

23. Kazenas E.K., Tsvetkov Yu.V., Volchenkova V.A. Investigation of thermodynamics of strontium molybdate sublimation // XVI International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia (RCCT 2007) ABSTRACTS. V.1. Suzdal, July 1-6. P. 29-144.

24. Казенас Е.К., Цветков Ю.В., Самойлова И.О., Астахова Г.К., Волченкова В.А., Петров А.А. Исследование термодинамики сублимации молибдата стронция // Металлы. 2008. N 2. с. 16-19.

25. Казенас Е.К. Термодинамика испарения двойных оксидов // М.: Наука. 2004. 551 с.

ЭРОЗИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ МАЛОГАБАРИТНОГО РАЗРЯДНИКА

EROSIVE EFFECT OF A PULSED VACUUM ARC ON THE WORKING SURFACES OF A SMALL-SIZED SPARK GAP

А.А. Козлов, С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, Р.Х. Якубов / alexsandr-kozlov95@rambler.ru

A. A. Kozlov, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, R. Kh. Yakubov

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л.Духова», Москва

Приведены результаты исследования эрозионных процессов в малогабаритном вакуумном разряднике с искровым поджигом методами электронной микроскопии, рентгенофлуоресцентного элементного анализа и масс-спектрометрии продуктов газовой выделения. Изучены закономерности эрозии переноса вещества элементов разрядного устройства.

The results of the study of erosive processes in a small-sized vacuum spark gap with spark ignition by electron microscopy, X-ray fluorescence elemental analysis and mass spectrometry of gas products are presented. The regularities of erosion and transfer of substance of the elements of the discharge device are studied.

Ключевые слова: пробой, эрозия, искровой разрядник.

Keywords: breakdown, erosion, spark gap.

В настоящее время управляемые малогабаритные вакуумные коммутаторы применяются в таких областях, где определяющими требованиями являются отсутствие накаливаемых цепей, миниатюрность, широкий диапазон коммутируемых токов, устойчивость к внешним воздействиям [1]. Увеличение ресурса и стабильности функционирования указанных устройств - задача, которая требует постоянного решения. Одно из препятствий на пути её успешного решения – эрозия элементов коммутирующего устройства под действием, в частности, высоких температур, достигаемых в вакуумно-дуговом разряде. Цель настоящей работы – изучение процесса эрозии элементов конструкции малогабаритного вакуумного разрядника с искровым поджигом. Особенность работы – использование различных по своему характеру и взаимодополняющих методов исследования.

Геометрию конструкции малогабаритного искрового разрядника можно представить в двух вариантах. В одном из них инициирующий разряд по поверхности

диэлектрика происходит параллельно оси симметрии разрядника (рис.1а). В другом – в направлении, перпендикулярном оси симметрии (рис.1б).

Малогобаритные коммутаторы применяются при относительно невысоких напряжениях – до нескольких киловольт. Соответствующая протяженность диэлектрической поверхности, по которой происходит инициирующий разряд, составляет ~0,1 мм. В узле поджига с продольным инициированием (рис.1а) необходимость использовать диэлектрик толщиной ~0,1 мм приводит к тому, что предпочтение отдается диэлектрикам, обладающим достаточной гибкостью, но и в большей степени подверженных эрозии при воздействии плазмы разряда в промежутке катод-анод. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что энергия, вкладываемая в коммутирующий разряд в промежутке катод-анод, значительно превышает энергию, вкладываемую в инициирующий разряд. Использование жаропрочных материалов, отличающихся одновременно с этим качеством твердостью и хрупкостью, создает угрозу надежности прибора. В узле поджига с поперечным инициированием (рис.1б) как раз напрашивается использование жаропрочных материалов, т.к. толщина диэлектрика в данном случае не связана с протяженностью пробиваемого промежутка.

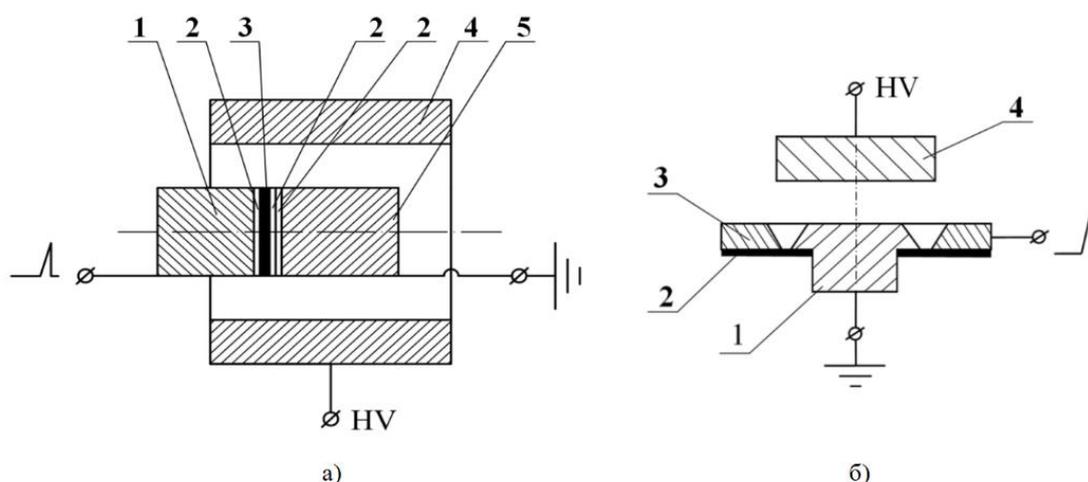


Рис.1. Вакуумные искровые разрядники различной геометрии:

а) инициирующий разряд вдоль (параллельно) оси симметрии: 1 – поджигающий электрод, 2 – дополнительные металлические вставки, 3 – диэлектрическая шайба, 4 – анод, 5 – катод; б) инициирующий разряд поперек (в направлении перпендикулярном) оси симметрии: 1 – катод, 2 – диэлектрическая шайба, 3 – поджигающий электрод, 4 – анод.

Картина эрозии электродов (поджигающий электрод, катод, выполненные из алюминиевого сплава, и дополнительные вставки из титана и кобальта) и диэлектрической шайбы, наблюдаемая визуально, выглядит так как показано на рис. 2-5.

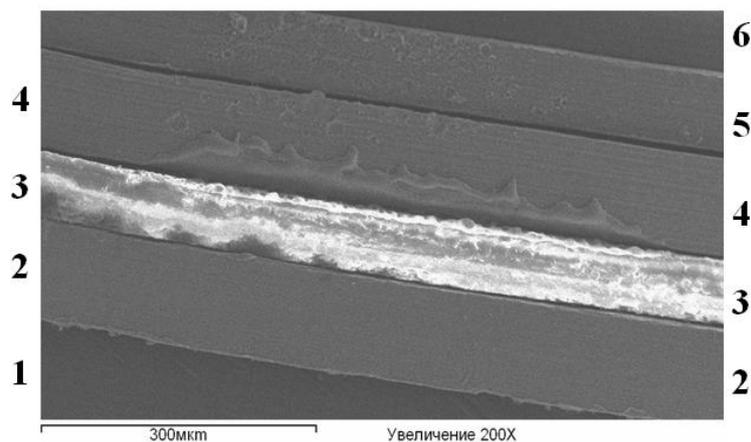


Рис.2. Состояние электродной системы после 4 срабатываний (снимок получен с помощью электронного микроскопа): 1 – поджигающий электрод; 2 – коваровая вставка; 3 – диэлектрическая шайба; 4 – коваровая вставка; 5 – титановая вставка; 6 – катод.

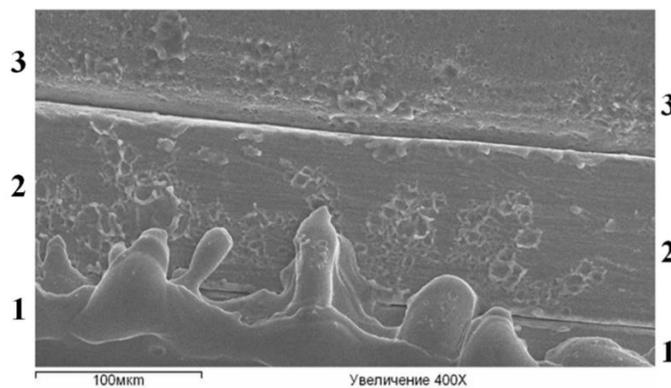


Рис.3. Состояние электродной системы после 20 срабатываний (снимок получен с помощью электронного микроскопа): 1 – коваровая вставка; 2 – титановая вставка; 3 – катод.

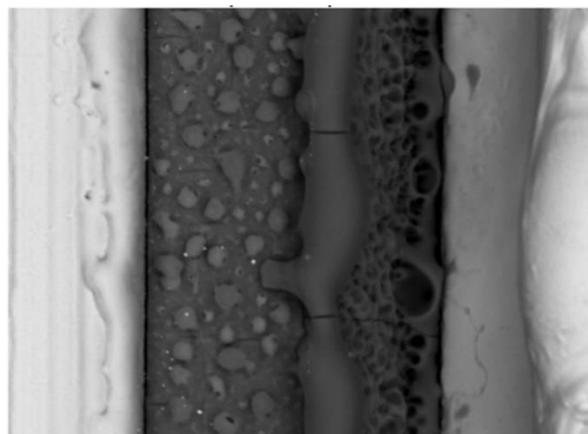


Рис.4. Картина эрозии в узле поджига с инициирующим разрядом вдоль оси симметрии.

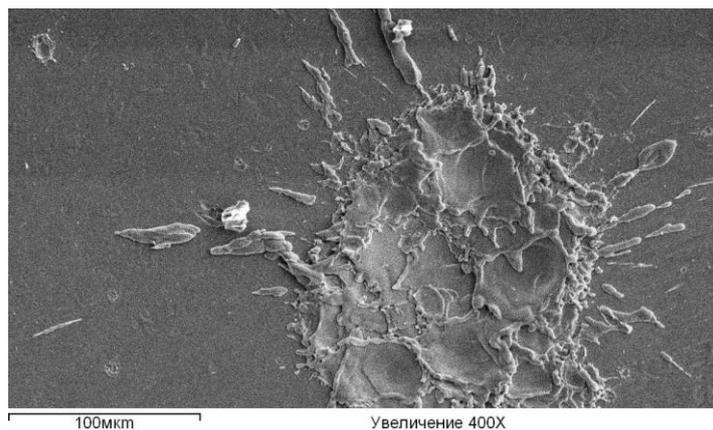


Рис.5. Картина эрозии на катоде.

Получены экспериментальные свидетельства устойчивого первоначального возникновения катодного пятна в искровом вакуумном разряде по поверхности диэлектрика в тройной точке на границе трех сред - вакуум, металл и диэлектрик (рис.2-4). О том, что образование катодных пятен произошло именно в данной области, говорит направление выброса расплавленного металла от границы металл – диэлектрик. На поверхности катода наблюдается формирование групп ярко выраженных кратеров (рис. 3,5)

Установлены различия в картине эрозии при продольном и поперечном инициировании коммутации короткого вакуумного промежутка. При продольном инициировании коммутации эрозия диэлектрика происходит в результате разогрева теплопередачей от катодного пятна в тройной точке и касательным потоком плазмы из области основного разряда в промежутке катод-анод. При поперечном инициировании причиной эрозии диэлектрика наряду с разогревом является механическое воздействие нормально падающего на поверхность диэлектрика потока плазмы.

При использовании слюды в первом случае, преобладающим воздействием, определяющим ресурс прибора, является перенос потока плазмы материала электрода (катода) на поверхность диэлектрика, что приводит к падению сопротивления в плоть до закорачивания промежутка между катодом и поджигающим электродом. Во втором случае преобладает возрастание протяженности промежутка по поверхности диэлектрика между катодом и поджигающим электродом вплоть до прекращения пробоев промежутка (рис. 6а). Заметной металлизации поверхности диэлектрика не происходит, вероятно, потому, что падающий по нормали поток плазмы в каждом разряде «сдувает» уносит прилипший перед этим к диэлектрической поверхности металл.

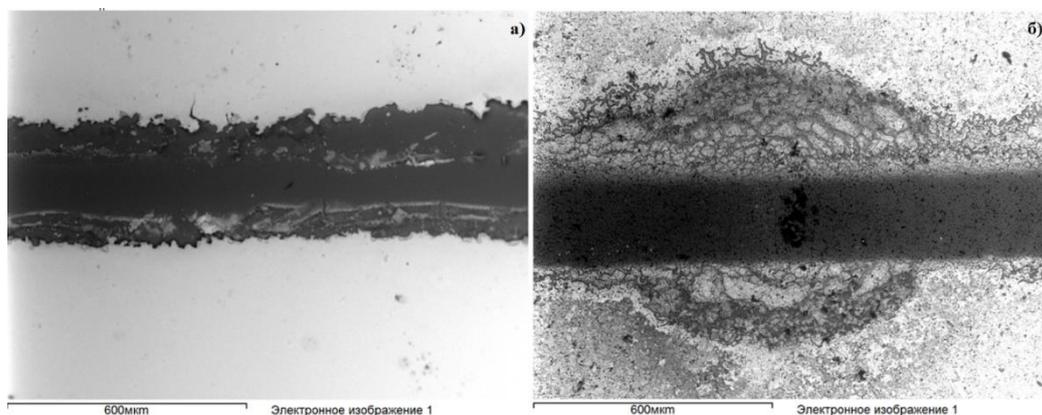


Рис.6. Картина эрозии поджигающей системы: а) на поверхности слюды, б) на поверхности керамики.

Слюда под воздействием разряда испускает значительное количества вещества: кристаллизационной воды и продуктов ее распада, продуктов распада окислов кремния и калия. Наблюдается «пузырение» и, добавив, расщепление слюды параллельно плоскости спайности, в результате выделения под прогретой до достаточно высокой температуры (вероятно, около 1700°C, при которой происходит плавление двуокиси кремния или по крайней мере диэлектрик приобретает пластические свойства) газообразных продуктов распада диэлектрика таких, как пары воды.

Присутствие сорбированного газа на поверхности слюды и значительная эмиссия продуктов эрозии, которая продолжается и после завершения основной фазы иницирующего разряда, с одной стороны ускоряет развитие разряда на начальной его фазе (пробой), с другой приводит к быстрому охлаждению плазмы разряда и затуханию самого разряда. В отличие от случая со слюдой применение в узле поджига керамики ведет к недостатку плазмообразующего вещества. Данное обстоятельство приводит к развитию ускорительных процессов, формированию электронных пучков и ярко выраженных анодных пятен. В этом случае эффективное образование проводящей среды происходит за счет эрозии материала электродов (рис. 6б).

При использовании керамики в результате эрозии материала электродов в узле поджига происходит перенос и осаждение значительного количества металла на поверхность изолятора в виде зернистой структуры, с вкраплениями открытой поверхности диэлектрика. Это с одной стороны, а с другой - в зоне эрозии тонкопленочного электрода наблюдается превращение сплошного покрытия в отдельные островки, окруженные участками с гораздо более тонким слоем металла на керамической подложке. Такой характер эрозии делает трудно предсказуемым сопротивление промежутка между катодом и поджигающим электродом (рис. 6б).

Таким образом, выбор материала диэлектрика, по поверхности которого протекает искровой разряд весьма заметным образом способен влиять на характер сопровождающих его эрозионных процессов. Представленный выше анализ дает возможность объяснить различия в наблюдаемой картине свечения разряда по поверхности слюды и керамики. Как было сказано, в случае разряда по поверхности керамики в качестве плазмообразующего элемента в большей степени должны быть задействованы поверхности электродов, а для слюды – поверхность слюды.

Изучение картины эрозии катода в вакуумно-дуговом разряде свидетельствует о том, что процесс образования и миграции катодного пятна по поверхности катода обнаруживает присутствие двух конкурирующих механизмов. Один можно связать с электрическим взрывом микроострий на поверхности металла и разбрызгиванием металла в жидкой фазе. Второй может быть связан с присутствием диэлектрической окисной пленки (оксида алюминия) на поверхности катода. Таким образом проявляется эктонный механизм образования катодного пятна в искровом и дуговом разряде [2].

На поверхности алюминия, соприкасавшейся с атмосферным воздухом, обязательно присутствует пленка окисла 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 окисла приходится примерно три атома алюминия. Глубина слоя, из которого регистрируется характеристическое рентгеновское излучение составляет 2-5 мкм [3]. Таким образом толщина диэлектрического слоя Al_2O_3 на поверхности проводника может составить примерно 0,5-1 мкм. Действительно, на изображениях, полученных с помощью электронного микроскопа, иногда удается различить трещины на поверхности катода, не подвергнутой значительной эрозии. Вероятно, эти трещины образовались именно в слое окисла, покрывающего металл. 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, соответственно, электрические поля с напряженностью порядка 10^8 В/м [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]). 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 [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника – М.: Наука, 2004, - 704 с.
2. Месяц Г.Ф. // Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, 2000, - 424 с.
3. Микроанализ и растровая электронная микроскопия / Под ред. Ф.Морис, Л.Мени, Р.Тиксье. М.: Металлургия. 1985. - 408с.
4. Иванов В.А. // Прикладная физика. 2001. №1. С.5.
5. 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.
6. Иванов В.А., Коньжев М.Е., Зимин А.М., Тройнов В.И., Камолова Т.И., Летунов А.А. Электронная температура в микроплазменных разрядах, развивающихся на поверхности титана//Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 31-40.