

Б.П. Саушкин

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ЖИДКИХ И ГАЗОВЫХ СРЕДАХ – ОСНОВА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Российский государственный технологический университет (МАТИ-РГТУ),  
Берниковская наб., 14, г. Москва, 109240, Россия*

Несмотря на то, что электроразрядные явления известны достаточно давно, их использование для технологических целей машиностроительного производства получило широкое распространение лишь во второй половине прошлого века в связи с открытием Б.Р. и Н.И. Лазаренко метода электроэрозионной обработки (ЭЭО) [1]. Это открытие оказало каталитическое воздействие на умы инженеров и исследователей и стимулировало появление множества теоретических и прикладных работ, направленных на всестороннее изучение и практическое применение различных видов электрических разрядов в технологиях машино- и приборостроения [2 – 6]. К настоящему времени разработаны многочисленные методы и способы целенаправленного воздействия на материал электрическими разрядами, которые можно классифицировать следующим образом:

- по технологическому (функциональному) назначению выделяют методы размерного формообразования и методы модификации свойств поверхностного слоя изделий;
- по агрегатному состоянию рабочей среды, в которой реализуется разряд, выделяют методы обработки, осуществляемые в жидкой, газообразной или аэрозольной средах. В зависимости от электрической проводимости жидкой среды различают методы, основанные на электрическом разряде в диэлектрике и проводящей среде (электролите);
- по виду применяемых электродов, между которыми реализуется разряд, можно указать две группы методов – с электродными системами “металл-металл” и “металл-электролит” соответственно;
- по величине плотности потока мощности (энергии), вводимой в рабочую зону. Например, электроэрозионную размерную обработку по этому признаку часто подразделяют на черновую, чистовую и доводочную;
- по характеру электрического разряда между электродами (искровой, тлеющий, искродуговой, дуговой);
- по характеру изменения объема заготовки в процессе формообразования различают методы аддитивные (нанесение материала), субтрактивные (удаление припуска) и совмещенные;
- по числу элементарных воздействий на поверхность изделия рассматривают собственно электроразрядные и комбинированные методы обработки.

Данная классификация иллюстрируется схемой (рис. 1).

Обсудим современное состояние и некоторые тенденции развития основных методов и способов обработки, представленных в данной схеме и получивших наибольшее промышленное распространение. Прежде всего, рассмотрим те, в основе которых лежит электрический разряд между металлическими электродами, помещенными в диэлектрическую среду. При определенных условиях такой разряд приводит к заметной эрозии металлических электродов, эффективное управление которой позволяет осуществить размерное формообразование.

### **Электроэрозионная обработка изделий**

При наложении достаточно высокого напряжения от внешнего источника питания происходит электрический пробой межэлектродного промежутка (МЭП) с образованием канала разряда,

окруженного газовым пузырем [7]. При преобразовании электрической энергии в тепловую в зоне разряда формируется нестационарное поле температур, которое при определенных условиях приводит к образованию на поверхности электродов локальных областей расплавленного материала. Ниже расплава в теле электрода располагается область термического воздействия, которая характеризуется протеканием структурно-фазовых превращений и термомеханических явлений. Часть поверхностного материала испаряется с поверхности расплава или сублимируется. При удалении расплава из микрованны на поверхности электрода появляется эрозионная лунка, размеры которой зависят в первую очередь от энергии разряда. В результате разряда и сопутствующих явлений рабочая среда обогащается газопаровыми пузырьками, твердыми частицами удаленного из лунки материала электрода и продуктами термического разложения рабочей среды [8].

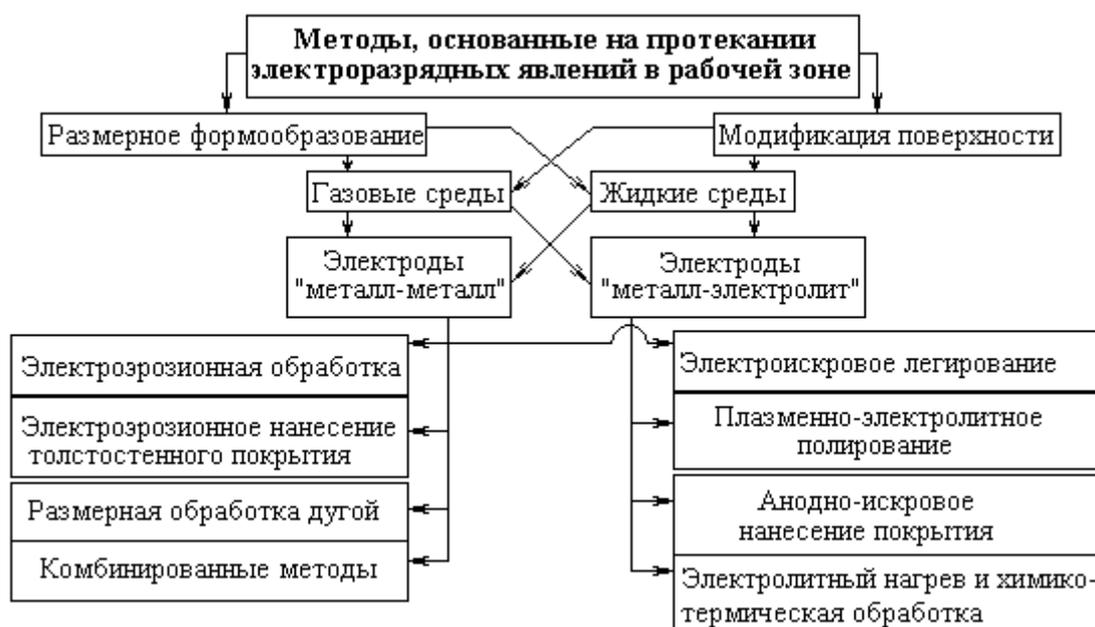


Рис.1. Классификация методов обработки, основанных на электроразрядных явлениях

Сказанное означает, что необходимым условием эрозии электродов является электрический пробой межэлектродного промежутка, который осуществляется при достижении некоторого значения напряжения на электродах, называемого напряжением пробоя  $U_{пр}$ , величина которого сильно зависит от размера МЭП и свойств рабочей среды. Пробой характеризуется образованием канала сплошной проводимости (канала разряда), резким падением напряжения и возрастанием тока. Послепробойные явления обычно подразделяют на две стадии. Искровая стадия разряда длительностью  $t_{и.р.}$  порядка  $10^{-7}$  с характеризуется звуковым, световым и тепловым эффектами. По завершении этой стадии канал разряда расширяется, плотность потока мощности снижается, напряжение и ток стабилизируются – начинается стадия дугового разряда, время протекания которой  $t_{д.р.}$  определяется длительностью импульса напряжения, накладываемого на электроды.

При высокой частоте наложения импульсов напряжения единичные лунки многократно воспроизводятся на участке поверхности рассматриваемого электрода, расположенном наиболее близко к противозлектроду. Суперпозиция таких лунок приводит к удалению некоторого припуска с поверхности электрода, а локализация снимаемого припуска в области малых значений МЭП обуславливает размерный характер формообразования при поступательном сближении электродов [9].

Из сказанного следует, что электроэрозионная обработка материалов характеризуется совместным или последовательным осуществлением ряда физико-химических процессов, экспериментальное изучение которых представляет значительные трудности из-за их быстротечности, локализации в ограниченном и весьма малом объеме пространства, сложности точного измерения отдельных параметров. К числу основных процессов при осуществлении ЭЭО относятся [10]: энергетические процессы в канале разряда и на поверхности электродов, отражающие энергетический баланс; тепловые процессы на электродах; гидродинамические процессы в МЭП; термомеханические процессы на электродах.

Предложены различные методы описания таких процессов, базирующиеся на гипотезах и до-

пущениях, правомерность которых трудно однозначно обосновать экспериментальным путем. Несмотря на значительные успехи в этой области, отраженные, например, в монографиях [3, 11, 12], многие теоретические вопросы не имеют в настоящее время однозначного толкования, и теоретическое описание метода ЭЭО нельзя считать завершенным. Вместе с тем отдельные стороны процесса электрической эрозии электродов при ЭЭО подробно исследованы в ряде теоретических [10, 13 – 15] и прикладных [16 – 20] работ.

Все вышесказанное предопределяет необходимость использования в ряде случаев эмпирических и полуэмпирических зависимостей при разработке технологий ЭЭО и выдвигает на первый план задачу обобщения опыта промышленного освоения таких технологий [21 – 26]. Широкое распространение получили инженерные методики расчета параметров режима и оценки технологических результатов [9, 27, 28].

Современное состояние и технический уровень ЭЭО позволяют в настоящее время ставить и эффективно решать широкий круг технологических задач. Это стало возможным в результате формирования, быстрого развития и расширения рынка соответствующего технологического оборудования [29]. Вместе с тем считается общепризнанным наличие нереализованных технологических резервов ЭЭО [30 – 32]. Анализ данных показывает, что к числу важнейших проблем дальнейшего развития ЭЭО относятся следующие:

– *разработка технологических основ ЭЭО*, переход от эмпирических и полуэмпирических знаний к теоретическому описанию процесса [22, 33]. Так, в [21] справедливо замечено, что многие годы исследования в области ЭЭО ограничивались достаточно узким диапазоном режимных параметров, определяющих достижение максимальной производительности процесса. Такой подход, безусловно, затруднил теоретическое обобщение имеющихся экспериментальных результатов хотя бы потому, что в ряде практически важных задач производительность не является главным показателем эффективности технологии. Вместе с тем разработка методов и средств повышения производительности ЭЭО остается одним из основных условий сохранения и повышения конкурентоспособности электроэрозионной обработки [34, 35];

– *разработка методов и средств повышения точности и качества обработанной поверхности* как важнейшее условие применения ЭЭО в микромашиностроении [36 – 38]. К настоящему времени средствами ЭЭО удается надежно обрабатывать объекты с размерами порядка 10 мкм. Есть основания предполагать, что в обозримом будущем применение ЭЭО в этой области будет расширяться [39, 40];

– *повышение уровня автоматизации* как при технологической подготовке, так и при производстве изделий [41]. Применение современных адаптивных систем управления станками, повышение уровня надежности таких систем, создание высокоэффективной системы сервиса – все это обеспечивает переход к безлюдным и безбумажным технологиям в практике применения ЭЭО;

– *повышение технического уровня средств технологического оснащения*. Совершенствование конструкций станков для ЭЭО идет по пути их дальнейшей унификации, модульного принципа построения основных элементов, повышения геометрической и кинематической точности за счет применения новых конструкционных материалов, достижений в области мехатроники и линейных электрических машин [42, 43]. Кроме того, быстрое развитие элементной базы для сильноточной электроники раскрывает новые перспективы создания источников питания для эрозионных станков [44]. Есть основания предполагать, что значительные технологические резервы могут быть реализованы при разработке новых рабочих сред для ЭЭО [6, 45];

– *создание интегрированных технологических систем* на основе процессов электроэрозионной обработки. Такие системы могут создаваться путем модернизации металлообрабатывающих станков фрезерной, сверлильной и токарной групп за счет оснащения их рабочими органами и источниками питания для проведения ЭЭО. Создание гибких технологических модулей для осуществления операций физико-химической обработки и обработки резанием позволит, на наш взгляд, существенно повысить эффективность обработки многих деталей авиационно-космической техники [47];

– *разработка научных основ и соответствующих технологий защиты окружающей среды и безопасности жизнедеятельности* при выполнении электроэрозионных работ. В последние годы этому вопросу уделяется все больше внимания. Детально проанализирован состав, концентрация и токсикологическое действие продуктов разложения рабочих сред при осуществлении мощных электрических разрядов [48], установлено образование высокотоксичных веществ при электроэрозионной резке некоторых материалов [49], предложены эффективные способы очистки рабочей среды от токсичных загрязнений [50];

– расширение номенклатуры материалов, эффективно обрабатываемых данным методом [51]. Особый интерес представляют, на наш взгляд, работы, направленные на создание технологий электроэрозионной обработки перспективных керамических материалов [52];

– создание новых и совершенствование существующих комбинированных методов обработки на основе или с привлечением метода ЭЭО. Получили промышленное применение технологии электроконтактной, электроэрозионно-электрохимической, электроэрозионно-механической, электроэрозионно-ультразвуковой обработки материалов [6].

Таким образом, к настоящему времени электроэрозионная размерная обработка получила значительное теоретическое и прикладное развитие. Создано и совершенствуется современное технологическое оборудование, широко используются высокоэффективные технологические процессы как в основном [18, 53, 54], так и в инструментальном [55, 56] производстве.

#### **Электроэрозионное наращивание и нанесение толстостенных покрытий**

Применение электроэрозионных явлений для разработки аддитивных технологических процессов изучено недостаточно. В [26] показана возможность получения заданной формы путем осаждения материала на электроде при электроэрозионной обработке в жидкой среде. В [57 – 59] изучены процессы переноса материала при реализации разряда в воздушной среде и разработаны технологии электроэрозионного нанесения толстослойных покрытий (ЭЭНП) для восстановления деталей машин [60]. Установлена возможность наращивания слоев толщиной до 2 мм на сторону на стальные изделия, получения буртиков высотой до 10 – 15 мм с использованием пластинчатых, стальных электродов и восстановления материала в труднодоступных местах (щели, пазы, уступы) с помощью электрода-щетki [61]. На основе проведенных исследований разработаны и апробированы технологии восстановления шеек коленчатых валов, шкворней, посадочных шеек крыльчаток и других деталей. Данные позволяют судить о том, что рассматриваемый процесс ЭЭНП обладает значительными резервами развития и широким спектром технологических возможностей. В последние годы вопросам технологии электроэрозионного нанесения толстослойных покрытий уделяется все большее внимание [62]. Разработана технологическая модель процесса нанесения толстослойных покрытий, которая может служить основой для дальнейшего углубления знаний об этом многообещающем способе восстановления и ремонта деталей машин.

#### **Размерная обработка электрической дугой**

Несомненный интерес представляют работы, связанные с исследованием и внедрением такого вида ЭЭО, как размерная обработка электрической дугой (РОД) [34, 63 – 66]. Теоретическое описание РОД базируется на анализе тех же основных процессов в МЭП, которые отмечались выше для эрозионной обработки электрическими импульсами. Основным процессом, определяющим съем материала при РОД, остается тепловыделение на электродах. Физические и технологические особенности обработки электрической дугой рассмотрены в [63, 66].

Обработка осуществляется электрической дугой, которая горит в поперечном потоке рабочей жидкости при динамическом давлении потока не менее 1 – 2 МПа. Такой поток не только интенсифицирует эвакуацию продуктов эрозии из МЭП, но и оказывает влияние на энергетическое состояние горячей дуги. В результате гидродинамические параметры потока являются эффективными средствами управления съемом материала в рассматриваемом случае. Высокая производительность достигается за счет введения большей мощности в МЭП, непрерывности процесса, возможности интенсивной эвакуации продуктов эрозии и охлаждения электродов. Все эти факторы позволили в несколько раз увеличить силу рабочего тока и достигнуть объемной производительности до 25 см<sup>3</sup>/мин, точности формообразования 0,05–0,1 мм, шероховатости поверхности  $R_a = 2,5 – 10$  мкм и величины дефектного слоя не выше 0,02 – 0,05 мм. Для реализации этого вида обработки разработана гамма электроэрозионных станков серии “Дуга” (модификации 8, 11, 13, 18, 36). Показана технико-экономическая эффективность применения РОД по отношению к традиционной ЭЭО при изготовлении фасонных полостей ковочных штампов (скорость подачи повышается примерно в 8 раз), прошивке разнообразных отверстий в диапазоне поперечных размеров 10 – 150 мм, обработке наружных поверхностей и выполнении других операций.

Технологические процессы обработки короткой дугой разработаны и внедрены в производстве двигателей для изготовления крупногабаритных дисков, секторов лопаток сопловых аппаратов и корпусных деталей [65].

#### **Электроэрозионно-электрохимическая обработка**

Возможность осуществления в токопроводящей, жидкой среде, как электрохимического, так и электроэрозионного механизма разрушения материала породила идею пространственно-временного совмещения этих процессов в рамках единого комбинированного метода обработки. В связи с этим

уместно отметить, что Б.Р. Лазаренко неоднократно высказывал мысль о существовании фундаментальной общей теории, описывающей явления электролиза и электрического разряда в электролитах с единых позиций, на основе обобщенных физико-химических представлений [2, 67]. Физическая картина прохождения электрического тока через растворы электролитов предполагает, что при достаточно интенсивном вводе энергии вблизи поверхности металлического электрода образуется многофазная система “металл–плазма–газ–электролит”, энергоносителями в которой являются не только ионы, но и электроны, а разрушение металлического электрода происходит в результате как анодного растворения, так и электрических разрядов и сопутствующих им явлений.

Систематические исследования комбинированного метода электроэрозионно-электрохимической обработки (ЭЭХО), проведенные как в нашей стране, так и за рубежом [68 – 72], позволили разработать основы теории и технологии нового метода обработки, выявить область его эффективно-го промышленного использования, спроектировать и внедрить конкретные высокоэффективные технологические процессы.

Несмотря на достаточно развитый аппарат физического и математического описания процесса, позволяющий обоснованно прогнозировать явления, протекающие в межэлектродном промежутке при ЭЭХО, до настоящего времени остаются неясными некоторые вопросы, характеризующие механизм разрушения материала. Так, нет однозначного мнения о природе развития разряда в газоэлектродном промежутке после пробоя тонкого газопарового слоя. Мало исследован вопрос об особенностях выброса металла в капельно-жидкой и паровой фазе и формировании лунки. Не обобщены и малочисленны сведения о взаимном влиянии электрохимических и электроразрядных процессов в специфических условиях ЭЭХО, которые приводят к синергизму съема материала. В этой связи необходимо отметить, что электрохимические процессы могут влиять на условия протекания разряда и последующее разрушение материала следующим образом: электродное газовыделение, формируя газожидкостные слои, облегчает вскипание электролитных мостиков и образование паровой фазы; пропускание через МЭП тока электролиза приводит к появлению поверхностных и объемного источников тепла, инициирующих процессы пузырькового и пленочного кипения жидкой фазы; поверхностные новообразования вносят свой вклад в баланс напряжения на МЭП, затрудняя, как это показано при обработке титанового сплава, искровой разряд; практически не изучено возможное влияние электрохимических процессов, протекающих на границе раздела фаз “газопаровая полость – электролит”, на формирование канала разряда, неясен механизм переноса заряда через эту границу;

Влияние электрических разрядов на протекание электродных процессов и процессов переноса проявляется преимущественно в следующем: гидродинамический эффект, сопутствующий разряду в жидкостях, способствует депассивации анодной поверхности в случае диффузионного контроля скорости анодного растворения, облегчает отвод продуктов реакций в объем раствора и эвакуацию их из рабочей зоны; тепловой эффект разряда способствует депассивации в случае диффузионного контроля скорости растворения, вызывает повышение локальной электропроводности раствора, влияет на скорость гомогенных и гетерогенных химических реакций; сказанное выше может приводить не только к возрастанию тока электролиза, но и к перераспределению скоростей электродных реакций с соответствующим изменением выхода по току основной реакции и степени окисления ионов металла, переходящих в раствор.

К настоящему времени накоплен значительный опыт по созданию и эксплуатации средств технологического оснащения для ЭЭХО [71]. Так, на предприятиях авиадвигателестроения используются модернизированные электрохимические копировально-прошивочные станки моделей ЭКУ-150, ЭКУ-400, ЭГС-2. Специальные станки для ЭЭХО создавались для обработки элементов камеры сгорания, прошивки смазочных отверстий в кольцах подшипников, резки каркасов фильтроэлементов, перфорации тонкостенных обечаек и других деталей.

В качестве источников питания применялись серийные генераторы импульсов МГИ-3, ТГ-250-015, ШГИ-125-100. Нашли применение источники питания, содержащие низковольтный выпрямитель и генератор импульсов, подключенные параллельно к МЭП. Получили распространение специальные генераторы импульсов для ЭЭХО. В последнее время значительный интерес к разработке широкодиапазонных источников питания для ЭЭХО проявляется за рубежом. Так, в [73, 74] отмечается, что применение специального ИП позволяет повысить гибкость технологической системы, надежность ее функционирования, снизить затраты на оборудование, достигнуть более высокие технологические показатели обработки.

Наиболее эффективное промышленное применение метод ЭЭХО нашел в операциях прошивки отверстий диаметром 0,5 – 5 мм с отношением длины к диаметру менее 10. Установлено, что в этом случае удается в 5 – 10 раз повысить производительность обработки по отношению к ЭХО и

ЭЭО, достигнуть скорости подачи до 300 мм/мин, получить поверхности без дефектного слоя с шероховатостью  $R_a = 0,63 - 1,25$  мкм. Кроме основной кинематической схемы с поступательным движением электрода-инструмента используются схемы, в которых он совершает дополнительные движения: вращается вокруг собственной оси или вибрирует в осевом направлении. При необходимости одновременной прошивки группы отверстий применяют многоэлектродную, многоконтурную обработку и их комбинации.

Отметим, что, несмотря на очевидную многофункциональность рабочих сред для ЭЭХО, теоретический подход к их синтезу или выбору к настоящему времени отсутствует. На практике используются, как правило, простейшие однокомпонентные водные растворы минеральных солей различной концентрации.

Обработка вращающимся инструментом успешно применяется для изготовления поверхностей вращения, элементов сложного профиля, плоскостей, прорезки пазов и разрезания. Три основные особенности отличают этот вид обработки от прошивки отверстий, рассмотренной выше. Во-первых, обработка может осуществляться с применением как импульсного генератора, так и источника постоянного напряжения из-за коммутационного эффекта, обусловленного вращением инструмента. Во-вторых, нет необходимости в использовании специальной системы прокачки рабочей жидкости: электролит подается поливом или обработка осуществляется под слоем электролита. В третьих, быстрое относительное перемещение электродов существенно влияет на поведение разрядного канала и, следовательно, на величину и характер эрозионного съема [75 – 77].

Значительный технологический интерес представляет вопрос о комбинированной обработке протяженных поверхностей. Это связано с тем, что, как и при ЭЭО, технологические показатели ЭЭХО должны существенно зависеть от площади обрабатываемой поверхности и геометрических параметров гидравлического тракта. Кроме того, конвективный фактор приводит к изменению как локальных условий электролиза, так и предпробойной ситуации в окрестностях различных точек обрабатываемой поверхности. Экспериментальные данные позволяют заключить следующее [78]: совмещенная обработка протяженных поверхностей в проточных каналах в общем случае приводит к выделению областей ЭХО и ЭЭХО с соответствующим механизмом съема материала в них; протяженность указанных областей сильно зависит от гидродинамических параметров режима обработки, формы и параметров импульса напряжения. При прочих равных условиях за счет гидродинамического параметра управления процессом можно обеспечить обработку практически всей поверхности в режиме ЭХО или ЭЭХО.

Установлено, что ЭЭХО может при определенных условиях успешно использоваться для обработки непроводящих материалов. Так, в [79] представлены данные по обработке различных видов керамики проволочным электродом-инструментом. Механизм разрушения непроводящих материалов при совместном протекании на их поверхности электрохимических и электроразрядных процессов к настоящему времени однозначно не определен. Однако можно предположить, что наблюдаемый эффект связан с разрушением поверхностных слоев материала из-за высоких градиентов температур и давлений в окрестностях разряда. Рост газовой и паровой фазы в порах керамики также создает высокие напряжения, способные, по-видимому, разрушать хрупкий материал.

#### **Электроискровое легирование**

Этот метод модификации свойств поверхностного слоя основан на искровом пробое газового промежутка между металлической поверхностью и электродом-инструментом, который сопровождается переносом материала электрода и включением его в качестве легирующего элемента или самостоятельной фазы в формируемый в условиях фазовых превращений в микрообъеме материала поверхностный слой детали [80]. Перенос материала происходит путем перемещения расплавленных микромасс через канал разряда. Очевидно, количество материала, переносимого за один разрядный импульс, очень мало. Так, для твердого сплава Т15К6 при энергии разряда 1 Дж прирост массы катода составляет  $(2 - 3) \cdot 10^{-6}$  г. Поэтому для формирования слоя требуемой толщины на значительной площади поверхности детали необходимо пропускание большого количества разрядов, сканирование электрода-инструмента и осуществление операции ЭИЛ в несколько проходов. В результате теплового эффекта электрического разряда в поверхностном слое детали протекают структурно-фазовые превращения [81], образуются химические соединения, интерметаллиды, твердые растворы. В связи с тем, что кристаллизация расплава и массоперенос происходят в сильно неравновесных условиях, в поверхностном слое образуются мелкокристаллические структуры и пересыщенные твердые растворы, что приводит к формированию специфических эксплуатационных свойств модифицированных поверхностей.

Использование различных электродных материалов и широкий диапазон изменения параметров режима обработки (энергия, длительность и частота разрядов, форма импульса, кинематические параметры взаимного перемещения электродов, число проходов) обеспечивают возможность изменения свойств поверхности в широких пределах. В результате этим методом получают твердые, износостойкие, жаропрочные, коррозионностойкие, антифрикционные и декоративные покрытия.

К достоинствам метода относят простоту его реализации, низкую стоимость оборудования, прочную связь модифицированного слоя с подложкой, отсутствие необходимости в специальной подготовке поверхности перед обработкой. Наряду с достоинствами ЭИЛ имеет недостатки: относительно низкая производительность (до 20 см<sup>2</sup>/мин), высокая шероховатость поверхности ( $R_z > 20$  мкм), формирование растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое.

Ряд исследований, выполненных в последние годы, позволяет судить о том, что метод ЭИЛ далеко не исчерпал свои технологические возможности. Так, в [82] рассмотрен перспективный путь интенсификации ЭИЛ за счет разработки и использования новых устройств для возбуждения искровых разрядов. В работах [83, 84] приведены расчетные зависимости, на основе которых предложена инженерная методика выбора параметров режима ЭИЛ по условию достижения покрытия заданной толщины. Установлено сильное влияние амплитудно-временных характеристик энерговыделения на протекание эрозионных процессов в условиях малого межэлектродного зазора [85], показано, что при ЭИЛ поверхности изоэнергетическими импульсами динамика переноса материала в значительной степени определяется формой импульса, отмечено отсутствие аддитивности съема в процессе эрозии анода [86].

### **Технологическое применение электроразрядных явлений в системе “металл-электролит”**

При повышении напряжения в электрохимической ячейке, содержащей раствор сильного электролита, у анода возникает ряд эффектов\*, которые удобно рассматривать, располагая их по шкале напряжений. На вольт-амперной характеристике ячейки (рис. 2) участок напряжений ОА соответствует классическому электрохимическому процессу. Заметим, что электролиз в этой области сопровождается некоторым нагревом анодной поверхности. Начиная с точки А вольт-амперная характеристика (ВАХ) становится нелинейной в тем большей степени, чем выше приложенное напряжение. Это обусловлено интенсивным электродным газовыделением, приводящим к формированию приэлектродного газожидкостного слоя, нелинейное сопротивление которого начинает определять характер нагрузки электрической цепи.

По мере повышения напряжения плотность упаковки газовых пузырьков в приэлектродном газожидкостном слое возрастает, и суммарная площадь поперечного сечения электролитных мостиков между ними уменьшается. В результате Джоулева тепловыделения температура электролита в этих мостиках достигает температуры кипения, образуется система “жидкость–газ–пар”. На ВАХ в точке В наблюдается максимум, которому соответствуют значения тока и напряжения, называемые обычно критическими –  $I_{кр}$ ,  $U_{кр}$ . Дальнейшее повышение напряжения сопровождается уменьшением величины тока в цепи из-за формирования сплошного газопарового слоя. Очевидно, на участке ВС сплошность и устойчивость этого слоя возрастают, а его электропроводные свойства снижаются. При достижении напряжения  $U_C$  начинаются пульсации тока, причиной которых, по-видимому, является периодическое образование и разрушение сплошной газопаровой пленки. Действительно, при напряжении  $U_C$  напряженность электрического поля в такой пленке достигает критических значений и происходит ее пробой в результате искрового разряда. Последний реализуется в данном случае между металлическим и электролитным электродами и сопровождается характерным свечением [87]. Однако газопаровая оболочка быстро восстанавливается ( $\approx 10^{-4}$  с) и запирает ток. Заметим, учитывая вероятностную природу разряда, что положение точки С на рассматриваемой кривой достаточно условно.

В точке D в связи с переходом от пузырькового режима кипения к пленочному образуется стационарная парогазовая оболочка, в которой реализуется тлеющий разряд. Температура поверхности электрода резко повышается до значений 400°С и выше и в дальнейшем растет с увеличением напряжения, достигая около 1000°С.

Дальнейшее увеличение напряжения на электродах приводит к установлению такого режима анодного процесса, при котором развиваются электрогидродинамические явления в электролите, а электрические разряды в газопаровой фазе носят иной характер. В этой области ВАХ наблюдается скачкообразное снижение температуры анода до значений 100 – 200°С. Начиная с точки F, электрическое сопротивление МЭП растет, а ток падает.

---

\* Предполагается, что площадь поверхности анода значительно меньше площади катода.

Парогазовая оболочка, формирование которой завершается в точке  $D$ , имеет по сравнению с раствором электролита и металлическими электродами наибольшее сопротивление и является, поэтому основным источником тепла в системе. При этом температура анода  $T_a$  определяется величиной напряжения.

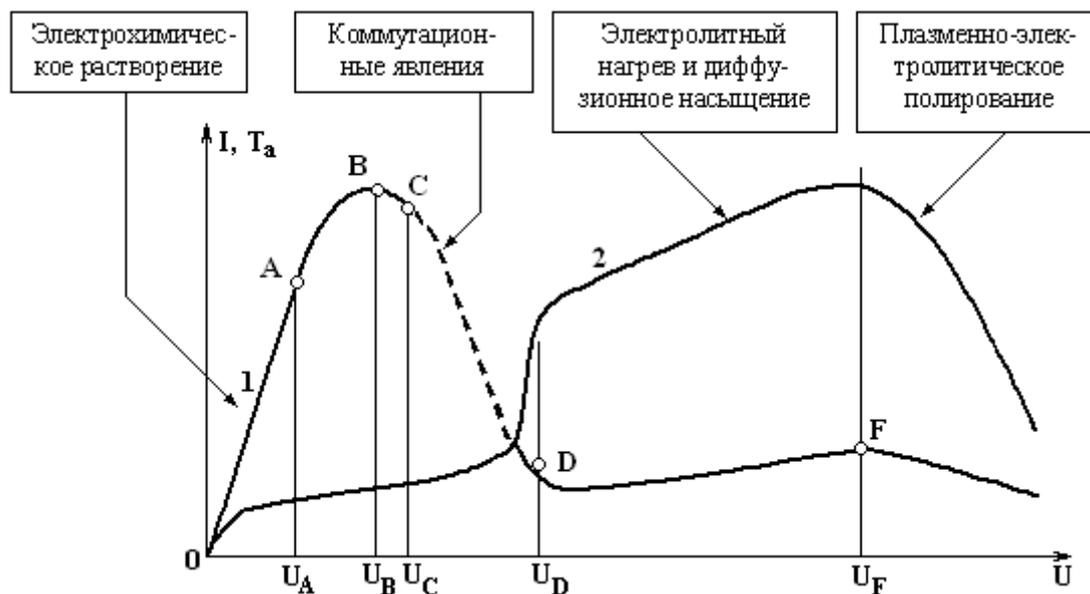


Рис. 2. Зависимости тока (1) и температуры анодной поверхности (2) от напряжения на электродах ячейки

### Электролитный нагрев и химико-термическая обработка

Ввиду того, что основные источники тепла сосредоточены в парогазовой оболочке, она является «нагревательным элементом», окружающим деталь. Малая инерционность этого элемента, связанная с небольшой толщиной оболочки ( $10^{-5}$  м), обеспечивает скорости нагрева до 100 град/с и возможность оперативного изменения температуры за счет регулирования величины приложенного напряжения. Зависимость температуры детали от напряжения в практически важном диапазоне близка к линейной и определяется размерами детали, а также гидродинамикой и электропроводностью раствора. Таким образом, при нагреве детали-анода и последующем ее охлаждении после выключения тока можно осуществлять с учетом достигаемых при этом температур эффективную термическую обработку поверхностного слоя [88]. Более того, при соответствующем выборе ионного состава раствора удастся осуществлять диффузионное насыщение этого слоя теми либо иными элементами [89].

Сравнивая прогрессивные технологии диффузионного насыщения и термической обработки на основе лазерного, электроннолучевого, индукционного или плазменного нагрева, заметим, что наряду со значительными достижениями эти методы имеют определенные ограничения и недостатки. К ним относятся трудности обработки детали сложной формы, необходимость предварительной подготовки поверхности изделий, высокая стоимость технологического оборудования. Ускорение термического и химико-термического нагрева с возможностью локальной обработки деталей, в том числе и сложной формы, может быть достигнуто применением анодного нагрева в водных растворах электролитов. Известны разнообразные составы для насыщения сталей серой, азотом, углеродом, бором, кремнием, молибденом и другими элементами. В качестве рабочих сред в рассматриваемом процессе в основном применяются водные растворы солей и щелочей с концентрациями, обеспечивающими достаточную электропроводность. Например, установлено, что при химико-термической обработке сталей наибольшая микротвердость и износостойкость достигаются электролитным борированием при напряжении на электродах 225 В (при этом  $T_a = 1250^\circ\text{C}$ ) и времени обработки 700 – 900 с. Обработка по такому режиму позволяет увеличить микротвердость поверхности и срок службы деталей в 2 – 5 раз по сравнению со стандартной термообработкой [31].

Интенсификация диффузионного насыщения при электролитном нагреве обусловлена как быстрым достижением стационарного состояния за счет высокой скорости разогрева, так и возникновением дислокаций, вакансий и других дефектов кристаллической решетки вследствие бомбардировки поверхности ионами.

Таким образом, видно, что целый комплекс физико-химических процессов, происходящих при анодном электролитном нагреве, влияет на формирование различных параметров качества поверхностного слоя, благодаря чему этот процесс при оптимальном выборе режима обработки и состава электролита может обеспечить следующие технологические результаты: эффективное упрочнение поверхностного слоя толщиной до 0,2 мм (микротвердость возрастает в 2 – 5 раз); повышение износостойкости в 2 – 4 раза; повышение антифрикционных свойств поверхности (коэффициент трения пары “сталь–сталь” снижается до 0,1 – 0,15); снижение шероховатости поверхности в 2 – 6 раз; нанесение защитно-декоративных оксидных покрытий толщиной 2 – 8 мкм.

#### **Плазменно-электролитическое полирование**

При определенных условиях в присутствии парогазовой пленки наблюдается эффект полирования поверхности металлического электрода-анода [92]. Процесс сглаживания микрорельефа обычно осуществляется в растворах минеральных солей при напряжении 250 – 350 В и средней плотности тока 0,2 – 0,5 А/см<sup>2</sup>. Установлено, что данный процесс протекает в условиях тлеющего разряда между металлическим и электролитным электродами [93]. Особенностью режима ПЭП является то, что доля выделяющейся энергии, отводимой в виде тепла в металлический электрод, невелика, и электрод нагревается незначительно. Обычно процесс проводят при температуре электролита 60 – 90°С.

К настоящему времени нет единого мнения о механизме сглаживания микронеровностей при ПЭП. Есть основания считать, что эффект полирования вызывается суперпозицией нескольких различных процессов: наличие электролитных мостиков в парогазовой оболочке приводит к выравниванию микронеровностей по электрохимическому механизму. Образование и разрушение таких мостиков носит стохастический характер и приводит к некоторой усредненной компоненте полирования по рассматриваемому механизму. Анодное выделение кислорода инициирует образование на поверхности металла тонкой оксидной пленки, приводящей к неравномерному анодному растворению выступов и впадин микрорельефа. Однако выход по току в условиях ПЭП значительно ниже, чем в классических условиях электрохимического растворения, по-видимому, из-за того, что доля ионного тока составляет лишь часть полного тока через парогазовую оболочку. В [94] отмечается, что электрохимический механизм не является определяющим, а результат ПЭП не описывается законами Фарадея; образование химически активных частиц и протекание плазмохимических реакций также рассматриваются среди причин эффекта полирования. На основании имеющихся данных трудно однозначно судить о том, каким образом реакции данного типа приводят к выравниванию микрогеометрии поверхности. Можно предположить, что существенную роль играют процессы переноса активных частиц к поверхности металлического электрода, обуславливающие преимущественное разрушение микровыступов; нельзя исключать разрушение микровыступов по электроэрозионному механизму в результате прохождения маломощных искровых разрядов между металлическим и электролитным электродами.

Несмотря на недостаточную изученность, процессы ПЭП получили распространение благодаря своей простоте и использованию несложного технологического оборудования.

Заметим, что специфика процессов, описанных выше и протекающих вблизи активного электрода, обуславливает комплексное воздействие различных факторов на поверхность этого электрода, которое может быть использовано для очистки поверхности. При этом механизм удаления загрязнений связан с анодным газовыделением. Вскипание электролита у анода способствует “размягчению” загрязнений и ослаблению их сцепления с подложкой. Кавитационные и электроэрозионные явления вблизи обрабатываемой поверхности также ускоряют процесс очистки. Подобные процессы позволяют удалять не только различные загрязнения, но и некоторые покрытия [95].

#### **Анодно-искровое нанесение покрытий**

Данный метод обеспечивает возможность получения оксидных, алюмосиликатных и других неорганических, функциональных покрытий в результате совместного протекания процессов электрохимической формовки анодной пленки и модификации ее свойств электрическими разрядами [96]. Искровые электрические разряды реализуются в системе “металл–оксид, металла–электролит” при достаточно высоких напряжениях. Они оказывают сильное тепловое воздействие на материал оксида и термически интенсифицируют электрохимические процессы роста оксидной пленки в окрестностях разряда. При правильном выборе рабочей среды-электролита и электрических параметров режима на поверхности изделия формируются покрытия, обладающие ценными эксплуатационными свойствами, такими как жаропрочность, высокие диэлектрические свойства, износостойкость и коррозионная стойкость [97].

В заключение отметим некоторые тенденции в развитии комбинированных методов воздействия на поверхность изделия с использованием электроразрядных явлений, наметившиеся в последние годы.

Во-первых, интенсивно развиваются интегрированные технологии модификации свойств ПС за счет последовательного осуществления различных по своей физической сущности методов воздействия на поверхность изделия [98]. Так, например, исследованы интегрированные технологии следующих видов:

- электроискровое легирование – лазерная обработка,
- электроискровое легирование – поверхностно-пластическое деформирование,
- электроискровое легирование – алмазное шлифование – алмазное выглаживание,
- микродуговое оксидирование – лазерная обработка.

Во-вторых, значительный интерес проявляется к технологиям комбинированного воздействия на объект обработки, основанных на пространственно-временном совмещении электроразрядных и иных физико-химических процессов с целью достижения супераддитивного технологического эффекта [99].

В-третьих, получили развитие многофункциональные процессы, позволяющие в рамках одной операции заданным образом изменить два и более показателей качества поверхностного слоя изделий. Так, например, за счет изменения параметров режима удается в несколько переходов на одном оборудовании осуществлять электролитную очистку или обезжиривание поверхности, ее электролитный нагрев, полировку и снятие заусенцев [100]. Такого рода технологии позволяют существенно улучшить комплекс свойств, определяющих качество поверхностного слоя деталей машин.

Таким образом, технология машиностроения располагает большой постоянно расширяющейся группой методов, способов обработки и технологий на их основе, базирующихся на интенсивных физических и химических процессах в зоне электрического разряда и способных решать разнообразные задачи технологического обеспечения качества машин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электрическая эрозия металлов. М.; Л., 1944.
2. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Прохождение электрического тока через электролиты // Электронная обработка материалов. 1978. № 1. С. 5 – 9.
3. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления. М., 1978.
4. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. Электрофизические процессы в разрядах с твердыми и жидкими диэлектриками. Свердловск, 1989.
5. Дураджи В.Н., Парсадян А.С. Нагрев металлов в электролитной плазме. Кишинев, 1988.
6. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. Б.П. Саушкина. М., 2002.
7. Золотых Б.Н., Мальдер Р.Р. Физические основы ЭЭО. М., 1977.
8. Zolotykh V.N. Modern physical Theory of Metals Electric Erosion as the Basis for the Development of New Trends in EDM // Proc. Intern. Symp. Electromach. (ISEM-XI) Switzerland, Lausanne. 1995. P. 114 – 116.
9. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Расчет, проектирование, изготовление электродов-инструментов. Часть 1. Электроэрозионная обработка / Под ред. А.Л. Лившица и А. Роша. М., 1980.
10. Золотых Б.Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде. Автореф. дис. докт. техн. наук. М., 1967.
11. Мицкевич М. К., Бушин А. И., Бакуто И. А. и др. Электроэрозионная обработка материалов / Под ред. И. Г. Некрашевича. Минск, 1988.
12. Артамонов Б.А., Волков Ю. С. Анализ моделей процессов электрохимической и электроэрозионной обработки. Ч. II. Модели процессов электроэрозионной обработки. Проволочная вырезка. М., 1991.
13. Золотых Б.Н. Методы расчета технологических параметров электроэрозионной обработки. М., 1999.
14. Баронец П.Н. Тепловая волна в искровом разряде // Электронная обработка материалов. 1994. № 3. С. 15 – 17.
15. Фотеев Н.К., Спришевская И.А. Расчет температурных полей в поверхностном слое детали, обрабатываемой электроэрозионным способом // Там же. 1991. № 2. С. 9–11.

16. *Фотеев Н.К.* Управление качеством технологической оснастки при электроэрозионной обработке // Там же. 1994. № 2. С. 3–7.
17. *Фотеев Н.К.* Особенности поверхностей, обработанных электроэрозионным способом // Там же. 1979. № 6. С. 5–8.
18. *Саушкин Б.П., Дорофеев И.А.* Обработка охлаждающих каналов в лопатках ГТД электроэрозионным методом // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, 2001. С. 160–162.
19. *Postanogov V.H., Komin V.F.* Electrochemical and Electrophysical Processing Technologies of Special Parts and their Conversion // Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-X). Germany, 1992. P. 486 – 492.
20. *Мицкевич М.К., Бушик А.И., Демидович А.А.* Модель процесса электроэрозионной обработки с орбитально-движущимся электродом // Электронная обработка материалов. 1994. № 2. С. 7 – 9.
21. *Золотых Б.Н.* 50 лет электроэрозионной обработке материалов: пройденный путь и перспективы дальнейшего прогресса // Там же. 1994. № 1. С. 4 – 7.
22. *Золотых Б.Н., Постаногов В.Х., Батьков А.А.* Электроэрозионная обработка – основа создания уникальных деталей летательных аппаратов // Там же. 2000. № 5. С. 4 – 15.
23. *Ставицкий Б.И.* Основные этапы, современное состояние и перспективы развития электроискровой обработки материалов // Там же. 1994. № 1. С. 7–11.
24. *Ставицкий Б.И.* Электроискровая обработка материалов – способ Лазаренко на рубеже столетий // Там же. 2000. № 5. С. 25–40.
25. *Золотых Б.Н.* Методы расчета технологических параметров электроэрозионной обработки. М., 1999.
26. *Kobayashi K.* The Present and Future Developments of EDM and ECM // Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-XI). Switzerland, 1995. P. 29–48.
27. *Золотых Б.Н., Любченко Б.М.* Инженерная методика расчета технологических параметров ЭЭО. М., 1981.
28. *Мицкевич М.К.* Применение принципа “технологической пары” при изготовлении сопрягаемых деталей разделительных штампов // Электронная обработка материалов. 1994. № 1. С. 26–29.
29. *Ставицкий Б.И.* Прецизионное электроискровое оборудование для изготовления деталей изделий электронной техники // Там же. 2001. № 2. С. 62–77.
30. *Коваленко В.С.* Нетрадиционные методы обработки материалов в Японии // Там же. 2000. № 3. С. 4 – 12.
31. *Коваленко В.С.* Машиностроение в новом тысячелетии // Там же. 2001. № 3. С. 60 – 68.
32. *Ставицкий Б.И.* Электроискровая прецизионная обработка материалов. Научные основы особо точных методов формообразования поверхностей // Там же. 2002. № 1. С. 5–32.
33. *Ставицкий Б.И.* Электроискровая прецизионная обработка материалов. Научные основы особо точных методов формообразования поверхностей // Там же. 2002. № 1. С. 5–32.
34. *Носуленко В.И., Боков В.М., Лебедев Ю.В.* Перспективы и области рационального применения размерной обработки материалов электрической дугой // Там же. 1993. № 6. С. 16 – 18.
35. *Zolotykh B.N., Postanogov V.K., Batkov A.A.* Calculation of EDM technological parameters for materials of space engineering // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining. Bilbao, Spain. 2001. P. 391 – 404.
36. *Любимов В.В., Сундуков В.К., Генералов А.В.* Изготовление микрообъектов методом электроэрозионного вырезания // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, УГАТУ. 2001. С. 177–182.
37. *Fujino M., Okamoto N., Masuzawa T.* Development of Multi-Purpose Microprocessing Machine // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining. Lausanne, Switzerland. 1995. P. 613–620.
38. *Klocke F., Lung D., Nothe T.* Micro contouring by EDM with fine wires // Proc. Intern. Symp. Electrical machining. Bilbao, Spain, 2001.
39. *Masuzawa T.* Micro-EDM // Proc. Intern. Symp. Electrical Mach. Bilbao, Spain, 2001.
40. *Koch O., Ehrfeld W., Michel F.* Recent progress in micro-electro discharge machining. Part 1: Technology // Proc. Intern. Symp. Electrical machining. Bilbao, Spain, 2001. P. 117–127.
41. *Behrens A., Ginzl J.* An open numerical control architecture for EDM // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining. Bilbao, Spain, 2001. P. 161–170.
42. *Kocher M., Guglielmetti P.* Modelling and simulation of an EDM die sinking machine // Proc. Intern. Symp. Electrical Mach. Lausanne, Switzerland, 1995. P. 105–113.
43. *Кохановская Т. С.* К вопросу о линейном сервоприводе // ИТО. 2000. № 3. С. 42 – 43.

44. *Obara H., Ohshumi T., Hatano M.* Development of twin-type resistorless power supply for electrical discharge machining // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining. Bilbao, Spain, 2001. Н. 153–160.
45. High Performance EDM Fluids // Modern Mach. Shop, 2000. № 3. P. 238.
46. *Ставицкий Б.И.* Условия, обеспечивающие электроискровое прецизионное изготовление деталей в обычной воде // Электронная обработка материалов. 2002. № 2. С. 5 – 11.
47. *Апрощенко В.В., Ганцев Р.Х., Гильметдинов М.Х. и др.* Комплекс электрооборудования для интегрированных технологических процессов электрообработки // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, 2001. С. 150–156.
48. *Evetz S., Eisentraeger A., Dott W.* Environmental and industrial hygiene in connection with EDM at high discharge energies // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining. Bilbao, Spain, 2001. P. 193 – 210.
49. *Петренко В.И., Молин А.Н., Дукусар А.И. и др.* Состав продуктов электроэрозионной резки полупроводниковых материалов // Электронная обработка материалов. 1993. № 1. С. 4 – 7.
50. *Петренко В.И., Молин А.Н., Салтановская Л.В. и др.* Очистка отработанной воды после электроэрозионной резки полупроводниковых материалов // Там же. 1993. № 2. С. 3–8.
51. *Cabanes I., Maidagan X., Sanchez J.A. and others.* Electro discharge machining of boron carbide industrial components // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining. Bilbao, Spain, 2001.
52. *Tani T., Fukuzawa Y., Mohu N.* Machining phenomena in EDM of insulating ceramics using powder suspended working oil // Ibidem. P. 359 – 362.
53. *Елисеев Ю.С., Трошин А.Н.* Электроэрозионная обработка отверстий малого диаметра // Авиационная промышленность. 2001. № 1. С. 15 – 19.
54. *Алтынбаев А.К.* Электроэрозионная струйная обработка глубоких отверстий малого диаметра в деталях газотурбинных двигателей // Тез. докл. ВНТК “Новые материалы и технологии”. М., 2001.
55. *Мицкевич М.К.* Использование электроэрозионной обработки в инструментальном производстве // Электронная обработка материалов. 1993. № 6. С. 8 – 12.
56. *Кравец А.Т.* Работы по созданию автоматизированного производства штампов и пресс-форм // Там же. 1994. № 1. С. 19 – 22.
57. *Юриков Ю.В., Саушкин Б.П.* Исследование электроэрозионного нанесения функциональных покрытий на детали машин / Справочник: Инженерный журнал. 2001. № 3. С. 28.
58. *Юриков Ю.В., Саушкин Б.П.* Моделирование процесса электроэрозионного нанесения толстослойных покрытий // Металлообработка. 2001. № 4. С. 21 – 25.
59. *Юриков Ю.В., Саушкин Б.П., Сычков Г.А., Быков Е.В.* Технологическая модель процесса электроэрозионного нанесения толстослойных покрытий // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, 2001. С. 169–176.
60. *Лобзин А.В., Гитлевич А.Е., Юриков Ю.В.* Опыт внедрения технологии электроэрозионного восстановления // Современная электротехнология в машиностроении: Сборник трудов Всерос. научн.-техн. конф. Тула, 1997. С. 253–255.
61. *Юриков Ю.В.* Повышение эффективности электроэрозионного восстановления шеек валов. Автореф. дис. канд. техн. наук. Воронеж, 2000.
62. *Goto A., Moro T. Matsukawa K.* Development of ED coating method // Proc. Intern. Symp. Electrical Machining // Bilbao, Spain, 2001. P. 573–588.
63. *Носуленко В.И.* Размерная обработка металлов электрической дугой. Автореф. дисс. докт. техн. наук. Кировоград. 1998.
64. *Боков В.М.* Технологические особенности формообразования электрической дугой рабочих поверхностей пуансонов сложного профиля // Электронная обработка материалов. 1997. № 3 – 4. С. 14 – 17.
65. *Великий В.И., Рябов К.И.* Электроэрозионная обработка короткой дугой крупногабаритных деталей // Технология авиационного двигателестроения. Вып. 1. М., 1990. С. 5557.
66. *Боков В.М., Маркашова Л.И.* Физический механизм малоизносной размерной обработки дугой // Электронная обработка материалов. 2002. № 4. С. 3 – 14.
67. *Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И.* Процессы, возникающие на электродах при прохождении электрического тока через электролит // Там же. 1966. № 1. С. 5–9.
68. *Мороз И.И., Исакова Р.Б.* Технология и оборудование для электроэрозионно-химической обработки. М., 1985.

69. Журавский А.К. К вопросу определения области целесообразного применения комбинированного электроэрозионно-электрохимического метода обработки материалов // Материалы ВНТК. “Электрохимическая размерная обработка материалов”. Тула, 1986. С. 30–32.
70. Зайцев А.Н. Электроэрозионно-химическая прошивка отверстий малого диаметра в деталях из высокопрочных сталей и сплавов. М., 1991.
71. Такунцов К.В., Зайцев А.Н. Электроэрозионно-электрохимическая обработка: современное состояние, проблемы, перспективы // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, 2001. С. 9–13.
72. Crichton J.N., McGeough J.A. Studies of the Discharge Machining in Electrochemical arc Machining // J. Applied Electrochem. 1985. V.15. № 1. P. 113 – 119.
73. Wollenberg G., Schulze H., Timm M., Pape T. Simulation of EDM Installations // Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-XI), Lausanne, Switzerland, 1995. P. 153–162.
74. Wollenberg G., Schulze H., Lauter M. Process Energy Supply for Uncon-ventional Machining // Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-XIII). Spain, 2001. P. 220 – 232.
75. Такунцов К.В. Основные закономерности механизма комбинированного электроэрозионно-электрохимического процесса обработки в динамических условиях // Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов. Уфа, 2001. С. 14–19.
76. Kozak J., Rajukar K.P. Investigation of Electrochemical Arc Machining with Rotating Electrode // Proc. Intern. Symp, Electrical Machining. Switzerland. 1995. P. 498 – 509.
77. Rajukar K.P., Kozak J. Hybrid Machining Process Evaluation and Development // Proc. 2-th Intern. Conf. Machining and Measurements of Sculptured Surfaces. Krakow. 2000. P. 501 – 536.
78. Саушкин Б.П., Мингазетдинов И.Х., Гушан В.А. Особенности процесса совмещенной электроэрозионно-электрохимической обработки длинномерных деталей машин // Электронная обработка материалов. 1982. № 3. С. 12 – 15.
79. Allesu K., Muju M., Ghosh A. Some Experimental Observations in the Electrochemical Discharge Machining of Non-Conducting Materials and other Manufacturing Processes // Proc. Intern. Sympos. Electromach. (ISEM-IX). Japan. 1989. P. 94 – 99.
80. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев, 1985.
81. Михайлов В.В., Игнатков Д.А., Пасинковский Е.А. Структурно-фазовые превращения и остаточные напряжения после комбинированного упрочнения стальных деталей электроискровым легированием и электролитной химико-термической обработкой // Электронная обработка материалов. 1999. № 3. С. 4–9.
82. Рыбалко А.В., Хамурарь В.И., Гринчук Д.М. Перспективы повышения производительности электроискрового легирования // Там же. 1999. № 1. С. 10–13.
83. Мулин Ю.И., Климова Л.А., Ярков Д.В. Феноменологическое описание закономерностей формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании // Физика и химия обработки материалов. 2000. № 3. С. 50–56.
84. Мулин Ю.И., Климова Л.А., Дмитриев Д.А. и др. Определение технологических параметров процесса электроискрового легирования для образования заданной толщины покрытия // Электронная обработка материалов. 2002. № 3. С. 19–23.
85. Рыбалко А.В., Симинел А.В., Сахин О. Электроискровое легирование импульсами малых энергий // Металлообработка. 2002. № 3. С. 14–19.
86. Рыбалко А.В., Симинел А.В., Сахин О. Электроискровое легирование изоэнергетическими импульсами тока различной формы // Там же. 2003. № 3. С. 17–22.
87. Агроскин Я.З., Жерновой А. И., Жуков В. В. К вопросу о свечении при прохождении электрического тока через электролиты // Электронная обработка материалов. 1979. № 5. С. 14 – 15.
88. Шадрин С.Ю., Белкин П.Н. Расчет температуры анодного нагрева // Там же. 2002. № 3. С. 24–29.
89. Дураджи В.Н., Парсаданян А.С. Нагрев металлов в электролитной плазме. Кишинев, 1988.
90. Кузенков С.Е. Разработка процесса многофункциональной анодной обработки стальных изделий при нагреве в электролите: Автореф. дис. канд. техн. наук. Воронеж, 1997.
91. Кузенков С.Е., Саушкин Б.П. Химико-термическая обработка стальных изделий в водных растворах электролитов // Сборник трудов ВНТК. “Современная электротехнология в машиностроении”. Тула, 1997. С. 327–331.

92. Кузенков С.Е., Саушкин Б.П. Электрохимические процессы при анодном электролитном нагреве // Сб. тр. РНТК “Теория и технология электрохимической обработки”. Уфа, С. 17.
93. Кузенков С.Е., Кирей Ю.В. Особенности тлеющего разряда в процессе электролитно-плазменной обработки // Металлообработка. 2002. № 3. С. 20 – 21.
94. Веселовский А.П., Кюбарсен С.В., Ушомирская Л.А. Особенности электролитно-плазменной обработки металлов в нетоксичных электролитах // Там же. 2001. № 4. С. 29–31.
95. Семенова И.П., Амирханова Н.А., Невьянцева Р.Р. и др. Влияние природы электролитов на фазовые составляющие сплава ЖСбУ при электролитно-плазменной обработке // Сб. статей ВН ПК “Перспективные технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов”. Уфа, С. 75–77.
96. Черненко В.И., Снежко Л.А., Папанова И.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. Л., 1991.
97. Снежко Л.А. Физико-химические превращения на металлических электродах под действием анодных искровых разрядов / Сб. тр. ВНТК “Современная электротехнология в машиностроении”. Тула, 1997. С. 12–21.
98. Никифоров А.В. Интенсификация чистовой и упрочняющей обработки титана при использовании электротехнологий // Электронная обработка материалов. 1993. № 4. С. 17 – 22.
99. Смоленцев В.П. Перспективы создания комбинированных методов обработки в стране и за рубежом // Межвуз. сб научн. трудов “Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении”. Воронеж, 1999. С. 4–8.
100. Саушкин Б.П., Кузенков С.Е., Масликов С.В. Физико-химические методы модификации свойств поверхностного слоя деталей машин. Липецк, 1998.

*Поступила 04.04.03*

### **Summary**

Electrodischarge machining method, proposed by B. Lazarenko is considered as the first catalytic link of the whole generation of methods and technologies used in machine-building production. High standard of theoretical and practical knowledge in the field of EDM is fixed and perspective ways of its further development are considered. Whole group of methods based on the processes of electrical discharge in liquid and gas medium is discussed. Obtained results of their industrial application and the ways of the further improving are disputed.

---