается новая дуга 3 в этом же месте, но между защитным слоем и ЭЗ.

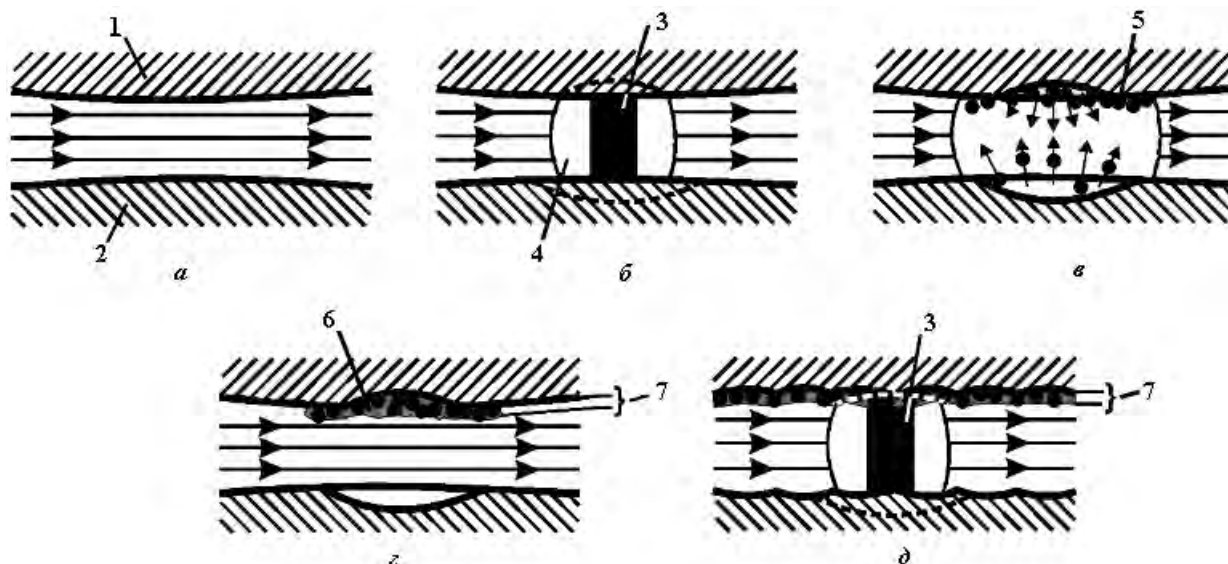


Рис. 5. Механизм образования защитного двухфазного металлографитового слоя на ЭИ, воспринимающего тепловой удар от горения дуги: 1 – ЭИ; 2 – ЭЗ; 3 – дуга; 4 – газовая полость; 5 – материал ЭЗ; 6 – графитовый слой; 7 – защитный слой.

Следует отметить, что образование именно **двухфазного** защитного металлографитового слоя на ЭИ удовлетворительно решает проблему его стойкости. При этом металлическая фаза, владеющая относительно небольшим удельным электрическим сопротивлением (для Fe: $\rho_c = 9,71 \cdot 10^{-8}$ Ом·м), относительно низкой температурой плавления (для Fe: $t_{пл} = 1535$ °С), относительно повышенной теплопроводностью (для Fe: $\lambda = 75$ Вт/м·К) и каркасной пространственной структурой, выполняет тройную функцию:

- во-первых, она 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 С: $\rho_c = (400-1400) \cdot 10^{-8}$ Ом·м};
- во-вторых, она эффективно отводит (рассеивает) тепло в тело ЭИ и тем самым уменьшает его температуру, а следовательно, и степень разрушения защитного слоя;
- в-третьих, она создает предпосылки для прочного сцепления с графитовой фазой за счет развитой поверхности.

В то же время графитовая фаза, обладая высокой температурой плавления-сублимации (для С: $t_{пл} = 3950$ °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 справедливой может быть зависимость толщины слоя от скорости потока в МЭП, схематично представленная на рис. 6. Как видим, с уменьшением скорости потока V толщина слоя S увеличивается, а слой уплотняется. Если на малых скоростях защитный слой сплошной (рис. 6, а–в), то при повышении скорости он может иметь дискретную (пористую) структуру (рис. 6, г). Увеличение толщины защитного слоя (рис. 6, а) указывает на нарушение равновесия между скоростями его образования и разрушения, вследствие чего наблюдается 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 графитовый слой б, процесс дестабилизируется и сопровождается интенсивным шлакованием МЭЗ, короткими замыканиями, что приводит к снижению производительности обработки.

Если процессы образования и разрушения защитного слоя сбалансированы, то износ ЭИ может быть минимальным и приближаться к нулю (рис. 6,б). В реальных условиях процесс разрушения защитного слоя немного опережает процесс его образования, в результате этого защитный слой может быть сплошным, но тонким (рис. 6,в), когда толщина слоя S меньше глубины лунки h_d , или иметь дискретную структуру (рис. 2,а,б,г), а износ ЭИ – положительный.

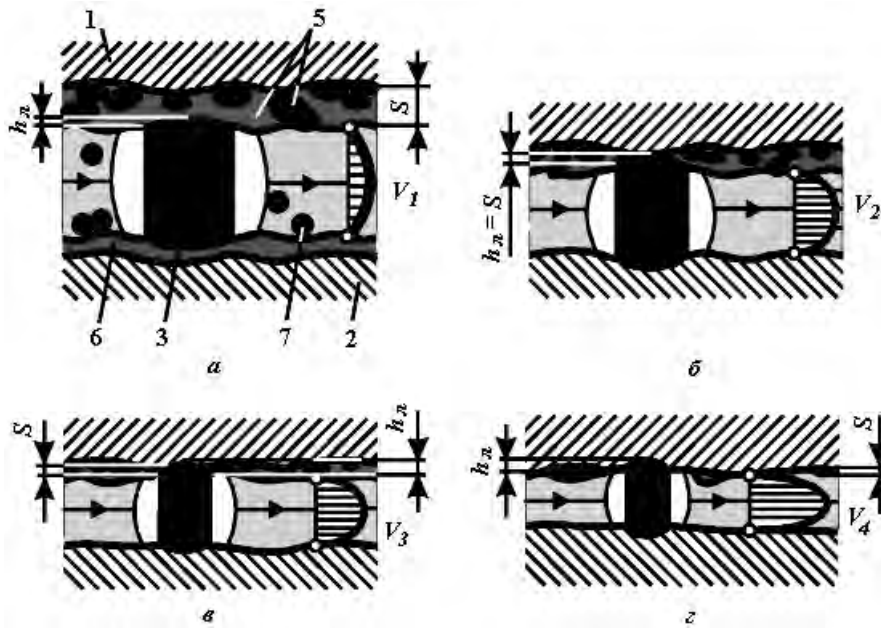


Рис. 6. Качественная зависимость толщины и формы защитного двухфазного металлографитового слоя S на ЭИ от скорости потока в МЭЗ ($V_1 < V_2 < V_3 < V_4$): а – $S > h_d$; б – $S = h_d$; в – $S < h_d$; г – $S \ll h_d$; 1 – ЭИ; 2 – ЭЗ; 3 – дуга; 4 – газовая полость; 5 – защитный слой; 6 – графитовый слой; 7 – продукты эрозии.

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, то есть без термического контакта с материалом ЭИ.

С целью прогнозирования износа графитового ЭИ, а следовательно, управления точностью процесса РОД внутренних поверхностей, проведены экспериментальные исследования и установлены многофакторные взаимосвязи износа с режимом обработки и с геометрическими параметрами электродов. При этом электрический режим задавался величиной технологического тока I (А) и напряжением на дуге U (В); гидродинамический режим – статическим давлением на входе в МЭЗ P_{cm} (МПа); геометрические параметры электродов – площадью обработки отверстий в плане F (мм²), глубиной обрабатываемого отверстия h (мм) или высотой рабочего пояса на ЭИ s (мм), относительным диаметром технологического канала в ЭИ D/d (отношение внешнего диаметра ЭИ D к диаметру технологического канала d). Материалы ЭИ и ЭЗ, а также состав применяемой рабочей жидкости одинаковы с указанными выше.

Матрица планирования экспериментальных исследований относительного линейного износа графитового цилиндрического ЭИ без рабочего пояса (рис. 7,а) при прошивке отверстий и полостей на обратной полярности представлена в табл. 2, а математическая модель относительного линейного износа графитового ЭИ имеет вид

$$\gamma_l = 1,89 + 0,589x_3 - 3,77x_1z_3x_4 - 0,471x_1x_6 - 0,421x_2 + 0,391x_2x_4 + 0,186x_1, \quad (3)$$

где $x_1 = 0,005 (I - 300)$; $x_2 = 0,2 (U - 30)$; $x_3 = 5 (P_{cm} - 0,6)$; $x_4 = 0,000571 (F - 3140)$; $z_3 = 125 (x_3^2 + 2,48 \cdot 10^{-8} - 0,889)$; $x_6 = 0,5 [(D/d) - 6]$.

Как видим (рис. 8,а), наибольшее влияние на относительный линейный износ ЭИ оказывает статическое давление рабочей жидкости на входе в межэлектродный промежуток P_{cm} , с повышением которого износ увеличивается. В этой связи фактор P_{cm} , который характеризует гидродинамические условия течения рабочей жидкости в МЭП, следует признать главным управляющим.

Из графической зависимости $\gamma_l = f(P_{cm}, F)$, представленной на рис. 8,б, следует, что одновременное уменьшение P_{cm} и F может привести к отрицательному линейному износу ЭИ (зона А), при котором наблюдается интенсивное образование защитного металлографитового слоя на ЭИ и шлакование межэлектродного зазора. Процесс обработки при этом затухает и может лишь искусственно

поддерживаться следящей за торцевым межэлектродным зазором системой в режиме релаксации (обработка – разведение электродов для промывки МЭЗ, с дальнейшим повторением данного цикла).

Таблица 2. Матрица планирования и результаты экспериментальных исследований относительного линейного износа графитового электрода-инструмента (план 2^{6-3})

Факторы		I, A	U, B	$P_{cm}, MПа$	$F, мм^2$	$h, мм$	D/d	$\gamma_{л}, \%$		
Основной уровень (X_{i0})		300	30	0,6	3140	12,5	6			
Интервалы варьирования (ΔX_i)		200	5	0,2	1884	7,5	2			
Верхний уровень ($x_i = + 1$)		500	35	0,8	5024	20	8			
Нижний уровень ($x_i = - 1$)		100	25	0,4	1256	5	4			
Код		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y_5		
Номер опыта	Порядок реализации	1	6	+	+	+	+	-	-	2,67
		2	2	-	+	+	-	+	-	0,51
		3	4	+	-	+	-	-	+	3,45
		4	7	-	-	+	+	+	+	3,30
		5	1	+	+	-	-	+	+	0,71
		6	8	-	+	-	+	-	+	2,00
		7	3	+	-	-	+	+	-	1,49
		8	5	-	-	-	-	-	-	1,02
Опыты в центре плана		1	0	0	0	0	0	0	1,90	
		2	0	0	0	0	0	0	1,85	
		3	0	0	0	0	0	0	1,95	
		4	0	0	0	0	0	0	1,90	

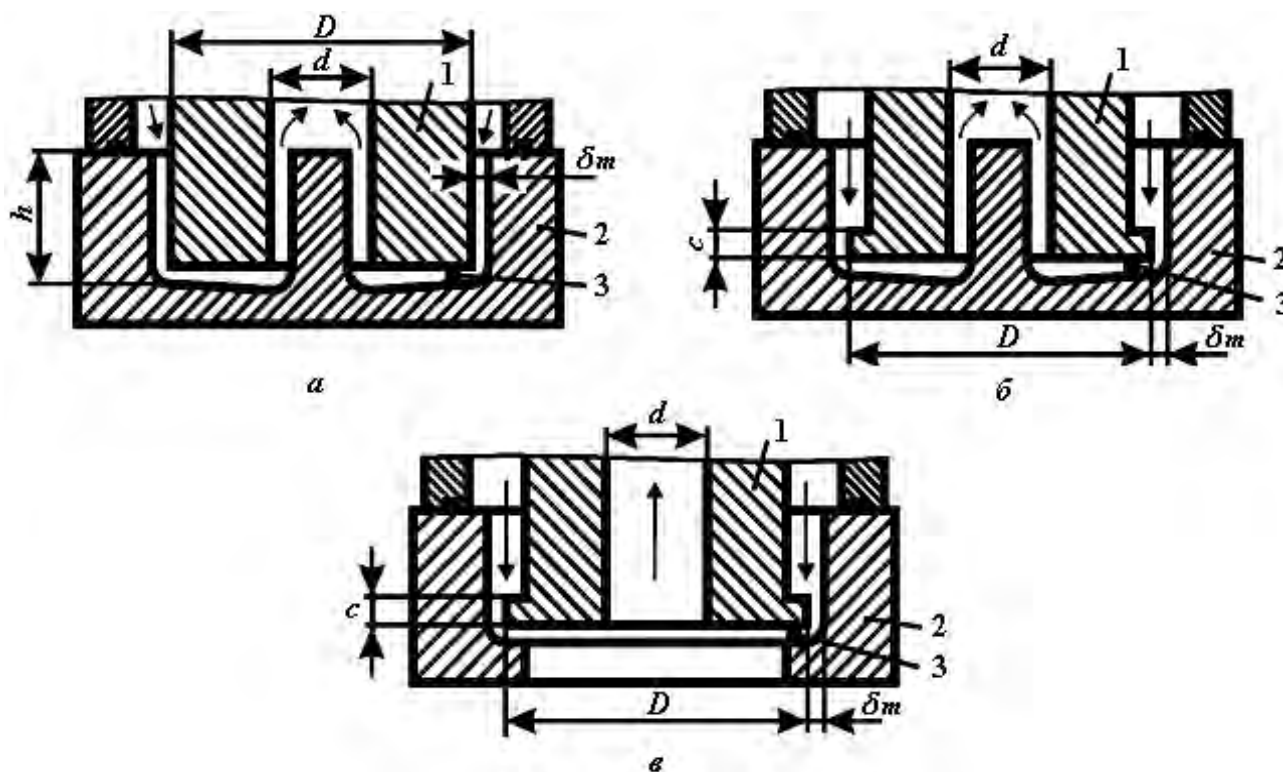


Рис. 7. Технологические схемы размерного формообразования внутренних поверхностей электрической дугой с использованием однозонного способа обратной прокачки рабочей жидкости через торцевой межэлектродный зазор: а – схема прошивки без рабочего пояса на ЭИ; б – схема прошивки с рабочим поясом на ЭИ; в – схема растачивания; 1 – ЭИ; 2 – ЭЗ; 3 – дуга.

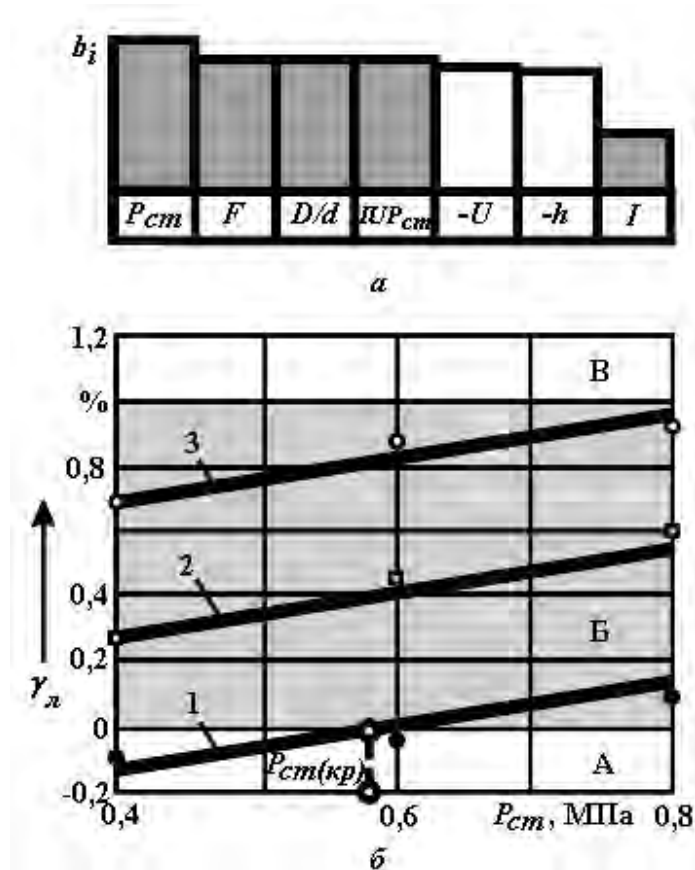


Рис. 8. Степень влияния переменных факторов на относительный линейный износ графитового ЭИ γ_l (а) и зависимость γ_l от P_{cm} и F (б).

Для точного формообразования торцевой поверхности ЭЗ целесообразно использовать такие значения факторов P_{cm} и F , которые соответствуют зоне Б (на рис. 8,б выделена серым цветом) и обеспечивают относительный линейный износ ЭИ в пределах $0 < \gamma_l < 1\%$.

Существенное увеличение площади обработки приводит к повышению износа выше верхнего предела (зона В). Такие режимы целесообразно использовать преимущественно при РОД сквозных отверстий, когда изменение геометрии торцевой поверхности не влияет на точность их обработки.

С целью снижения износа ниже верхнего предела при РОД крупногабаритных полостей и глухих отверстий ярко выраженная его зависимость от площади обработки обуславливает необходимость применения многозонного способа обратной прокатки рабочей жидкости через торцевой межэлектродный зазор [9]. При многозонной прокатке (рис. 9) торцевой межэлектродный зазор искусственно разделен на определенное (необходимое) количество зон (гидродинамических модулей), каждая из которых реализует однозонный способ обратной прокатки. Обработка крупногабаритной поверхности может осуществляться одновременно во всех зонах, однако в рамках каждой зоны факторы F и P_{cm} поддерживаются на оптимальном уровне, соответствующем условию малоизносной обработки ($\gamma_l < 1\%$). Таким образом, одним из критериев возможности применения однозонного способа обратной прокатки является ограничение площади обработки в связи с повышением износа ЭИ выше допустимого уровня.

В физическом понимании влияние F на γ_l объясняется следующим образом. С увеличением площади обработки повышается вероятность создания одинаковых условий для одновременного возбуждения нескольких электрических дуг на разных участках МЭЗ (рис. 10,а). В связи с многоканальностью процесса обработки, в соответствии с правилом Кирхгофа, сила тока I , питающая эти дуги, будет равна сумме элементарных сил токов I_i , проходящих через них (рис. 10,б), то есть

$$I = \sum_1^n I_i = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n. \quad (4)$$

Вследствие этого сила тока в канале единичной дуги уменьшается, однако плотность тока повышается. Последнее подтверждается зависимостью (4) плотности тока в дуге j (А/м²) от силы тока I (А) и динамического давления потока P_0 , (Па), полученной в работе [4].

$$j = 2,86 \cdot 10^6 \cdot I^{-0,12} \cdot P_0^{0,41}. \quad (5)$$

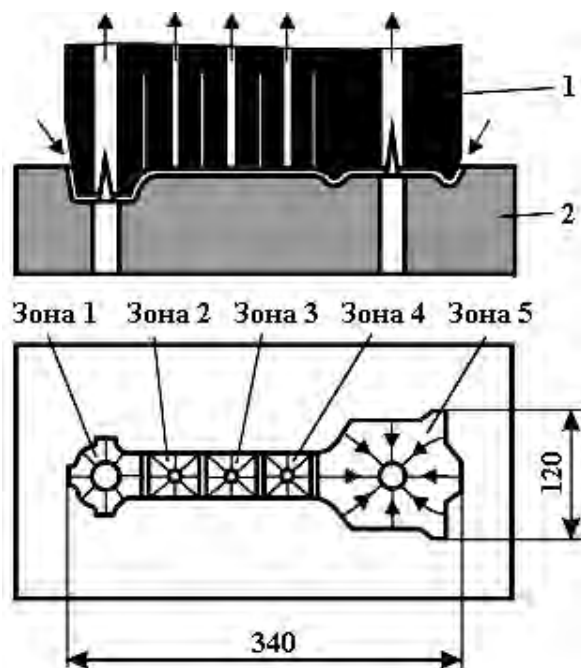


Рис. 9. Схема реализации многозонального способа обратной прокатки для РОД полости ручьевого вставки ковочного штампа на деталь «Шатун»: 1 – ЭИ; 2 – ЭЗ.

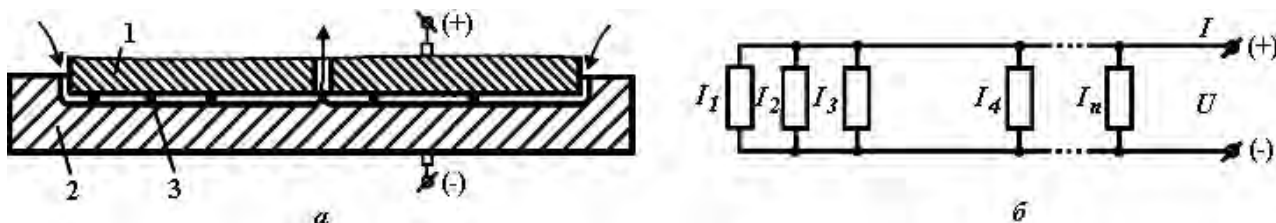


Рис. 10. К физическому механизму дробления электрической дуги при РОД крупногабаритной поверхности с использованием однозонального способа обратной прокатки рабочей жидкости через торцевой МЭЗ: а – технологическая схема формообразования поверхности; б – эквивалентная электрическая модель многоканального процесса РОД; 1 – ЭИ; 2 – ЭЗ; 3 – дуга.

Повышение плотности тока в дуге, как известно, приводит к интенсификации факельного механизма эрозии, в результате чего износ повышается.

Влияние факторов D/d и U на износ графитового ЭИ довольно значительно (рис. 8,а), что свидетельствует о широких технологических возможностях управления им в процессе РОД.

Незначительная зависимость износа от силы технологического тока I (рис. 8,а) обосновывает возможность осуществления **высокопроизводительной и малоизносной обработки** при одновременном увеличении I и уменьшении P_{cm} .

При прошивке отверстий и полостей цилиндрическим ЭИ с рабочим пояском c (рис. 7,б) получены следующие математические модели относительного линейного износа графитового ЭИ:

– на обратной полярности

$$\gamma_{л} = 0,67 - 0,36x_2 + 0,35x_6 - 0,22x_5 + 0,1x_1 + 0,04x_3, \quad (6)$$

где $x_1 = 0,02 (I - 150)$; $x_2 = 0,2 (U - 30)$; $x_3 = 5 (P_{cm} - 0,6)$; $x_5 = 0,111 (c - 11)$; $x_6 = 0,8 [(D/d) - 2,75]$.

Модель (6) справедлива в следующем диапазоне изменения переменных факторов:
 $I = 100\text{--}200$ А; $U = 25\text{--}35$ В; $P_{cm} = 0,4\text{--}0,8$ МПа; $F = 314\text{--}1256$ мм²; $c = 2\text{--}20$ мм; $D/d = 1,5\text{--}4$;
 – на прямой полярности

$$\gamma_n = 0,88 + 0,7x_3 - 0,45x_1 - 0,34x_2 + 0,22x_5, \quad (7)$$

где $x_1 = 0,0066 (I - 250)$; $x_2 = 0,2 (U - 30)$; $x_3 = 1,25 (P_{cm} - 1,2)$; $x_5 = 0,111 (c - 11)$.

Модель (7) справедлива в следующем диапазоне изменения переменных факторов:
 $I = 100\text{--}400$ А; $U = 25\text{--}35$ В; $P_{cm} = 0,4\text{--}2$ МПа; $F = 314\text{--}1256$ мм²; $c = 2\text{--}20$ мм; $D/d = 1,5\text{--}4$.

При РОД на обратной полярности износ ЭИ γ_n (5) одинаково зависит от напряжения на электродах U и относительного диаметра технологического канала в ЭИ D/d . В физическом смысле уменьшение износа графитового ЭИ при увеличении U объясняется повышением величины межэлектродного зазора, а следовательно, уменьшением скорости потока в нем. Увеличение значения фактора D/d приводит к уменьшению гидравлического сопротивления течения жидкости в торцевом МЭЗ, увеличению скорости потока в нем, а следовательно повышению износа ЭИ.

При РОД на прямой полярности износ ЭИ γ_n (6) практически в одинаковой мере зависит от статического давления рабочей жидкости на входе в межэлектродный промежуток P_{cm} и высоты рабочего пояска c . В данном случае повышение P_{cm} приводит к повышению износа ЭИ, что объясняется аналогично, как и при прошивке цилиндрическим ЭИ без пояска. Уменьшение высоты рабочего пояска на ЭИ c приводит к увеличению износа, что связано со снижением гидравлического сопротивления МЭП и увеличением скорости рабочей жидкости в нем. Зависимость $\gamma_n = f(c)$ обосновывает необходимость уменьшения давления P_{cm} при уменьшении высоты пояска на ЭИ c , с целью предупреждения повышения скорости потока в МЭЗ, а следовательно, уменьшения относительного линейного износа ЭИ.

Из результатов сравнительного анализа процесса РОД образцов из стали 45 графитовыми ЭИ на обратной и прямой полярностях (рис. 11) вытекает, что, в диапазоне варьирования факторов, износ ЭИ на обратной полярности изменялся в пределах 0,4–1,3%, на прямой полярности – в пределах 1,3–4,8%, а отношение износа ЭИ на прямой полярности к его износу на обратной полярности – в пределах 1,9–4. Последнее свидетельствует о том, что для точного формообразования торцевой поверхности ЭЗ электрической дугой при применении однозонного способа обратной прокатки рабочей жидкости через торцевой МЭЗ необходимо давать предпочтение обратной полярности. Кроме этого, полученные положительные результаты относительного линейного износа ЭИ на прямой полярности указывают на перспективность и экономическую целесообразность применения данного процесса для высокопроизводительной обработки внутренних поверхностей.

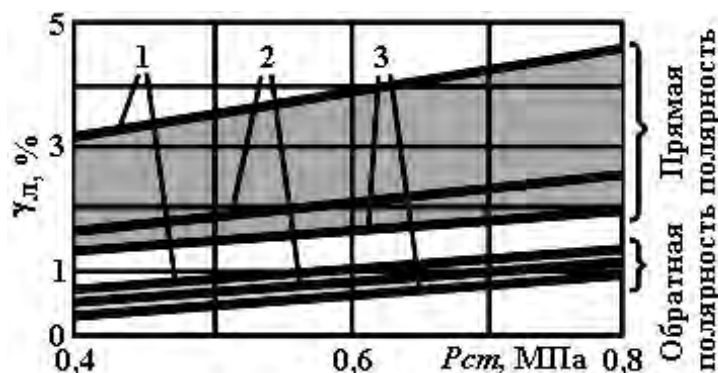


Рис. 11. Зависимость относительного линейного износа ЭИ γ_n от P_{cm} , c и полярности РОД ($I = 200$ А; $U = 25$ В; $D/d = 1,5$): 1 – $c = 2$ мм; 2 – $c = 11$ мм; 3 – $c = 20$ мм.

При растачивании (чистовая обработка) электрической дугой на обратной полярности (рис. 7,в) математическая модель относительного линейного износа графитового ЭИ имеет вид

$$\gamma_n = 0,44 - 0,25x_1 - 0,25x_5 + 0,19x_3 + 0,19x_1x_6 - 0,18x_1x_2 + 0,13x_3x_6 + 0,12x_1x_4, \quad (8)$$

где $x_1 = 0,066 (I - 45)$; $x_2 = 0,2 (U - 30)$; $x_3 = 5 (P_{cm} - 0,6)$; $x_4 = 0,019 (F - 188,5)$; $x_5 = 0,111 (c - 11)$; $x_6 = 0,66 [(D/d) - 4,5]$.

Модель (8) справедлива в следующем диапазоне варьирования переменных факторов: $I = 30\text{--}60$ А; $U = 25\text{--}35$ В; $P_{cm} = 0,4\text{--}0,8$ МПа; $F = 138\text{--}239$ мм²; $c = 2\text{--}20$ мм; $D/d = 3\text{--}6$.

Из модели (8) следует существенная зависимость относительного линейного износа ЭИ от силы технологического тока I , высоты рабочего пояска c на ЭИ и давления рабочей жидкости на входе в МЭП P_{cm} , причем с повышением I и c износ уменьшается, а при повышении P_{cm} – увеличивается. Вариации изменения факторов в рамках диапазона исследования позволили получить относительный линейный износ ЭИ в пределах $-0,4\text{--}0,7\%$. Последнее свидетельствует о высокой точности чистовой РОД, возможности многократного использования графитовых ЭИ при формообразовании электрической дугой внутренних поверхностей (полостей, глухих и сквозных отверстий).

Выводы

1. С использованием методов аналитической растровой и микродифракционной просвечивающей электронной микроскопии, а также методов электронной оже-спектроскопии, рентгеновской фотоэлектрической 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 малоизносного режима.

3. Установлены многофакторные экспериментальные взаимосвязи линейного износа графитового ЭИ с электрическим и гидродинамическим режимами РОД, а также с геометрическими параметрами электродов, позволяющие как управлять износом, так и прогнозировать его в условиях применения различных схем формообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фотеев Н.К.* Технология электроэрозионной обработки. М., 1980.
2. *Мицкевич М.К., Бушик А.И., Бакуто И.А. и др.* Электроэрозионная обработка материалов / Под ред. И. Г. Некрашевича. Минск, 1988.
3. *Левит М.Л., Падалко О.В.* Материалы и методы для изготовления фасонных электродов-инструментов электроэрозионных копировально-прошивочных станков. М., 1975.
4. *Носуленко В.І.* Розмірна обробка металів електричною дугою: Дис... д-ра техн. наук: 05.03.07. Кіровоград, 1998.
5. *Meshcheriakov G.N.* Electro-physical Processes in Electropulse Machining // Process and Metal Transfer. Annals of the CIRP. 1970. Vol 18. P. 491–499.
6. *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.
7. *Боков В.М.* Размерная обработка электрической дугой фасонных полостей: Автореф. дис... канд. техн. наук. Киев, 1986.
8. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Расчет, проектирование и применение электродов-инструментов. Часть 1 / Под ред. А. Л. Лившица, А. Роша. М., НИИМАШ, 1980.
9. Исследование, разработка и внедрение технологии и оборудования для размерной обработки дугой полостей штампов: Отчет о НИР № 424 / Кировоградский ин-т с/х машиностроения. – № ГР 79024781; Инв. № 02830060982. Кировоград, 1983.

Поступила 05.03.02

Summary

It is shown experimentally that a formation of two-phase metallocarbon permanently renewing layer on the working surface of graphitic electrode in the process of dimensional machining by electric arc application takes place. The physical mechanism of erosion resistance of graphitic electrode during the dimensional machining is described. The method of mathematical planning of experiment is used for established of cybernetic inter coupling of relative linear wearing of graphitic electrode with electrical and hydrodynamic modes of dimensional machining by means of electric arc application, and also with geometrical parameters of electrodes. It allows to control wearing of electrodes in the process of dimensional machining and to forecast wearing.