

УДК 621.385

Процесс эрозии в малогабаритном управляемом вакуумном разряднике с искровым поджигом

В. И. Асюнин, С. А. Бушин, С. Г. Давыдов, А. Н. Долгов,
А. В. Пилюшенко, А. А. Пшеничный, В. О. Ревазов, Р. Х. Якубов

Приведены результаты исследования процесса эрозии в малогабаритном вакуумном разряднике с искровым поджигом методами электронной микроскопии, рентгенофлуоресцентного элементного анализа и масс-спектрометрии продуктов газовой выделения. Изучены закономерности эрозии и переноса вещества металлических элементов разрядного устройства и диэлектрика, разряд по поверхности которого инициирует процесс коммутации. Обнаружено влияние окисной пленки, присутствующей на поверхности материала катода, на развитие дугового разряда в коммутаторе.

PACS: 52.80.-s

Ключевые слова: вакуумный разрядник, эрозия электродов, оксидная пленка, температурный градиент.

Введение

Интерес к искровому и дуговому разрядам в вакууме вызван их успешным применением в высоковольтной и силовой электронике: устройствах коммутации и размыкания цепей, приборах распыления материалов для тонкопленочных технологий, ионных источниках. Задача, которую приходится решать авторам, состоит в поиске путей дальнейшего повышения эффективности вакуумных коммутаторов на основе углубленного исследования процессов, происходящих в них.

Цель настоящей работы — исследование механизма эрозии элементов вакуумного коммутирующего устройства с искровым поджигом.

Методика эксперимента

Используемый в проведенных исследованиях макет управляемого вакуумного разрядника представляет собой трехэлектродную коаксиальную систему (анод, катод, поджигающий электрод и разделительные изоляторы), элементы которой образуют герметичный откачанный объем. Катод, поджигающий электрод и плотно сжатая между ними диэлектрическая вставка толщиной 0,1 мм, выполненная из слюды, а также набор металлических (ковар, титан) вставок, улучшающих, как показала практика, повторяемость срабатывания разрядника, образуют систему поджига (рис. 1). Величина зазора в вакуумном промежутке катод-анод составляет 1 мм. Диаметр катода, выполненного из алюминия, равен 5 мм. Катод заземлен, анод до начала процесса коммутации находится под положительным потенциалом 2—3 кВ. Срабатывание происходит при подаче на поджигающий электрод положительного относительно катода импульса напряжения амплитудой 3,5 кВ. Коммутируемый в промежутке катод-анод ток имеет продолжительность 30 мкс и амплитуду 200—300 А. При подаче импульса напряжения на поджигающий электрод происходит пробой между катодом и поджигающим электродом по обращенной в сторону вакуума поверхности диэлектрической вставки. Образующийся плазменный факел замыкает вакуумированный промежуток катод-анод, в результате чего зажигается дуговой разряд в продуктах эрозии элементов разрядного устройства. Параметры коммутируемой цепи выбраны таким образом, чтобы заведомо обеспечить заметный уровень эрозии подвергающихся воздействию раз-

Асюнин Вячеслав Игоревич, инженер II категории.

Бушин Сергей Артурович, ведущий научный сотрудник.

Давыдов Сергей Геннадьевич, научный сотрудник.

Долгов Александр Николаевич, ведущий научный сотрудник, профессор.

Пилюшенко Антон Владимирович, инженер II категории.

Пшеничный Александр Александрович, инженер I категории.

Ревазов Владислав Олегович, зам. начальника научно-исследовательского отдела.

Якубов Рустам Халимович, зам. начальника научно-исследовательского отдела.

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова.

Россия, 127055, Москва, ул. Сушэвская, 22.

Тел. 8 (499) 400-19-70 доб. 1302.

E-mail: asvi@mail.ru ; alnikdolgov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 сентября 2015 г.

© Асюнин В. И., Бушин С. А., Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Пилюшенко А. В., Пшеничный А. А., Ревазов В. О., Якубов Р. Х., 2015

ряда элементов разрядника уже при единичном срабатывании с одной стороны, а с другой стороны, чтобы при достаточно большом числе срабатываний режим горения разряда не изменялся заметным образом. Контроль режима разряда осуществлялся на основе регистрации осциллограмм токов и напряжений, характеризующих процесс коммутации.

Исследование и анализ состояния рабочих поверхностей разрядного устройства производились с помощью оптического микроскопа МБС-9 при (14—100)-кратном увеличении путем визуального обследования разрядников, подвергшихся испытаниям, после удаления разделительных изоляторов и анода. Кроме того, с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-35F были получены изображения элементов разрядного устройства и изучен их элементный состав.

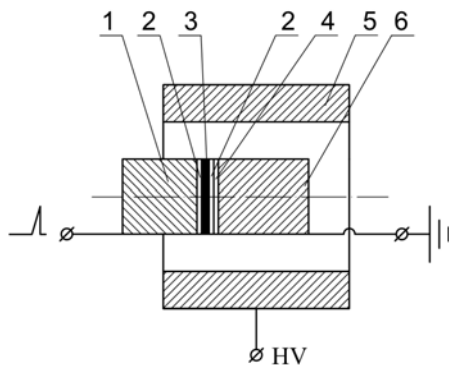


Рис. 1. Конструкция разрядника: 1 — поджигающий электрод, 2 — коваровые вставки, 3 — диэлектрическая вставка, 4 — титановая вставка, 5 — анод, 6 — катод.

Для получения дополнительной информации о процессе эрозии диэлектрической вставки проводилось исследование газовой выделенности рабочих поверхностей разрядного устройства на макете масс-спектрометрической установке УФКГ [1]. С этой целью разрядник с помощью впаянного в него штенгеля соединялся с высоковакуумной системой, обладающей безмаслянными средствами откачки. В качестве откачных средств были применены сорбционный насос НСЖА 0,025; магниторазрядный насос НДМ10 и турбомолекулярный насос MTU 71P фирмы Pfeifer с форвакуумным насосом ТМ315-2. Изучение состава газовой выделенности при срабатывании разрядника производилось с помощью входящего в состав высоковакуумной системы квадрупольного масс-спектрометра ОМГ 422. Для выполнения измерений с помощью масс-спектрометра выполнялась предварительная откачка объема высоковакуумной системы и прогрев внешним электрическим нагревателем до температуры примерно 200 °С в течении 3 часов. После охлаждения системы до комнатной темпе-

ратуры и при давлении $(3—4) \times 10^{-8}$ мм рт.ст. включался масс-спектрометр в режиме «MID Timer» [2]. Измерения выполнялись для последовательных серий срабатываний таким образом, что продолжительность одной серии срабатываний была значительно (в несколько раз) больше времени, затрачиваемого масс-спектрометром на совершение полного цикла последовательного считывания массовых чисел начиная с 1-го по 250-е. Следовательно, мы получали возможность проследить динамику газовой выделенности разрядника по мере нарастания количества его срабатываний.

Результаты эксперимента

Картина эрозии электродов (поджигающий электрод, катод, коваровые и титановая вставки) и диэлектрической вставки, выполненной из слюды (мусковит), наблюдаемая визуально, выглядит следующим образом. Образование катодного пятна при срабатывании системы поджига происходит, по-видимому, на кромке коваровой вставки, расположенной со стороны катода, у края диэлектрической вставки (рис. 2). Нескольких первых срабатываний оказывается достаточно, чтобы в области образования катодных пятен, а эта область локализована, т. е. наблюдается так называемый эффект привязки разряда, произошло расплавление участка коваровой вставки и прилегающего края диэлектрика. О том, что образование катодных пятен произошло именно в данной области, говорит направление выброса расплавленного металла от границы металл—диэлектрик. Сравнительно слабые следы присутствия катодных пятен — кратеры — на практически неподвергнутой плавлению части поверхности коваровой и титановой вставок, а также их отсутствие на поверхности катода, вероятно, свидетельствует о том, что условия для перемещения катодных пятен на эти участки электродной системы складываются только на заключительной стадии каждого разряда. Обратим внимание, что температура плавления кобальта около 1500 °С, титана — 1670 °С и алюминия — 650 °С.

После 20 срабатываний расплавленный металл в области привязки разряда покрывает практически полностью поверхность коваровой вставки. Следы присутствия катодных пятен появляются на поверхности катода и гораздо более редкие на поверхности той части коваровой вставки, которая подверглась плавлению на начальной стадии разряда. По-прежнему фиксируется преимущественный вынос жидкофазного материала коваровой вставки в направлении от диэлектрической вставки.

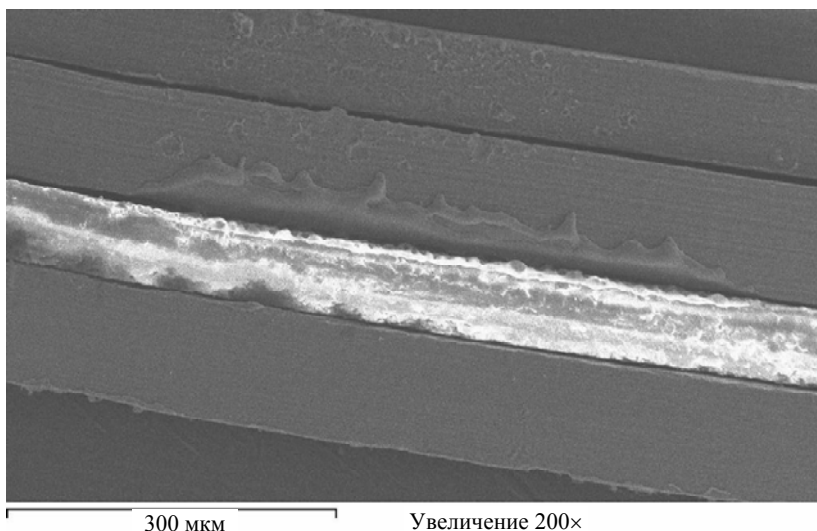


Рис. 2. Состояние электродной системы после 4 срабатываний (снимок получен с помощью электронного микроскопа)

После 50 срабатываний в области горения разряда поверхности коваровой и титановой вставок полностью покрыты слоем металла, подвергшегося расплавлению. Более того, поверхность металла, который испытал указанный фазовый переход, подверглась сильному эрозионному воздействию, по-видимому, потоков плазмы, испущенных из области дугового разряда в промежутке катод-анод (рис. 3). На поверхности катода наблюдается формирование групп ярко выраженных кратеров, т. е. характер воздействия разряда на катод претерпел несомненное изменение, а именно, значительно увеличилась продолжительность существования катодных пятен на поверхности катода. Достоин удивления то обстоятельство, что кратеры на поверхности катода (или группы кратеров) порой разделяют расстояния, значительно превышающие как размер самих кратеров, так и размер зоны расплескивания жидкого металла вокруг кратеров. Более не наблюдается преимущественный вынос жидкофазного материала коваровой вставки в направлении от диэлектрической вставки. Наоборот, заметны признаки того, что появляется перенос металла в направлении от

катода и прилегающих металлических вставок к диэлектрической вставке. Вместе с тем возрастает размер каверны, которая формируется на границе диэлектрической вставка — коваровая вставка (со стороны катода) в результате выноса вещества как диэлектрической, так и металлической вставки.

При дальнейшем увеличении числа срабатываний наблюдается увеличение количества кратеров на катоде, причем их плотность, т. е. степень эрозии, приходящейся на единицу поверхности катода и оцениваемой визуально, постепенно возрастает. Возрастает глубина каверны на кромке диэлектрической вставки. На краю каверны со стороны коваровой вставки увеличивается количество металла, претерпевшего плавление. После нескольких сотен срабатываний этот металл нависает над диэлектрической вставкой. На поверхности диэлектрической вставки появляются капли металла, переносимого, по-видимому, со стороны катода и прилегающих металлических вставок, т. е. наблюдается дальнейший перенос электропроводящего вещества в указанном направлении от катода к диэлектрической вставке, что становится устойчивой тенденцией.

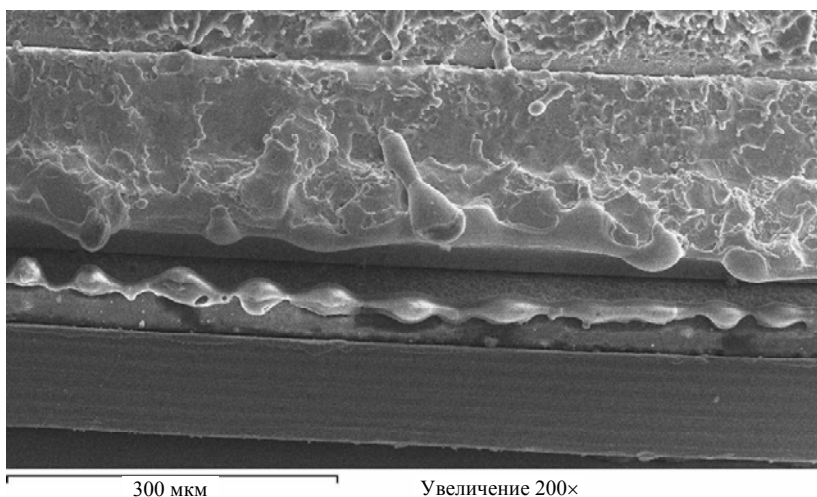


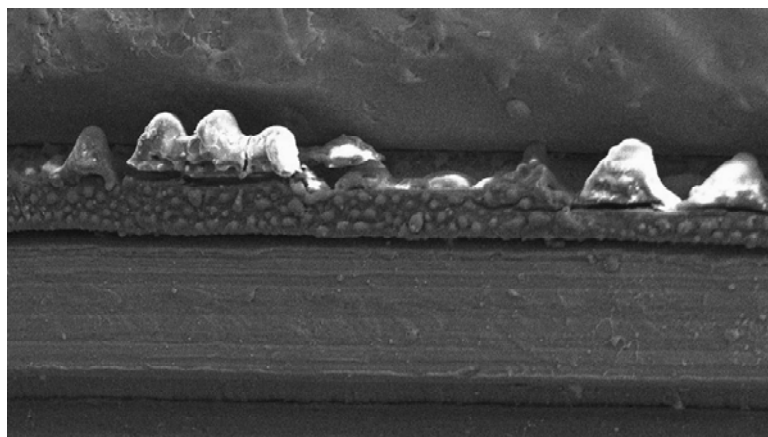
Рис. 3. Состояние электродной системы после 50 срабатываний

Элементный анализ вещества, перенесенного на поверхность диэлектрической вставки, выполненный с использованием возможностей, предоставляемых электронным микроскопом (рентгенофлуоресцентный анализ характеристического излучения методом дифракционной спектроскопии), подтверждает предположение об источнике этого вещества. Обнаруженное на поверхности диэлектрической вставки вещество, несомненно, является материалом катода, поскольку об этом говорит присутствие в его составе алюминия при отсутствии следов кислорода и кремния, также входящих в состав слюды, и коваровой вставки, о чем говорит наличие железа, кобальта и никеля.

При достаточно большом числе срабатываний (порядка сотни) наблюдалось явление, которое можно назвать «пузырением» обращенной к вакууму поверхности диэлектрической вставки (рис. 4). Отметим, что «пузыряющаяся» поверхность имеет вид оплавленной среды. Тщательное изучение изображений, полученных с помощью как электронного, так и оптического микроскопа, а также анализ элементного состава поверхности диэлектрической вставки заставляют прийти к выводу о том, что наблюдаемая структура поверхности диэлектрика обусловлена именно его локальным испарением, а не переносом вещества

металлических узлов разрядного устройства на поверхность диэлектрика. Линейный размер «пузырей» на поверхности диэлектрика составляет порядка 5—8 мкм. Наблюдается расщепление слюды параллельно плоскости спайности.

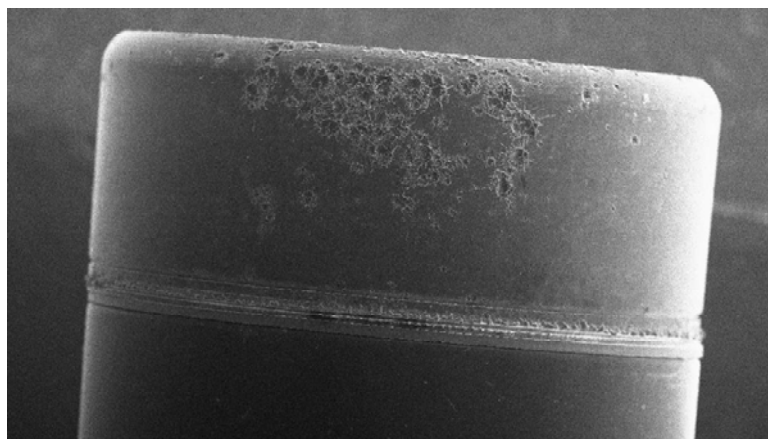
Следует отметить, что характерная картина развития процесса эрозии электродной системы, описанная выше, т. е. постепенное увеличение площади проводящей поверхности, подвергающейся воздействию катодных пятен, и степени эрозионного воздействия на металл в направлении от границы «диэлектрическая вставка — коваровая вставка со стороны катода» в некоторых сериях экспериментов несколько нарушается. «Нехарактерная» картина эрозии электродной системы (см. рис. 5) отличается тем, что по мере возрастания числа срабатываний поверхность, подвергшаяся эрозии, распадается на две изолированные зоны: одна из них привязана к области вблизи диэлектрической вставки, где происходит инициирование разряда, другая находится на значительном удалении от первой на поверхности катода. Во второй зоне наблюдается сильная эрозия, вызванная воздействием катодных пятен, причем рельефная структура кратеров, по-видимому, свидетельствует о привязке катодных пятен на стадии дуги.



100 мкм

Увеличение 400×

Рис. 4. «Пузырение» диэлектрической вставки



3 мм

Увеличение 20×

Рис. 5. «Нехарактерная» картина эрозии электродной системы

Обсуждение результатов эксперимента

Масс-спектрометрия продуктов газовой выделенной и рентгенофлуоресцентный анализ элементного состава фрагментов диэлектрической вставки, подвергшейся воздействию электрических разрядов, дал следующие результаты. Что касается азота, углекислого газа и метана, то наибольшее газовой выделение наблюдается при первом срабатывании. При дальнейших срабатываниях разрядного устройства происходит монотонное убывание количества выделяющихся продуктов десорбции. Выделение водорода возрастает до максимальной величины на протяжении первых 4 срабатываний, затем также следует монотонный спад газовой выделенной. Выделение паров воды имеет пик на первых 1—2 срабатываниях, затем следует некоторый заметный спад, и далее примерно после 5—6 срабатываний наблюдается всплеск газовой выделенной на протяжении нескольких десятков срабатываний. Первый пик, вероятно, соответствует десорбции воды с поверхности слюды, второй — десорбции из пространства между плоскостями спайности и разложению материала диэлектрической вставки.

Элементный состав поверхностного слоя диэлектрика со стороны вакуума, на котором наблюдаются отчетливые следы «пузырения», свидетельствуют о практически полной потере слюдой входящих в ее состав молекул воды. Можно предположить, что наблюдаемый в данном случае диэлектрик подвергся нагреву до 600–700 °С, при этом произошло выделение до 90 % всей воды, содержащейся в слюде [3—5]. Образовавшийся внутри диэлектрика водяной пар создает высокое давление в порах, которые он заполняет (уже при температуре 374 °С давление насыщенного водяного пара составляет 170 атм. [6]), что вполне может приводить к расслоению и вспучиванию слюды. Нагрев верхнего слоя слюды обусловлен потоком частиц из плазмы разряда в пространстве катод-анод. Оценка глубины прогрева за время разряда по формуле $L \approx (\chi \times \tau)^{1/2}$ (вдоль плоскости спайности коэффициент температуропроводности слюды $\chi = 1,4 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [7], τ — продолжительность разряда) дает величину порядка 7 мкм, что близко к наблюдаемому размеру вспученностей на поверхности диэлектрика (т. н. «пузырей»). Фрагменты диэлектрической вставки, образовавшиеся после расслоения и дробления части диэлектрической вставки на отдельные фрагменты, демонстрирующие признаки оплавления (подобные фрагменты диэлектрической вставки можно увидеть на рис. 5), имеют обычно элементный состав, соответствующий ситуации, когда произошла не только полная потеря воды из состава слюды, но, кроме того, и разложение двуокиси кремния с

выделением кислорода и частичным выносом Si, а также частичное разложение окисла калия с выносом атомов К. Такая ситуация могла сложиться после достижения температуры свыше 800 °С и далее до примерно 1600–1700 °С (температура плавления двуокиси кремния, температура плавления трехоксида алюминия — еще одной из основных компонент слюды — значительно выше).

Разряд зажигается каждый раз в результате образования катодного пятна в тройной точке металл-вакуум-диэлектрик, т. е. на стыке диэлектрической вставки и коваровой вставки, расположенной со стороны катода, где происходит усиление электрического поля при наличии микроазоров [8]. Наличие диэлектрической границы создает градиент температуры и давления в плазме над катодным пятном, что приводит к выносу вещества проводящей вставки в виде жидкометаллических струй в направлении катода. Оценка линейного размера области прогрева дает для ковара ($\chi = 0,2 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ [7]) порядка 20—25 мкм и для слюды (поперек плоскости спайности $\chi = 0,22 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) порядка 3 мкм, что мы и наблюдаем на рис. 2.

Отчетливо сформировавшиеся кратеры на поверхности титановой вставки и на поверхности катода, выполненного из алюминия, со значительным плавлением и разбрызгиванием металла появляются только тогда, когда до указанных элементов разрядного устройства доходят потоки жидкого металла от коваровой вставки. На поверхности ковара, подвергшейся плавлению, практически отсутствуют следы миграции катодных пятен. Данное обстоятельство объясняется, по видимому, тем, что появление цетров взрывной электронной эмиссии, образующих катодное пятно, затруднено на заглаженной в результате плавления проводящей поверхности, к тому же лишенной (как показывают результаты рентгенофлуоресцентного элементного анализа) диэлектрической окисной пленки в качестве покрытия [8—10].

Наблюдаемая картина кратеров на поверхности алюминия выглядит более рельефно, чем на поверхности ковара и титана. Потенциал ионизации титана (6,83 эВ) и элементов, входящих в состав ковара (7,63—7,90 эВ), выше, чем у алюминия (5,98 эВ), а температуропроводность титана и ковара ($\sim 0,09 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ и $\sim 0,2 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ соответственно) существенно ниже, чем у алюминия ($\sim 1,0 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$). Вследствие этого, катодное падение потенциала дуги в парах титана и продуктах эрозии ковара выше [11—13] и, соответственно, больше выделяющаяся тепловая мощность в катодном пятне, а скорость прогрева материала меньше. Отсюда больше глубина кратеров в алюминии и более значительные следы выброса жид-

кой фазы этого металла. Для титана же и кобальта более значительна доля выброса вещества в газообразном виде. Кроме того, коэффициент поверхностного натяжения жидкого алюминия при температуре плавления ($\sim 0,9$ Н/м) заметно меньше значения такого параметра для титана ($\sim 1,4$ Н/м) и кобальта ($\sim 1,8$ Н/м) [10]. Следовательно, силы поверхностного натяжения гораздо эффективнее действуют на поверхности титана и кобальта, чем на поверхности алюминия, разглаживая следы выбросов жидкой фазы. С появлением на поверхности катода кратеров, т. е. в условиях относительно длительного присутствия катодного пятна, фиксируются признаки формирования потока проводящего вещества в направлении от катода к диэлектрической вставке.

Отступление картины эрозии от типичной, описанной выше, как это наблюдается в некоторых сериях экспериментов (рис. 5), указывает на причастность к процессу миграции катодного пятна по поверхности катода (в нашем случае, исходя из достигаемой силы коммутируемого тока, речь, конечно же, идет об одновременно существующих нескольких катодных пятнах [11—13]) двух конкурирующих механизмов: одного, так сказать, — типичного, связанного с электрическим взрывом микроострий на поверхности металла и разбрызгиванием металла в жидкой фазе, и другого, который проявляет себя реже, и, видимо, связанного с присутствием диэлектрической пленки на поверхности металла [9, 14]. Дело в том, что на поверхности алюминия, соприкасавшейся с атмосферным воздухом, обязательно присутствует пленка оксида алюминия, являющегося диэлектриком. Рентгенолюминисцентный анализ элементного состава поверхности используемого катода до начала его эксплуатации дает следующий результат. Регистрируемая массовая доля алюминия в составе подвергнутого анализу материала составляет 73 %. Остаток почти полностью принадлежит кислороду, за исключением незначительного количества марганца и следов некоторых случайных примесей. В предположении, что анализируемый материал состоит из молекул трехоксида алюминия и атомов алюминия, можно рассчитать, что на одну молекулу оксида приходится примерно три атома алюминия. Глубина слоя, из которого регистрируется характеристическое рентгеновское излучение, составляет 2—5 мкм [15, 16]. Таким образом, толщина диэлектрического слоя Al_2O_3 на поверхности проводника может составить примерно 0,5—1 мкм. В вакууме под воздействием потока плазмы происходит накопление заряда на внешней поверхности диэлектрической пленки. В результате, в местах разрыва пленки на ее срезе могут возникать разности потенциала порядка 10^2 В и, соответ-

ственно, электрические поля с напряженностью порядка 10^8 В/м [14]. Разрыв пленки может происходить при нагревании на стадии предварительного прогрева и обезгаживания разрядника за счет различия температурных коэффициентов линейного расширения пленки и металлической подложки (у пленки температурный коэффициент линейного расширения в 4—6 раз меньше, чем у металла [6, 7]). При таких условиях происходит пробой по краю диэлектрической пленки и появление так называемого микроплазменного разряда уже на металле с образованием области плотной плазмы размером 1—100 мкм. Воздействие плазмы микроплазменного разряда на металл приводит к появлению в контактном слое электрического поля напряженностью $\sim 2 \times 10^9$ В/м, которое вызывает переход к взрывной электронной эмиссии [10]. Впрочем, при разности потенциалов $\sim 10^2$ В между внешней и внутренней поверхностями напряженность поля внутри микронной диэлектрической пленки может превзойти пробойное [7].

Заключение

Масс-спектрометрия продуктов газовой выделения в процессе функционирования разрядника показала, что газовыделение водорода, азота, углекислого газа и метана происходит во время нескольких первых срабатываний и затем быстро убывает. Регистрируемое выделение паров воды, однако, гораздо более продолжительное (на протяжении до сотни срабатываний). Природа выделения водорода, азота, углекислого газа и метана — десорбция с поверхностей кристаллитов слюды. Пары воды появляются, по-видимому, как в результате десорбции, так и в результате разложения слюды, т. е. выделения кристаллизационной воды.

При достаточно большом числе срабатываний (порядка сотни) наблюдалось «пузырение» обращенной к вакууму поверхности диэлектрической вставки. Линейный размер «пузырей» на поверхности диэлектрика составляет порядка 5—8 мкм. Кроме того наблюдается расщепление диэлектрика параллельно плоскости спайности. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа элементного состава поверхностного слоя диэлектрика со стороны вакуума, на котором наблюдаются отчетливые следы «пузырения», позволяют сделать вывод о практически полной потере слюдой входящих в ее состав молекул воды. «Пузырение» может быть следствием вспучивания оплавленного внешнего слоя под действием давления паров воды, образующихся при модификации структуры слюды в условиях нагрева до высокой температуры потоком плазмы с катода. Дальнейшая эрозия диэлектрической вставки приводит к ее фрагментации,

сопровождается разложением двуоксида кремния с выделением кислорода и частичным выносом Si, а также частичное разложение оксида калия с выносом атомов К. Одновременно на внешней поверхности диэлектрической вставки накапливаются каплевидные продукты эрозии катода и прилегающих к нему проводящих вставок.

Разряд зажигается каждый раз в результате образования катодного пятна в тройной точке металл-вакуум-диэлектрик, т. е. на стыке диэлектрической вставки и коваровой вставки, расположенной со стороны катода, где происходит усиление электрического поля при наличии микроазоров. Наличие диэлектрической границы создает градиент температуры и давления в плазме над катодным пятном, что приводит к выносу вещества проводящей вставки в виде жидкометаллических струй в направлении катода. Отчетливо сформировавшиеся кратеры на поверхности титановой вставки и на поверхности алюминиевого катода, со значительным плавлением и разбрызгиванием металла появляются только тогда, когда до указанных элементов разрядного устройства доходят потоки жидкого металла от коваровой вставки. Таким образом, проявляется, вероятно, эктонный механизм образования катодного пятна. В дальнейшем при типичном развитии картины эрозии происходит постепенное разрастание области образования и миграции катодных пятен на поверхности катода в направлении от области зажигания разряда, сопровождающееся формированием потока продуктов эрозии катода в направлении диэлектрической вставки.

Наблюдаемое отступление развития картины эрозии от типичного указывает на причастность к процессу образования и миграции катодного пятна по поверхности катода двух конкурирующих ме-

ханизмов: одного, связанного с электрическим взрывом микроострий на поверхности металла и разбрызгиванием металла в жидкой фазе, и другого, который проявляет себя в нашем случае реже, связанного с присутствием диэлектрической пленки оксида алюминия на поверхности катода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бушин С. А., Галкин С. С. // Вакуумная техника и технология. 2014. Т. 23. Вып 1. С. 39.
2. Инструкция по эксплуатации масс-спектрометра OMG 422: прикладное программное обеспечение Quastar 422.
3. Collins R. H., Turnbull J. C. // Vacuum. 1961. V. 11. No. 2. P. 119.
4. Lawson R. W. // Vacuum. 1962. V. 12. No. 3. P. 145.
5. Craig R. D. // Vacuum. 1966. V. 16. No. 2. P. 67.
6. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат. 1976..
7. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины: Справочник — М.: Энергоатомиздат. 1991.
8. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. — М.: Наука. 2004.
9. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. — М.: Наука. 2000.
10. Иванов В. А., Коньжеев М. Е., Зимин А. М. и др. / 21-я Всероссийская конференция «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2014. Казань. 20—23 мая 2014. — Казань: Изд-во КНИТУ. 2014. Т. 1. С. 175.
11. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. — М.: Наука. 1968.
12. Раховский В. И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. — М.: Наука. 1970.
13. Сливков И. Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. — М.: Энергоатомиздат. 1986.
14. Иванов В. А. // Прикладная физика. 2001. № 1. С. 5.
15. Микроанализ и растровая электронная микроскопия / Под ред. Ф. Морис, Л. Мени, Р. Тиксье. — М.: Металлургия. 1985.
16. Гимельфарб Ф. А. Рентгеноспектральный микроанализ слоистых материалов. — М.: Металлургия. 1986.

Erosion processes in a small-size triggered vacuum spark gap

V. I. Asiunin, S. A. Bushin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. V. Pilyushenko,
A. A. Pshenichniy, and R. Kh. Yakubov

All-Russian Research Institute of Automatics
22 Sushchevskaya str., Moscow, 127055, Russia
E-mail: asvi@mail.ru ; alnikdolgov@mail.ru

Received September 16, 2015

The results of researches of erosion processes in a small-size vacuum spark gap are submitted in this paper. Researches were carried out by electron microscopy, X-ray fluorescence analysis and mass-spectrometry of gas emission products. Regularities of erosion and transfer of substances from metal elements of the discharge device and from dielectric (breakdown over its surface initiates the process of

switching in the triggered vacuum spark gap) were studied. An influence of the surface microstructure and oxide film on the surface of the cathode material on the arc discharge development was determined.

PACS: 52.80.-s

Keywords: vacuum gap, electrode erosion, oxide film, temperature gradient.

REFERENCES

1. S. A. Bushin and S. S. Galkin, *Vakuumn. Tekhnol. Tekhnol.* **23** (1), 39 (2014).
2. *Handbook on OMG 422: Quastar 422.*
3. R. H. Collins and J. C. Turnbull, *Vacuum* **11** (2), 119 (1961).
4. R. W. Lawson, *Vacuum* **12** (3), 145 (1962).
5. R. D. Craig, *Vacuum* **16** (2), 67 (1966).
6. *Tables on Physical Values* Ed. by I. K. Kikoin (Atomizdat, 1976) [in Russian].
7. A. P. Babichev et al., *Physical Values. Handbook*, Ed. by I. S. Grigor'ev et al., (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
8. G. A. Mesyats, *Pulse Energetics and Electronics* (Nauka, Moscow, 2004) [in Russian].
9. G. A. Mesyats, *Ectons in Vacuum Discharge* (Nauka, Moscow, 2000) [in Russian].
10. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, A. M. Zimin, et al., in *Proc. 21-st All-Russian Conf. on Physica of Low-Temperature Plasma (FNTP-2014, Kazan, May 20-13, 2014)*. Vol. 1. P. 175.
11. I. G. Kesaev, *Cathode Processes of Electric Arc* (Nauka, Moscow, 1968) [in Russian].
12. V. I. Rakhovskii, *Physical Foundations of Commutation of Electric Current in Vacuum* (Nauka, Moscow, 1970) [in Russian].
13. I. N. Slivkov, *Processes at High Voltage in Vacuum* (Energoatomizdat, Moscow, 1986) [in Russian].
14. V. A. Ivanov, *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 5 (2001).
15. *Microanalysis and Scanning Electron Microscopy*. Ed. by F. Moris et al., (Metallurgiya, 1985) [in Russian].
16. F. A. Gimelfarb, *X-ray Microanalysis of Schistose Materials* (Metallurgiya, Moscow, 1986) [in Russian].