
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

М.К. Мицкевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭРОЗИИ В БЕЛАРУСИ

К 60-летию электроэрозионного способа обработки

*Физико – технический институт НАН Беларуси,
ул. Купревича, 10, г. Минск, 220141, Республика Беларусь*

Основополагающее изобретение Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко было зарегистрировано в 1943 г. А уже в 1946 г. на кафедре резания металлов МАИ у профессора Кривоухова мне впервые довелось увидеть одну из первых установок, где искра резала металл. Но тогда я не мог и подозревать, что после окончания института буду заниматься изучением основ этого способа – явления электрической эрозии, разработкой технологических процессов, основанных на этом явлении. Спустя шесть лет после открытия этого способа новый директор Физико-технического института Академии наук Беларуси С.И. Губкин, весьма информированный и тесно связанный с научными кругами Москвы, командировал заведующего лабораторией электрофизики физ.–мат. наук И.Г. Некрашевича и старшего научного сотрудника канд. физ.–мат. наук Н.В. Афанасьева к Борису Романовичу Лазаренко. Они вернулись вдохновленными увиденным и, конечно, были очарованы самим автором этого способа, его кипучей энергией.

Эпохальное изобретение Б.Р.Лазаренко явилось детонатором к поиску разновидностей его, к реанимации прежних предложений. Среди них – электроконтактная, анодномеханическая, электрохимическая обработка, электролитный нагрев, электрогидравлическое воздействие, ультразвуковая, позже – электронно-лучевая, лазерная обработка. Это изобретение стимулировало поворот к нетрадиционным методам обработки, что вызвало необходимость проведения теоретических и экспериментальных исследований и конструкторско-технологических разработок. Тематика лаборатории электрофизики, определявшаяся проблемой физики электрических контактов, исследованиями явлений эмиссии материала контактов и его переноса была уточнена и расширена в область исследований физического явления электрической эрозии металлов, как основы принципиально новых методов обработки. А эти методы развивались в основном в двух направлениях – размерного формообразования и легирования поверхности деталей.

Лаборатория приняла посильное участие в исследованиях обоих направлений. Были установлены тесные связи с основоположниками этих методов. Координация тематики лаборатории осуществлялась ЦНИЛ ЭЛЕКТРОМ АН СССР (Б.Р. Лазаренко и Б.Н. Золотых). Научные исследования в лаборатории проводились под руководством И.Г. Некрашевича и Н.В., Афанасьева работавшими по совместительству заведующими кафедр физики в Университете и Политехническом институте. В 1949 г. С.И. Губкин направил двух дипломников – М.К. Мицкевича и С.П. Миткевича в лабораторию электрофизики. Сначала работа носила прикладной характер, устанавливались творческие связи с предприятиями Минска. В следующем году лаборатория пополнилась выпускником физфака университета И.А. Бакуто. Начинать исследования приходилось с нуля. Аппаратуры практически не было, кроме установки ЭИСК-03 для электроэрозионного прошивания и КЭП-1 для легирования. Необходимые средства отсутствовали, но была молодость, был энтузиазм, сотрудники лаборатории сами изготовили простейшие установки, самоделки, на которых получили первые сведения о многогранном, необыкновенно загадочном явлении – электрической эрозии металлов.

Хорошо сработавшийся небольшой коллектив лаборатории с первых лет стал вносить существенный вклад в изучение явления электрической эрозии. Четко определились два различающиеся по методике исследования направления. Одно из них было сосредоточено на изучении процессов в единичном сильноточном разряде (И.Г. Некрашевич, М.К. Мицкевич, И.А. Бакуто), другое – на изучении электроэрозионной стойкости материалов по серийной методике (Н.В. Афанасьев, С.П. Миткевич). Кроме того, первое направление дополнялось решением некоторых вопросов электроэрозионной обработки, а второе – исследованием электроискрового упрочнения. Начиная с 1952 г. с уходом Н.В. Афанасьева на кафедру БПИ, все работы в лаборатории проводились под руководством И.Г. Некрашевича.

Исследовались следующие вопросы: электрическая прочность чистых и загрязненных жидких диэлектриков; геометрические параметры эрозионных следов на электродах, оставляемых единичными импульсными разрядами; давление на электроды, развиваемое при разрядах в жидкости; связь величины эрозии с теплофизическими свойствами металлов; динамика спектральных линий; электроискровое упрочнение инструмента. Популярность новых методов обработки материалов привлекла внимание и других лабораторий института. Так, исследованиями структуры поверхности, образующейся после электроискрового упрочнения, занималась лаборатория металловедения под руководством академика К.В. Горева, а изготовлением гравюр ковочных штампов – лаборатория обработки металлов давлением под руководством академика С.И. Губкина. В Политехническом институте на кафедре физики Н.В. Афанасьев создал группу из преподавателей и изучались различные стороны электрической эрозии металлов. В Университете на кафедре физики И.Г. Некрашевич создал небольшой коллектив, исследовавший физику явления электрической эрозии. Использовались простейшие методики и измерительная аппаратура, хотя и удовлетворявшие уровень исследований того времени, но не позволявшие глубоко вскрыть природу исследуемых явлений. Для измерения давлений на электроды применялся простейший баллистический маятник, а для определения интенсивности эрозионного процесса использовалась весо-измерительная техника. Энергетические, интегральные параметры разрядов исследовались с помощью калориметрической методики и аппаратуры, изготовленной в лаборатории. Временная развертка спектральных линий изучалась с помощью высокооборотного механического устройства также лабораторного изготовления для вращения барабана с фотопленкой (Н.М. Алехнович).

В результате исследований был накоплен значительный объем информации о различных сторонах явления электрической эрозии и освоено несколько простейших технологических процессов, получивших внедрение на заводах Минска.

Исследованиями электрической прочности жидких диэлектриков при напряжениях на электродах до 300 В была выяснена реальная геометрическая сторона межэлектродного промежутка. Установлено бесконтактное начало разряда. Загрязнение продуктами эрозии диэлектрика приводило к изменению электрической прочности сложным образом. Так, величина межэлектродного промежутка в зависимости от концентрации загрязнения приобретает наибольшее значение при ее малых значениях. Этому дана теоретическая интерпретация на основе соотношения между двумя факторами: удлинением промежутка за счет заполнения проводящими металлическими частицами и увеличением прочности жидкой прослойки между частицами по мере ее утоньшения. Кроме того, вскрыта особенность статистического характера процесса пробоя. Изучение геометрии эрозионных следов импульсных разрядов показало, что размеры их значительно превышают величину межэлектродного расстояния. Это в первую очередь относится к диаметру эрозионного следа, глубина которого порядка межэлектродного расстояния. Этим было обращено внимание на серьезность проблемы удаления продуктов эрозии из зоны обработки при углублении электрода в заготовку. Изучение рельефа эрозионных следов указывало на наличие в них многих мелких кратеров. Временная развертка свечения спектральных линий при разряде в воздухе показывала своеобразную прерывистость в интенсивности свечения линий. При этом на осциллограммах тока и напряжения импульсного разряда не обнаруживалось прерывистости в временном изменении. Противоречивость наблюдений не поддавалась интерпретации с позиций существующих представлений о механизме явления. К этому времени стали появляться отдельные экспериментальные факты и других авторов, указывающие на совокупность точечных эрозионных следов на загрязненных электродах при разрядах с более высоким начальным напряжением. Накопление экспериментальных фактов обостряло их противоречивость и вызывало потребность в их обобщении и четкой интерпретации. Привлечение И.Г. Некрашевичем дипломников физфака БГУ (Б.Б. Бойко, Э.И. Точицкий, А.А. Лабуда и др.) в лабораторию электрофизики способствовало расширению поиска путей исследования явления электрической эрозии. Основная же работа проводилась сотрудниками лаборатории.

В 1955 г. была опубликована, а ранее предложена гипотеза о пространственно-временной дискретности электроэрозионного процесса на электродах (И.Г.Некрашевич, И.А. Бакуто). Первоначально ее суть заключалась в следующем. Тонкий плазменный канал разряда существует на одном месте поверхности электрода не постоянно, а только короткое время, достаточное для перегрева металла под пяткой канала и доведения его до взрыва за счет Ленц–Джоулева эффекта. Затем канал смещается на новое место и цикл многократно повторяется в течение разряда. В результате на электроде остается интегральный эрозионный след, состоящий из множества мелких кратеров. В дальнейшем эти представления были обобщены как в отношении видов источника тепла на электроде, так и множества разрядных каналов и получили название миграционной теории явления электрической эрозии металлов. Появление таких новых представлений оказало стимулирующее воздействие на интенсивность и характер исследований, особенно мест привязки разрядного канала (электродных пятен) на поверхности электродов. В настоящее время считается твердо установленным, что пространственно-временная дискретность электродных процессов является формой существования сильно-точного электрического разряда в вакууме, газообразной и жидкой средах. (Handbook of Vacuum Arc: Science and Technology/ Edited by R.L. Boxman, D.M. Sanders and Ph.J. Martin. New Jersey, 1995; Г.А. Месяц. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга, М., Наука, 2000). Но до этого был длительный путь дискуссий, исследований, расчетов и т.п.

Измерения давления на электроды, развиваемого при разряде в жидкой диэлектрической среде, показали, что оно в сильной степени зависит от материала электрода и в слабой от рода диэлектрической жидкости. Величина давления при энергии разряда в несколько джоулей лежит в пределах от десятка до нескольких сотен атмосфер в зависимости от материала электродов. Этим определяется их важная роль в процессе удаления продуктов эрозии из образующихся лунок.

Исследования интенсивности эрозионного процесса на различных материалах показали, что с увеличением их теплоты плавления и испарения разрушение металлов уменьшается. Сделана попытка установить эрозионный ряд, исходя из представлений о явлении эрозии как процессе дискретном в пространстве и во времени. В приближении, учитывающем только Ленц–Джоулевский эффект в контакте металла с плазмой была дана качественная интерпретация известного эрозионного ряда Б.Р. Лазаренко. При этом ферромагнитные материалы выделились в самостоятельную группу и образовали ряд на уровне более высокой интенсивности эрозионного процесса.

Обширные исследования связи между интенсивностью эрозионного эффекта и параметрами разрядной RLC-цепи показали существенную зависимость от этих параметров не только величины эрозии электродов, но и величины относительного износа электрода.

Калориметрические измерения выделяемой в разрядном промежутке энергии позволили оценить не только ее абсолютное значение, но и такую важную величину, как коэффициент полезного действия разрядного контура при различных значениях параметров. Было показано, что с увеличением значений параметров контура, определяющих начальный уровень запасенной в нем энергии, КПД существенно уменьшается. В частности при изменении величины емкости конденсатора от 50 до 400 мкФ к.п.д. убывает от 0,6 до 0,2.

Наряду с научно-исследовательской работой лаборатория развивала творческие связи с промышленными предприятиями. Так, была выполнена совместная разработка технологического процесса электроискрового упрочнения большой номенклатуры режущего инструмента. В дальнейшем электроискровое упрочнение использовалось в направлении повышения долговечности деталей машин типа втулок для продольно-строгальных станков завода им. Октябрьской революции. Была разработана технология двухслойного электроискрового упрочнения и средство ее реализации – станки типа МВ (С.П. Миткевич, Б.Л. Павлюкевич и от завода И.И. Беяков, В.А. Волконовский и др.).

Эта работа получила дальнейшее развитие (О.И. Авсеевич) и явилась первой попыткой в стране механизировать процесс электроискрового упрочнения. В этот период были начаты исследования электроэрозионной обрабатываемости сталей стальными электродами с целью выяснения причин, препятствующих использованию их в качестве электродного материала. Выполненный комплекс исследований обрабатываемости металлов позволил сформулировать практически важные рекомендации применительно к изготовлению ковочных штампов. Обобщение этих материалов послужило основой для кандидатской диссертации С.П. Миткевича.

Детальное исследование электроэрозионного процесса при единичных импульсных разрядах позволило установить статистический характер явлений электрической эрозии и подтвердить линейную зависимость интегральной эрозии от числа разрядов. Кроме того, выяснено влияние формы электродов на величину эрозии и давления на электроды при разряде между коническими электродами с различным углом при вершине. Результаты получили удовлетворительную интерпретацию на

основе рассмотрения гидродинамических явлений при импульсном разряде в жидкости, из которого следует экстремальная зависимость давления от угла заострения электродов (И.Г. Некрашевич, И.А. Бакуто).

В дальнейшем исследования эрозионных характеристик при единичных разрядах развивались в направлении изучения разряда на линии раздела двух металлов (биметалла) с целью выяснения причины повышенной эрозионной стойкости композиционных электродных материалов. Это привело к обнаружению нового эффекта, названного авторами (И.Г. Некрашевич, И.А. Бакуто) «биметаллическим». Суть его заключается в том, что эрозионный след при разряде на линии раздела приобретает асимметричную форму, а участие в эрозионном процессе различных металлов приводит к неаддитивности относительно их свойств.

Исследования по серийной методике развивались в направлении изучения взаимной обрабатываемости инструментальных сталей стальными электродами при сообщении одному из электродов низкочастотных вибраций. В результате установлено, что причиной, препятствующей процессу обработки сталей стальными электродами, является сваривание их через продукты эрозии, находящиеся в жидкой фазе и образование металлического контакта между ними. С уменьшением длительности разряда, повышением плотности энергии резко уменьшается количество жидкой фазы в продуктах эрозии. При этих условиях сваривания электродов не происходит. Это открыло перспективы использования сталей в качестве электродов при разработке оригинальных технологий. При этом стабилизирующим фактором являются вибрации одного из электродов. Исследованиями показано, что вибрации электрода играют роль не поршневого эффекта, как об этом трактовалось в литературе, а роль перераспределения импульсов тока по энергии (при генераторах типа RC). Параметры вибраций существенно влияют на величину эрозии электрода, амплитуда их не должна превышать величину межэлектродного промежутка, быть соизмеримой с ней.

При исследовании влияния природы диэлектрика – рабочей жидкости – в различных условиях И.А. Бакуто был получен удивительный результат. При питании электродов от танкового преобразователя тока (напряжение порядка 400 В) со стабилизирующими ток конденсаторами в сотые доли микрофарды была обнаружена – после многочасового воздействия на электрод – абсолютно отполированная поверхность детали. В те годы не был оценен полученный результат, явившейся прообразом процесса электроэрозионного полирования, предложенного много лет спустя в Швейцарии.

В конце 50-х годов деятельность академических учреждений была ориентирована главным образом на фундаментальные исследования. В то же время промышленность начала выпуск современного оборудования и кое-чем удалось обогатиться. Это позволило лаборатории осуществить постановку экспериментов на более высоком методическом уровне на современной экспериментальной базе. Так появилась возможность «пробраться» внутрь канала разряда, приступить к исследованию динамики, выхода и миграции вещества электродов в межэлектродном пространстве с помощью фотоэлектрической методики с высоким временным и пространственным разрешением; селективности выхода и фазового состава продуктов эрозии с помощью методики, основанной на полярографическом анализе; характера воздействия ультразвука на процесс электроэрозионной обработки и др.; получили развитие теоретические методы исследования.

Так, на основе уравнения теплопроводности Фурье с добавлением к нему ионизационного члена при соответствующем преобразовании его при условии непрерывности электрического тока и дополнении начальными и граничными условиями сформулирована феноменологическая теория электрического пробоя диэлектрика в любом фазовом состоянии. Теория теплового пробоя и таунсендовская теория содержатся в ней в качестве частных случаев. Получены новые виды граничных условий на основе введения понятия переходного слоя на электродах, в котором происходит преобразование энергии одного вида в другой. Используя их и уравнение типа таунсендовского, получена полная вольт–амперная характеристика разрядного процесса от тлеющей до дуговой формы разряда с падающей характеристикой. Этот метод был обобщен на другие явления в силовом поле, такие как пластическое течение металла (И.Г. Некрашевич, И.А. Бакуто), получена связь между напряжением и деформацией, а также характеристики других процессов пластического течения материала.

Если низкочастотные вибрации электрода являлись внешним воздействием на процесс электроэрозионной обработки, то предположительно ультразвуковые колебания, особенно мегагерцевых частот, период которых соизмерим с длительностью разряда, могли стать фактором, воздействующим на «внутреннюю» сторону разряда. Поэтому в лаборатории были проведены обширные исследования воздействия ультразвука, как мощного фактора, в первую очередь на начальную стадию разряда – пробой диэлектрика. В результате обнаружено такое явление, как упрочнение жидкого диэлектрика при напряжениях на электродах ниже Пашеновского минимума пробивного напряжения для газооб-

разных сред. Предположительно это явление объяснялось возникновением на поверхности электродов тонкого газообразного слоя, который не пробивается при этих напряжениях. Стойкость этого слоя обладает определенным последствием, которое сохраняется в течение суток. Получили дальнейшее развитие исследования воздействия низко- и высокочастотных колебаний непосредственно на процесс электроэрозионной обработки. Обобщение экспериментальных и теоретических исследований в этой области составило предмет кандидатской диссертации М.К. Мицкевича (1969).

Полярографические исследования механизма выхода вещества электродов при единичных разрядах в различных диэлектрических средах увенчались установлением ряда важных физических закономерностей селективного выхода вещества, а также фазового состояния продуктов эрозии. Комплекс результатов исследований в этом направлении обобщен в виде кандидатской работы О.И. Авсеевича (1968).

Получили развитие экспериментальные и теоретические исследования динамики электродных процессов на электродах с макронеоднородной поверхностью, проводимые с целью поиска путей повышения электроэрозионной стойкости металлокерамических и композиционных материалов. Для этого была привлечена методика сверхскоростной фоторегистрации быстропротекающих процессов с использованием камеры СФР-2М с дополнительной светосильной оптикой и набором оптических интерференционных фильтров. Во многих экспериментах дополнительно использовалась методика развертки разряда во времени с помощью внешнего магнитного поля, создаваемого разрядом. В результате получены богатейшие сведения о динамике электродных пятен при развитии разряда в катодном и анодном режимах на однородных и сложных электродах – биметаллических и композиционных. Так, показана избирательность возникновения и существования электродных пятен на одном из металлов при разряде на линии раздела двух металлов. Такая избирательность зависит не только от свойств соприкасающихся металлов, но и от полярности электродов. Установлена коррелятивная связь между распределением пятен при разряде на линии раздела металлов и свойствами этих металлов. Показано, что электродные пятна могут возникать также и путем инициации из объема плазменного облака, а также, что пятна могут развиваться как в направлении, так и против силы Ампера в магнитном поле. В теоретическом плане поставлена и решена нелинейная теплофизическая задача для анодного пятна на линии раздела двух металлов с учетом процесса испарения и движения границ фазовых превращений для ряда пар металлов. Совокупность полученной экспериментальной и теоретической информации позволила сформулировать практические рекомендации для разработки эрозионностойких композиционных материалов, а также существенно углубить представления о механизме возникновения и существования электродных пятен, об их свойствах и параметрах. По результатам этих исследований в 1973 г. защищена кандидатская диссертация А.И. Бушик.

Используя аппаратуру высокоскоростной регистрации процессов, исследована динамика импульсного разряда в керосине (А.И. Бушик, В.А. Шилов). Естественно, начальное напряжение и длительность разряда отличались от характеристик используемых разрядов в процессах электроэрозионной обработки. Возбуждение разряда инициировалось вспомогательным маломощным импульсом тока. В этих условиях подтверждено запаздывание основного разряда относительно поджигающего, при этом весьма значительное. Основной разряд возникает в газовой полости, образовавшейся от разряда поджига. При этом плазменное облако основного разряда увеличивается быстрее, чем газовая полость. После заполнения газовой полости разрядная плазма воздействует на жидкий диэлектрик, проникая в виде тонких густорасположенных струек. Граница плазма – жидкость принимает «ворсинчатый» вид. Постепенно яркость ворсинок угасает, вокруг них образуются газовые полости, которые с ростом округляются и создают на границе полости своеобразный рельеф. Одновременно фиксируемые осциллограммы разрядного тока позволили определить картину процесса. Размеры газоплазменной области увеличиваются монотонно, яркость плазменного облака пульсирует, наблюдается горение ярких пятен на электродах, как и при разрядах в воздухе. При сжатии газовой полости вокруг нее появляется кольцо с прерывистым контуром. По-видимому, это результат отставания унесенных продуктов эрозии. Разрушение полости происходит из-за вторжения в нее неравномерных струй жидкости. Из фотограмм следует, что выход материала из эрозионной лунки происходит в парокпельном состоянии в течение разряда. Этим подтверждается дискретный характер процесса эрозии. Длительность и инерционность гидродинамических явлений могут существенно влиять на характер следования разрядов, на восстановление состояния межэлектродной области.

К концу 60-х годов в лаборатории был накоплен солидный объем фундаментальных сведений о различных сторонах явления электрической эрозии, процесса электроэрозионной обработки. Это позволило интенсивно расширять и укреплять творческие связи с промышленными предприятиями на основе хозяйственных и с научно-исследовательскими институтами на базе договоров о сотрудни-

честве. Тематика начала приобретать более выраженный прикладной характер. В частности, в сотрудничестве с базовой лабораторией ультразвука МТЗ были выполнены две работы: одна в области технологии получения толстослойных покрытий из бронзы путем нанесения ее на деталь электроискровым способом, другая – в области использования ультразвука для повышения технологических свойств СОЖ на основе эмульсола.

Принципиально новый подход к проблеме нанесения покрытий с помощью электрических разрядов позволил решить проблему, отнесенную Б.Р.Лазаренко к числу трех важнейших, сдерживающих развитие инженерных разработок в этой области. Анализируя известные данные о характере изменения толщины покрытия во времени (приращение слоя до определенного предела и последующее непрерывное разрушение его и уменьшение толщины детали), определены два возможных фактора – физический и геометрический, препятствующих наращиванию слоя. Прежде всего – это геометрический, обусловленный контактным началом разряда по гребешкам поверхности и дальнейшим разрушением их. Вследствие того, что площадь электрода превышает площадь контактирующих выступов, а доступ к впадинам поверхности детали закрыт, происходит переработка образующихся выступов и образование новых. Поэтому здесь возможны два решения – использование упрочняющего электрода с сечением, равным площади выступов, что должно обеспечить высокую сплошность слоя при перемещении электрода вдоль поверхности. И второе – нанесение покрытий «заторможенным» электродом, обеспечивающем перенос материала на поверхность детали локально. Для получения толстослойных локальных покрытий необходимо обеспечить повышенную температуру контактирующей поверхности электрода, при которой обеспечивается перенос металла микрокаплями в жидкой фазе. Это достигалось использованием достаточно мощных импульсных разрядов, реализуемых с управляемой частотой следования их в 150 –180 Гц. Скорость нанесения слоя из бронзы составляла 0,5 г/мин. Структура слоя – литая.

В 1960 г. лаборатория была включена в состав лаборатории физических проблем во главе с академиком Н.С.Акуловым, прежняя тематика сохранилась. В 1964 г. эта лаборатория выделилась в самостоятельное научное подразделение, а группа сотрудников лаборатории электрофизики осталась в институте. В 1968 году ее руководителем был назначен М.К.Мицкевич, лаборатория, как подразделение института была восстановлена.

В эти годы были расширены исследования в направлении взаимной обрабатываемости инструментальных сталей, что позволило приступить к разработке оригинального технологического процесса изготовления рабочих элементов разделительных штампов применительно к потребностям Минского радиозавода, где на универсальном оборудовании были изготовлены первые штампы без слесарной доработки. Установлена связь эрозионных характеристик инструментальных сталей с их свойствами, теоретически изучена динамика теплофизических процессов на стальных электродах в условиях сильнооточного разряда. Этот этап работ завершился защитой Ж.А. Мрочком в 1973 г. кандидатской диссертации.

Перспективность научной тематики и плодотворность приложения результатов исследования в промышленности являлись основанием для расширения штатов лаборатории и изменения ее структуры. Были созданы тематические группы физических и технологических исследований (1975 г.) во главе с А.И. Бушиком и Ж.А. Мрочком. Для расширения разработок прикладного характера образован сектор СКТБ с ОП, который возглавил В.К. Малышкин.

Для выявления наиболее перспективных областей применения процессов электроэрозионной обработки проведено обследование около тридцати заводов республики, собрана информация об узких местах производств, главным образом инструментальных. Одним из них явилось изготовление вырубных штампов. Начались систематизированные разработки технологии и оборудования (В.К.Малышкин). Из анализа применяемых на заводах разделительных штампов была выявлена необходимость нового подхода к разработке технологии – создание типовых технологических процессов для различных групп штампов. Для этого разработана классификация штампов, в основу которой положена идея обеспечения требуемого зазора между пуансоном и матрицей без слесарной доработки. В качестве критерия классификации принята величина зазора, которую следует получить в результате электроэрозионной обработки. Обычная схема прямого копирования позволяет получать зазоры в узких пределах – для одной группы штампов. Для других, а их оказалось пять, потребовалась разработка способов, приемов, схем, обеспечивающих в целом управление величиной зазора. При этом достигается очень важное качество штампа – равномерность зазора по контуру пуансонов. Поставленные задачи потребовали решения целого комплекса принципиальных и конструкторско-технологических задач. Среди них вопросы точности, способы позиционирования электродов-пуансонов, пути снижения затрат времени на изготовление штампов, способы изготовления проме-

жуточных электродов, сравнение эффективности выполнения одних и тех же работ путем копирования и вырезания проволочным электродом и т.п.

Одним из важных вопросов в технологии обработки являлась связь скорости съема металла с величиной обрабатываемой площади. Экспериментально наблюдаемые зависимости получали в литературе неоднозначные объяснения. Причины, приводящие к снижению скорости съема металла, не были установлены. И.А. Бакуто теоретически обосновал эту связь, исходя из времени выхода газовых продуктов из-под торца электрода и создания возможности возбуждения разрядов в жидком диэлектрике. В дальнейшем это обоснование получило экспериментальное подтверждение. Так, разделение площади на части с той же суммарной величиной приводит к увеличению скорости съема. В предельном случае – площади электрода в виде узкой полоски – благодаря быстрому выходу газовых продуктов реализуется большинство импульсных разрядов.

Учитывая целесообразность использования минимального количества электродов – не более двух (для предварительной и окончательной обработки) проанализированы затраты времени на выполнение этих операций, исходя из соотношения скорости съема металла и величин удаляемых припусков. В связи с существенным различием в длительностях предварительной и чистовой обработки возникла идея создания технологических линий электрообработки на модульной основе – на базе специализированных установок для предварительной и окончательной обработки. Число таких установок в технологической линии определялось из затрат времени на выполнение соответствующих операций.

Проведено теоретическое обоснование структуры технологических линий обработки, создаваемых на базе одноконтурных установок, многоконтурных и смешанного типа в зависимости от размеров, числа полостей и т.д. (М.К. Мицкевич, И.А. Бакуто).

При разработке типовых технологий пришлось столкнуться с характерными погрешностями формы полостей – с бочкообразностью, возрастающей с увеличением интенсивности режима обработки. Предложено использование ряда технологических приемов, один из них – орбитальное движение электрода. Однако ранее проведенные экспериментальные данные не давали удовлетворительного ответа о причинах нарушения стабильности процесса при изменении параметров осцилляций – амплитуды и их частоты. Разработка математической модели этого процесса позволила понять причины его особенностей и определить диапазон рациональных значений параметров осцилляций. Это позволило существенно дополнить схемы технологических процессов, расширить возможности формообразования поверхности деталей. Используя оригинальные технологические схемы формообразования с орбитальным движением электрода, пришлось столкнуться с такими явлениями, как "зарубание" пуансоном матрицы в остроугольных элементах профиля. Изучение этого вопроса при выполнении операций, основанных на «обратном копировании» и «двойном копировании» с орбитальным движением, позволило рассчитать вероятные погрешности, связанные с величиной амплитуды осцилляций.

Из анализа возможных путей интенсификации процессов формообразования поверхности деталей предложен и научно обоснован способ одновременной предварительной и чистовой операции, то есть их совмещения. Этот способ можно реализовать при разнесенных электродах и при использовании одного блока электродов. Питание их следует производить от независимых друг от друга источников импульсов тока и только в некоторых случаях от одного, путем подключения электрода для чистовой обработки через развязывающее сопротивление.

При анализе формообразования поверхности сопрягаемых деталей обнаружено существование уникальной возможности электроэрозионного способа, названной «принципом технологической пары» (Мицкевич М.К.). Суть этого принципа заключается в возможности с помощью одной из сопрягаемых деталей непосредственно (или опосредованно с помощью промежуточной детали, изготовленной по задающему профилю) получить рабочую поверхность сопряженной детали. Все определяется характером сопряжения, величиной зазора или натяга. Как оказалось, в литературе отражены разработки, выполнявшиеся практически по этому принципу, – это взаимная приработка мукомольных валов, приработка шестерен. В обоих случаях деталям сообщалось принудительное движение. При изготовлении полости в матрицах стальными пуансонами обработка происходит при следящем режиме электрода.

Следует отметить, что при использовании электродов (пуансонов) для формообразования полости в матрице съем металла происходит по контуру электрода на малой площади – по узкому пояску в несколько десятых долей миллиметра. В этом случае возникают особые условия теплового состояния электрода. При небольших размерах его сечения наблюдается повышенный износ. Тепловое состояние таких электродов изучалось теоретически и экспериментально с помощью термпары.

Установлено, что длительность охлаждения стальных электродов в 4 – 5 раз больше, чем медных, что чаще приводит к нестабильности процесса и вызывает необходимость ограничения тепловой нагрузки.

Теоретически рассмотрены вопросы точности изготовления деталей штампов при использовании различных схем формообразования, основанных на прямом, обратном, «двойном копировании», при формообразовании полостей с лицевой и обратной стороны матрицы. Выполненный комплекс работ явился весомым вкладом в научные основы технологии электроэрозионной обработки металлов. По отдельным разработкам технологических процессов изготовления штампов защитили кандидатские диссертации В.К. Малышкин, Б.А. Эйзнер, И.Г. Девойно.

Научные основы технологии электроэрозионного формообразования деталей штампов явились основой докторской диссертации М.К. Мицкевича. За комплекс выполненных работ в 1980 г. коллектив в составе И.А. Бакуто, М.К. Мицкевича, В.К. Малышкина, Ж.А. Мрочка (ФТИ АН БССР), А.Ф. Бабицкого, Е.А. Ржановского был удостоен Государственной премии БССР.

В направлении повышения стойкости электрических контактов теоретически был рассмотрен вопрос развития электродных пятен на композиционных электродах, что позволило определить размеры зон теплового взаимодействия металлов, знание которых необходимо при выборе оптимальных размеров зерен или элементов каждого композиционного материала. В этом направлении совместно с Институтом проблем материаловедения АН УССР проведен ряд экспериментальных исследований процессов на армированных и композиционных электродах (А.И.Бушик). Так, анализ скоростных фотограмм развития разряда в воздухе в катодном режиме на электродах, армированных проволочками из тугоплавких материалов (вольфрам), и матрицы из меди, серебра, а также из стали и алюминия, показал, что после возникновения пятен первого типа (центров автоэлектронной эмиссии) пятна второго типа (центры термоэлектронной эмиссии) возникают в основном по периметру более тугоплавких проволочек и постепенно заполняют всю площадь сечения проволочек, переходя затем и на более легкоплавкую связку. С угасанием разряда пятна второго типа исчезают сперва со связки и из центра проволочек. Последними прекращают свое существование пятна, горящие по периметру проволочек.

Исследованиями динамики разряда на композиционных материалах на основе меди с эмиссионноактивными добавками (гексаборид лантана, карбид циркония) показано, что эти добавки способствуют более длительному существованию пятен первого типа. Пятна второго типа, ответственные за разрушение материала, существуют рассредоточено, снижая тепловую нагрузку на электрод. Эти пятна в первую очередь возникают на эмиссионноактивных включениях и существуют меньшее время, чем на меди, из-за взрывообразного разрушения. Это обеспечивает снижение эрозионного разрушения катода.

При разработке специальных электронно-вакуумных приборов потребовались сведения о катодных процессах в глубоком вакууме. В этом отношении проявился интерес сотрудников Центрального института электронной физики Академии наук ГДР (Б. Ютнер, Ж. Пурш). У них техника достижения глубокого вакуума была хорошо отработана, в Физтехе – благодаря А.И. Бушик была хорошо отработана техника и методика регистрации быстропротекающих процессов. В результате успешного сотрудничества двух коллективов получены новые сведения о характере пятен на чистых и окисленных поверхностях электродов в сверхвысоком вакууме в широком диапазоне режимов тока. Показано, что тип катодных пятен в основном определяется степенью чистоты поверхности электрода. На окисленной поверхности существуют пятна первого и второго типа, на очищенной – пятна только второго типа. Обнаружено, что в таких условиях (10^{-9} мм рт.ст.) в некоторый момент времени пятна второго типа взрываются и прекращают свое существование.

Плодотворное сотрудничество с ЦИЭФ АН ГДР в рамках академических планов продолжалось в течение пятнадцати лет. Осуществлялось также сотрудничество с научными сотрудниками Института высоких температур АН СССР (В.И. Раховский), ФТИ АН СССР (Ленинград, Г.В.Дюжев), Институт электрофизики АН СССР (Свердловск, Г.А. Месяц), Институт проблем материаловедения АН УССР (Г.В. Левченко) и др.

Результаты работ публиковались в журналах «Электронная обработка материалов», «Известия АН БССР» и др. Число публикаций – порядка трехсот, создано порядка сорока изобретений.

Результаты исследований и разработок докладывались на многих конференциях в стране и за рубежом (Австрия, ФРГ, США, Голландия, Франция, Англия, Италия и др.).

Исследования и разработки, проводившиеся в Физико-техническом институте в области электрофизических методов обработки, благоприятствовали подготовке и аттестации кадров в этой области. Сначала на объединенном совете отделения физико-технических наук, а впоследствии на совете

института был защищен ряд кандидатских и докторских диссертаций не только сотрудников института, но и других организаций. Среди них работы К.К. Намитокова (Харьков), Р.Е. Игудесмана, Е.В. Пасаха, Н.Д. Ахремчика (Минск, МТЗ), В.П. Чемисова, В.И. Абрамова (Полоцк), М.И. Бурды (Москва), В.Д. Дорофеева (Пенза), Л.М. Акуловича (Минск), В.А. Таскаева (Севастополь).

В оппонировании работ приняли участие авторитетные специалисты в этой области – М.Н. Улитин, Ф. Седыкин, Б.А. Агранат, Г.Н. Мещеряков, Е.В. Холоднов, В.С. Коваленко, Н.К. Фотеев и др.

В Университете защитили диссертационные работы: В.Е. Граков, А.А. Лабуда, В.А. Лапшин, А.В. Смирнов, в политехническом: А.Г. Головейко, Г.Н. Капельян, З.М. Юдовин, Л.П. Филлипов, А.Д. Худокормов (Минск), А.Я. Любчик (Кишинев).

На защиту докторской диссертации Н.В. Афанасьева в Минск приезжал Б.Р. Лазаренко. Оппонирующей организацией по докторской работе М.К. Мицкевича был Институт прикладной физики АН МССР. Общение с ведущими специалистами способствовало установлению контактов и расширению связей, взглядов, представлений, заключений о физике явления электрической эрозии, о разработках, основанных на основополагающих изобретениях Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко.

Поступила 26.02.03

Summary

The paper presents the basic information about research and elaboration in the sphere of metals electro-eroaion in Belarus. The research has been directed to the problems of measured shaping and strengthening of surface. A great amount of questions connected with the influence of current impulse on the metals has been investigated. The hypothesis about time-space discreteness of erosion process which has been stated in 1955 was experimentally proved. Bimetallic effect on the border of two metals was discovered. Dynamics of discharge in air, liquid, vacuum and on composition electrodes has been studied. An important contribution to learning of scientific base of surface shaping technology was made. Big amount of original technological processes has been developed. Specialists in the sphere of electric discharge machining were prepared.
