

В. И. Носуленко

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

*Кировоградский национальный технический университет,  
просп. 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 их всех объединяет единая физическая природа “инструмента” обработки – это то, что называют электрическим дуговым разрядом или, что то же, электрической дугой. Это позволяет рассматривать их в единстве, взаимосвязи и взаимозависимости, в частности, как альтернативу традиционным процессам обработки металлов резанием (ОМР) и обработки металлов 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, от того, какой она является, какой мы её видим. Сущность является узловым, ключевым моментом внутренних связей, сторон объекта, а познать сущность объекта – это понять причины и условия его возникновения, его определяющие свойства, законы его жизни, характерные для него 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 также классификационные признаки и классификацию способов 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 ни 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 глубоким проникновением дугового разряда в практику находятся явно неудовлетворительное 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, недостаёт 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 и она описывается в известной мере 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 (рис. 1, а) при напряжении не менее  $\sim 10 \dots 20$  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, т.е. 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 (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  $U_{к+а} \approx 10 \dots 20В$ .

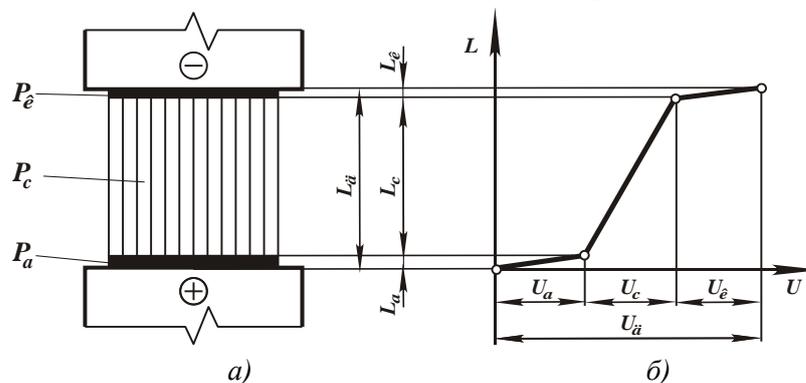


Рис. 1. Принципиальная схема электрической дуги как источника тепла

Электрическая дуга может протекать в самых разнообразных условиях и характеризоваться самыми разнообразными электрическими, геометрическими и энергетическими характеристиками. Так, например, известно, что дуга горит между любыми проводниками; она устойчиво горит в вакууме и при давлениях, достигающих многих тысяч атмосфер; она 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 1А до многих тысяч ампер; температура плазмы столба дуги, по имеющимся данным, изменяется в диапазоне от  $5000^{\circ}К$  до  $50000^{\circ}К$  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 неограничено. В этой связи электрическая дуга неисчерпаема в формах своего проявления, неисчерпаемы также ее технологические возможности. Поэтому важно описать основные закономерности (законы, принципы) такого саморегулирования. Состояние теории и практики электрической дуги позволяют сформулировать основной закон саморегулирования, согласно принципа 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 изменяется таким образом, чтобы уменьшить эффект внешнего воздействия (согласно принципа 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 является 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 энергетиче-

скую структуру адекватно внешним воздействиям, при необходимости, в желаемом направлении. Заметим, это означает, что одно явление (энергетическая структура дуги соответствующих характеристик) обязательно сопровождается другим явлением (наличием собственного магнитного поля дуги соответствующих характеристик). Иначе, скажем так, 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, если 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 постоянно отличны от нуля в отличие от нестационарной электрической дуги, 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 конечном счете, 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  $10^{-5} \dots 10^{-4}$  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  $U_{к+а} \approx 10 \dots 20$  В. Именно это является необходимым и достаточным условием, чтобы считать электрический разряд “типично дуговым”. Но именно этими параметрами характеризуются 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 изложенного (см. рис. 1), дугу рассматривают как сумму трех самостоятельно действующих источников тепла в катодной области, анодной области и столбе дуги. Схема трех источников тепла в дуге дает возможность представить дугу следующим образом: один источник тепла мощностью  $P_k$  расположен в плоском слое толщиной  $L_k$  на поверхности катода, другой мощностью  $P_a$  в плоском слое толщиной  $L_a$  на поверхности анода и третий мощностью  $P_c$  расположен по объему столба дуги высотой  $L_c$ . Таким образом схема трех источников тепла в дуге позволяет рассматривать и исследовать дугу как единство трех весьма различных по энергетическим характеристикам источников тепла, каждый из которых 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) вследствие весьма высокой напряженности электрического поля представляет собой весьма мощные концентрированные плоские источники тепла, в то время как столб дуги является значительно 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 обработанных статистических данных  $C_2 = 150 \dots 200$  К/(В/см).

Давление плазмы в столбе дуги, Па:

$$p = C_3 j E, \quad (4)$$

где  $C_3$  – коэффициент размерности.

Приведенные соотношения (2, 3, 4) являются важными. Они позволяют просто и надежно оценить энергетическое состояние плазмы в столбе дуги с точки зрения простой сути такого сложного физического явления каким является 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 позволяет надежно определять их геометрические параметры, а значит плотность силы тока и напряженность электрического поля. Поэтому приведенные выше соотношения (1, 2, 3, 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 источнику тепла для размерной обработки металлов, которые должны отличать такую дугу от обычных дуг. Они состоят в том, что, 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 области, анодной области 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 расходятся в основном на нагрев, плавление и испарение электродов, т.е. на осуществление процесса обработки, и, таким образом, возможность и качественная сторона процесса обработки определяется качественными характеристиками (качеством) источников тепла на электродах, в частности, объемной плотностью тепловой мощности в катодном и

анодных источниках тепла (см. выражение 1). Заметим, что в связи с малой протяженностью катодного и анодного источников тепла они могут характеризоваться поверхностной плотностью тепловой мощностью [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, характеризующиеся 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 следовательно 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 протеканию разряда; 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 источник тепла. Из этого следует вывод, 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, так как это, по крайней мере, по состоянию вопроса на 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 иметь статический характер, когда среда практически неподвижна, или же динамический характер, когда дуговой разряд протекает в потоке среды-диэлектрика в условиях динамического (механического) воздействия на него потока. В первом случае, когда давление внешней среды имеет статический характер, 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 практического осуществления делают такой способ регулирования энергетических характеристик дуги малоприменимым.

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. Основным технологическим фактором – динамическое давление потока, которое регулируется легко, плавно и в самых широких пределах, что обеспечивает регулирование энергетических характеристик дуги в самом широком диапазоне режимов, начиная от значений, характерных для обычных сварочных дуг, и кончая значениями, достаточными для самого тонкого размерного испарения металла. Отметим, что в условиях РОД при необходимости зона тер-

мического влияния может практически отсутствовать (что, заметим, указывает на исключительно большой диапазон энергетических и, следовательно, технологических возможностей разряда).

При ЭИО и при 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 “набегаёт” на неподвижную среду-диэлектрик, сжимая её. Действительно, по этому поводу Б. Н. Золотых [9] отмечает: “Любая жидкость в силу её инерционности будет препятствовать расширению канала разряда и действовать на первых этапах развития как твердая стенка. Эта механическая “фокусировка” приводит к резкому увеличению плотности энергии, а, следовательно, и к резкому увеличению величины эрозии”. 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 недостаточными 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. Следует 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 неё 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 характеристик дуги (площади поперечного сечения и длины) и её энергетических характеристик – напряженности электрического поля и плотности силы тока в столбе дуги, а следовательно, объёмной 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 потока среды диэлектрика  $P_d$ , т. е.

$\bar{I} \times \bar{P}_d$ , и возрастают при увеличении последнего.

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

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

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 существу, 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, А, принимается в пределах от нескольких ампер до нескольких тысяч ампер, определяет производительность обработки и таким образом, по существу, отражает количественную сторону процесса;  $P_d$  – динамическое давление потока, Па, выбирается в пределах от 1...2 кПа до 1 МПа и более, определяет качество обработки (шероховатость, глубину зоны термического влияния, точность) и таким образом, по существу, 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 изложенного 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, это – электрический дуговой разряд соответствующих энергетических характеристик. Можно, например, сказать, что электрическая искра – это дуга с изменяющимися во времени энергетическими характеристиками, а можно, напротив, сказать, что дуга в условиях РОД – это длительная искра.

Таким образом, по своим энергетическим характеристикам, а также по своему 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 её 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 свои технологические возможности, а потому каждый из них имеет свою область рационального применения. Так, процессы ЭИО обеспечивают высокую точность размеров и высокое качество поверхности, но отличаются низкой производительностью. Они незаменимы, когда нет возможности применить прокачку 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 прокачку 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 имеет большое научное и методологическое значение, поскольку позволяет отделить существенные от несущественных и обнаружить общие для всех способов еще неизвестные внутренние связи и закономерности, позволяет находить новые комбинации определяющих признаков и описывать некоторые еще неизвестные свойства обработки, позволяет выбрать направление поисковых исследований и предугадать основные тенденции и возможные направления в развитии ЭРО.

Основные классификационные признаки ЭРО должны, по-видимому, отражать основные 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 ЭРО 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, что, как нам представляется, недостатка в количестве способов ЭРО не имеется, 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, что то же, электрической дугой. Именно это объединяет эти 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 при 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 её. 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 свои технологические возможности, а потому каждый из них имеет свою 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 том, что при этом наблюдается саморегулирование энергетических характеристик дуги в функции динамического давления потока в самом широком диапазоне режимов, начиная от значений, характерных для обычных дуг типа сварочных и кончая 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.

18.10.2005 г.