

04

Воздействие импульсного вакуумно-дугового разряда на поверхность элементов разрядного устройства

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

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова, Москва
E-mail: vniia@vniia.ru

Поступило в Редакцию 30 ноября 2015 г.

Методами визуализации структуры поверхности и рентгенофлуоресцентного элементного микроанализа изучены закономерности эрозии и переноса вещества элементов разрядного устройства. Обнаружено влияние микрорельефа и окисной пленки, присутствующей на поверхности материала катода, на развитие дугового разряда в коммутаторе.

Интерес к искровому и дуговому разрядам в вакууме вызван их успешным применением в высоковольтной и силовой электронике [1]. Цель настоящей работы — исследование механизма эрозии элементов вакуумного коммутирующего устройства с искровым поджигом.

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 до давления не более 10^{-1} Па 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 3 кВ. Срабатывание происходит при подаче на поджигающий

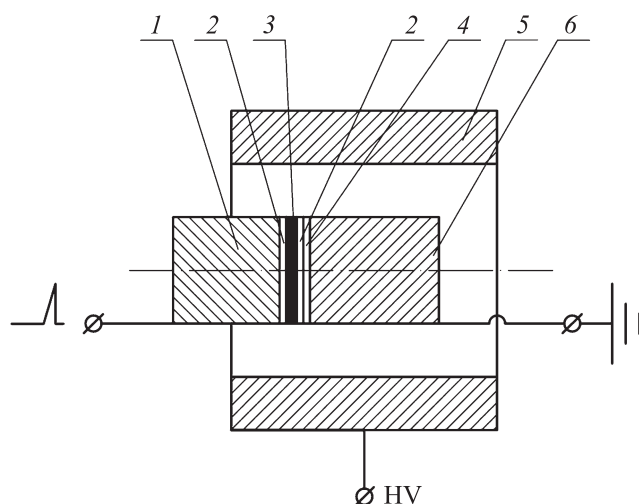


Рис. 1. Конструкция разрядника: 1 — поджигающий электрод, 2 — коваровые вставки, 3 — диэлектрическая вставка, 4 — титановая вставка, 5 — анод, 6 — катод.

электрод положительного относительно катода импульса напряжения амплитудой 3.5 kV. Коммутируемый в промежутке катод-анод ток имеет продолжительность $30 \mu\text{s}$ и амплитуду 200–300 А. При подаче импульса напряжения на поджигающий электрод происходит пробой между катодом и поджигающим электродом по поверхности диэлектрической вставки. Образующийся плазменный факел замыкает вакуумированный промежуток катод-анод, в результате чего зажигается дуговой разряд в продуктах эрозии элементов разрядного устройства. Контроль режима разряда осуществлялся на основе регистрации осциллограмм токов и напряжений, характеризующих процесс коммутации. Исследование состояния подвергшихся испытаниям рабочих поверхностей разрядного устройства производилось с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-35F после удаления разделительных изоляторов и анода. Были получены визуальные изображения элементов разрядного устройства и изучен их элементный состав методом рентгенофлуоресцентного анализа.

Картина эрозии электродов и диэлектрической вставки, выполненной из слюды (мусковит), наблюдаемая визуально, выглядит следующим

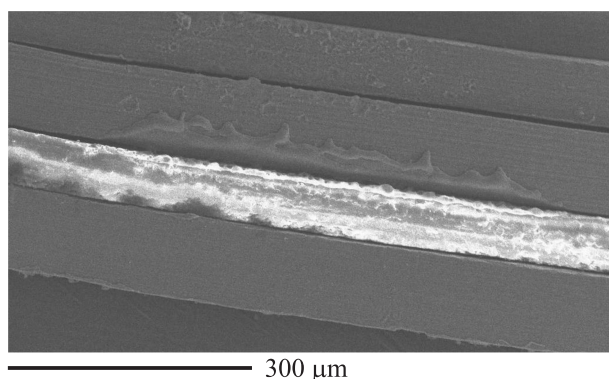


Рис. 2. Состояние электродной системы после 4 срабатываний (снимок получен с помощью электронного микроскопа).

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. Следы катодных пятен — кратеры присутствуют на поверхности титановой вставки и отсутствуют на поверхности катода.

После 20 срабатываний расплавленный металл в области привязки разряда покрывает практически полностью поверхность коваровой и титановой вставок. Следы присутствия катодных пятен появляются на поверхности катода и гораздо реже 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.

После 50 срабатываний в области горения разряда поверхности коваровой и титановой вставок полностью покрыты слоем металла, подвергшегося расплавлению и сильному эрозионному воздействию, по-

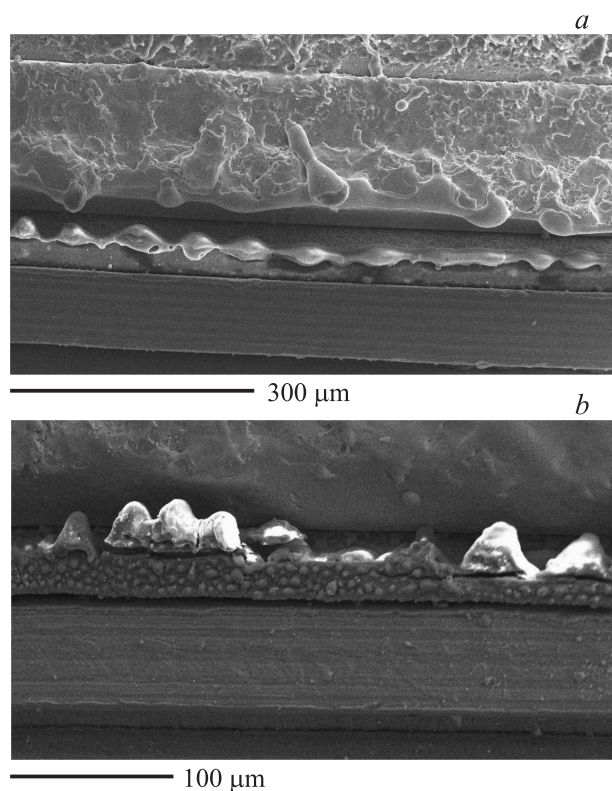


Рис. 3. Эрозия электродной системы разрядного устройства. *a* — после 50 срабатываний; *b* — „пузырение“ диэлектрической вставки; *c* — „нехарактерная“ картина эрозии электродной системы.

видимому, потоков плазмы, испущенных из области дугового разряда в промежутке катод-анод (рис. 3, *a*). На поверхности катода наблюдается формирование групп ярко выраженных кратеров. 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. Появляются признаки переноса металла в направлении от катода и прилегающих металлических вставок к диэлектрической вставке.

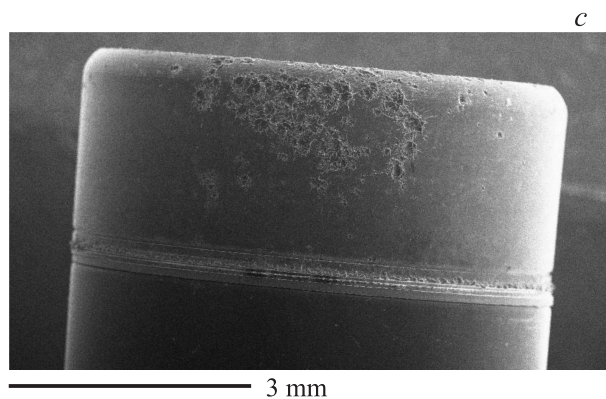


Рис. 3 (продолжение).

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, перенесшего 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.

Обнаруженное на поверхности диэлектрической вставки вещество, как показывают результаты рентгенофлуоресцентного анализа, несомненно является материалом катода; об этом говорит присутствие в его составе алюминия при отсутствии следов кислорода и кремния, также входящих в состав слюды, и коваровой вставки, о чем свидетельствует 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. 3, *b*). Наблюдаемая структура

поверхности диэлектрика обусловлена его локальным вспучиванием, а не переносом вещества металлических узлов разрядного устройства на поверхность диэлектрика. Линейный размер „пузырей“ на поверхности диэлектрика составляет порядка 5–8 μm . 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 (рис. 3, *с*) 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.

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, подвергшегося плавлению, практически отсутствуют следы миграции катодных пятен. Объясняется данное обстоятельство, по-видимому, тем, что появление центров взрывной электронной эмиссии, образующих катодное пятно, на заглаженной в результате плавления проводящей поверхности, к тому же лишенной — как показывают результаты рентгенофлуоресцентного элементного анализа — диэлектрической окисной пленки в качестве покрытия, затруднено [2,3].

Отступление картины эрозии от типичной (рис. 3, *с*), указывает на причастность к процессу миграции катодных пятен по поверхности катода 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, связанного с присутствием диэлектрической пленки на поверхности металла [2,4]. На поверхности алюминия, соприкасавшейся с атмосферным воздухом, обязательно присутствует пленка окисла алюминия, являющегося диэлектриком. Результаты рентгенолюминисцентного анализа элементного состава поверхности

катода до начала его эксплуатации позволяют оценить толщину диэлектрического слоя Al_2O_3 величиной примерно $0.5\text{--}1\ \mu\text{m}$. 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 $10^2\ \text{V}$ и соответственно электрические поля с напряженностью порядка $10^8\ \text{V/m}$ [4]. 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 [5,6]). При таких условиях происходит пробой по краю диэлектрической пленки и появление так называемого микроплазменного разряда уже на металле с образованием области плотной плазмы размером $1\text{--}100\ \mu\text{m}$. Воздействие плазмы микроплазменного разряда на металл приводит к появлению в контактном слое электрического поля напряженностью $\sim 2 \cdot 10^9\ \text{V/m}$, которое вызывает переход к взрывной электронной эмиссии [3]. Впрочем, при разности потенциалов $\sim 10^2\ \text{V}$ между внешней и внутренней поверхностями напряженность поля внутри микронной диэлектрической пленки может превзойти пробойную [6].

Изучение картины эрозии катода в вакуумно-дуговом разряде свидетельствует, что процесс образования и миграции катодного пятна по поверхности катода обнаруживает присутствие двух конкурирующих механизмов: 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. Таким образом проявляется эктонный механизм образования катодного пятна.

Список литературы

- [1] *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
- [2] Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
- [3] Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.С. Мелихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

-
- [4] *Месяц Г.А.* Этоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Мир, 2000. 424 с.
- [5] *Иванов В.А., Конышев М.Е., Зимин А.М., Тройнов В.И., Летунов А.А., Камолов Т.И., Дорофеев А.А.* // 21-я Всероссийская (с международным участием) конференция „Физика низкотемпературной плазмы“ ФНТП-2014. Казань. 20–23 мая 2014. Казань: Изд-во КНИТУ, 2014. Т. 1. С. 175.
- [6] *Иванов В.А.* // Прикладная физика. 2001. № 1. С. 5.