



Получено: 15.09.2022 г. | Принято: 24.09.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.384.390>

Научная статья

ЭРОЗИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ВАКУУМНОЙ ДУГИ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ МАЛОГАБАРИТНОГО РАЗРЯДНИКА

А.А.Козлов¹, инженер / aleksandr-kozlov95@rambler.ru

С.Г.Давыдов¹, к.т.н., нач. лаборатории

А.Н.Долгов¹, д.ф.-м.н., вед. науч. сотр.

Р.Х.Якубов¹, к.т.н., нач. отделения

Аннотация. 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 и переноса вещества элементов разрядного устройства.

Ключевые слова: пробой, эрозия, искровой разрядник

Для цитирования: А.А. Козлов, С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, Р.Х. Якубов. Эрозионное воздействие импульсной вакуумной дуги на рабочие поверхности малогабаритного разрядника. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 6. С. 384–390. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.384.390>

Received: 15.09.2022 | Accepted: 24.09.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.384.390>

Original paper

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

A.A.Kozlov¹, Engineer / aleksandr-kozlov95@rambler.ru

S.G.Davydov¹, Cand. of Sci. (Tech), Head of Laboratory

A.N.Dolgov¹, Doct. of Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher

R.Kh.Yakubov¹, Cand. of Sci. (Tech), Head of Department

Abstract. The result 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.

Keywords: breakdown, erosion, spark gap

For citation: A. A. Kozlov, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, R. Kh. Yakubov. Erosive effect of a pulsed vacuum arc on the working surfaces of a small-sized spark gap. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 6. PP. 384–390. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.6.384.390>

¹ ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова", Москва, Россия / The Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute, Moscow, Russia

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время управляемые малогабаритные вакуумные коммутаторы применяются в таких областях, где определяющими требованиями являются отсутствие накаливающих 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 ее 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.

КОНСТРУКЦИЯ И МЕТОДЫ 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).

Малогабаритные 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 подверженным 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, так как толщина диэлектрика в данном случае не связана с протяженностью пробиваемого промежутка.

Картина эрозии электродов (поджигающий электрод, катод, выполненные из алюминиевого

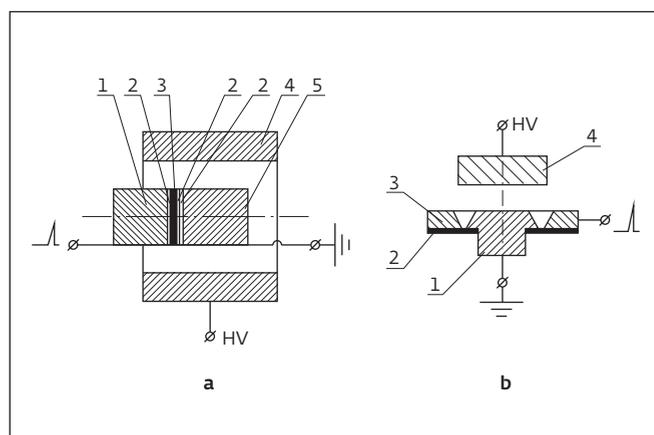


Рис.1. Вакуумные искровые разрядники различной геометрии: а – инициирующий разряд вдоль (параллельно) оси симметрии: 1 – поджигающий электрод, 2 – дополнительные металлические вставки, 3 – диэлектрическая шайба, 4 – анод, 5 – катод; б – инициирующий разряд поперек (в перпендикулярном направлении) оси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

Fig.1. Vacuum spark gaps of different geometry: а – Initiating discharge along (parallel) symmetry axis: 1 – ignition electrode, 2 – additional metal inserts, 3 – dielectric washer, 4 – anode, 5 – cathode; б – initiating discharge across (in perpendicular direction) symmetry axis: 1 – cathode, 2 – dielectric washer, 3 – ignition electrode, 4 – anode

INTRODUCTION

Nowadays, controlled small vacuum commutators are used in applications where the defining requirements are: absence of filament circuits, miniaturization, wide range of commutated currents and resistance to external influences [1]. Increase of lifetime and operation stability of the specified devices present a task which is to be adequately solved. One of the obstacles to its successful solution is erosion of commutator elements under the influence of high temperatures achieved in the vacuum-arc discharge. The purpose of the present work is to study erosion process in the small-sized vacuum gap construction elements with spark ignition. The peculiarity of the work is focused on the use of different in nature and complementary methods of research.

DESIGN AND RESEARCH METHODS

The geometry of the small-size spark gaps can be represented in two variants. In one of them, the initiating discharge on the dielectric surface occurs parallel to the symmetry axis of the gap (Fig.1a). The other takes place in the direction perpendicular to the symmetry axis (Fig.1b).

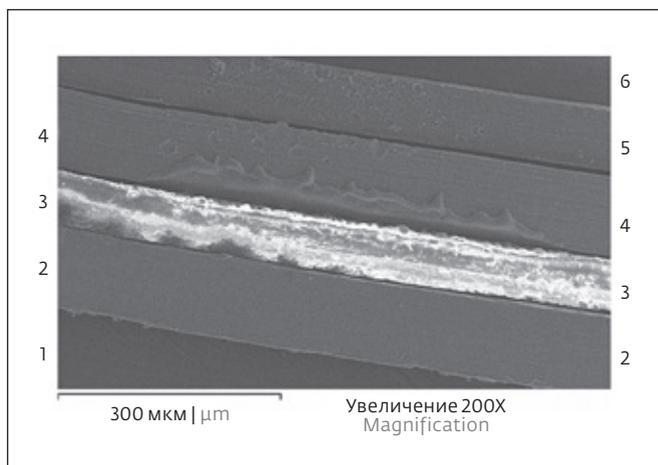


Рис.2. Состояние электродной системы после 4 срабатываний (снимок получен с помощью электронного микроскопа): 1 – поджигающий электрод; 2 – коваровая вставка; 3 – диэлектрическая шайба; 4 – коваровая вставка; 5 – титановая вставка; 6 – катод

Fig.2. Condition of the electrode system after 4 actuations (image obtained by an electron microscope): 1 – ignition electrode; 2 – forging insert; 3 – dielectric washer; 4 – kovar insert; 5 – titanium insert; 6 – cathode

сплава, и дополнительные вставки из титана и ковара) и диэлектрической шайбы, наблюдаемая визуально, выглядит так, как показано на рис. 2-5.

Получены экспериментальные свидетельства устойчивого первоначального возникновения катодного пятна в искровом вакуумном разряде по поверхности диэлектрика в тройной точке на границе трех сред: вакуума, металла и диэлектрика (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 иницировании коммутации короткого вакуумного промежутка. При продольном иницировании 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 иницировании причиной эрозии диэлектрика наряду с разогревом является механическое воздействие нормально падающего на поверхность диэлектрика потока плазмы.

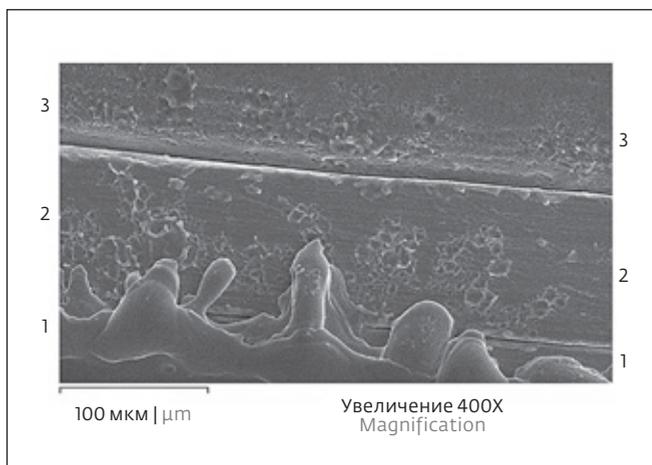


Рис.3. Состояние электродной системы после 20 срабатываний (снимок получен с помощью электронного микроскопа): 1 – коваровая вставка; 2 – титановая вставка; 3 – катод

Fig.3. Condition of the electrode system after 20 actuations (image obtained by an electron microscope): 1 – kovar insert; 2 – titanium insert; 3 – cathode

Small commutators are used at relatively low voltages, up to a few kilovolts. The corresponding length of dielectric surface over where the initiating discharge occurs is ~ 0.1 mm. In the longitudinally initiated ignition assembly (Fig.1a) the need to use a dielectric of ~ 0.1 mm thickness leads to preference for dielectrics that are sufficiently flexible, but also more prone to erosion by the discharge plasma in the cathode-anode gap. The latter is due to the fact that the energy invested in the switching discharge in the cathode-anode gap is significantly higher than the energy required for the initiating discharge. The use of heat-resistant materials, which are both hard and brittle, poses a threat to the reliability of the device. In the cross-initiation ignition unit (Fig.1b), the use of heat-resistant materials is desirable, as the dielectric thickness in this case is not related to the length of the gap to be punctured.

The visually observed erosion pattern of the electrodes (ignition electrode, cathode made of aluminium alloy, and additional inserts made of titanium and kovar) and the dielectric washer is as shown in Figs.2-5.

Experimental evidence of a stable initial occurrence of cathode spot in spark vacuum discharge on dielectric surface in the triple point at the boundary of three media – vacuum, metal and dielectric (Fig.2-4) was obtained. The direction of molten metal ejection from the metal-dielectric boundary indicates that the formation of cathode spots occurred in this area. The formation of groups of pronounced craters is observed on the cathode surface (Fig.3, 5).

При использовании слюды в первом случае, преобладающим воздействием, определяющим ресурс прибора, является перенос потоком плазмы материала электрода (катода) на поверхность диэлектрика, что приводит к падению сопротивления вплоть 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.

Слюда под воздействием разряда испускает значительное количество вещества: кристаллизационной воды и продуктов ее распада, продуктов распада окислов кремния и калия. Наблюдается "пузырение" и, добавим, расщепление слюды параллельно плоскости спайности, в результате выделения под прогревом до достаточно высокой температуры (вероятно, около 1700 °С, при которой происходит плавление двуоксида 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,

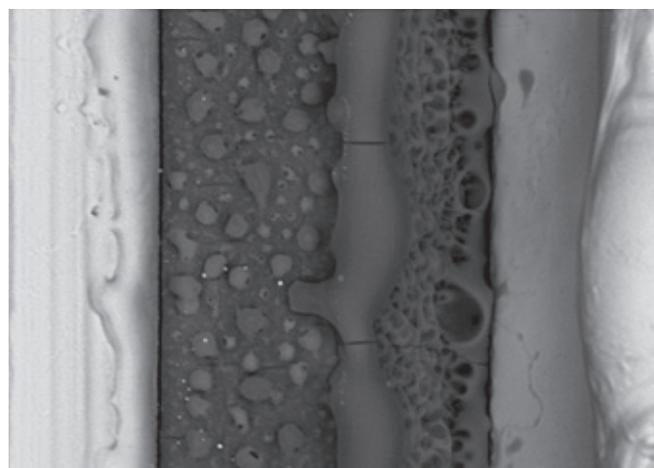


Рис.4. Картина эрозии в узле поджига с иницирующим разрядом вдоль оси симметрии

Fig.4. Erosion pattern in the ignition assembly with the initiating discharge along the symmetry axis

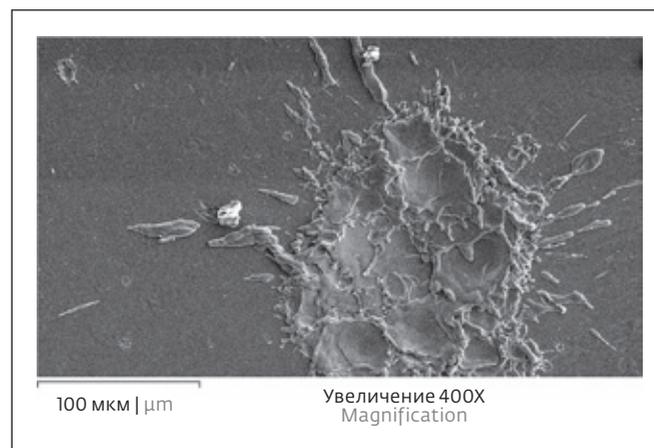


Рис.5. Картина эрозии на катоде

Fig.5. Erosion pattern on the cathode

Differences in erosion pattern for longitudinal and transverse commutation initiation of the small vacuum gap have been established. At the longitudinal commutation initiation the dielectric erosion occurs as a result of heat transfer from the cathode spot in the triplet point and tangential plasma flow from the main discharge area in the cathode-anode gap. In transverse initiation, the cause of dielectric erosion, along with the heating, is the mechanical effect of the plasma flux normally falling on the dielectric surface.

When mica is used in the first case, the predominant influence, determining the device life, is the transfer of plasma flow of the electrode material (cathode) to the dielectric surface, which leads to a drop of resistance up to shorting of the gap between the cathode and the ignition electrode. In the second case the gap

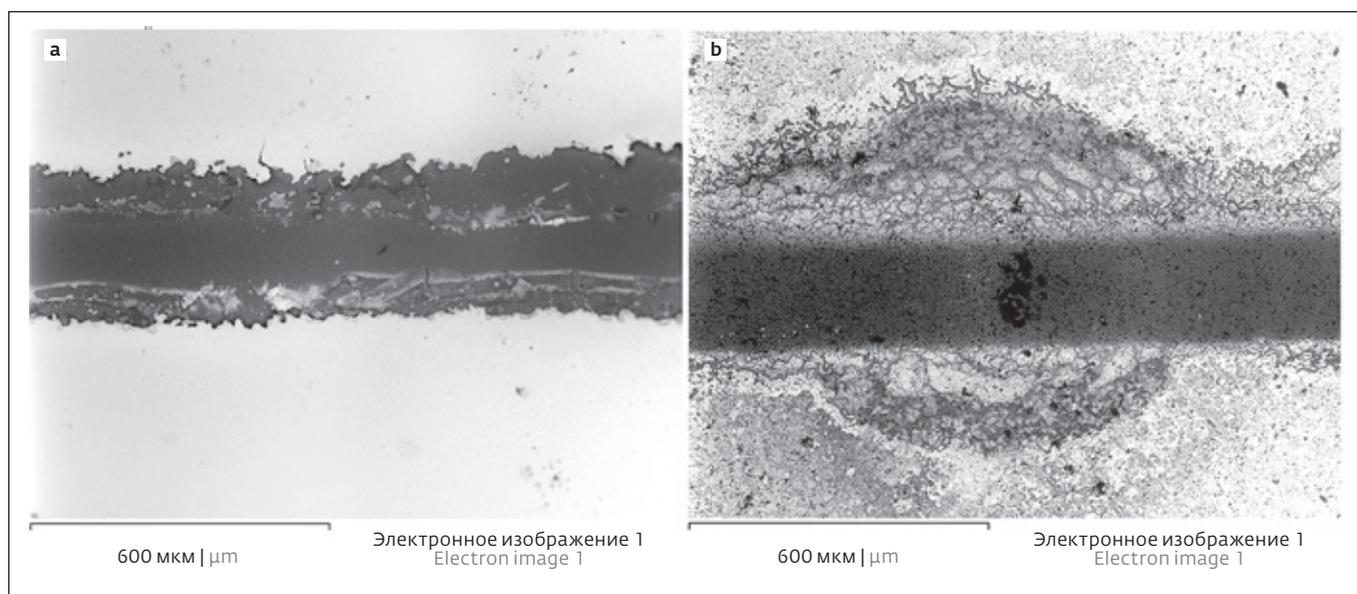


Рис.6. Картина эрозии поджигающей системы: а – на поверхности слюды; б – на поверхности керамики
 Fig.6. Erosion pattern of the ignition system: a – on the mica surface; b – on the ceramic surface

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].

between the cathode and the ignition electrode increases in the dielectric surface until the gap is closed (Fig.6a). Noticeable metallization of the dielectric surface does not occur, probably because the plasma flux falling along the normal in each discharge "blows away" the metal adhering to the dielectric surface.

Under the influence of the discharge mica emits significant quantities of matter: crystallized water, the products of its decomposition and the products of silicon and potassium oxides decomposition. There is "bubbling" and splitting of mica parallel to the plane of cleavage as a result of release of gaseous dielectric decomposition products such as water vapour under heated to a sufficiently high temperature (probably around 1,700 °C, at which silicon dioxide melts or at least the dielectric acquires plastic properties).

Presence of sorbed gas on mica surface and significant emission of erosion products which continues after the main phase of the initiating discharge, accelerates, on the one hand, the development of the discharge in its initial phase (breakdown), on the other hand it leads to rapid cooling of the discharge plasma and attenuation of the discharge itself. In contrast to the case of mica, the use of ceramics in the ignition unit leads to a lack of plasma-forming substance. This leads to the development of acceleration processes, formation of electron beams and pronounced anode spots. In this case, the effective formation of the conductive medium is due to erosion of the electrode material (Fig.6b).

With ceramics the erosion of the electrode material at the ignition point results in the transfer and



ВЫВОДЫ

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 подвергшейся значительной эрозии. Вероятно, эти трещины образовались именно в слое окисла, покрывающего металл.

deposition of a significant amount of metal onto the insulator surface in the form of a granular structure, with inclusions of the exposed dielectric surface. This is on the one hand, and on the other hand, in the erosion zone of the thin-film electrode there is a transformation of the continuous coating into separate islands surrounded by areas with a much thinner layer of metal on the ceramic substrate. Such kind of erosion makes the resistance of the gap between the cathode and the ignition electrode difficult to predict (Fig.6b).

Thus, the choice of dielectric material, over the surface of which the spark discharge takes place can influence the nature of the accompanying erosion processes in a very noticeable way. The above presented analysis makes it possible to explain the difference in the observed pattern of discharge glow on the mica and ceramic surfaces. As it was mentioned, in case of discharge on the ceramic surface the electrode surfaces should be more involved as a plasma-forming element, while for mica – it is the mica surface.

The study of cathode erosion pattern in vacuum arc discharge shows that the process of cathode spot formation and migration of the cathode spot across the cathode surface reveals a presence of two competing mechanisms. One can be attributed to electrical explosion of micro points on the metal surface and metal sputtering in the liquid phase. The second mechanism can be



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Самохин А.Б.

ОБЪЕМНЫЕ СИНГУЛЯРНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 218 с. ISBN 978-5-94836-618-0.

Цена 840 руб.

В книге с помощью сингулярных интегральных уравнений рассматриваются различные классы задач электродинамики. Монография состоит из двух частей. В первой части выводятся объемные сингулярные интегральные уравнения, описывающие задачи рассеяния электромагнитных волн на трехмерных неоднородных и анизотропных структурах, а также сингулярные уравнения с запаздыванием по времени, описывающие задачи взаимодействия нестационарного поля с ограниченной материальной средой. С использованием полученных уравнений доказываются теоремы существования и единственности решения различных классов задач рассеяния волн. Во второй части излагаются итерационные методы для решения уравнений, математически строго обосновывается применение метода Галеркина и метода коллокации для численного решения уравнений, описывающих задачи рассеяния волн на трехмерных неоднородных и анизотропных структурах. Предлагаются эффективные алгоритмы численного решения сингулярных уравнений.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphera.ru; sales@technosphera.ru



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].

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

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. 408 с.
4. Иванов В.А. Прикладная физика. 2001. № 1. С. 5.
5. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С.Григорьева, Е.С.Мелихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
6. Иванов В.А., Коныжев 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.

related to the presence of a dielectric oxide film (aluminium oxide) on the cathode surface. In this way the ecton mechanism of cathode spot formation in spark and arc discharge can be recorded [2].

CONCLUSIONS

An aluminium oxide dielectric film is necessarily present on the surface of aluminium in contact with atmospheric air. X-ray fluorescence analysis of the elemental composition of the used cathode surface prior to its operation yields the following result. The recorded mass fraction of aluminium in the analysed material is 73%. The remainder is almost entirely oxygen, with the exception of a small amount of manganese and traces of some random impurities.

Assuming that the analysed material consists of aluminium trioxide molecules and aluminium atoms, it can be calculated that there are approximately three aluminium atoms per one oxide molecule. The depth of the layer emitting the characteristic X-ray radiation comprises 2–5 μm [3]. Thus, the thickness of Al_2O_3 dielectric layer on the conductor surface can be about 0.5–1 μm . Indeed, the electron microscope images sometimes show cracks on the cathode surface which have not undergone significant erosion. It is likely that these cracks have been formed in the oxide layer covering the metal. In vacuum, under the influence of plasma flux, a charge accumulates on the outer surface of the dielectric film. As a result, potential differences of about 10^2 V and, accordingly, electric fields with intensities of about 10^8 V/m can arise in places of film rupture at its cut-off [4]. Film rupture can occur during heating at the stage of preheating and degassing of the gap due to difference in the linear expansion temperature coefficients of the film and metal substrate (the film has 4–6 times smaller thermal coefficient of linear expansion than the metal [5]). Under such conditions, a breakdown at the edge of the dielectric film occurs and the so-called microplasma discharge appears on the metal with the formation of a dense plasma region of 1–100 μm in size. The impact of microplasma discharge on metal leads to appearance of electric field of $\sim 2 \times 10^9$ V/m in the contact layer which causes transition to explosive electronic emission [6].

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

31.10–03.11.2022

www.chemistry-expo.ru



25-я юбилейная
международная
выставка химической
промышленности
и науки

ХИМИЯ

КНИМИА



**Иновации
и современные
материалы**



Нефтегазохимия



Startup ChemZone



**Автоматизация
и цифровизация
производства**



Химмаш. Насосы



Хим-Лаб-Аналит



Зеленая химия



Индустрия пластмасс

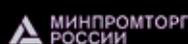


**Защита от коррозии
«КОРРУС»**

При поддержке:

- Министерства промышленности и торговли РФ
- ФГУП «НПЦ «Химвест»
- Российского Союза химиков
- ОАО «НИИТЭХИМ»
- Российского химического общества им. Д.И. Менделеева
- Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
- РХТУ им. Д.И. Менделеева

Под патронатом ТПП РФ



12+

Реклама

