

В.И. Носуленко

## РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ (РОД)

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

При протекании электрической дуги в поперечном потоке среды-диэлектрика ее энергетические характеристики регулируются легко, плавно и в самых широких пределах за счет изменения динамического давления потока [1]. В частности, возможно регулирование в самых широких пределах энергетических характеристик катодного и анодного источников тепла на электродах, начиная от значений, характерных для обычных дуг типа сварочных, когда осуществляется плавление металла, и до значений, достаточных для тонкого, размерного испарения металлов. Такой способ [2] уже получил заметное практическое применение под названием размерная обработка металлов электрической дугой (РОД) [3].

**Общие сведения.** Сущность процесса РОД состоит в том (рис. 1), что обработку осуществляют стационарной электрической дугой, которая горит между электродом-инструментом (ЭИ) и электродом-заготовкой (ЭЗ) в поперечном потоке жидкости при динамическом давлении потока не менее 1–2 кПа. Полученный дуговой разряд имеет высокие энергетические характеристики, достаточные для локального разрушения металла за счет испарения и капельного выброса расплава, и перемещается по поверхности электродов, копируя таким образом на заготовке профиль ЭИ, а поток жидкости удаляет из зоны обработки продукты эрозии. Все это обеспечивает оптимальное протекание процесса размерной обработки.

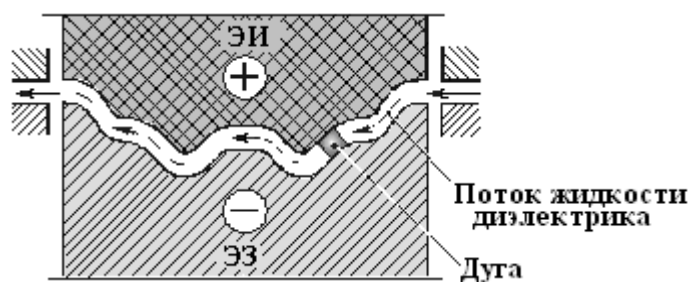


Рис. 1. Схема процесса РОД

В условиях РОД энергетические характеристики разряда (плотность силы тока, напряженность электрического поля) регулируются легко, плавно и в широких пределах за счет изменения динамического давления потока и при увеличении (уменьшении) последнего увеличиваются (уменьшаются). Как следствие, в условиях такого процесса можно легко регулировать качество обработки за счет изменения динамического давления потока, осуществляя обработку в широком диапазоне режимов, начиная от грубого размерного плавления и вплоть до преобладающего тонкого размерного испарения. Таким образом, динамическое давление потока рабочей жидкости в условиях РОД является основным параметром процесса, определяющим возможность и качественную сторону обработки.

В качестве рабочей жидкости применяют жидкости-диэлектрики, например нефтепродукты, воду, эмульсии и суспензии. Отметим, что в условиях РОД могут эффективно использоваться раз-

нообразные газы, прежде всего воздух. Однако жидкости-диэлектрики, по крайней мере сейчас, имеют преимущество с точки зрения технологических и эксплуатационных характеристик, и поэтому РОД обычно реализуют с применением сред-жидкостей.

ЭИ могут быть плавящимися (например, стальными) и неплавящимися (графитовыми), профилированными и непрофилированными. Они изготавливаются из тех же материалов и имеют приблизительно такую же эрозионную стойкость, как и при известных способах электроэрозионной обработки (ЭЭО). Так, высокую стойкость обеспечивают графитовые ЭИ при использовании рабочей жидкости из нефтепродуктов (износ менее 1% от объема разрушенного металла).

Источником питания током являются сварочные выпрямители или генераторы с внешней падающей характеристикой. Напряжение рабочего хода источников питания определяется особенностями реализации технологических схем формообразования и составляет 20–50 В и более (напряжение холостого хода – 50–100 В и более). Мощность источников питания током определяет производительность обработки и может достигать десятков и сотен киловатт.

Если изменять типоразмеры электродов и придавать им соответствующие движения подачи, то при использовании соответствующих технологических приемов можно осуществить указанные закономерности процесса РОД и таким образом реализовать практически все известные технологические схемы формообразования.

Качество обработанной поверхности, которое определяется ее шероховатостью и глубиной зоны термического влияния, является преимущественно функцией динамического давления потока рабочей жидкости и меньше силы тока, улучшается при увеличении динамического давления потока и уменьшении силы тока и в целом не уступает качеству, достигнутому при известных способах ЭЭО. Глубина, структура и твердость зоны термического влияния легко регулируются за счет изменения динамического давления потока рабочей среды, и при увеличении последнего до соответствующих значений независимо от силы тока эта зона может практически полностью отсутствовать.

Оптимальная величина межэлектродных зазоров колеблется в пределах 0,05–0,2 мм. Точность обработки, определяемая прежде всего износом ЭИ и колебаниями величины межэлектродного зазора, в целом не уступает достигнутой при известных способах ЭЭО.

Сравнительная обрабатываемость материалов в условиях РОД оценивается, как и при известных способах ЭЭО. Производительность обработки прямо пропорциональна силе тока, который может достигать нескольких тысяч ампер, и во много раз превышает производительность электроискровой обработки. Например, при силе тока обработки 1000 А производительность обработки сталей достигает 30 000 мм<sup>3</sup>/мин при  $R_a$  6,3 мкм и глубине зоны термического влияния в пределах нескольких сотых долей миллиметра. Удельные затраты электроэнергии в зависимости от режимов обработки стали составляют 3–7 кВт·ч/кг.

На рис. 2 представлена зависимость производительности обработки  $M$  стали 45 от силы тока  $I$  и динамического давления  $P_d$  при использовании в качестве рабочей жидкости индустриального масла и ЭИ из графита МПГ-7 при прямой полярности электродов. На рис. 3, 4 показаны зависимости шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  и глубины зоны термического влияния  $H$  стали 5ХНТ от  $I$  и  $P_d$  при использовании в качестве рабочей жидкости керосина (50%) и индустриального масла (50%) и ЭИ из графита МПГ-7 при обратной полярности электродов.

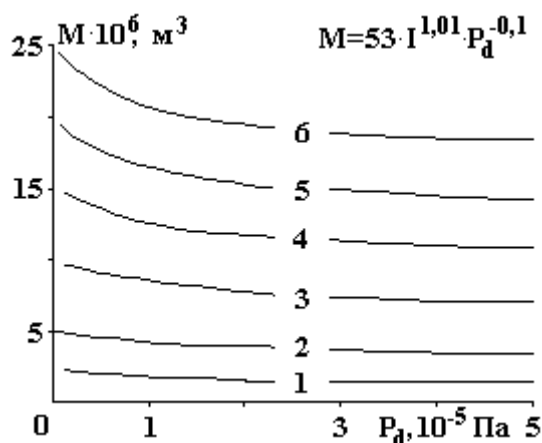


Рис. 2. Зависимость производительности обработки  $M$  от  $I$  и  $P_d$ .  
 $I$ , А: 1 – 100; 2 – 200; 3 – 400; 4 – 600; 5 – 800; 6 – 1000

Изложенные технологические возможности РОД, достигнутый уровень разработок, простота реализации и наличие соответствующей техники (источников питания дуги и т.д.) делают обработку высокоэффективным альтернативным процессом, который обеспечивает высокую экономическую эффективность, прежде всего, более высокую производительность и ресурсосбережение, и поэтому у него своя область рационального применения:

- обработка разнообразных фасонных полостей ковочных штампов, пресс-форм и т.д.;
- прошивка разнообразных глухих и сквозных, круглых и фасонных отверстий;
- многоэлектродная прошивка отверстий, которая позволяет значительно увеличить производительность процесса;
- прошивка глубоких отверстий;
- обработка внешних поверхностей деталей типа “фасонный стержень”;
- обработка листовых деталей любой толщины из любых металлов и сплавов по внутреннему и внешнему контурам, в частности в комбинации с плазменной резкой, что позволяет в условиях единичного, мелко- и среднесерийного производства рассматривать способ РОД как высокоэффективную альтернативу процессам штамповки и механической обработки;
- обработка сопряженных пар “пуансон–матрица” разделительных штампов;
- РОД может выполняться как один из операционных переходов на модернизированных станках с ЧПУ фрезерной, сверлильной и токарной группами;
- обработка (нарезка) внешних и внутренних нарезок в закаленных и высокопрочных сталях и сплавах;
- формообразование, а значит, и отбор проб в определенных местах, прежде всего труднообрабатываемых металлов и сплавов;
- разнообразные специализированные процессы. Так, реализован процесс очистки от металлического графа твердосплавных блок–матриц, предназначенных для получения искусственных алмазов.

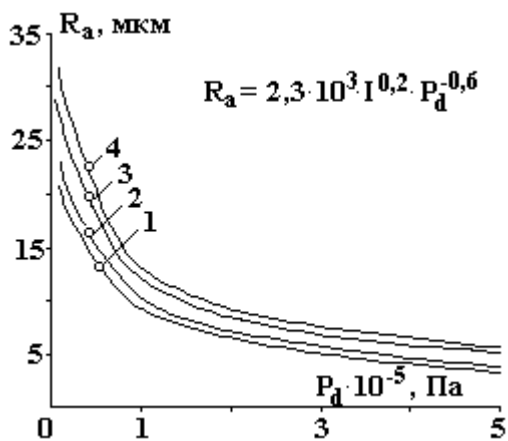


Рис. 3. Зависимость шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  от  $I$  и  $P_d$ .  $I, A$ : 1 – 100; 2 – 200; 3 – 400, 4 – 1000

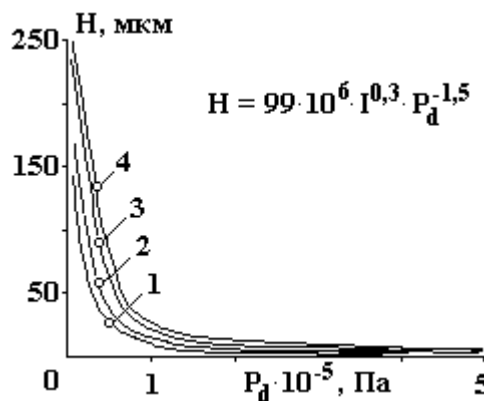


Рис. 4. Зависимость глубины зоны термического влияния  $H$  от  $I$  и  $P_d$ .  $I, A$ : 1 – 100; 2 – 200; 3 – 400, 4 – 1000

Особо отметим, что все указанные области применения процесса РОД могут быть реализованы в условиях основного производства получения серийных деталей.

**О качестве источников тепла на электродах и полярности электрической эрозии.** Дугу, как известно, следует рассматривать как сумму трех самостоятельно действующих источников тепла на катоде, аноде и в столбе дуги. При этом качественные характеристики (качество) источника тепла на катоде определяют возможность и качественную сторону процесса эрозии (обработки) катода, а качественные характеристики (качество) источника тепла на аноде – возможность и качественную сторону процесса эрозии (обработки) анода. Сравнительная количественная и качественная оценки источников тепла на катоде и аноде в свою очередь позволяют судить о предпочтительной полярности электрической эрозии, поскольку, как известно, эффект электрической эрозии полярен.

Качество катодного и анодного источников тепла на электродах может быть охарактеризовано поверхностной плотностью тепловой мощности (произведение плотности силы тока на падение напряжения соответственно в катодном и анодном источниках тепла, Вт/см<sup>2</sup>), поскольку при протекании дуги в поперечном потоке жидкости суммарная протяженность катодной и анодной областей в

диапазоне исследованных режимов для стальных электродов составляет, по нашим данным, всего 0,3–0,6 мкм, поэтому такие источники тепла можно рассматривать как плоские.

Плотность силы тока в описанных дугах определялась в [1, рис. 6]. Она является главным образом функцией динамического давления потока, в 5–10 раз превышает плотность силы тока в открытых дугах в воздухе и увеличивается (уменьшается) с возрастанием (уменьшением) динамического давления потока жидкости, достигая 40–50 кА/см<sup>2</sup>. Суммарное значение катодного и анодного падений напряжения  $U_{к+а}$  составляет 12–21 В [1].

Следовательно, поверхностная плотность тепловой мощности катодного и анодного источников тепла в диапазоне исследованных режимов достигает  $5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, что в десятки раз превышает значения, полученные в открытых дугах в воздухе. Напомним, что, согласно закону Джоуля – Ленца, количество тепла, выделяемого в этих источниках, пропорционально квадрату плотности силы тока. Все это подтверждает возможность реализации обработки в условиях РОД в самом широком диапазоне режимов.

Заметим, что качество катодного и анодного источников тепла на электродах является временной функцией даже в пределах одного элементарного эрозионного акта, когда дуга практически неподвижна. Для того чтобы убедиться в этом, обратимся к типичной осциллограмме напряжения  $U$  и силы тока  $I$  (рис. 5), записанной на режимах “устойчивый процесс – сближение электродов до короткого замыкания – размыкание электродов – устойчивый процесс”.

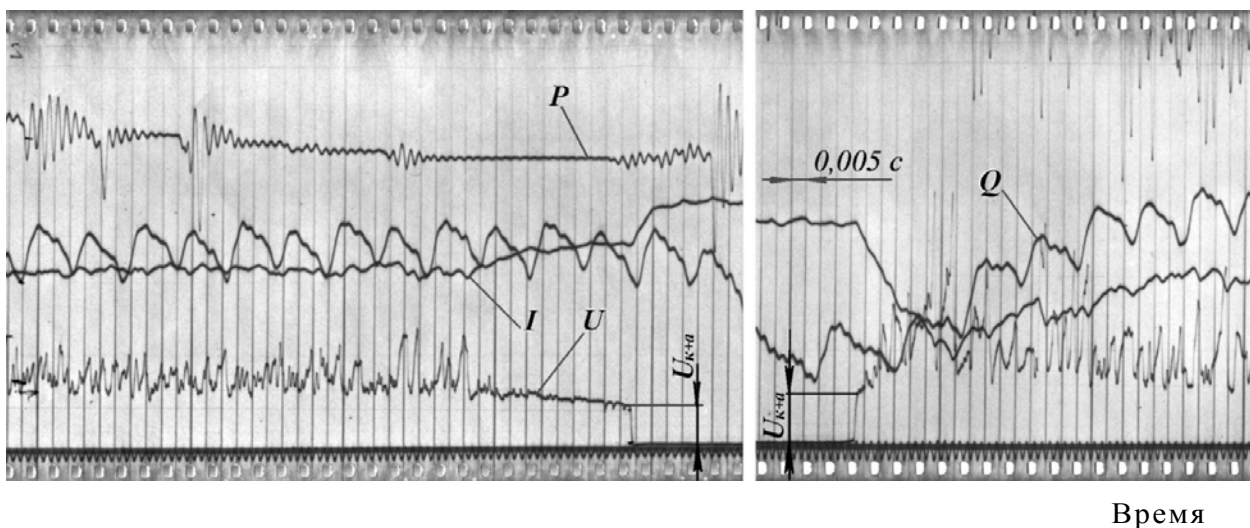


Рис. 5. Осциллограмма процесса РОД:  
*P* – статическое давление рабочей жидкости; *Q* – расход рабочей жидкости

Из осциллограммы следует, что напряжение и сила тока во времени постоянно изменяются. Последнее связано прежде всего с процессами, происходящими на электродах в области катодного и анодного источников тепла, когда нестационарный процесс распространения тепла от этих плоских источников сопровождается нагревом, плавлением и испарением материала электрода и соответственно увеличением напряжения на дуге. Это превращает плоский источник в объемный и в 1,5–2 раза и более увеличивает его тепловую мощность, способствуя более интенсивному протеканию процесса эрозии. Из осциллограммы следует, что разными, хотя и незначительно, являются катодный и анодный источники тепла для случаев замыкания и размыкания электродов (поскольку разными являются  $U_{к+а}$ ).

В конечном счете о качестве катодного и анодного источников тепла на электродах и о пригодности дуги для размерной обработки металлов можно судить по характеру ее теплового воздействия на электроды, в частности по профилю лунок обработанной поверхности, а также по величине и структуре зон термического влияния на катоде и аноде. Рассмотрим некоторые примеры.

На рис. 6,а показаны профили лунок на катоде и аноде из стали 45 в случае использования электродов из графита МПГ-7 при протекании дуги в поперечном потоке водопроводной воды при  $I = 400$  А и  $P_d = 0,2$  МПа. На рис. 6,б для тех же режимов показаны профили лунок на катоде и аноде из стали 45. При использовании стального ЭЗ и графитового ЭИ качество источника тепла на ЭЗ, а значит, количественная и качественная стороны процесса обработки определяются прежде всего полярностью электродов. При этом по площади катодного источника тепла (если ЭЗ катод) тепловая мощность распределена достаточно равномерно, в то время как по площади анодного источника теп-

ла (если ЭЗ анод) она распределяется неравномерно, с явно выраженным максимумом в центре, в результате чего шероховатость анода значительно превышает шероховатость катода. Однако анодный источник тепла обеспечивает более высокую производительность (1,5–1,8 раза). Можно сделать вывод: прямую полярность следует применять для обеспечения более высокой производительности; обратную полярность – для более высокого качества обработки.

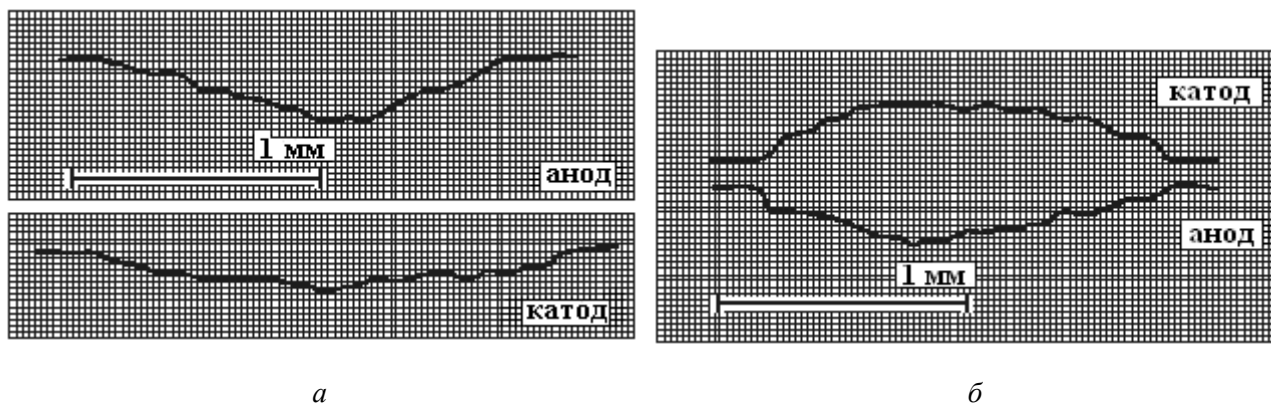


Рис. 6. Профили лунок на аноде и катоде из стали 45

На рис. 7 показаны снимки микроструктуры зон термического влияния на катоде и аноде из стали 45 при протекании дуги в поперечном потоке воды при указанных режимах. Видно, что зоны термического влияния на аноде не только несколько меньше, но и не имеют поверхностного слоя с повышенной твердостью (поскольку зерна феррита выходят к периферии шлифа), что, в частности, облегчает последующую механическую обработку. Учитывая, что эрозированные объемы примерно одинаковы (см. рис. 6,б), а величины зон термического влияния на катоде и аноде отличаются незначительно, можно утверждать, что качество катодного и анодного источников тепла примерно одинаково.



Рис. 7. Микроструктуры зон термического влияния на катоде (а) и на аноде (б) из стали 45

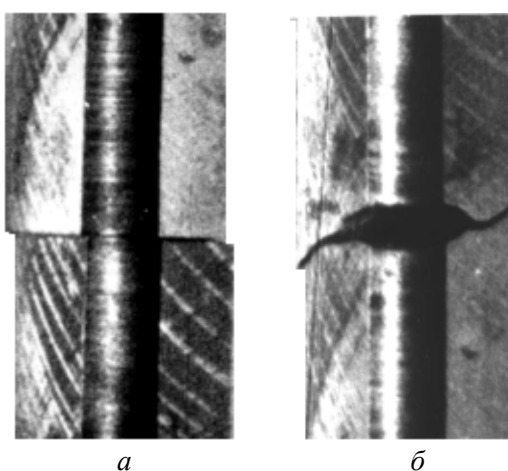


Рис. 8. Характер износа стальных электродов при их взаимном смещении

Необходимо учитывать, что качество источников тепла на электродах может определяться и быть разным в связи с различными гидродинамическими режимами течения жидкости по высоте межэлектродного зазора. Это касается прежде всего участков, где происходит изменение направления течения рабочей жидкости. Так, при осуществлении процесса между стальными электродами одного диаметра, например, в указанных режимах при относительном смещении электродов, пусть да-

же на десятые доли миллиметра (рис. 8,а), наблюдается явно выраженная неравномерная эрозия электродов (рис. 8,б). Особенно заметно это на диаметрально противоположных участках. Такого не наблюдается, например, при отсутствии смещения электродов или при обычной прошивке. Это означает, что определяющими в данном случае являются различные гидродинамические режимы течения рабочей жидкости по высоте межэлектродного зазора, которые обуславливают различное качество источников тепла на электродах, а значит, и различные количественные и качественные характеристики процесса эрозии. В этом случае объясняется факт инверсии электрической эрозии в условиях РОД.

Качество источников тепла на электродах в значительной мере определяется теплофизическими константами материала электродов. В частности, известно, что, в отличие от стальных, тугоплавкие катоды, например из твердого сплава, разрушаются менее интенсивно, чем аноды. Вот почему твердые сплавы в условиях РОД обрабатываются только на прямой полярности.

**Феноменологическое описание процесса электрической эрозии.** По визуальным оценкам, обработанная РОД поверхность представляет собой совокупность большого числа лунок, что говорит о дискретном характере процесса разрушения металла и о том, что интегральный эрозионный эффект создается совокупностью следующих друг за другом элементарных эрозионных актов. Лунки чаще всего располагаются в определенной последовательности и образуют следы от разряда обычно в направлении протекания жидкости, что свидетельствует об имеющихся место закономерностях перемещения разряда по поверхности электродов. Так как следы часто прерываются в одном месте и появляются в другом, можно говорить о действии механизма избирательного характера процесса эрозии.

В этой связи требуют объяснения, во-первых, факт дискретного разрушения металла при наличии постоянно действующих источников тепла на электродах (поскольку реализуется непрерывно протекающий стационарный электрический разряд), во-вторых, причины и имеющие место закономерности в перемещении разряда по поверхности электродов, в-третьих, механизм избирательного характера процесса эрозии. Рассмотрим протекание элементарного эрозионного акта.

При протекании разряда в связи с плавлением и испарением материала электродов в зоне действия катодного и анодного источников тепла межэлектродный зазор, а значит, и длина дуги возрастают, а в столб дуги с электродов поступает большое количество частиц малых энергий, что приводит к повышению напряжения на дуге. Последняя, как известно, представляет собой саморегулируемую систему. В соответствии с принципом минимума Штеенбека, в результате процессов саморегулирования из всех реализуемых режимов горения дуги устойчивым является такой, при котором напряжение на дуге минимально.

Это означает, что если при протекании разряда в какой-то точке А между электродами напряжение на дуге увеличивается, то и увеличивается вероятность того, что где-то в другой точке В между электродами напряжение для протекания разряда может оказаться меньшим. Тогда процесс в точке А прекращается, а в точке В начинается, хотя последняя может оказаться на значительном удалении от точки А. Соответственно в этом случае элементарный эрозионный акт в точке А завершается, а в точке В начинается. Чаще разряд перемещается на близлежащий участок по направлению протекания жидкости (то есть по линии наименьшего сопротивления). Перемещению дуги на новый участок предшествует существование двух дуг: прежней (первой) и новой (второй), которая шунтирует первую. Как следствие, напряжение на дуге уменьшается.

Описываемый процесс, таким образом, характеризуется непрерывными подводом энергии в зону обработки протеканием разряда и существованием источников тепла на электродах. Следовательно, тепловое воздействие разряда на электроды и процесс эрозии происходят непрерывно. Но это не означает непрерывного, одинаковой интенсивности разрушения металла, поскольку, в соответствии с изложенным, физическая природа существования непрерывно протекающей (стационарной) электрической дуги предполагает дискретный характер ее перемещений по поверхности электродов (дуга после некоторого выстаивания на месте перемещается на другой участок), а следовательно, и прерывистый, дискретный характер процесса эрозии, что является безусловным свойством дуги.

Следует различать два этапа эвакуации продуктов эрозии: из лунки и межэлектродного зазора. Удаление металла из лунки происходит главным образом во время протекания разряда. Металл из лунки в зависимости от реализуемых режимов обработки может удаляться как в жидком, так и в газообразном состоянии, причем с увеличением динамического давления потока рабочей жидкости, что соответствует реализации более высоких энергетических характеристик разряда, все большая масса металла удаляется в сильно диспергированном состоянии (за счет испарения). Из межэлектродной полости продукты эрозии легко удаляются мощным потоком рабочей жидкости.

**Способ РОД как качественно новый этап в развитии металлообработки.** Способ РОД является разновидностью ЭЭО, следующим этапом ее развития. В отличие от известных способов ЭЭО, основанных на использовании нестационарных электрических разрядов (искры, импульса), РОД реализует стационарную электрическую дугу. По энергетическим характеристикам (плотности силы тока, напряженности электрического поля, суммарному значению катодного и анодного падений напряжения), а также тепловому эффекту воздействия на металл, например по величине зоны термического влияния, электрическая дуга в условиях РОД соответствует нестационарному электрическому разряду в условиях ЭЭО. Поэтому можно утверждать, что физическая природа стационарной электрической дуги в условиях РОД и нестационарного электрического разряда (искры, импульса) в условиях известных способов ЭЭО одинакова – это то, что принято называть электрическим дуговым разрядом [3]. В этой связи можно сказать, что искра – это кратковременная дуга в условиях РОД, а стационарная дуга в условиях РОД – это длительная искра, энергетические характеристики которой не опускаются ниже определенного уровня, достаточного для локального разрушения материала. Это означает, что стационарная электрическая дуга в условиях РОД и нестационарный электрический разряд в условиях ЭЭО как источники тепла для размерной обработки металлов в известной мере равноценны. Однако различны технологические возможности источников тепла.

Действительно, при протекании дуги в поперечном потоке жидкости ее энергетические характеристики, например плотность силы тока, являются достаточно стабильными и могут колебаться в достаточно узких пределах, не опускаясь ниже соответствующего уровня, обусловленного динамическим давлением потока, в то время как энергетические характеристики нестационарного электрического разряда являются, как известно, временной функцией, ограничены силой тока и изменяются в очень широких пределах, а в конечной стадии протекания разряда и вовсе недостаточны для локального разрушения металла. Таким образом, электрическая дуга в условиях РОД по сравнению с нестационарным электрическим разрядом в условиях известных способов ЭЭО обладает весьма важным преимуществом: она позволяет получить независимо от силы тока стабильные энергетические характеристики разряда, которые регулируются в самых широких пределах. Это обеспечивает количественную и качественную стороны процесса обработки в самом широком диапазоне режимов и, в частности, дает возможность реализовать высокопроизводительную обработку (десятки тысяч мм<sup>3</sup>/мин) на больших токах (сотни и тысячи ампер) при высоком качестве обработки и глубине зоны термического влияния в пределах сотых долей миллиметра и даже практически при полном ее отсутствии. Примерно вдвое уменьшается энергоемкость процесса. Это означает, что дуга приобрела еще одну “специальность” – она стала точно обрабатывать металл. То есть металлообработка получила еще один, качественно новый “инструмент” обработки с чрезвычайно широкими технологическими возможностями.

При этом способ РОД обеспечивает по сравнению с известными способами ЭЭО такие преимущества:

1. Значительно более высокую производительность (в 5–10 раз и больше), что приближается к производительности обработки металлов резанием.
2. Меньшие удельные затраты электроэнергии (приблизительно вдвое), что заметно повышает экономическую эффективность процесса.
3. Более дешевые (в 3–5 раз) источники питания технологическим током (обычные источники питания сварочной дуги) широко распространены и общедоступны, имеются в достаточном количестве.
4. Сравнительно простые и дешевые электроэрозионные станки РОД и системный ряд компактных, простых и дешевых электроэрозионных головок (ЭЭГ) реализуют концепцию локального подведения рабочей жидкости в зону обработки (отсутствует рабочая ванна с жидкостью, что характерно для обычных электроэрозионных станков). Это позволяет эффективно осуществить обработку как профилированным, так и непрофилированным электродом, как на универсальных и специальных станках РОД, так и на любых металлорежущих станках без потери последними своих основных функций, как в наиболее современном инструментальном цехе, так и в любой ремонтной мастерской. Поэтому станки РОД становятся станками массового спроса.

Отметим, однако, что способ РОД, вытесняя в известной степени традиционные способы ЭЭО, не заменяет их полностью, оставляя за каждым из них свою область рационального применения. Более того, в совокупности традиционные процессы ЭЭО, включая электроконтактную обработку (ЭКО), РОД, а также примыкающую к ним плазменную обработку металлов, образуют так называемую электроразрядную обработку (ЭРО), основанную на использовании преобразуемой в тепло энергии электрических дуговых разрядов различных параметров. Эти процессы следует рассматри-

вать в единстве, взаимосвязи и взаимозависимости, поскольку их объединяет не только единая физическая природа “инструмента” обработки (электрического дугового разряда), но в известной степени общие технологические приемы и техника. Кроме того, в своей совокупности, дополняя друг друга, по своим технологическим возможностям они составляют высокоэффективную альтернативу основным процессам металлообработки, каковыми являются обработка металлов резанием и давлением.

Уместно поставить вопрос об основных тенденциях и направлениях развития металлообработки в целом, перспективах и областях рационального применения каждого из указанных процессов металлообработки. Это важно, поскольку ориентирует производителей на новые технологии и делает последние высокоэффективным бизнесом (ибо первый, кто приходит на рынок, получает наибольшую прибыль), а в итоге оптимизирует развитие металлообработки в целом.

В этой связи обратимся к преимуществам процессов ЭРО в сравнении с обработкой резанием и давлением:

1. Исходный энергоноситель (электроэнергия) не превращается в силовую энергию (не нужен двигатель и соответствующие звенья кинематической цепи станка), а реализуется в зоне обработки непосредственно, выполняя соответствующую операцию в нужном месте, в нужное время и с необходимыми качеством, производительностью и точностью обработки; при этом производительность и качество обработки, например при РОД, могут быть изменены простым регулированием силы тока и динамического давления потока рабочей жидкости. В результате станок становится более простым и дешевым, а процесс более мобильным.

2. Обработка осуществляется без заметных механических усилий на инструмент (силовое резание отсутствует) и силового действия на заготовку. Соответственно исключается необходимость передачи значительных механических усилий через систему СПИД, что позволяет заметно упростить и удешевить станок в целом.

3. Отсутствует необходимость в применении специальных более твердых инструментов, чем обрабатываемый металл. Инструмент (электрод) заметно проще и дешевле инструментов, применяемых при традиционных методах металлообработки (резец, сверло, протяжка, штамп).

4. Производительность обработки не зависит от твердости и вязкости обрабатываемого металла, что очень важно в условиях всевозрастающего применения труднообрабатываемых материалов.

5. Широкие возможности реализации разнообразных технологических схем формообразования как непрофилированным, так и профилированным электродом, в частности копирования формы электрода на поверхность заготовки при простом поступательном движении электрода, что позволяет получить аналогично процессу штамповки разнообразные отверстия, полости, стержни и прочие изделия сложной формы. При этом для реализации таких операций нужны сравнительно простые и дешевые станки и относительно дешевые электроды, тогда как при традиционных методах металлообработки для достижения того же результата требуются металлоемкие, достаточно дорогие, часто уникальные станки и прессы, а также сравнительно дорогие инструменты.

6. Возможность выполнять ряд технологических операций, которые не могут быть выполнены другими методами обработки, например разнообразные глубокие отверстия в труднообрабатываемых материалах.

Преимущества технологий, простота реализации, достигнутый уровень разработок делают процессы ЭРО в своей совокупности высокоэффективной альтернативой традиционным процессам обработки резанием и давлением как в инструментальном и иных элитных производствах, так и в основном производстве для изготовления серийных деталей.

Это означает, что металлообработка получила качественно новый, высокоэффективный, универсальный, с чрезвычайно широкими технологическими возможностями «инструмент» обработки, представляющий источник тепла в виде электрического дугового разряда самых разнообразных форм его проявления, который позволяет, во-первых, реализовать практически все возможные технологические схемы формообразования, во-вторых, обеспечивает оптимальное сочетание количественных и качественных характеристик процесса обработки и, в-третьих, все это, по сравнению с процессами обработки резанием и давлением, реализуется более простыми средствами (техникой и инструментом). То есть, что в металлообработке на смену «эры силы» приходит «эра тепла». Прогресс металлообработки переходит “с острия резца” на “кромку ЭИ”, и, таким образом, ЭРО – это следующий этап развития металлообработки.

Следует, однако, признать, что все это может показаться декларацией, тезисы которой выглядят недостаточно убедительно. Поэтому примем во внимание следующее. Несмотря на то что традиционные процессы ЭЭО и плазменной обработки в своем развитии достигли «технологического по-



толка», все указанные преимущества ЭРО стали возможны лишь после появления РОД. Объясняется это исключительными технологическими возможностями источника тепла, реализуемого в условиях РОД. Для понимания этого обратимся к физической модели процесса РОД, которая описывается простым соотношением

$$y = kI^\alpha P_d^\beta,$$

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 по существу отражает количественную сторону процесса;  $P_d$  – динамическое давление потока, Па, выбирается от 1–2 кПа до 1 МПа и более, определяет качество обработки (шероховатость, глубину зоны термического влияния, точность) и отражает качественную сторону процесса;  $\alpha$  и  $\beta$  – показатели степени для различных технологических характеристик.

Из 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  $P_d$  при использовании простейшего оборудования и наличии простого и дешевого инструмента. Именно благодаря этим особенностям процесса РОД оказалось возможным реализовать все вышеперечисленные преимущества ЭРО в целом. Процесс РОД, таким образом, явился скачком, качественно новым этапом в развитии металлообработки в целом.

Примером высокоэффективного применения процессов ЭРО является изготовление листовых деталей самых различных форм и сложности в условиях единичного, мелко- и среднесерийного производства, например лапы культиватора, когда внешний контур деталей получают плазменной резкой, а отверстия в ней – способом РОД.

#### **Заключение**

Сущность способа РОД состоит в том, что обработку осуществляют стационарной электрической дугой в поперечном потоке жидкости при динамическом давлении потока не менее 1–2 кПа.

Способ РОД – это высокоэффективный альтернативный процесс металлообработки, обеспечивающий высокую экономическую эффективность, широкие технологические возможности и имеющий определенную область рационального применения и потому получающий заметное практическое применение, а станки РОД становятся станками массового спроса.

Осуществление и качественная сторона процесса РОД определяются энергетическими характеристиками катодного и анодного источников тепла на электродах, в частности поверхностной плотностью тепловой мощности, которая возрастает (уменьшается) с увеличением (уменьшением) динамического давления потока, что позволяет легко управлять качеством процесса эрозии, начиная от грубого размерного плавления вплоть до самого тонкого размерного испарения металла.

Физический процесс электрической эрозии в условиях РОД характеризуется стабильным подводом энергии в зону обработки, непрерывным горением дуги и постоянным существованием источников тепла на электродах. Следовательно, при постоянном тепловом воздействии разряда на электроды процесс эрозии протекает непрерывно. При этом физическая природа существования стационарной электрической дуги предполагает дискретный характер ее перемещения по поверхности электродов, а следовательно, и дискретный характер процесса эрозии, что является безусловным свойством дуги.

Стационарная электрическая дуга в поперечном потоке жидкости и нестационарный электрический разряд (искра, импульс) в условиях традиционных способов ЭЭО по энергетической структуре и энергетическим характеристикам, а также по тепловому эффекту воздействия на металл, например по величине зоны термического влияния, в известной мере равноценны. Однако различны технологические возможности этих источников тепла. Как следствие, способ РОД, в отличие от традиционных способов ЭЭО, обеспечивает высокопроизводительную обработку (десятки тысяч мм<sup>3</sup>/мин) на больших токах (сотни и тысячи ампер) при высоком качестве обработки и глубине зоны термического влияния в пределах сотых долей миллиметра и даже практически при полном ее отсутствии. Примерно вдвое уменьшается энергоемкость процесса.

Процессы металлообработки, основанные на использовании электрических дуговых разрядов различных форм проявления и включающие в себя традиционные способы ЭО, РОД и плазменную обработку, образуют в своей совокупности ЭРО, обладающую широкими технологическими возможностями. Преимущества этих технологий, простота осуществления, достигнутый уровень разработок делают процессы ЭРО высокоэффективной альтернативой традиционным процессам обработки резанием и давлением. Объективно ЭРО – это следующий этап развития металлообработки, когда на смену «эры силы» приходит «эра тепла». При этом именно процесс РОД явился скачком, качественно новым этапом в развитии металлообработки в целом, поскольку изложенные преимущества процессов ЭРО возможно реализовать в полной мере лишь после появления РОД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Носуленко В.И. Электрическая дуга в поперечном потоке среды-диэлектрика как источник тепла для новых технологий // Электронная обработка материалов. 2005. № 2.
2. А. с. 368965 СССР. М. Кл. В 23 Р 1/02. Способ электрофизической обработки металлов / В. И. Носуленко № 1223593/25-8; Заявлено 04.03.68.
3. Носуленко В.И. Розмірна обробка металів електричною дугою: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07 / Кіровоградський держ. техн. ун-т. Киев, 1999.

*Поступила 10.05.04*

#### Summary

The new high-performance way electrophysical sizing machining of metals distinguished of themes is circumscribed, that handling realize by a stationary electrical arc in a transversal stream of a fluid of the appropriate hydrodynamic performances. Is shown, that this process was by a qualitatively new stage in a development of metal working as a whole.

---

Н.И. Цынцару<sup>\*</sup>, И.В. Яковец<sup>\*\*</sup>, О.Ю. Келоглу<sup>\*</sup>, В.Г. Звонкий<sup>\*\*</sup>,  
С.П. Ющенко<sup>\*,\*\*</sup>, А.И. Дикусар<sup>\*,\*\*</sup>

### РАССЕИВАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СТАНДАРТНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА ХРОМИРОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОСТОЯННЫМ И ИМПУЛЬСНЫМ ТОКАМИ

*<sup>\*</sup>Институт прикладной физики АН РМ,  
ул. Академией, 5, Кишинев, MD-2028, Молдова*  
*<sup>\*\*</sup>Приднестровский госуниверситет им. Т.Г. Шевченко,  
ул. 25 октября, 128, Тирасполь, Молдова*

Важным технологическим показателем различных видов электрохимической обработки является распределение локальных скоростей, которое в свою очередь определяется распределением тока (локальных плотностей тока) по обрабатываемой поверхности.

Применительно к процессам электроосаждения, в частности электроосаждения хрома, таким показателем является так называемая рассеивающая способность (РС) электролита, под которой обычно понимается способность электролита (вернее, границы раздела в широком смысле, включая в это понятие и диффузионные слои) изменять первичное распределение тока, обусловленное только геометрическими параметрами. Другими словами, РС характеризует равномерность распределения тока и толщины осадка (скорости электроосаждения) по обрабатываемой поверхности.

Специфической особенностью процесса хромирования при постоянной плотности тока является возрастающая зависимость выхода по току от плотности тока, что приводит к низкой рассеивающей (высокой локализирующей) способности электролита.