

В. И. Носуленко

## О ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ, ОБ ОБЩЕМ И ОТЛИЧИЯХ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ И КЛАССИФИКАЦИИ СПОСОБОВ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

*Кировоградский национальный технический университет,  
пр. Университетский, 8, г. Кировоград, 25006, Украина*

Процессы размерной электроразрядной обработки металлов (ЭРО), основанные на использовании преобразуемой в тепло энергии электрических разрядов, получили широкое применение и продолжают интенсивно развиваться. К ним относятся процессы электроискровой (электроимпульсной) обработки (ЭИО), электроконтактная обработка (ЭКО) и примыкающая к ней анодно-механическая обработка, размерная обработка электрической дугой (РОД), а также плазменная обработка (ПО).

Покажем, что все эти процессы объединяет единая физическая природа “инструмента” обработки – то, что называют электрическим дуговым разрядом, или электрической дугой. Это позволяет рассматривать их в единстве, взаимосвязи и взаимозависимости, в частности как альтернативу традиционным процессам обработки металлов резанием (ОМР) и давлением (ОМД). Отличия же электрических разрядов в условиях указанных процессов ЭРО – это, как будет показано, лишь различные формы динамического (механического) взаимодействия дугового разряда с поперечным потоком среды-диэлектрика. Это важно, поскольку логика развития познания приводит к необходимости четко различать то, что составляет сущность объекта. Сущность является узловым, ключевым моментом внутренних связей, сторон объекта, а познать сущность объекта – это понять причины и условия его возникновения, определяющие свойства, законы его жизни, характерные противоречия, понять физический смысл явлений, тенденции развития. Именно это, как будет показано далее, позволит установить неизвестные ранее закономерности взаимодействия дуги с внешней средой и описать электрическую дугу как качественно новый источник тепла для ЭРО, энергетические, а следовательно, и технологические характеристики которого регулируются в самых широких пределах, что, в частности, создает теоретические предпосылки для дальнейшего развития процессов ЭРО как высокоэффективной альтернативы традиционным технологиям ОМР и ОМД.

На основе изложенных представлений предложим классификационные признаки и способы ЭРО. Это становится необходимым, поскольку общая универсальная связь, взаимодействие явлений и процессов должны найти отображение во взаимосвязи человеческих понятий. Научное понятие или система понятий, в частности классификация способов ЭРО, есть не что иное, как отражение внутренних связей явлений, процессов между ними.

Электрическая дуга – явление хорошо известное, но отнюдь не вполне понятное [1, с. 4]. В резком контрасте с широким применением дугового разряда на практике находится состояние его теории и поверхностный, бессистемный характер сведений о его физических процессах [2, с. 3]. Достаточно сказать, что “единого, общепринятого определения дуги еще нет” [3, с. 13]. “Недостатка в количестве работ нет, недостает только ясности и объективности” [4]. Исключительная сложность электрической дуги как объекта исследования делает пока неосуществимой разработку математически строгой модели этого физического явления. В этой связи к электрической дуге в полной мере можно отнести слова Фейнмана [5, с. 29]: “Физическое понимание – это нечто неточное, неопределенное и абсолютно нематематическое”. Поэтому при рассмотрении электрической дуги как физического явления преобладает феноменологический подход, что позволяет описывать его лишь качественно.

Изложенная ниже на уровне феноменологического описания теория электрической дуги как источника тепла для ЭРО позволяет, как нам представляется, рассматривать такую электрическую дугу как качественно новый источник тепла для ЭРО и других технологий.

### Феноменологическое описание электрической дуги

**Электрическая дуга – это физическое явление**, сопровождающее протекание электрического тока свыше  $\sim 1$  А между двумя электродами (см. рис. 1,а) при напряжении не менее  $\sim 10$ – $20$  В через среду-диэлектрик и проявляющее себя в виде ослепительно яркого токопроводящего столба плазмы, который электрически “соединяет” оба электрода, образуя замкнутый контур.

В отличие от металлического проводника каждая дуга обладает своим электрическим сопротивлением, зависящим от внешних условий и параметров разряда, и таким образом электрическое сопротивление дуги есть функция многих переменных. Как следствие, электрическая дуга обладает ярко выраженной нелинейностью, то есть между ее током и напряжением нет пропорциональной связи. Электрическое сопротивление, а следовательно, и напряжение, являющееся функцией и одновременно мерой электрического сопротивления, распределяются по длине дуги неравномерно (см. рис. 1,б). При этом в катодной и анодной областях дуги сопротивление значительно, а в столбе разряда во много раз меньше. Суммарное значение катодного и анодного падений напряжения составляет  $U_{\text{э+а}} \approx 10$ – $20$  В.

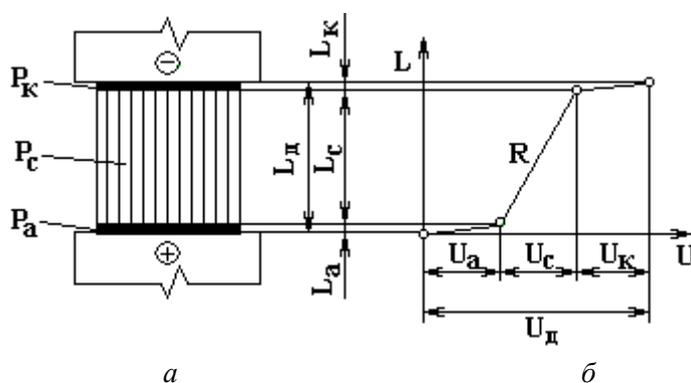


Рис. 1. Принципиальная схема электрической дуги как источника тепла

Электрическая дуга может протекать в самых разнообразных условиях и иметь самые разнообразные электрические, геометрические и энергетические характеристики. Так, например, известно, что дуга горит между любыми проводниками; она устойчиво горит в вакууме и при давлениях, достигающих многих тысяч атмосфер; может протекать в мощных продольных и поперечных потоках газа и жидкости, в продольном и поперечном магнитных полях; устойчиво горит между вращающимися электродами; длина дуги может колебаться от сотых долей миллиметра до десятков метров; ток дуги может регулироваться от 1 А до многих тысяч; температура плазмы столба дуги, по данным исследования изменяется в диапазоне от 5000 до 50000 К и т.д. При этом любое, самое незначительное изменение условий протекания разряда, любой возмущающий фактор вызывает соответствующее изменение структуры дуги и ее характеристик.

Все это указывает на весьма тонкие, совершенные и разнообразные процессы саморегулирования, протекающие в дуге, и, следовательно, на то, что дуга представляет собой саморегулируемую систему, находящуюся с внешней средой в подвижном, колеблющемся равновесии. Поэтому можно говорить о больших возможностях управления свойствами дуги как источника тепла для различных целей науки и практики за счет изменения условий протекания разряда.

Число механизмов саморегулирования дуги практически неограниченно. В этой связи электрическая дуга неисчерпаема в формах своего проявления, так же неисчерпаемы ее технологические возможности. Поэтому важно описать основные закономерности (законы, принципы) такого саморегулирования. Состояние теории и практики электрической дуги позволяет сформулировать основной закон саморегулирования (согласно принципу наименьшего действия) как закон наименьшего сопротивления, в соответствии с которым, во-первых, электрическая дуга протекает между электродами там, где электрическое сопротивление среды протеканию разряда, а следовательно, и напряжение дуги минимальны, обычно по кратчайшей нормали к поверхности электродов (что соответствует принципу минимума Штеенбека и объясняет дискретность перемещения дуги в пространстве), и, во-вторых, с изменением внешних условий в результате процессов саморегулирования структура и характеристики дуги изменяются таким образом, чтобы уменьшить эффект внешнего воздействия (со-

гласно принципу смещения равновесия Ле-Шателье) и тем самым снова-таки обеспечить в новых условиях минимально возможное электрическое сопротивление среды протеканию разряда.

Спрашивается, однако, где та сила, которая обеспечивает столь “рациональные” условия существования дуги? Как было показано [6, с. 31], такой силой служит собственное магнитное поле дуги, которое является функцией внешних воздействий, и в свою очередь воздействуя на дугу, представляющую собой столб плазмы (проводник) с протекающим по нему током, изменяет его энергетическую структуру адекватно внешним воздействиям, при необходимости, в желаемом направлении. Это означает, что одно явление (энергетическая структура дуги соответствующих характеристик) обязательно сопровождается другим явлением (наличием собственного магнитного поля дуги соответствующих характеристик). Иначе, каждое из этих явлений есть следствие и продолжение другого, а в целом – это две стороны одного и того же явления, называемого электромагнетизмом дугового разряда.

**Стационарные и нестационарные электрические дуги.** Электрическая дуга, если не применять специальных мер, является неустойчивым процессом. В этой связи различают стационарные и нестационарные дуги. Стационарная электрическая дуга – это дуга, параметры которой не зависят от времени [3, с. 18]. Из этого, однако, не следует, что стационарное, не изменяющееся во времени состояние дуги является безусловным ее свойством. Стационарность, напротив, возможна только при условии, что случайные колебания установившейся силы тока выравниваются за счет процессов в дуге или реакции цепи питания [3, с. 22].

Стационарная электрическая дуга, таким образом, – это дуга с установившимися, мало изменяющимися параметрами, она горит не прерываясь, ее ток и напряжение в любой момент отличны от нуля по сравнению с нестационарной электрической дугой, ток и напряжение которой периодически падают до нуля. Условия устойчивости стационарных электрических дуг известны [3, с. 30–34; 7, с. 163–167] и в конечном счете сводятся к тому, что дугу питают постоянным током от источника соответствующих вольт-амперных характеристик. Стационарная дуга по сравнению с нестационарной – более сложное по своей внутренней организации физическое явление, законы ее жизни более многообразны, ее труднее получить, но в связи с достаточной стабильностью электрических, геометрических и энергетических характеристик ее легче исследовать и в итоге описать.

В условиях ЭРО используют как стационарную дугу, так и нестационарные (искровые, импульсные) электрические разряды. Покажем, что нестационарные электрические разряды имеют со стационарной дугой единую физическую природу – это то, что принято называть электрическим дуговым разрядом. Для этого обратимся к многочисленным, но несистематизированным литературным данным.

Все известные разновидности ЭРО реализуют длительности электрических разрядов  $t_i > 10^{-7}$  с [8, с. 25]. “С данных, что имеем, видно, что после 1 мкс и более искра становится квазистабильной и получает много черт, характерных для установившегося дугового разряда” [1, с. 104]. “Искру можно представить как нестационарную электрическую дугу, которая гаснет через относительно короткое время лишь вследствие того, что источник питания не в состоянии питать дугу током достаточно длительное время” [3, с. 17]. “Можно считать, что после  $10^{-5} - 10^{-4}$  с от начала разряда между электродами его параметры при иных равных условиях получают значения, характерные для дуги, горящей сколь угодно долго” [7, с. 10]. “М. Н. Соболев показал, что напряжение разряда становится типично дуговым и установившимся после  $10^{-6}$  с после его начала” [7, с. 9–10]. Напомним, что “типично дуговой разряд” характеризуется силой тока более  $\sim 1$  А и суммарным значением катодного и анодного падений напряжения  $U_{e+\dot{a}} \approx 10 - 20$  В. Именно это является необходимым и достаточным условием, чтобы считать электрический разряд “типично дуговым”. Однако этими параметрами характеризуются только нестационарные электрические разряды в условиях ЭРО [9, с. 12–15]. Это, в частности, означает, что основные закономерности протекания стационарной дуги в известной мере справедливы и для нестационарной дуги.

**Электрическая дуга как источник тепла.** Согласно изложенному (см. рис. 1), дугу рассматривают как сумму трех самостоятельно действующих источников тепла в катодной и анодной областях и столбе дуги. Схема трех источников тепла в дуге дает возможность представить ее следующим образом: один источник тепла мощностью  $P_e$  расположен в плоском слое толщиной  $L_e$  на поверхности катода, другой мощностью  $P_a$  в плоском слое толщиной  $L_a$  – на поверхности анода и тре-

тий мощностью  $P_{\bar{n}}$  расположен по объему столба дуги высотой  $L_{\bar{n}}$ . Таким образом, схема трех источников тепла в дуге позволяет рассматривать и исследовать дугу как единство трех весьма различных по энергетическим характеристикам источников тепла, каждый в пределах своей области определяется достаточно однородными характеристиками.

Для оценки дуги как источника тепла воспользуемся такой характеристикой, как объемная плотность тепловой мощности на участках каждого из трех указанных источников тепла, которая может быть определена по формуле

$$K = Ej, \quad (1)$$

где  $K$  – объемная плотность тепловой мощности, Вт/см<sup>3</sup>;  $E$  – напряженность электрического поля, В/см;  $j$  – плотность силы тока, А/см<sup>2</sup>.

В соответствии с уравнением (1) приэлектродные области (катодная и анодная) из-за весьма высокой напряженности электрического поля представляют собой весьма мощные концентрированные плоские источники тепла, в то время как столб дуги является менее концентрированным объемным источником тепла.

Оценим энергетическое состояние плазмы в столбе дуги, определяемое концентрацией элементарных частиц, температурой и давлением. Воспользуемся для этого установленными соотношениями [6, с. 29].

Концентрация элементарных частиц (их число в единице объема) может быть представлена выражением, 1/м<sup>3</sup>:

$$n = C_1 j, \quad (2)$$

где  $C_1$  – коэффициент размерности.

Температура плазмы в столбе дуги, К:

$$T = C_2 E, \quad (3)$$

где  $C_2$  – коэффициент размерности; согласно обработанным статистическим данным,  $C_2 = 150\text{--}200$  К/(В/см).

Давление плазмы в столбе дуги, Па:

$$p = C_3 jE, \quad (4)$$

где  $C_3$  – коэффициент размерности.

Указанные соотношения (2), (3) и (4) позволяют просто и надежно оценить энергетическое состояние плазмы в столбе дуги с точки зрения простой сути такого сложного физического явления, как дуга, по легко определяемым экспериментально плотности силы тока и напряженности электрического поля. Заметим также, что в условиях процессов ЭРО электрические разряды имеют четкие оптические границы, что дает возможность надежно определять их геометрические параметры, а значит, плотность силы тока и напряженность электрического поля. Поэтому приведенные соотношения (1), (2), (3) и (4) являются достаточно точными для практических расчетов.

**Электрическая дуга как источник тепла для ЭРО.** Обычные электрические дуги типа сварочных непригодны для размерной обработки металлов. Поэтому прежде сформулируем основные требования к дуге как к источнику тепла для размерной обработки металлов, которые должны отличать такую дугу от обычных. Во-первых, дуга должна иметь более высокие энергетические характеристики, достаточные для локального разрушения металла за счет его плавления и испарения; во-вторых, для управления технологическими характеристиками процесса обработки энергетические характеристики дуги должны легко регулироваться; и, в-третьих, для достижения размерного формообразования длина дуги обычно должна быть минимально возможной (межэлектродный зазор должен составлять десятые и сотые доли миллиметра). Рассмотрим возможность получения дуг, пригодных для размерной обработки металлов, основываясь на известных положениях теории и практики описанных электрических дуг.

В соответствии с изложенным электрическую дугу следует рассматривать как сумму трех самостоятельных действующих источников тепла в катодной, анодной областях и столбе дуги. При этом катодная и анодная области представляют собой весьма мощные, концентрированные, плоские источники тепла, в то время как столб дуги является значительно менее концентрированным объемным источником тепла. Поскольку градиент температуры в приэлектродных областях направлен к столбу, потоки энергии катодного и анодного источников тепла направлены к электродам. Следовательно, мощности приэлектродных областей расходуются в основном на нагрев, плавление и испаре-

ние электродов, то есть на осуществление процесса обработки, и, таким образом, возможность и качественная сторона процесса обработки определяются качественными характеристиками (качеством) источников тепла на электродах, в частности объемной плотностью тепловой мощности в катодном и анодном источниках тепла (см. выражение (1)). Заметим, что в связи с малой протяженностью катодного и анодного источников тепла они могут характеризоваться поверхностной плотностью тепловой мощности [10, с. 10–11].

Столб дуги в процессе непосредственной обработки существенной роли не играет. Однако энергетические процессы в столбе дуги обуславливают энергетические процессы на электродах и, в частности, объемную плотность тепловой мощности в катодном и анодном источниках тепла, а следовательно, возможность и качественную сторону процесса обработки. По этой причине энергетические характеристики столба дуги, характеризуемые прежде всего напряженностью электрического поля и плотностью силы тока (см. выражения (1), (2), (3), (4)), являются важнейшими параметрами процесса, определяющими в конечном счете возможность и качественную сторону процесса обработки.

Проанализируем возможность достижения в столбе дуги и соответственно в катодном и анодном источниках тепла энергетических характеристик, достаточных для локального разрушения металла, а значит, и для размерной обработки. Напряженность электрического поля и плотность силы тока, а следовательно, и иные энергетические характеристики столба дуги (см. выражения (1), (2), (3), (4)) в конечном счете являются функцией электрического сопротивления среды, через которую протекает разряд; при этом с увеличением (уменьшением) электрического сопротивления среды напряженность электрического поля и плотность силы тока в столбе дуги возрастают (уменьшаются), что следует рассматривать как явление саморегулирования указанных характеристик в функции электрического сопротивления среды протеканию разряда. Аналогичные закономерности распространяются также на катодный и анодный источники тепла. Из этого следует, что для получения дуг с достаточно высокими для локального разрушения металла энергетическими характеристиками необходимо обеспечить соответствующее, достаточно значительное и непрерывно проявляющее себя электрическое сопротивление среды протеканию разряда. Рассмотрим возможные пути достижения таких сопротивлений.

Электрическое сопротивление среды протеканию разряда является функцией состава и состояния внешней среды и материала электродов. Изменяя состав внешней среды и материал электродов, можно, как это известно, в ограниченных пределах регулировать электрическое сопротивление среды протеканию разряда, а следовательно, и энергетические характеристики дуг. Однако при этом энергетические характеристики таких дуг оказываются недостаточными для локального разрушения металла, а значит, и для размерной обработки металлов.

Установим, в каких пределах можно изменять электрическое сопротивление протеканию разряда за счет изменения состояния внешней среды, которое характеризуется давлением и температурой. Изменять температуру внешней среды с целью регулирования энергетических характеристик дуги, по-видимому, нецелесообразно, по крайней мере, в настоящее время затруднительно и малоэффективно. Рассмотрим возможность регулирования электрического сопротивления среды протеканию разряда за счет изменения давления внешней среды.

Давление внешней среды (обычно это газы или жидкости) может быть статическим, когда среда практически неподвижна, или же динамическим, когда дуговой разряд протекает в потоке среды-диэлектрика в условиях динамического (механического) воздействия на него потока. В первом случае с повышением давления электрическое сопротивление среды, напряженность электрического поля и плотность силы тока, а значит, и энергетические характеристики дуги несколько возрастают [3, с. 41–45]. Однако малоэффективность и трудности применения такого способа регулирования энергетических характеристик дуги на практике делают его малопримемлемым.

Таким образом, для эффективного управления энергетической структурой дуги остается единственный технологический фактор, единственная возможность – дуга должна протекать в потоке среды-диэлектрика в условиях динамического (механического) воздействия потока на столб дуги. Проанализируем по этому технологическому фактору электрические разряды, реализуемые в условиях ЭРО.

При РОД дуга протекает в поперечном потоке среды-диэлектрика в условиях одностороннего динамического давления потока на столб дуги. Основной технологический фактор – динамическое давление потока, которое регулируется легко, плавно и в самых широких пределах. А это обеспечивает регулирование энергетических характеристик дуги в самом широком диапазоне режимов, начиная от значений, характерных для обычных сварочных дуг, и заканчивая значениями, достаточными

для самого тонкого размерного испарения металла. Отметим, что в условиях РОД при необходимости зона термического влияния может практически отсутствовать (что, заметим, указывает на исключительно большой диапазон энергетических и, следовательно, технологических возможностей разряда).

При ЭИО и реализации нестационарных электрических разрядов вообще динамическое взаимодействие дуги с поперечным потоком среды-диэлектрика достигается в условиях изменяющегося во времени всестороннего и равномерного сжатия столба дуги при расширении канала разряда, когда последний “набегает” на неподвижную среду-диэлектрик, сжимая ее. В этом случае динамическое давление потока на столб разряда и соответственно энергетическая структура дуги определяются длительностью импульса и плотностью среды-диэлектрика, которые следует отнести к основным технологическим факторам процесса и которые, собственно, определяют и ограничивают энергетические возможности разряда. При этом энергетические характеристики разряда по мере его протекания падают, а в конечной стадии протекания оказываются и вовсе не достаточными для локального разрушения металла. В начальной стадии протекания разряда его энергетические характеристики являются достаточными для локального разрушения металла, а зона термического влияния может составлять сотые доли миллиметра. Необходимо учитывать, что принудительная прокачка рабочей жидкости (а это дополнительное одностороннее динамическое давление потока среды-диэлектрика на столб разряда и, следовательно, дополнительный технологический фактор) позволяет заметно интенсифицировать процесс эрозии.

При ЭКО реализуются как нестационарные, так и стационарные электрические разряды в условиях одностороннего динамического воздействия поперечного потока среды-диэлектрика на столб дуги с той лишь особенностью, что этот поток создается движущимися, обычно вращающимися, электродами. В этом случае к основным технологическим факторам, определяющим динамическое давление потока на столб разряда, следует отнести окружную скорость вращения электродов и плотность среды-диэлектрика, что, собственно, определяет и ограничивает энергетические характеристики разряда. Но тогда название способа “электроконтактная обработка” следует изменить как не отражающее физическую суть способа и назвать этот процесс “электромеханическая обработка” (ЭМО). В условиях такого процесса энергетические характеристики дуги ограничены, но являются достаточными для локального разрушения металла. Так, зона термического влияния может составлять сотые доли миллиметра.

В плазмотронах эффект всестороннего, постоянного, равномерного, поперечного к столбу дуги динамического воздействия потока среды-диэлектрика достигается за счет ограничения площади поперечного сечения канала разряда соплом плазмотрона с дополнительным динамическим воздействием потока на столб дуги за счет прокачки через сопло среды-диэлектрика. К числу основных технологических факторов следует отнести геометрические параметры сопла и расход среды-диэлектрика, что, собственно, определяет и соответственно ограничивает энергетические характеристики дуги. При этом энергетические характеристики дуги ограничены, но являются достаточными для локального разрушения металла, а зона термического влияния может составлять десятые доли миллиметра.

Таким образом, все известные дуговые разряды в условиях ЭРО отличаются лишь различными формами динамического воздействия поперечного к столбу дуги потока среды-диэлектрика, динамическое давление которого (потока) на столб дуги и определяет энергетическую структуру последней, что следует рассматривать как явление саморегулирования энергетических характеристик дуги в функции динамического давления потока. При этом от таких механических воздействий дуга, скажем так, “защищает” себя термически, создавая соответствующую энергетическую структуру адекватно механическим воздействиям и разрушая таким образом набегающий на нее поток среды-диэлектрика. Физический механизм такого саморегулирования описан в [6] и состоит в следующем.

Установлена неизвестная ранее закономерность взаимодействия электрической дуги (электрического поля) с потоком среды-диэлектрика (силового поля), состоящая в том, что такое взаимодействие сопровождается явлением саморегулирования геометрических (площади поперечного сечения и длины) и энергетических характеристик дуги – напряженности электрического поля и плотности силы тока в столбе дуги, а следовательно, объемной плотности тепловой мощности, температуры, концентрации элементарных частиц, давления плазмы (см. выражения (1), (2), (3), (4)), а также магнитной индукции собственного магнитного поля дуги, которые описываются в функции векторного произведения силы тока дуги  $I$  на динамическое давление по-

тока среды диэлектрика  $P_d$ , то есть  $\bar{I} \times \bar{P}_d$ , и возрастают при увеличении последнего.

При этом магнитная индукция собственного магнитного поля дуги может быть представлена в виде векторного произведения, Тл:

$$\bar{A} = \bar{I} \times \bar{P}_d \quad (5)$$

Выражение (5) имеет принципиальное значение и важные последствия. Сформулируем в самом общем виде его физический смысл, приняв во внимание, что  $I$  – основная количественная характеристика электрического поля,  $P_d$  – основная количественная характеристика силового поля. Оно выражает, по сути, неизвестную ранее закономерность взаимодействия электрического и силового полей (электрической дуги и потока среды-диэлектрика), результатом которого является преобразование энергии электрического поля в энергию собственного магнитного поля дуги, сжимающего и удерживающего плазму столба дуги высоких энергетических характеристик. Следовательно, в столбе электрической дуги с увеличением  $P_d$  одновременно достигается и получение, и удержание плазмы высоких энергетических характеристик.

Это также означает, что при протекании электрической дуги в поперечном потоке среды-диэлектрика указанные геометрические и энергетические характеристики дуги, а следовательно, и технологические характеристики процесса описываются в функции указанных технологических факторов  $I$  и  $P_d$  и, например, при РОД могут быть представлены простым соотношением

$$y = kI^\alpha P_d^\beta, \quad (6)$$

где  $y$  – любой технологический показатель (характеристика) процесса, например производительность, шероховатость, глубина зоны термического влияния и др.;  $k$  – коэффициент размерности;  $I$  – сила тока, принимается в пределах от нескольких ампер до нескольких тысяч ампер, определяет производительность обработки и, таким образом, отражает количественную сторону процесса;  $P_d$  – динамическое давление потока, выбирается в пределах от 1–2 кПа до 1 МПа и более, определяет качество обработки (шероховатость, глубину зоны термического влияния, точность) и, таким образом, отражает качественную сторону процесса;  $\alpha$  и  $\beta$  – показатели степени, различные для различных технологических характеристик.

Из этого соотношения следует, что в условиях РОД представляется возможным, с одной стороны, ввести в зону обработки практически любые мощности, от наименьших до наибольших, а значит, обеспечить любую целесообразную производительность, а с другой стороны, возможно реализовать обработку в самом широком диапазоне режимов, от размерного плавления до тонкого размерного испарения при соответствующем изменении качества обработки – и это независимо от силы тока. И достигается это мобильно, в нужное время, в нужном месте простым регулированием  $I$  и  $P_d$ .

Заметим, что, согласно изложенному, в условиях реализации различных процессов ЭРО при заданном  $P_d$  энергетическая структура разрядов должна совпадать и такие источники тепла для ЭРО могут рассматриваться как равноценные. И действительно, если сравнить, например, энергетические характеристики дуги в условиях РОД [10] и энергетические характеристики нестационарного разряда в условиях известных способов ЭИО [9, с. 12–15], то оказывается, что это именно так. Имеются, однако, и отличия. Разными являются и технологические возможности этих источников тепла. Действительно, по мере протекания нестационарного электрического разряда его энергетические характеристики изменяются в широких пределах (например, напряженность электрического поля в столбе разряда может изменяться от 4 до 0,1 кВ/см), тогда как энергетические характеристики стационарного электрического разряда в условиях РОД достаточно стабильны (так, например, независимо от силы тока напряженность электрического поля в столбе дуги будет колебаться около 3 кВ/см). Однако, с точки зрения физической сущности явления, это одно и то же – электрический дуговой разряд соответствующих энергетических характеристик. Можно, например, сказать, что электрическая искра – это дуга с изменяющимися во времени энергетическими характеристиками, а можно, напротив, дуга в условиях РОД – это длительная искра.

Таким образом, по своим энергетическим характеристикам, а также эффекту теплового воздействия на металл, например по величине зоны термического влияния, стационарная дуга в

условиях РОД соответствует нестационарному (искровому, импульсному) электрическому разряду в условиях ЭИО. Однако, сравнительно с последним, имеет важное преимущество – она обеспечивает стабильные энергетические характеристики, которые легко регулируются независимо от силы тока, а значит, обеспечивают как качественную, так и количественную стороны процесса обработки в значительно более широком диапазоне режимов, начиная от грубого размерного плавления и до самого тонкого размерного испарения. В частности, позволяет реализовать высокопроизводительную обработку (десятки тысяч мм<sup>3</sup>/мм) на большой силе тока (сотни и тысячи А) при высоком качестве обработки и глубине зоны термического влияния в пределах сотых долей миллиметра или даже практически при ее отсутствии.

Технологические возможности электрических разрядов в условиях процессов ЭРО определяются возможностями и диапазоном регулирования энергетических характеристик дуги, а также возможностями реализации разнообразных технологических схем формообразования. Процессы ЭРО в своей совокупности обеспечивают регулирование энергетических характеристик дуги в самом широком диапазоне технологических режимов. Реализуются также и все известные технологические схемы формообразования при оптимальном сочетании количественных и качественных характеристик процесса. Но каждый из способов ЭРО имеет свои ограничения и технологические возможности, а потому и свою область рационального применения. Так, процессы ЭИО обеспечивают высокую точность размеров и качество поверхности, но отличаются низкой производительностью. Они незаменимы, когда нет возможности применить прокатку рабочей жидкости, в частности при получении малых отверстий. Процессы ПО высокоэффективны при обработке листового металла как по внешнему, так и по внутреннему контурам, если к получаемым изделиям не предъявляются повышенные требования в отношении точности и качества резки. ЭМО возможна и целесообразна при обработке изделий типа тел вращения из труднообрабатываемых материалов. РОД обеспечивает оптимальное сочетание количественных и качественных характеристик процесса (максимально высокую производительность при высоком качестве обработки) и позволяет высокоэффективно реализовать все известные технологические схемы формообразования за исключением тех, когда невозможно обеспечить прокатку рабочей жидкости. Но, по существу, разработана и получила практическое применение лишь технологическая схема формообразования по принципу прошивания с объемным копированием формы электрода-инструмента. Другие технологические схемы формообразования требуют исследований и разработки.

### **О классификационных признаках и классификации способов ЭРО**

Разработка классификационных признаков и совершенствование классификации способов ЭРО имеют большое научное и методологическое значение, поскольку позволяют отделить существенные признаки от несущественных и обнаружить общие для всех способов еще неизвестные внутренние связи и закономерности, а также находить новые комбинации определяющих признаков и описывать некоторые еще неизвестные свойства обработки, дают возможность выбрать направление поисковых исследований и предугадать основные тенденции и возможные направления в развитии ЭРО.

Основные классификационные признаки ЭРО должны, по-видимому, отражать главные физические условия ее осуществления. На основании изложенного феноменологического описания электрической дуги как источника тепла для ЭРО на рис. 2 представлены классификационные признаки и классификация способов ЭРО.

Необходимо учитывать, что указанные способы можно комбинировать. Кроме того можно предложить принципиально новые способы ЭРО, например способ, реализующий дугу, перемещающуюся в диэлектрической жидкости между электродом-заготовкой и электродом-инструментом в результате взаимодействия с магнитным полем. Однако о практической значимости этих способов можно говорить только после проведения соответствующих поисковых исследований, в связи с чем включать их в классификацию пока нецелесообразно. Тем более, как нам представляется, недостатка в количестве способов ЭРО нет, их и в настоящее время достаточно, чтобы в каждом конкретном случае решить вопрос оптимального сочетания количественных и качественных сторон процесса обработки за счет соответствующего согласования энергетических характеристик разряда с теплофизическими характеристиками электродов.



Рис. 2. Классификационные признаки и классификация способов ЭРО

## Выводы

1. Электрические разряды в условиях процессов ЭРО, включающих ЭИО, ЭМО, ПО и РОД, имеют единую физическую природу – это то, что принято называть электрическим дуговым разрядом, или электрической дугой. Именно это объединяет процессы, делает их похожими, позволяя рассматривать их в единстве, взаимосвязи и взаимозависимости, в частности как альтернативу традиционным процессам ОМР и ОМД.

2. Отличия электрических разрядов в условиях реализации разнообразных процессов ЭРО – это лишь различные формы динамического (механического) взаимодействия дуги с поперечным к столбу дуги потоком среды-диэлектрика, динамическое давление которого на столб дуги и определяет энергетическую структуру дугового разряда. При РОД дуга протекает в поперечном потоке среды-диэлектрика в условиях одностороннего динамического давления потока на столб дуги. При ЭМО односторонний поперечный к столбу дуги поток среды-диэлектрика создается движущимися, обычно вращающимися электродами. При ЭИО и реализации нестационарных электрических разрядов динамическое взаимодействие дуги с поперечным потоком среды-диэлектрика достигается в условиях изменяющегося во времени всестороннего и равномерного сжатия столба дуги при расширении канала разряда, когда последний “набегает” на неподвижную среду-диэлектрик, сжимая ее. В плазмотронах эффект всестороннего, постоянного, равномерного, поперечного к столбу дуги динамического воздействия потока среды-диэлектрика достигается за счет ограничения площади поперечного сечения канала разряда соплом плазмотрона с дополнительным динамическим воздействием потока на столб дуги за счет прокачки через сопло среды-диэлектрика.

3. Технологические возможности электрических разрядов в условиях процессов ЭРО определяются возможностями и диапазоном регулирования энергетических характеристик дуги, а также возможностями реализации разнообразных технологических схем формообразования. Процессы ЭРО в своей совокупности обеспечивают регулирование энергетических характеристик дуги в самом широком диапазоне технологических режимов. Реализуются также и все известные технологические схемы формообразования при оптимальном сочетании количественных и качественных характеристик процесса. Но каждый из способов ЭРО имеет свои ограничения и технологические возможности, а потому и определенную область рационального применения.

4. Представленная на уровне феноменологического описания теория электрической дуги как источника тепла для ЭРО описывает неизвестную ранее закономерность взаимодействия дуги с поперечным к столбу дуги потоком среды-диэлектрика, состоящую в саморегулировании энергетических характеристик дуги в функции динамического давления потока в самом широком диапазоне режимов, начиная от значений, характерных для обычных дуг типа сварочных, и заканчивая значениями, достаточными для самого тонкого размерного испарения металла. И это независимо от силы тока, что позволяет обеспечить оптимальное сочетание количественных и качественных характеристик процесса и, следовательно, рассматривать такую дугу как качественно новый источник тепла для ЭРО и иных технологий. Поэтому можно утверждать, что созданы теоретические предпосылки для дальнейшего развития процессов ЭРО как высокоэффективной альтернативы традиционным технологиям ОМР и ОМД.

5. На основании изложенных представлений предложены классификационные признаки и классификация способов ЭРО.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сомервилл Дж. М. Электрическая дуга / Пер. с англ. “Госэнергоиздат”, 1962.
2. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. М., Наука, 1968.
3. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
4. Эккер Г. Современное развитие теории приэлектродных областей электрической дуги // Теплофизика высоких температур. 1973. Т. 2. Вып. 4.
5. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Электричество и магнетизм. М., Мир, 1977.
6. Носуленко В.И. Электрическая дуга в поперечном потоке среды-диэлектрика как источник тепла для новых технологий // Электронная обработка материалов. 2005. № 2. С. 26–33.
7. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. М., Машиностроение, 1970.
8. Лившиц А. Л. и др. Электроимпульсная обработка металлов. М., Машиностроение, 1967.
9. Золотых Б. Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой

диэлектрической среде: Автореф. дис. докт. техн. наук/МИЭМ. М., 1968.

10. Носуленко В.И. Размерная обработка металлов электрической дугой // Электронная обработка материалов. 2005. № 1. С. 8–17.

Поступила 18.10.05

### Summary

Is shown, that the electrical discharges in conditions of electric discharge machining (EDM) methods, introduced by electrospark (electroimpulse) machining, electromechanical machining, plasma machining and by an electrical arc sizing machining, have an identical physical nature is that is accepted to name by an electrical arc discharge or, that same, electrical arc. It unites these processes, makes by their similar, allowing to consider them in unity, correlation and interdependence, in particular, as alternative to traditional processes of metals treatment by cutting and pressure. Differences of electrical discharges in conditions of various EDM methods realization is only different ways of an arc dynamic (mechanical) interaction with transversal to an arc pole by an environment-dielectric stream, which dynamic pressure on an arc pole determines power structure of an arc discharge, allowing to regulate an arc power performances in the widest conditions range. On a foundation of explained introducing the classification attributes and EDM methods classification are offered.

---

П.П. Малюшевский, В.Г. Сысоев, А.И. Ивлиев, А.П. Малюшевская,  
М.Ю. Комаров, В.Е. Рябцев, А.П. Малюшевский, Т.В. Хейдал

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ПЕРМАНЕНТНОЙ МАРКИРОВКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН (Часть I. Концепция. Разрядно-импульсная технология)**

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина  
International Pipe Technology & Management (Norway)*

В ряде отраслей машиностроения, сельскохозяйственного производства, горнодобывающих предприятий, металлургии, транспорта, газо- и нефтедобычи и других существует проблема долговременной маркировки деталей и элементов конструкций. Это заключается, например, в необходимости строгого учета труб нефтяного сортамента и трубных изделий нефтяной индустрии на протяжении всего периода с момента производства и начала эксплуатации до момента утилизации [1]. В этот период производится их транспортировка, передача от одной фирмы другой, очистка каким-либо активным способом, ремонт, изменение рода использования и т.п. По сути, такая паспортная маркировка должна служить всегда, несмотря на то что наносится на внешних легко доступных для маркировки поверхностях, но которые столь же легко доступны и разрушающим воздействиям со стороны внешней среды. При этом маркировка должна быть доступной для считывания в любой момент эксплуатации замаркированной детали. Требования очень жесткие, поэтому направление решения этой задачи для металлургической и нефтедобывающей промышленности может быть показательным. Аналогичные (требуемые маркировки) узлы и детали есть практически во всех отраслях промышленности.

Анализ литературных источников позволил сформулировать основные требования к любой системе такой маркировки:

- 1) маркировка должна быть перманентной, то есть сопровождать изделие на протяжении всего “жизненного цикла”, информация о данном изделии доступной на любом этапе этого цикла;
- 2) информация об изделии должна быть недоступной уничтожению;
- 3) маркировка должна находиться на теле изделия (исключая резьбовые соединения);

---

© Малюшевский П.П., Сысоев В.Г., Ивлиев А.И., Малюшевская А.П., Комаров М.Ю., Рябцев В.Е., Малюшевский А.П., Хейдал Т.В., Электронная обработка материалов, 2006, № 1, С. 14–21.