

УДК 537.525

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ СТРУЙНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ КАТОДОМ И МЕТАЛЛИЧЕСКИМ АНОДОМ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

© 2019 г. А. И. Попов<sup>1</sup>, \*, В. И. Новиков<sup>1</sup>, М. М. Радкевич<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГАОУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,  
«Институт металлургии, машиностроения и транспорта», Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: profbaikl@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.08.2018 г.

После доработки 02.10.2018 г.

Принята к публикации 10.10.2018 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований электрического разряда в режимах электролиза и электролитной плазмы между струйным электролитическим катодом и металлическим анодом при атмосферном давлении. Исследованы вольт-амперные характеристики разряда в процессе обработки образцов из меди М1 и нержавеющей стали 08Х18Н9Т с использованием полового токоподвода со скоростью подачи электролита  $w = 3.34\text{--}13.36$  м/с в диапазоне напряжений 20–565 В. Продемонстрированы закономерности развития электрического разряда в режиме электролиза в виде полусферы и электролитной плазмы в виде циклически повторяющихся форм: капли, цилиндра, конусов, эллипсоида, сфер и совмещенных форм. Выявлены особенности разряда: вращение, деструкция, отклонение, локализация, электрические пробои, свечение. Описано условие существования электролитно-плазменного разряда эллипсоидной формы. Зафиксированы особенности формирования разряда при межэлектродных зазорах 2–8 мм в стационарном режиме, и при его перемещении относительно поверхности металлического анода. Рассмотрено влияние формы разряда на уровень шума, вес образца, шероховатость поверхности.

DOI: 10.1134/S004036441903013X

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время изучение свойств и характеристик электрических разрядов (ЭР) со струйными электродами приобретает все большую актуальность в связи с раскрывающимися возможностями обработки поверхностей различных конструкционных материалов и в других сферах применения. При этом технологическое применение находят как режимы электролиза, так и режимы формирования электролитной плазмы и их комбинация. К специфике процессов плазмообразования со струйными электродами следует отнести экологическую чистоту, низкое потребление электроэнергии, локализованную поверхность контакта, формирование зоны разряда в широком диапазоне размеров и конфигураций за счет группы струй, возможность управления формой разряда при малых межэлектродных расстояниях, поддержание ЭР длительный период при замкнутой системе подачи электролита, наличие более широких технологических возможностей по сравнению с процессами в электролитической ванне. Поэтому струйные электролитно-плазменные процессы конкурируют с получением и применением ЭР в электролитической ванне

между двумя электродами [1–3]. В литературе рассматриваются способы получения разряда как с одной электролитической струей, так и с группой струй, а также перекрещенных электролитических струй разных полярностей [4–6]. Находит промышленное применение и комбинированный способ получения ЭР с электролитической струей в электролитической ванне [7]. Значительное количество работ посвящено формированию электролитно-плазменного разряда в неравновесной плазме с температурой электронного газа 1400–5000 К [6, 8, 9]. Среди способов получения струйного ЭР можно выделить применение электролитических и газовых [10] струй с различными видами токоподводов: полым, сплошным, единичным, наборным, магнетронной распылительной головкой [11], которые могут быть использованы как при струйной обработке, так и в электролитической ванне для проточных и непроточных электролитов. Кроме этого, указанные способы различаются по знаку прилагаемого потенциала к обрабатываемому изделию. Большинство работ посвящено формированию электролитно-плазменного разряда (ЭПР) между электролитическим анодом и металлическим катодом [12]. Ряд работ посвящен исследованию разряда между

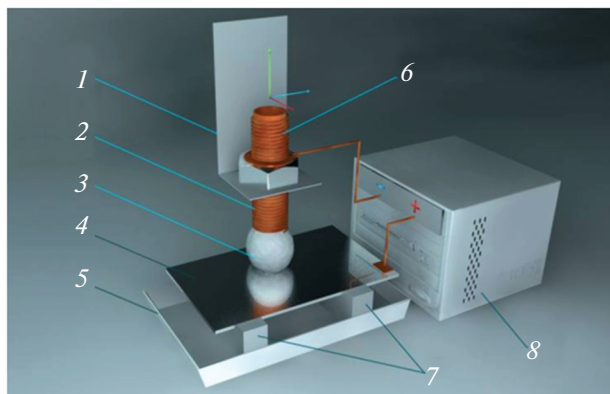
электролитическим катодом (ЭК) и металлическим анодом (МА) при пониженных давлениях [13]. Среди струйных процессов представляет интерес обработка электролитической струей с близко (2–8 мм) расположенным металлическим электродом [14, 15]. Однако, по мнению авторов, недостаточно изученными являются закономерности формирования и развития ЭР между струйным ЭК с использованием полого токоподвода и МА в стационарном состоянии при перемещении образца относительно поверхности в условиях атмосферного давления.

Цель данной работы – выявление закономерностей формирования ЭР между ЭК и МА при расстояниях между ними 2–8 мм в диапазоне давлений  $(9.9–10.1) \times 10^4$  Па в стационарном режиме и при перемещении. Задачей работы является определение вольт-амперных характеристик (ВАХ) процесса в режимах электролиза и электролитной плазмы, закономерностей развития формы и положения ЭР, условий сохранения формы ЭПР, уровня шума, влияния формы ЭПР на изменение веса МА и шероховатость поверхности.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МАТЕРИАЛЫ

Опытная экспериментальная установка (рис. 1) с источником питания, собранным по схеме Ларионова с бесступенчатой регулировкой напряжения, подробно описана в [16].

Эксперимент проводился при атмосферном давлении на 25 маркированных образцах размером  $45 \times 50 \times 1$  мм из меди М1 и 25 образцах из нержавеющей стали 08Х18Н9Т. Перед обработкой пластины взвешивались на лабораторных весах ВМ213М с ценой деления 0.001 мг. Для уменьше-



**Рис. 1.** Формирование ЭПР при  $U = 290$  В и скорости потока электролита  $w = 6.68$  м/с: 1 – держатель полого катода, 2 – полый катод, 3 – ЭПР в виде эллипсоида, 4 – МА, 5 – ванна для стока электролита, 6 – трубопровод подачи электролита, 7 – изолированные опоры, 8 – источник питания.

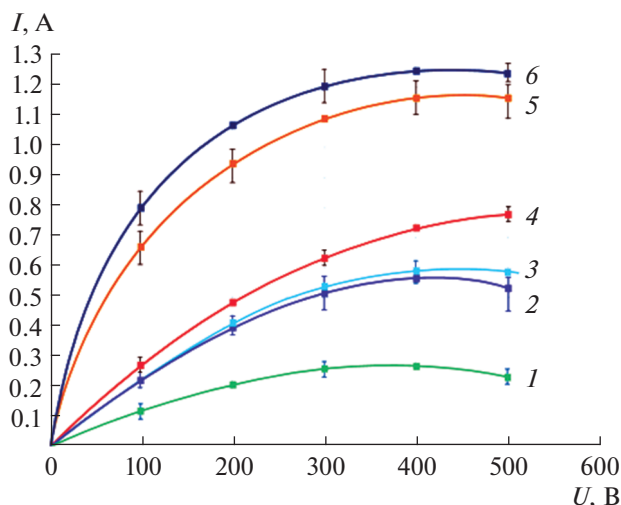
ния среднестатистической погрешности измерения каждая пластина проходила взвешивание не менее семи раз до обработки и не менее семи раз после обработки. Параметры ВАХ фиксировались аналоговыми и цифровыми приборами. Класс точности вольтметра и амперметра – 2.5. Форма ЭР в эксперименте фиксировалась видеозаписью. Съемка проводилась цифровой видеокамерой Canon EOS550D при дневном свете и в помещении с освещенностью менее 1.5 лк.

При обработке образцов из меди М1 использовался раствор сульфата аммония с концентрацией 10–50 г/л и лимонной кислоты 5–30 г/л в водопроводной воде. Для образцов из нержавеющей стали применялся сульфат аммония 2.7–27 г/л с добавлением аммония лимоннокислого 2.7–27 г/л в водопроводной воде. Перед обработкой электролит нагревался до температуры  $50^\circ\text{C}$ . Поддержание температуры в заданных пределах осуществлялось термоконтроллером с точностью измерения  $0.1^\circ\text{C}$ . Расход пропускаемого через полый катод электролита от капельного режима до струйного фиксировался ротаметром с точностью 2%. Напряжение, подводимое к каждому образцу, находилось в диапазоне 20–500 В и изменялось с шагом 20 В. Межэлектродный промежуток  $L$  изменялся в диапазоне 2–8 мм. Диаметр отверстия полого токоподвода  $d = 0.1–3$  мм. Полый катод выполнен в виде медной трубки, он служит соплом для подачи электролита и генератора электролитной плазмы. Образцы крепились в многоместном приспособлении на установке, и в таком состоянии проводилось изучение ЭР в стационарном режиме и при перемещении полого катода относительно поверхности МА. Время воздействия ЭР на поверхность МА – 5 мин. Перемещение ЭР выполнялось по программе станка с ЧПУ с точностью позиционирования полого катодного модуля 0.1 мм в стационарном режиме и в режиме перемещения ЭР относительно МА со скоростью 5–100 мм/мин. После обработки образцы промывались водопроводной водой от остатков электролита, сушились и повторно взвешивались. Оценка параметра шероховатости поверхности  $Ra$  проводилась прибором TR-200, анализ развития ЭР – с помощью программного продукта Sony Vegas Pro. Иллюстрации выполнены с использованием программного продукта Cinema4D.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

#### *ВАХ и формы разряда*

В результате проведенных экспериментов установлены ВАХ ЭР между ЭК и МА в диапазоне рабочих напряжений 20–500 В при скорости потока электролита 3.34–13.36 м/с (рис. 2). Установлено, что ВАХ при разряде между ЭК и МА



**Рис. 2.** ВАХ ЭР между полым катодом и МА из стали 08Х18Н9Т при  $w = 3.34$  (1), 6.68 (2, 5), 9.018 (6), 10.02 (3), 13.36 м/с (4); электролит: 1–4 – сульфат аммония (2.7 г/л), аммоний лимоннокислый (2.7 г/л); 5 – сульфат аммония (50 г/л) и лимонная кислота (30 г/л); 6 – сульфат аммония (15 г/л) и лимонная кислота (15 г/л).

при атмосферном давлении незначительно отличается током разряда от ВАХ между электролитическим анодом и металлическим катодом в ванне и между ЭК и МА в вакууме [12, 13]. Увеличение концентрации и объема пропускаемого электролита приводит к повышению плотности тока во всем исследуемом диапазоне. ВАХ имеет плавную нарастающую зависимость. При формировании струйного ЭР электролит играет существенную, но не определяющую роль. При формировании ЭК водопроводной водой ЭПР в целом повторяет свои формы, но при меньших межэлектродных промежутках и повышенном напряжении. В качестве примера можно привести формирование ЭПР в виде усеченного конуса правильной формы при  $U = 565$  В,  $I = 0.4$  А,  $w = 6.68$  м/с,  $L = 2$  мм.

Повышение концентрации электролита существенно снижает порог образования ЭПР между ЭК и МА. Авторы [9] указывают, что подбором электролита можно добиться зажигания разряда уже при 50–80 В. Для традиционных схем с металлическими электродами характерными являются следующие пороги образования плазмы: при дуговом разряде напряжение – от 10 В и ток –

от одного до сотен ампер; при тлеющем разряде напряжение – сотни вольт, плотность тока  $\sim 1$  мА/см<sup>2</sup>; при искровом разряде напряжение пробоя воздуха – 16 кВ/см [9]. В случае формирования ЭР между ЭК и МА при малых расстояниях между ними условия близки к случаю тлеющего разряда с ярко выраженными микроархивами на поверхности МА в зоне ЭПР при атмосферном давлении, низких напряжениях и повышенных плотностях тока до нескольких А/см<sup>2</sup>. Установлено, что в диапазоне напряжений 20–500 В и скорости потока электролита 3.34–13.36 м/с при высоте межэлектродного промежутка 4–6 мм одновременно с возрастанием напряжения ЭР имеет свои геометрические особенности, обусловленные прилагаемым напряжением, объемным расходом и концентрацией электролита. Определяющее влияние на форму ЭПР оказывает напряжение. Зафиксировано, что в режиме электролиза, в диапазоне 20–140 В ЭР принимает форму полусферы (рис. 3а). С увеличением напряжения в режиме ЭПР в диапазоне 140–500 В форма разряда в процессе горения не остается постоянной и циклически подвергается трансформациям вследствие разрядки конденсаторов и недостатка энергии электронов. При этом зафиксированы следующие формы циклического развития ЭПР: капля на срезе полого катода (рис. 3б), усеченный конус с основанием на срезе полого катода и вершиной на металлическом аноде (рис. 3в), цилиндр (рис. 3г), усеченный конус правильной формы (рис. 3д), усеченный конус с искривленной поверхностью (рис. 3е), усеченный с двух сторон эллипсоид (рис. 1), усеченная полусфера с искривленной поверхностью (рис. 3ж), полная деструкция разряда (рис. 3з). Установлено, что цикл трансформации ЭПР зависит от напряжения. В табл. 1 представлены формы ЭПР, отчетливо проявляющиеся в диапазоне напряжений 220–500 В. Характерной особенностью ЭПР между ЭК и МА является различие его форм даже при близких значениях напряжения. Наиболее характерными являются режимы 300 и 420 В, по которым можно проследить динамику развития ЭР и зафиксировать максимальное количество форм ЭПР и переходов между ними.

Установлено, что при фиксированном напряжении происходит циклическая смена форм раз-

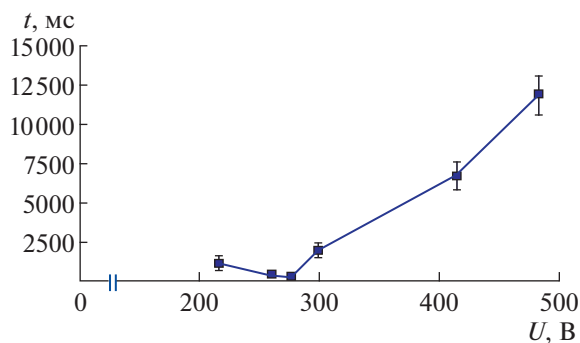


**Рис. 3.** Основные формы развития ЭР на образцах из меди М1 при  $U = 20$ –500 В и  $w = 9.018$  м/с, межэлектродном промежутке 5 мм, электролит – сульфат аммония (15 г/л) и лимонная кислота (15 г/л).

**Таблица 1.** Напряжения, при которых наиболее отчетливо проявляются формы ЭПР

Напряжение разряда, В	Форма ЭПР							
	капля на срезе полого катода	усеченный конус с основанием на срезе полого катода	цилиндр	усеченный конус правильной формы	усеченный конус с искривленной поверхностью	усеченный с двух сторон эллипсоид	усеченная полусфера с искривленной поверхностью	полная деструкция разряда
220	–	+	+	+	–	–	–	+
240	+	+	+	+	–	–	–	–
260	+	+	+	+	+	–	+	–
280	+	+	+	+	+	–	+	+
300	+	+	+	+	–	+	+	+
420	–	+	+	+	+	–	+	+
440	–	–	–	+	+	–	+	–
500	–	–	–	–	+	–	+	–

ряда. При разных напряжениях ЭР смена одной формы другой происходит за разный промежуток времени. Покадровый анализ формы разряда показал, что в диапазоне 220–440 В время цикла ЭР имеет значительный разброс и увеличивается с ростом напряжения (рис. 4). Среднее время цикла для диапазона 220–420 В оценивалось по наиболее четкой форме ЭПР – цилиндру, а время цикла для 440 В – по циклически повторяющейся форме конуса. Минимальное время цикла составило 260 мс, максимальное – 12083 мс. При напряжении 500 В ЭПР имеет основную форму в виде искривленного конуса, в отдельных случаях



**Рис. 4.** Среднее время цикла ЭР (цилиндр–цилиндр, конус–конус) при  $w = 9.018$  м/с, диаметре полого катода 3 мм, межэлектродном промежутке 5 мм, электролит – сульфат аммония (15 г/л) и лимонная кислота (15 г/л).

наблюдается переход разряда к усеченной полусфере с искривленной поверхностью. Кроме формы ЭПР и среднего времени цикла важной характеристикой является отношение  $d/D$  (табл. 2), где  $d$  – диаметр трубки полого токоподвода ( $d = 0.1–3$  мм),  $D$  – средний диаметр основания ЭР на МА. Для ЭР в режиме электролиза отношение  $d/D$  изменяется в диапазоне от  $1/1.25$  до  $1/8$ . Для ЭПР  $d/D = 0–1/5$ .

### Формы ЭР

**ЭПР в виде капли на срезе полого катода.** Капля на срезе полого катода при ЭР образуется в двух случаях: при первичном подводе полого токоподвода к поверхности МА и после деструкции разряда. В первом случае капля формируется на конце трубки полого токоподвода (рис. 3б) при ламинарном потоке электролита, чем обеспечивается непрерывность поддержания ЭР в режимах электролиза и ЭПР. Зафиксировано, что при скорости потока электролита менее 3.34 м/с и падении капли электролита на поверхность МА в режиме 20–140 В происходит вскипание малого объема жидкости.

При напряжении 220–500 В и подъеме токоподвода на высоту 5–8 мм после отрыва капли внутри нее возникает свечение белого цвета. При соприкосновении капли с ванночкой электролита (сформированной на поверхности МА падением капель электролита) менее чем за 30 мс происхо-

Таблица 2. Параметр  $d/D$  для ЭПР разных форм

Форма ЭПР	Полусфера	Капля на срезе полого катода	Усеченный конус с основанием на срезе полого катода	Цилиндр	Усеченный конус правильной формы	Усеченный конус с искривленной поверхностью	Усеченный с двух сторон эллипсоид	Усеченная полусфера с искривленной поверхностью	Полная деструкция разряда
$d/D$	0.8–0.125	0	10–1.43	1.25–1	1–0.25	0.33–0.25	0.8–0.2	0.33–0.2	0.33–0.2

дит растекание электролита ванночки по поверхности МА с образованием в центре углубления в виде полусферы и вспениванием верхних слоев электролита с возникновением радиальных лучей с белым свечением.

При деструкции ЭПР зафиксировано, что у среза полого катода не наблюдается капля электролита после электрогидравлического удара. Очевидно, распространение волны происходит во все стороны. Через 30 мс на конце токоподвода формируется треть капли с белым свечением в нижней части. С увеличением капли фиксируется увеличение объема разряда белого цвета в нижней части капли. При освещении менее 1.5 лк и  $U = 420$  В наблюдается свечение малинового цвета внизу капли. Особенность формирования разряда в капле в том, что видимое свечение разряда возникает при отсутствии соприкосновения капли с поверхностью МА.

**ЭР в виде полусферы.** При малых межэлектродных расстояниях ЭР в режиме электролиза между струйным ЭК и МА формируется уже при 20 В. В этом случае наблюдается характерная форма разряда в виде полусферы (рис. 3а), состоящая из пузырьков разных размеров, образующихся за счет вскипания электролита. С ростом напряжения между электродами до 80 В полусфера увеличивается в диаметре и высоте за счет роста температуры МА и увеличения пузырьков. При дальнейшем увеличении напряжения под действием сил электромагнитного поля полусфера сжимается и происходит уменьшение пузырьков. Зафиксированы размеры пузырьков ЭПР: при низком напряжении 20 В их диаметр – 5–15 мм, при повышении напряжения до 140 В происходит их сжатие до 1–2 мм. Невооруженным глазом фиксируется увеличение скорости их вращения вокруг оси полого токоподвода. Диапазон напряжений от 20 до 140 В соответствует электролизу соли.

**ЭПР в виде усеченного конуса с основанием на срезе полого катода и вершиной на МА.** Конус с основанием на срезе полого катода и вершиной, касающейся МА, характеризуется малым объемом ЭПР. При  $w = 6.68$  м/с,  $U = 290$  В,  $I = 1.2$  А от среза

полого катода вниз по поверхности ЭК зафиксирована “юбка” из множества вытянутых вниз “клиньев”, состоящих из пузырьков размером менее 0.5 мм. При этом наблюдается мелкопузырьковая фаза только вблизи среза полого катода при наличии практически прозрачного конуса, обращенного к поверхности МА. При обработке края образца между полым катодом и МА образуется острый усеченный конус с белым свечением у поверхности МА. При  $U = 420$  В и дневном свете вблизи поверхности МА наблюдается розовое свечение. Размеры усеченного конуса соответствуют соотношению  $d/D$  от 1/0.1 до 1/0.7.

**ЭПР в виде цилиндра.** Для цилиндрической формы ЭПР (рис. 3ж) с соотношением  $d/D = 1/0.8–1/1$  наблюдается мелкопузырьковая фаза по всему цилиндру ЭК. При дневном свете уже при 220 В фиксируется свечение ярко белого цвета вблизи МА. При освещенности менее 1.5 лк зафиксирован разряд белого цвета в виде кольца вблизи полого катода. Наблюдается сиреневое свечение выше и ниже кольца. Вблизи МА на участке высотой 0.4–0.5 от высоты ЭПР цвет разряда белый. Выше среза токоподвода разряда не наблюдается. Время перехода от капли к цилиндру при  $U = 420$  В в среднем составляет 280 мс. При этом деструкция проходит через потухший ЭПР, невидимый в темном помещении. Развитие цилиндрического и конического разряда малого радиуса сопровождается резким нарастанием звука до уровня 70 Дб.

**ЭПР в виде усеченного конуса правильной формы.** ЭПР в виде усеченного конуса является основной формой разряда в диапазоне 140–480 В. Повышение напряжения приводит к существенному изменению формы ЭПР, его характеристик и свойств. Подъем напряжения выше 140 В изменяет характерную форму ЭР в виде полусферы на ЭПР в виде расширяющегося к МА конуса (рис. 3д). При повышении напряжения от 140 до 220 В наблюдается сжатие разряда по диаметру, повышается интенсивность горения. Процесс сопровождается появлением при дневном свете микроразрядов вблизи поверхности МА, повышением

уровня шума до 40 Дб, увеличением скорости перемещения пузырьков вокруг оси полого токоподвода и уменьшением их диаметра до 1–0.5 мм. Усеченный конус имеет правильную форму при соотношении  $d/D = 1/3$ . При перемещении полого катода относительно поверхности МА со скоростью 100 мм/мин форма ЭПР сохраняется.

При повышении напряжения до 220 В и последующем приближении на расстояние 5 мм к поверхности МА при заряженном электролитическом конденсаторе формируется ЭПР в виде усеченного конуса правильной формы на МА с соотношением  $d/D = 1/4$ . Для ЭПР такой формы характерно изменение соотношения  $d/D$  в диапазоне  $1/2–1/4$ . Усеченный конус правильной формы при  $d/D = 1/2$  за счет небольшого объема характеризуется максимальной степенью ионизации. При дневном свете в прианодной зоне фиксируется свечение в виде круга ярко-белого цвета. Выше наблюдается ЭК молочного цвета. При  $U = 420$  В и освещении менее 1.5 лк фиксируется ярко-белое свечение по всему объему за исключением пространства между прикатодной областью и основным свечением. Ниже среза полого катода по поверхности и по периферии разряда наблюдается свечение малинового цвета. Время перехода ЭПР от цилиндрической струи к установившемуся разряду с конусом малого радиуса составляет 360 мс, такой разряд существует в среднем 200 мс.

**ЭПР в виде усеченного конуса с искривленной поверхностью.** Такая форма ЭПР (рис. 3е) характеризуется конической поверхностью конуса с продольными волнами. На поверхности МА формируются образованные криволинейной поверхностью конуса выступы и впадины, а в области среза полого токоподвода возникает зона застоя с образованием отдельных пузырьков большого размера до 12 мм в диаметре. ЭПР характеризуется соотношением  $d/D = 1/5$ . При дневном свете наблюдается свечение в основании усеченного конуса. При освещенности менее 0.5 лк видно ярко-белое свечение в центральной области ЭПР размером  $3d$  с участками малинового цвета и сиреневое свечение наружной криволинейной поверхности ЭПР. Зафиксировано последовательное вращение ЭПР искривленной формы в разные стороны по поверхности МА. Наблюдается искривление формы ЭПР до вытянутого вдоль оси вращения эллипса, треугольника, многогранника.

**ЭПР в виде усеченного с двух сторон эллипсоида.** При увеличении напряжения до 290–300 В при  $w = 6.68–9.018$  м/с наблюдается переход формы разряда от усеченного конуса правильной формы к усеченному с двух сторон эллипсоиду (рис. 1) Формирование струйного ЭПР данной формы

имеет ряд характерных особенностей. Он формируется в небольшом объеме, в котором происходит постоянная смена электролитической жидкости, ее испарение и поступление нового электролита с оставлением мокрого следа на поверхности МА. Одной из основных особенностей ЭПР данной формы является режим его динамического равновесия. Объем поступающего электролита в зону ЭПР равен объему расходуемого электролита

$$\frac{dV_{\text{пос}}}{dt} = \frac{dV_{\text{расх}}}{dt},$$

где  $V_{\text{пос}}$  и  $V_{\text{расх}}$  – объемы поступающего и расходуемого электролита. При этом

$$\frac{dV_{\text{расх}}}{dt} = \frac{dV_{\text{расх. исп}}}{dt} + \frac{dV_{\text{расх. след}}}{dt}.$$

Здесь  $V_{\text{расх. исп}}$  – объем испаряемого электролита,  $V_{\text{расх. след}}$  – объем расходуемого электролита на след по поверхности. По данным опытов,  $V_{\text{расх. след}}$  не превышает 1–2%.

Область максимальной плотности теплового потока формируется в объеме ЭПР за счет выделяемой мощности, которую можно оценить как  $q = \frac{IU}{S}$ , где  $U = 290–300$  В – напряжение между поверхностью изделия и срезом катодного модуля при максимальной силе тока  $I = 1.2$  А,  $S$  – площадь поверхности контакта электролитной плазмы и МА в виде круга с диаметром 1 см [13]. Тогда выделяемая на поверхности детали мощность составляет 443.3–458.6 Вт/см<sup>2</sup>.

За счет этого формируется пузырьковый объем, имеющий форму усеченного с двух сторон эллипсоида и при избытке электролита искривленную книзу. При этом данный объем достаточно устойчив и позволяет его перемещать по поверхности МА. Очевидно, данный объем сохраняет устойчивое равновесие за счет сил поверхностного натяжения электролита и приложенного электромагнитного поля. Силы поверхностного натяжения связывают пузырьки между собой, но слишком слабы, чтобы без электромагнитного поля фиксировать данный объем. Отмечено, что при выключении напряжения между электродами данный объем разрушается менее чем за 30 мс. Зафиксировано, что пузырек воздуха с размером, соответствующим диаметру трубопровода подачи электролита, проходя сквозь эллипсоидный пузырьковый объем ЭПР, разрушает его. В этом случае ЭПР также не может быть удержан в своем объеме силами электромагнитного поля.

Таким образом, ЭПР в виде усеченного с двух сторон эллипсоида сохраняется частично за счет сил поверхностного натяжения электролита и

преимущественно за счет влияния электромагнитного поля. Такой ЭПР представляет собой вспененную электролитическую струю и является электрическим проводником, на который воздействует электромагнитное поле. Выделение и расход теплоты в процессе формирования ЭПР связаны балансом теплоты

$$Q_{\text{ток}} = Q_a + Q_k + Q_{\text{эл}} + Q_{\text{пар}} + Q_{\text{изл}}.$$

Левая часть уравнения соответствует количеству теплоты, выделяемой в процессе горения ЭПР (за время  $t$ ) при прохождении электрического тока  $Q_{\text{ток}} = UI$ , правая часть – распределению тепловой энергии в процессе формирования ЭПР. Составляющие  $Q_a$ ,  $Q_k$ ,  $Q_{\text{эл}}$ ,  $Q_{\text{пар}}$ ,  $Q_{\text{изл}}$  – тепловые потоки, направленные соответственно в МА, полый катод, стекающий электролит, окружающую среду в виде пара и в виде излучения. Здесь  $Q_{\text{эл}} = cm\Delta T$ , где  $c$ ,  $m$  – удельная теплоемкость и масса электролита,  $\Delta T$  – увеличение его температуры;  $Q_a = R_{\text{разряд}}I$ , где сопротивление разряда  $R_{\text{разряд}} = R_{\Sigma} - R_{\text{пр}} - R_{\text{э}}$ ,  $R_{\Sigma}$  – общее сопротивление цепи,  $R_{\text{пр}}$  и  $R_{\text{э}}$  – сопротивления проводов и электролита;  $Q_{\text{пар}} = Nu\lambda_{\text{ж}}(T_{\text{пар}} - T_{\text{ж}})/x$ , где  $Nu$  – число Нуссельта,  $\lambda_{\text{ж}}$  – теплопроводность жидкости (электролита),  $T_{\text{пар}}$  и  $T_{\text{ж}}$  – температуры пара и жидкости. Количество теплоты  $Q_{\text{изл}}$  в области исследуемых напряжений 280–500 В не превышает 5% от  $Q_{\text{ток}}$  [14].

**ЭПР в виде усеченной полусферы с искривленной поверхностью.** Следующей характерной циклической формой ЭПР является усеченная полусфера с искривленной поверхностью. Она отчетливо наблюдается при  $U = 420$  В и связана со снижением напряженности электрического поля. При этом происходит увеличение объема ЭПР за счет роста пузырьковой фазы выше уровня среза полого токоподвода (рис. 3ж). Данная форма характеризуется изменением цвета разряда и интенсивности его свечения. Выше среза токоподвода формируются несколько зон с удержанием больших пузырьков размером до 12 мм в неподвижном состоянии. Наблюдается искривление формы ЭПР в виде усеченной полусферы. По периферии разряд имеет разные границы в виде круга, треугольника, многоугольника, каждая из них может быть искривлена. Фиксируются единичные разряды по периферии ЭПР. В прикатодной области и по поверхности усеченной сферы разряд бледно-синего цвета как ниже, так и выше среза токоподвода. При увеличении объема разряда свечение в прианодной зоне ослабевает, и единичные разряды высокой интенсивности фиксируются только по периферии искривленной полусферы.

### Особенности ЭПР

**Полная деструкция ЭПР.** Разряд поднимается вверх и практически не контактирует с поверхностью МА. Пузыри электролита диаметром 1–2 мм зафиксированы только в прикатодной области. Полная деструкция разряда сопровождается электрогидроударом, при этом он имеет мелкодисперсную фазу молочного цвета. Изменение формы разряда при  $U = 420$  В происходит менее чем за 30 мс. Наблюдается взрывной переход парогазовой оболочки пузырькового типа в мелкодисперсную парогазовую среду. При этом происходит интенсивное испарение электролита из парогазовой фазы и верхних вспененных слоев ванночки электролита, растекающегося с высокой скоростью по поверхности МА с образованием вогнутой полусферы по оси полого катода и формированием волны. До момента деструкции напряжение разряда растет, а в момент пробоя резко падает. Это соответствует минимальному заряду электролитического конденсатора. Разряд полностью теряет свою форму и перестает существовать. На срезе полого токоподвода не наблюдается капля электролита (рис. 3б). Характер электрогидроудара внешне похож на соприкосновение падающей капли электролита с поверхностью МА. При падении капли в ванночку электролита наблюдаются четко выраженные радиальные лучи (кистевые разряды) в количестве пять–семь с разрядом белого цвета. А деструкция при  $U = 260$  В происходит на гребне поперечной волны, от ванночки электролита в радиальном направлении отходят четко выраженные разряды (более 5 на см), образующие продольные волны. При  $U = 420$  В поверхность ванночки электролита имеет молочный цвет и характеризуется более равномерным распределением разряда. Падающей капли или струи электролита при электрогидроударе не зафиксировано.

**Вращение ЭПР.** Зафиксировано круговое вращение по поверхности МА ЭПР в виде усеченного конуса правильной формы (рис. 3д), усеченного конуса с искривленной поверхностью (рис. 3е), усеченного с двух сторон эллипсоида (рис. 1), усеченной полусферы с искривленной поверхностью (рис. 3ж). При этом движение происходит как по часовой, так и против часовой стрелки. При перемещении относительно поверхности МА ( $U = 290$ – $300$  В,  $w = 6.68$ – $9.018$  м/с) ЭПР в виде усеченного с двух сторон эллипсоида не находится в постоянном положении и объеме, а описывает эксцентричное движение вокруг оси полого катода, сохраняя при этом свою форму. Зафиксировано при  $U = 300$  В растекание ЭПР по поверхности анода с формированием областей в виде двух широких лопастей гребного винта, вращающихся по поверхности то в одну, то в другую

сторону. Данное явление описано в [12], однако не приведено его объяснение. По-видимому, в процессе формирования разряда и перемещения пузырьков внутри пузырьковой области происходит перезарядка и противопоставление отдельных областей пузырькового объема относительно других с таким же знаком заряда. В результате начинается взаимное отталкивание пузырьков или пузырьков объемов. Однако за счет сил электромагнитного поля объем сжимается и удерживается, закручиваясь в разные стороны. Скорость вращения разряда при повороте на  $90^\circ$  составляет  $7.9 \times 10^5$  об./мин.

**Разбрызгивание ЭПР.** Зафиксировано разбрызгивание разряда при увеличении напряжения выше 280 В вблизи анода. С ростом напряжения интенсивность разбрызгивания увеличивается. Данный процесс является следствием выталкивания микрообъемов ЭПР силами, значительно превышающими силы сжатия. Предполагается, что выбросы локальных объемов происходят при деструкции разряда в момент электрогидроудара, направленного внутрь ЭР. Скорость движения таких микрообъемов достигает 6 м/с. Зафиксировано, что данные микрообъемы несут на себе заряд и разряжаются искровым разрядом при соприкосновении с отрицательно заряженным токоподводом в виде пластин на расстоянии до 200 мм от оси ЭПР.

**Отклонение оси ЭПР.** Предполагая, что объемы электролитной плазмы в ЭР подвержены перезарядке, следует полагать и перезарядку поверхности МА относительно электролитной плазмы. Это сопровождается несколькими сходными явлениями: отклонением оси ЭПР при неподвижном положении полого катода, отталкиванием ЭПР от МА при выходе за пределы анода, раскачиванием ЭПР в разные стороны при перемещении. Отклонение оси ЭПР относительно оси неподвижного полого катода происходит до  $30^\circ$ . Это объясняется перезарядкой поверхности МА, приобретающей отрицательный заряд, что приводит к отталкиванию ЭПР. После стекания заряда из этой области, разряд возвращается в вертикальное положение. Особенно явно данное явление наблюдается при выходе ЭПР за геометрические пределы МА. Зафиксировано отталкивание ЭПР от анода с его изгибанием вокруг края образца в форме дуги, что можно объяснить перезарядкой поверхности образца отрицательным зарядом.

**Уровень шума ЭПР.** Анализ показывает, что форма ЭПР коррелирует с формой импульсов на звуковой дорожке. При напряжении 290 В и  $w = 6.68$  м/с их амплитуда имеет два характерных участка: большой интенсивности с амплитудой

звукового сигнала до 60 Дб и средней интенсивности с амплитудой до 25–30 Дб.

Зафиксировано, что суммарное среднее время развития разряда с уровнем шума, превышающим фоновый, составляет 5.1 с, в том числе участок большой интенсивности равен 1.6 с. Участок большой интенсивности соответствует последовательному развитию ЭПР следующих форм: усеченного конуса с основанием на срезе полого катода и вершиной на МА (23% от выборки), цилиндра (41%), усеченного конуса правильной формы с соотношением  $d/D = 1/3$  (36%). После высоких значений амплитуды звуковое давление от разряда резко уменьшается, что свидетельствует об увеличении площади поверхности, занимаемой ЭР, и переходе к другим формам ЭПР.

**Электрические пробои.** Формирование пробоя происходит преимущественно при деструкции ЭПР в виде усеченной полусферы с искривленной поверхностью. Наблюдаются электрические пробои в нескольких местах: на острых кромках, по ее наружной и внутренней поверхности полого катода, на поверхности МА в центральной зоне ЭПР и по его периферии. Зафиксированы пробои, связанные с разрушением острых кромок полого токоподвода и осаждением расплавленных капель на поверхность МА, и пробои на поверхности МА, приводящие к зонам оплавления в виде сферических лунок размером 0.1–0.3 мм при напряжениях до 375 В и до 0.8–1.2 мм в виде цветка при более высоких напряжениях. Все пробои характеризуются разрядом зеленого или сине-зеленого цвета, значит, разряд горит в парах меди трубки полого катода и МА. По размерам вспышки разряды на поверхности МА не более 8 мм в диаметре. Для пробоя на срезе полого катода при  $U = 420$  В зафиксирован максимальный размер разряда диаметром до  $20d$  белого цвета. Максимальный ток электрического пробоя – 3.5 А.

Физическую модель электрического пробоя можно представить в следующем виде. Данный вид пробоя имеет большое сходство с искровым пробоем при магнетронном распылении проводящей минералокерамики при низком вакууме. Поверхность образца довольно хорошо распыляется до момента возникновения на поверхности непроводящей фазы в виде  $Al_2O_3$ . На данной фазе происходит накопление заряда противоположного знака относительно основной поверхности. В момент, когда потенциал превысит напряжение пробоя, происходит стекание заряда на поверхность с разрушением  $Al_2O_3$ . Непроводящая фаза работает, как обкладка конденсатора, и является накопителем заряда. В данном случае накопителем заряда являются непроводящие зоны вследствие недостаточной подготовки поверхности МА (окисные пленки, жиры, зерна абразива и



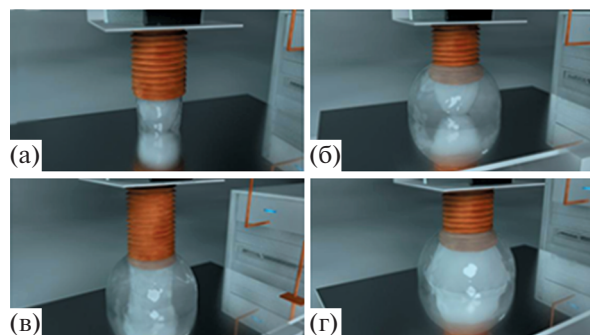
наличие двойного слоя). Для поверхности полого токоподвода, по-видимому, более предпочтительна модель электрического пробоя с поверхности острых кромок полого катода и продуктов осаждения, формирующихся в виде “юбки” с клиновидными острями вниз. Это связано с высокой напряженностью электрического поля в ЭПР до  $(6-7) \times 10^4$  В/м [17]. Для обеих моделей характерным является возникновение искрового разряда в канале с наиболее низким сопротивлением и максимальной напряженностью электрического поля с образованием в момент пробоя лавинной ионизации и потоком электронов на анод, а положительных ионов на катод. Искровой разряд характеризуется высокой температурой электронного газа, превышающей 4000 К. Температура и время воздействия искрового разряда определяют характер разрушения поверхности.

**Влияние времени горения ЭПР на полый токоподвод.** В результате продолжительного времени горения ЭПР (более 20 мин) на срезе полого токоподвода осаждаются продукты взаимодействия электролита с поверхностью МА. Их форма имеет вид “юбки” со множеством вытянутых вниз “клиньев”. При пробое вблизи полого катода происходит разрушение “юбки” с рассыпанием продуктов пробоя на МА. При вторичном попадании продуктов в зону ЭПР взаимодействия с ними не зафиксировано, и они смываются отработанным электролитом с поверхности МА.

**Влияние диаметра токоподвода на ЭПР.** Зафиксировано, что в случае полого токоподвода диаметром 0.1 мм и межэлектродного промежутка 3–4 мм при напряжениях 180–220 В происходит электрический пробой, разрушающий токоподвод. Очевидно, это связано с высокой напряженностью электрического поля на кромках токоподвода.

**Влияние скорости потока электролита на ЭПР.** При межэлектродном промежутке 5–6 мм и напряжении на МА 260 В и  $w \geq 10.02$  м/с ЭК вначале имеет цилиндрическую форму. Однако через несколько десятков секунд происходит локализация струи в усеченный конус с основанием на срезе полого катода и вершиной на МА и формирование в медном аноде толщиной 1 мм отверстия. При неподвижном токоподводе сквозное отверстие формируется за 94 с. При начальной скорости более 13.36 м/с поток электролита с высокой скоростью равномерно растекается в разные стороны и создает пузырьковую чашу с коническим стоком электролита. Визуальными средствами контроля на дне чаши в зоне высокой скорости электролита пузырьковая фаза не фиксируется. Размеры пузырьков сверху чаши  $\sim 1-2$  мм.

**Совмещение разных форм ЭПР.** При  $U = 260$  В и  $w = 9.018$  м/с зафиксировано совмещение ЭПР



**Рис. 5.** Совмещенные формы ЭПР при  $U = 260$  В,  $w = 9.018$  м/с, межэлектродном промежутке 5 мм, электролит – сульфат аммония (15 г/л) и лимонная кислота (15 г/л).

разных форм (рис. 5). Как правило, внутренняя форма ЭПР молочного цвета, характеризующего мелкодисперсную пузырьковую фазу с диаметром пузырьков 0.5–1.5 мм. Внешняя оболочка – прозрачная с пузырьками менее 0.5 мм. Время существования совмещенных форм ЭПР  $\sim 30$  мс.

**Цвет ЭПР.** Одной из характеристик ЭПР является его цвет. Ввиду неравновесности ЭР распределение цвета неравномерно по высоте межэлектродного промежутка ( $L$ , мм) внутри разряда, снаружи и по периферии. Величина  $h$  в табл. 3 характеризует размер участка данного цвета относительно межэлектродного промежутка  $L$ . При  $U = 260$  В и  $w = 9.018$  м/с разряд в прикатодной зоне прозрачный или молочного цвета и имеет белое свечение в узкой прианодной зоне.

Повышение напряжения приводит к ионизации и изменению свечения ЭПР. Оно меняется от синего, сиреневого, малинового до ярко-белого, что говорит о переходе в диффузный разряд (табл. 4).

При  $U = 420$  В на верхней поверхности усеченного конуса правильной формы, усеченного конуса с искривленной поверхностью, усеченной полусферы с искривленной поверхностью зафиксированы как частичная ионизация оболочки и объема пузырьков ЭПР, так и полная ионизация пузырьков (табл. 5).

Свечение разряда вызвано рекомбинацией атомов, зависит от сорта электролита, и его цвет изменяется от синего до белого. Синий цвет соответствует самой низкой энергии ионизации ЭПР на периферии и в его верхней части. Сиреневый – низкой энергии ионизации при уменьшении энергии разряда и переходе его формы к усеченному конусу с искривленной поверхностью. Малиновый цвет наблюдается при средней энергии ионизации и контактирует с ярко-белым цветом ЭР. Белый цвет соответствует самой высокой

Таблица 3. Цвет ЭПР при  $U = 260$  В

Зона ЭПР	Форма ЭПР				
	цилиндр $d/D = 1/0.8$	цилиндр $d/D = 1/1$	усеченный конус правильной формы $d/D = 1/1.5$	усеченная полусфера с искривленной поверхностью $d/D = 1/3$	полная деструкция разряда
Прикатодная	$h = 0.1L$ прозрачный	$h = 0.1L$ молочный	$h = 0.1L$ молочный	$h = 0.1L$ молочный	$h = 0.1L$ молочный
Средняя	$h = 0.8L$ прозрачный	$h = 0.8L$ молочный	$h = 0.8L$ молочный	$h = 0.8L$ молочный	$h = 0.4L$ полупрозрачный
Прианодная	$h = 0.1L$ белое свечение	$h = 0.1L$ белое свечение	$h = 0.1L$ белое свечение	$h = 0.1L$ молочный	$h = 0.3L$ радиальные лучи в ванночке электролита, молочный

Таблица 4. Свечение ионизированного ЭПР при  $U = 420$  В

Зона ЭПР	Форма ЭПР							
	капля на срезе полого катода	усеченный конус с основанием на срезе полого катода $d/D = 1/0.3$	цилиндр $d/D = 1/0.8$	цилиндр $d/D = 1/1$	усеченный конус правильной формы $d/D = 1/1-1/2$	усеченный конус с искривленной поверхностью $d/D = 1/2.5$	усеченный конус с искривленной поверхностью $d/D = 1/5$	усеченная полусфера с искривленной поверхностью
Прикатодная зона	$h = 0.1L$ прозрачный	$h = 0.1L$ прозрачный	$h = 0.2L$ сиреневый	$h = 0.1L$ сиреневый	$h = 0.1L$ малиновый	$h = 0.1L$ малиновый	$h = 0.1L$ сиреневый	$h = 0.1L$ белое свечение
Средняя зона	$h = 0.3L$ малиновый	$h = 0.7L$ прозрачный	$h = 0.4L$ сиреневый	$h = 0.2L$ белое свечение $h = 0.3L$ сиреневый	$h = 0.4L$ белое свечение	$h = 0.4L$ белое свечение	$h = 0.5L$ белое свечение	$h = 0.5L$ белое свечение
Прианодная зона	Нет кон- такта	$h = 0.2L$ : белое свечение	$h = 0.4L$ белое свечение	$h = 0.4L$ белое свечение	$h = 0.5L$ белое свечение	$h = 0.5L$ белое свечение	$h = 0.4L$ белое свечение	$h = 0.4L$ белое свечение
Верх разряда						Сиреневый	Сиреневый	Синий
Периферия разряда							Синий	Синий

Таблица 5. Свечение пузырьков ЭПР при  $U = 420$  В

Место ионизации	Оболочка пузырька	Частичный объем пузырька	Полный объем пузырька
Цвет свечения ионизации	Белый	Сиреневый	Сиреневый
	Малиновый	Малиновый	Малиновый
	Не фиксируется	Ярко-белый	Ярко-белый

энергии ионизации ЭПР при его переходе в диффузный разряд. Температура газа в этой области по данным [6] может достигать 1400–2000 К.

**Изменение веса МА.** Отмечено изменение веса МА в зависимости от формы ЭР (рис. 6). Минимальная убыль массы МА зафиксирована при ЭР в виде полусферы при напряжениях до 140 В. Также незначительная убыль массы имеет место при напряжениях более 400 В. Максимальное влияние ЭР на убыль массы МА наблюдается при циклически изменяющейся фазе “капля—полная деструкция ЭПР” при напряжении 180–240 В.

**Эффект полирования.** Наблюдается эффект полирования поверхности МА за счет ЭПР различных форм (рис. 7) при скорости перемещения полого токоподвода 50 мм/мин. Изменение шероховатости поверхности происходит в двух зонах. Первая зона находится под перемещающимся полым катодом, вторая зона соответствует общему пятну контакта ЭПР, перемещаемому по поверхности МА. Первая зона представляет собой полированную область с высокой отражательной способностью, ее ширина равна диаметру полого токоподвода. Предположительно ЭПР оказывает максимальное влияние на микронеровности поверхности при максимальной амплитуде звуковой волны. Самый громкий звук соответствует формам ЭПР в виде усеченного конуса с основанием на срезе полого катода, цилиндра, усеченного конуса правильной формы. При низкой громкости звука происходит ослабленное воздействие плазмы разряда на поверхность МА. При ЭПР в виде усеченного конуса с искривленной поверхностью и усеченной полусферы с искривленной поверхностью наблюдается увеличение объема разряда во все стороны, что приводит к увеличению длины пробега электронов, снижению степени ионизации и воздействия на поверхность МА. Поэтому вторая зона представляет собой матовую поверхность с параметром шероховатости поверхности  $Ra$  меньше, чем у основного материала МА, и формируется участками ЭПР, выходящими за пределы токоподвода. Заряженная емкость электролитического конденсатора вносит свой вклад. Поверхности, близкие к краю образца, полируются быстрее.

Для формы ЭПР в виде искривленной сферы с выбросами электролитной плазмы наблюдается ухудшение шероховатости поверхности. Минимальный параметр шероховатости поверхности для образцов меди М1  $Ra = 0.1$  мкм.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Значительный интерес представляет механизм трансформации разряда в ту или иную форму, определяющий его технологические возможно-

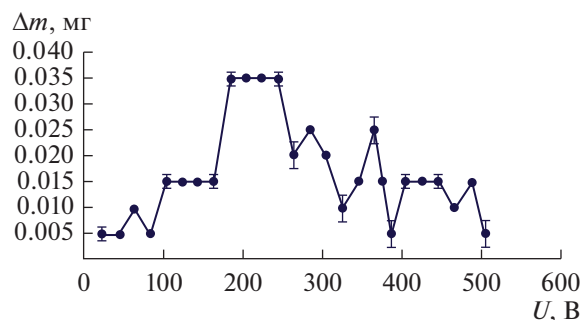


Рис. 6. Зависимость убыли массы материала от напряжения между электродами, при  $w = 9.018$  м/с, межэлектродном промежутке 5 мм, электролит — сульфат аммония (15 г/л) и лимонная кислота (15 г/л).

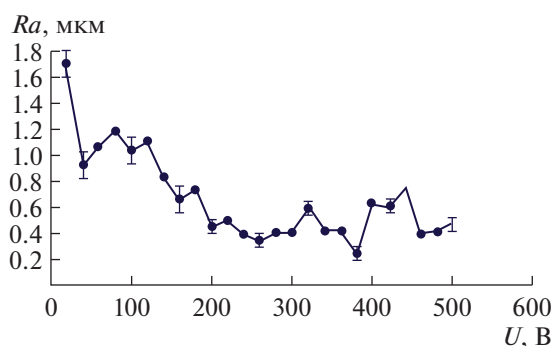


Рис. 7. Зависимость параметра шероховатости поверхности МА от напряжения между электродами при  $w = 9.018$  м/с, межэлектродном промежутке 5 мм, электролит — сульфат аммония (15 г/л) и лимонная кислота (15 г/л).

сти. Электрический разряд между ЭК и МА рассматривается как проводник тока, на который действуют силы скрещенных электрического и магнитного полей. Форма силовых линий этих полей между полым катодом и плоским МА подобна форме колокола. Внутри “колокола” в зависимости от приложенного напряжения силовые линии электрического поля образуют фигуры в виде гиперболоида, цилиндра, усеченного эллипсоида, полусферы. При малом межэлектродном расстоянии и рассматриваемых значениях скорости потока электролита и приложенного напряжения электромагнитные поля формируют ЭР, приближенно “вписывающийся” в силовые линии электромагнитного поля. Приложенное по касательной к формируемым фигурам ЭР магнитное поле вращает разряд попеременно в разные стороны. Это может быть связано с двумя основными факторами. Первый фактор — перезарядка поверхности МА из-за возникновения двойного слоя, приводящая к отклонению ЭР от своей оси. Это влияет на возникновение второго

фактора, которым является перезарядка оболочек пузырьков и их объемов противоположным знаком вследствие их дипольной природы. Возникновение двух отрицательно заряженных объектов приводит к отталкиванию пузырьков от заряженной поверхности. Кроме этого, с изменением знака заряда пузырьков изменяется направление действия силы Лоренца, что приводит к их вращению в противоположную сторону. При вращении электромагнитное поле сжимает разряд, предотвращая его растекание по поверхности. Падение напряжения в цепи при разрядке электролитического конденсатора определяет динамические процессы разряда. Под действием электрогидравлического удара происходит разбрызгивание микрообъемов разряда в стороны и воздействие ударной волны на поверхность МА. Изменение формы разряда во многом зависит от приложенного напряжения, оказывающего значительное влияние на размеры и ионизацию пузырьковой фазы. Выявлены закономерности, показывающие, что с увеличением напряжения диаметр оболочки пузырьков уменьшается. Увеличение концентрации электролита приводит к ионизации разряда при более низких напряжениях и росту тока разряда. Это оказывает более сильное воздействие на форму разряда с уменьшением соотношения  $d/D$ . При увеличении расстояния от оси полого катода и расстояния от МА размер пузырьков увеличивается. Их размер выше среза катода и наружной границы ЭР всегда максимален вследствие ослабления электрического поля. С ростом напряжения увеличивается степень ионизации ЭР и интенсивность его свечения. Ионизация оболочки пузырька происходит вначале за счет ионной проводимости, а затем его внутреннего объема за счет электронной проводимости, что приводит к стиранию границы между оболочкой пузырька и его внутренним объемом. Ионизация границ пузырьковой фазы приводит к переходу поверхностного тлеющего разряда в объемный.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены основные формы ЭПР между ЭК и МА в диапазоне  $U = 20\text{--}565$  В при межэлектродном промежутке 2–8 мм.

2. Показана последовательность развития разряда в пузырьках электролита с возникновением ионизированной области вокруг оболочки и дальнейшим формированием диффузного разряда во внутреннем объеме пузырька.

3. Выявлены особенности развития ЭПР при разных объемах пропускаемого электролита, разных расстояниях между электродами и разных напряжениях.

4. Установлены условия существования ЭПР эллипсоидальной формы между полым катодом и МА.

5. Установлены ВАХ ЭПР между ЭК и МА.

6. Изучено влияние ЭПР на уровень шума, изменение веса образцов, параметр шероховатости поверхности.

Авторы выражают благодарность графическому дизайнеру Д.А. Поповой за подготовку иллюстраций к работе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электролитно-плазменная обработка материалов / Под ред. Куликова И.С. Минск: Беларуская навука; Сосны, 2010. 232 с.
2. Новиков В.И., Попов А.И., Тюхтяев М.И., Зейдан М.Н. Возможности электролитно-плазменного полирования при обработке деталей с различным начальным уровнем шероховатости поверхности // Металлообработка. 2011. № 1(61). С. 13.
3. Nestler K., Böttger-Hiller F., Adamitzki W., Glowa G., Zeidler H., Schubert A. Plasma Electrolytic Polishing – an Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range // Proc. CIRP. 2016. V. 42. P. 503.
4. Новоселов М.В., Шиллинг Н.Г., Рудагин А.А., Радкевич М.М., Попов А.И. Оценка возможности полирования нержавеющей стали струйной электролитно-плазменной обработкой // Вестн. ПНИПУ. 2018. № 1. С. 95.
5. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. Электрические разряды в парогазовой среде с нетрадиционными электродами // Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. Фортова В.Е. М.: Наука, 2000. С. 241.
6. Баринев Ю.А., Школьник С.М. Зондовые измерения в разряде с жидкими неметаллическими электродами в воздухе при атмосферном давлении // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 3. С. 31.
7. Гайсин Ал.Ф. Многоканальный разряд между проточным электролитическим катодом и металлическим анодом при атмосферном давлении // ТВТ. 2006. Т. 44. № 3. С. 343.
8. Баринев Ю.А., Школьник С.М. Разряд с жидким неметаллическим катодом (водопроводная вода) в потоке воздуха атмосферного давления // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 11. С. 156.
9. Словецкий Д.И., Терентьев С.Д., Плеханов В.Г. Механизм плазменно-электролитного нагрева металлов // ТВТ. 1986. Т. 24. № 2. С. 353.
10. Witzke M., Rumbach P., Go D.B., Sankaran R.M. Evidence for the Electrolysis of Water by Atmospheric-Pressure Plasmas Formed at the Surface of Aqueous Solutions // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 5.
11. Попов А.И., Радкевич М.М., Медко В.С., Шиллинг Н.Г., Рудагин А.А. Магнетронная распылительная головка. Патент на изобретение РФ № 2656318. Кл. МПК: C23C14/35. 04.06.2018.

12. *Гайсин А.Ф.* Паровоздушный разряд между электролитическим анодом и металлическим катодом при атмосферном давлении // ТВТ. 2005. Т. 43. № 5. С. 684.
13. *Гайсин А.Ф., Абдуллин И.Ш.* Характеристики электрического разряда между струйным электролитическим катодом и твердым анодом при пониженных давлениях // Вестн. Казанск. технол. ун-та. 2011. № 8. С. 81.
14. *Попов А.И., Тюхтяев М.И., Радкевич М.М., Новиков В.И.* Анализ тепловых явлений при струйной фокусированной электролитно-плазменной обработке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 4 (254). С. 141.
15. *Гайсин А.Ф., Сон Э.Е.* Паровоздушные разряды между электролитическим катодом и металлическим анодом при атмосферном давлении // ТВТ. 2005. Т. 43. № 1. С. 5.
16. *Попов А.И., Радкевич М.М., Кудрявцев В.Н., Захаров С.В., Кузьмичев И.С.* Установка для электролитно-плазменной обработки турбинных лопаток. Патент на изобретение РФ № 2623555. Кл. МПК: С25F7/00. 27.06.2017.
17. *Алексеев Ю.Г., Королев А.Ю., Паршута А.Э., Нисс В.С.* Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокостепенного электрического поля // Наука и техника. 2017. Т. 16. № 5. С. 391.