

INVESTIGATION OF CHANGES IN THE FIELD EMISSION CHARACTERISTICS OF THE ERODED CATHODE SURFACE AFTER SUBMICROSECOND VACUUM ARC DISCHARGES WITH DIFFERENT CURRENT AMPLITUDES

Yuriy Alexandrovich Zemskov^a, Yuriy Igorevich Mamontov, Igor Vladimirovich Uimanov

Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Amundsen str. 106, Yekaterinburg, 620016, Russia

^a zemskov@iep.uran.ru

ABSTRACT

A multifactorial investigation of the influence of the parameters of a vacuum discharge on the copper cathode on its emission properties was carried out. The object of the study was the initially smooth surface of copper cathodes obtained by melting the tips of copper needles in vacuum. The typical radius of the cathode tip was 25–30 μm. Several cathodes were subjected to vacuum arc discharges of submicrosecond duration with a current amplitude in the range of tens of amperes. After each discharge, the cathode was placed in a field-emission projector inside the same vacuum chamber without breaking the vacuum conditions. An automated measuring system was connected to the projector to obtain the current-voltage characteristics of the field emission. According to the current-voltage characteristics, the factor of the electric field enhancement on the surface of the emitter was estimated. This estimation, in combination with the analysis of the images of the sample surface, obtained by the scanning electron microscopy, showed the increase of the characteristic size of the microrelief objects and the local electric field enhancement factor with the arc discharge current value.

KEYWORDS

Vacuum discharges; electrode erosion; current amplitude; field electron emission.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ АВТОЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭРОДИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАТОДОВ ПОСЛЕ СУБМИКРОСЕКУНДНЫХ РАЗРЯДОВ С РАЗЛИЧНОЙ АМПЛИТУДОЙ ТОКА

Юрий Александрович Земсков^a, Юрий Игоревич Мамонтов, Игорь Владимирович Уйманов

Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

^a zemskov@iep.uran.ru

АННОТАЦИЯ

Проведено многофакторное исследование влияния параметров вакуумного разряда на поверхности медного эмиттера на его эмиссионные свойства. Объектом исследования выступала исходно гладкая поверхность медных катодов, полученная путем оплавления в вакууме

кончиков медных игл. Типичный радиус кончика катода составлял 25–30 мкм. Несколько катодов были подвергнуты вакуумным дуговым разрядам субмикросекундной длительности с амплитудой тока в диапазоне десятков ампер. После каждого разряда катод помещался в автоэлектронный проектор внутри той же вакуумной камеры без напуска воздуха. К проектору был подключен автоматизированный измерительный комплекс для съемки вольт-амперных характеристик автоэмиссии. По вольт-амперным характеристикам производилась оценка коэффициента усиления электрического поля на поверхности эмиттера. Эта оценка в комплексе с анализом изображений поверхности образцов, полученных методом сканирующей электронной микроскопии, показали рост характерных размеров объектов микрорельефа и коэффициента локального усиления электрического поля с током дугового разряда.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Вакуумные разряды; эрозия электродов; амплитуда тока; автоэлектронная эмиссия.

Введение

Механизм функционирования катодного пятна вакуумных разрядов по-прежнему остается не до конца изученным, хотя именно он является ключевым для понимания фундаментальных процессов и особенностей горения вакуумных дуг. Среди таких особенностей важное место занимают условия самоподдержания дугового разряда, самопроизвольное погасание дуги при малых токах и наличие пороговых значений тока дуги. Согласно эктонной теории [1], эти явления могут объясняться параметрами взаимодействия плазмы с жидким металлом в ячейках катодного пятна [2]. При этом важными факторами в этом процессе выступают ток дуги, его плотность, а также теплофизические параметры материала катода. Известно, что под воздействием плазмы жидкий металл из лунки катодного пятна может выдавливаться в стороны, формируя различные структуры (валики, микроструи) [3], которые в свою очередь могут служить базой для инициирования новых ячеек катодного пятна [4]. Такие микроструктуры многократно наблюдались на поверхности электродов в застывшем виде [5, 6]. Микронеровности такого типа зачастую являются точками инициирования последующих пробоев [7, 8]. Поведение жидкого металла в ячейках катодного пятна – предмет многих исследова-

ний, в частности, численного моделирования [9–12]. Однако в данной области ощущается недостаток экспериментальных данных, связанный в том числе со сложностью получения информации по функционированию отдельных ячеек катодного пятна, поскольку для этого нужны слаботочные разряды малой длительности. Следует отметить, что для исследования связи эмиссионных характеристик с микрорельефом поверхности нужны чистые образцы без диэлектрических включений, поскольку последние очень заметно влияют на автоэлектронную эмиссию, повышая коэффициент усиления поля [13–15].

В данной работе предпринята попытка исследовать микрорельеф и эмиссионные характеристики структур, являющихся результатом горения дуги на гладких медных катодах малого размера (десятки микрометров). Для этого в комплексе применялась методика съемки вольт-амперных характеристик (ВАХ) автоэмиссии с образца (с определением коэффициента локального усиления электрического поля на микровыступах), а также сканирующая электронная микроскопия поверхности образцов.

1. Экспериментальная установка и методы

В ходе эксперимента использовались образцы, изготовленные из медной проволо-

ки технической чистоты с начальным диаметром 180 мкм. Заготовки подвергались электрохимическому полирующему травлению, в результате которого получались медные иглы со средним диаметром около 60–70 мкм и углом при вершине конуса около 10 градусов. Затем кончик иглы переплавлялся в вакууме при давлении остаточных газов около 10^{-2} Па. Для этого использовался метод контактного оплавления на вольфрамовой проволоке, разогретой до температуры, превышающей температуру плавления меди. В результате на концах игл получались шаровидные образования с гладкой поверхностью и с характерным диаметром ~50–80 мкм.

Для исследования изменения эмиссионных характеристик по мере эродирования образца применялась комплексная установка на базе автоэлектронного проектора. Схема установки приведена на рис. 1. В экспериментальной камере создавались высоковакуумные условия с давлением остаточных газов не хуже 10^{-6} Па. И эродирование, и измерение эмиссионных характеристик образца проводились в одной камере без ее развакуумирования. Образец закреплялся в держателе, изолированном от заземленного корпуса вакуумной камеры, что позволяло подключать к держателю измерительные омические шунты для измерения тока автоэмиссии или регистрации импульса разрядного тока. Основным узлом проектора является люминофорный экран в металлической рамке, служащий анодом вакуумного промежутка. Экран закреплен на штоке трехкоординатного манипулятора с микрометрическими винтами через изолирующую вставку. Это позволяло подавать на экран высокое напряжение, необходимое для пробоя промежутка или запуска процесса автоэмиссии. Манипулятор позволял помещать

напротив образца либо основную часть экрана для контроля автоэмиссии, либо металлическую рамку экрана для запуска эродированного дугового разряда. Микрометрические винты позволяли регулировать величину межэлектродного промежутка с точностью до 10 мкм. Контролировалось это расстояние при помощи оптической системы, включающей длиннофокусный микроскоп Questar QM100 и цифровую камеру с откалиброванной шкалой. Как правило, расстояние между катодом и анодом составляло 300 мкм в режиме эродирования и около 1 мм в режиме съемки вольт-амперных характеристик автоэмиссии с образца. Величина промежутка для эродированной дуги определялась с одной стороны необходимостью создать достаточную для пробоя напряженность поля на катоде, а с другой стороны – потребностью снизить влияние анодной плазмы на образец, а также уменьшить перенос материала анода на катод, особенно в виде капельной фракции.

В качестве источника, питающего эродированную дугу, использовалась LC-линия из восьми LC-звеньев. Этот источник позволял подавать на промежуток квазипрямоугольные импульсы длительностью около 600 нс и амплитудой напряжения до 17 кВ. Ток дуги регулировался лимитирующим резистором в цепи анода, а измерялся при помощи низкоиндуктивного шунта сопротивлением 1,13 Ом в цепи катода. Примеры осциллограмм разрядного тока при различных значениях ограничивающего сопротивления приведены в следующем разделе. Поскольку на квазипрямоугольный импульс накладывались осцилляции в контуре, за действующую величину тока принималось среднее значение тока во временном диапазоне 100–400 нс от начала импульса.

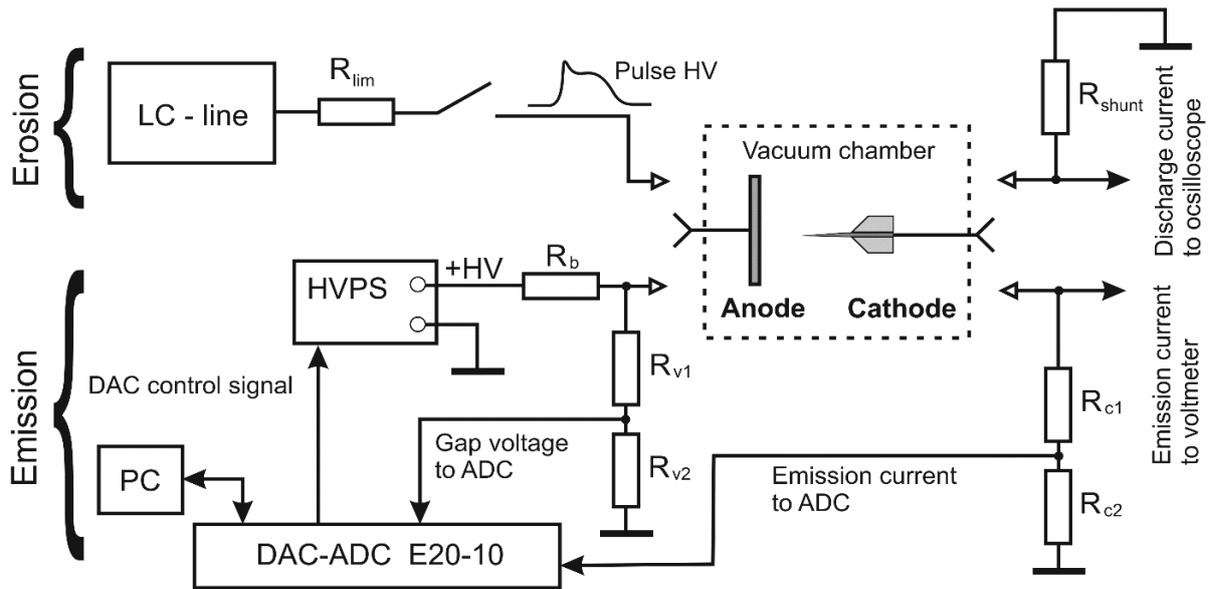


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Эрозия образца вакуумной дугой и съемка вольт-амперных характеристик

Fig. 1. Experimental setup scheme. Erosion of a sample with vacuum arc and obtaining of current-voltage characteristics

Вольт-амперные характеристики автоэмиссии снимались при помощи автоматизированного измерительного комплекса, включающего компьютер со специализированным программным обеспечением, ЦАП-АЦП модуль LCard E20-10 и управляемый источник постоянного высокого напряжения ИВН-10П-30-5, позволяющий подавать на промежуток напряжение до 20 кВ. Методика получения ВАХ с помощью этого комплекса подробно описана в наших предыдущих работах [16–18].

Основной оценочной характеристикой эмиссионных свойств образца выступал локальный коэффициент усиления электрического поля β_{micr} , связанный с параметрами микрорельефа на поверхности образца [19]. Для корректной оценки величины β_{micr} по полученным в ходе эксперимента кривым ВАХ необходимо знать макроскопическое распределение электрического поля вблизи образца. Для выяснения конфигурации электрического поля в исследуемой электродной системе производилось численное решение уравнения Лапласа. В качестве исходных данных

для построения геометрии расчетной области использовались реальные размеры и форма образцов, полученные в ходе микрофотографирования. Искомой величиной являлась напряженность поля на оси расчетной области вблизи поверхности катода. В результате расчета для каждого образца вычислялась величина β_{macr} , которая имеет смысл параметра формы катода и имеет размерность см^{-1} . При этом подразумевалось, что величина поля вблизи поверхности образца E , напряжение U , приложенное к электродам, и β_{macr} связаны соотношением: $E = \beta_{\text{macr}} \cdot U$.

При известной напряженности макроскопического поля вблизи поверхности образца задача вычисления микроскопического коэффициента усиления поля β_{micr} , который зависит от геометрических параметров эмиттера на поверхности образца, сводится к перестроению полученной в эксперименте ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма [20]. При этом предполагается, что реальное поле E_{res} вблизи поверхности образца должно быть увеличено в β_{micr} раз, то есть: $E_{\text{res}} = \beta_{\text{micr}} \cdot E = \beta_{\text{micr}} \cdot \beta_{\text{macr}} \cdot U$. По углу наклона α диаграм-

мы ВАХ, перестроенной в координатах Фаулера-Нордгейма (где она представляет собой прямую), можно оценить β_{micr} , поскольку они связаны соотношением $\beta_{\text{micr}} = 2,98 \cdot 10^9 \cdot \varphi^{3/2} / \tan \alpha$, где φ – работа выхода материала катода (в эВ). В результате по свойствам полученной кривой ВАХ, перестроенной в координатах Фаулера-Нордгейма, удавалось оценить эмиссионные характеристики поверхности образца. При этом описанная процедура оценки микроскопического коэффициента усиления поля проводилась после каждого пробоя поверхности дуговым разрядом. Количество пробоев на один образец составляло 5–7 раз. Большее количество пробоев при максимальных значениях разрядного тока приводило к разрушению всего шаровидного кончика образца.

В эксперименте ток эродирующей дуги был ограничен диапазоном 20–70 А. При токах выше этого диапазона эрозия за один акт разряда была сопоставима с массой шаровидного кончика, а при меньших токах не удавалось создать условия для регулярного пробоя промежутка на достаточно большом расстоянии. По-видимому, микро рельеф при этом был недостаточно выраженным, чтобы создать значительное усиление поля на микровыступах и достичь необходимой для пробоя напряженности поля.

Микро рельеф поверхности образцов исследовался с помощью сканирующего

электронного микроскопа TESCAN MIRA. СЭМ-съемка была выполнена в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН.

2. Результаты и обсуждение

Поскольку ток эродирующего разряда варьировался дискретно, заменой ограничивающего резистора, в целевом диапазоне токов было выбрано несколько точек для проведения экспериментального исследования влияния эрозии на эмиссионные характеристики.

СЭМ-съемка для образцов до эродирования, как правило, не проводилась. Качество исходной поверхности и форма шаровидной законцовки оценивались с помощью оптического микроскопа Zeiss Stemi 2000 с откалиброванной цифровой камерой. Геометрические параметры образца определялись по совместному рассмотрению результатов оптической съемки до эксперимента и СЭМ-съемки после него.

Наименьший ток, при котором происходили воспроизводимые пробой промежутка 300 мкм, оказался порядка 20 А. Образец для данного тока имел диаметр законцовки около 45 мкм и диаметр стержня около 38 мкм у самой законцовки. Оцененный коэффициент $\beta_{\text{macr}} = 271,45 \text{ см}^{-1}$. Образец был подвергнут 7 дуговым разрядам со средним током около 24 А. Пример осциллограммы разрядного тока, полученной с помощью омического шунта, приведен на рис. 2.

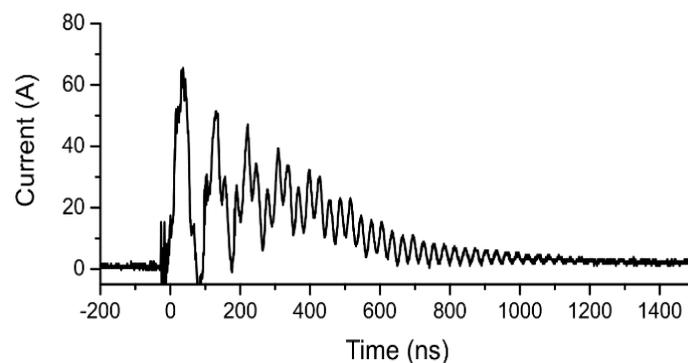


Рис. 2. Пример осциллограммы тока дуги (первый образец, 24 А)

Fig. 2. Example of the arc current waveform (first sample, 24 A)

После каждого разряда установка переводилась в режим съемки ВАХ автоэмиссии с образца. Как правило, производился поиск такого уровня напряжения на промежутке, при котором ток оказывался в диапазоне 200–800 нА, что близко к пределу для нашего измерительного комплекса, а затем ВАХ снималась в автоматическом режиме при постепенном уменьшении напряжения. Ток автоэмиссии не отличался высокой стабильностью, особенно в диапазоне наибольших значений, где он мог изменяться на десятки процентов. Поэтому ВАХ снимались по 2–4 после каждого пробоя образца. Значения коэффициента усиления электрического поля β_{micr} для этого образца в основном лежали в диапазоне 40–70, кроме самого первого пробоя, когда β_{micr} был около 20–25, и после четвертого пробоя, когда β_{micr} достигал значения 175. Такое значение коэффициента усиления поля в ходе эксперимента больше

ни разу не обнаруживалось, даже при больших токах. По-видимому, на поверхности могло возникнуть нетипичное микрообразование с высоким соотношением высоты к радиусу. На рис. 3 приведена микрофотография первого образца после семи разрядов.

Заметно, что поверхность значительно разрушена, однако большая часть объема шарика сохранилась. Основную часть микро рельефа поверхности формируют кратеры, образованные катодными пятнами, с характерным размером 15–25 мкм. Струи застывшего металла, растекавшегося из кратеров, имеют размеры 5–7 мкм.

Второй образец имел исходный диаметр шарика около 44 мкм, а стержня – около 36 мкм. Оцененный коэффициент $\beta_{\text{macr}} = 315,33 \text{ см}^{-1}$. Этот образец подвергался эрозии дуговым разрядом с током около 45 А (см. осциллограмму на рис. 4).

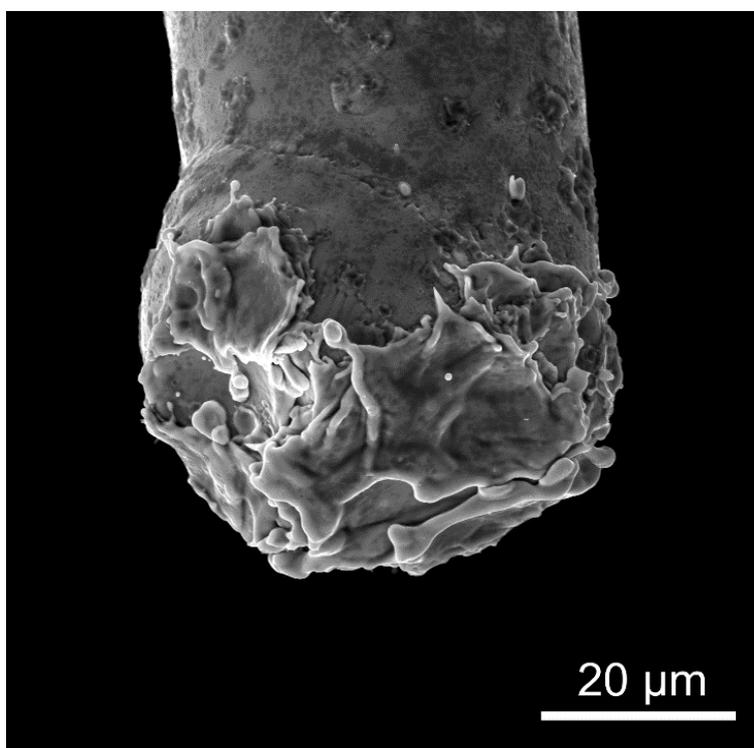


Рис. 3. СЭМ-изображение первого образца после 7 разрядов с током 24 А

Fig. 3. SEM-image of the first sample after 7 discharges with 24 A current

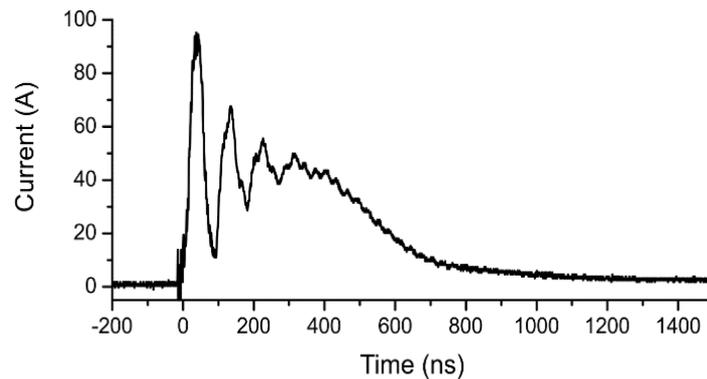


Рис. 4. Пример оциллограммы тока дуги (второй образец, 45 А)

Fig. 4. Example of the arc current waveform (second sample, 45 A)

В оптический микроскоп, используемый для контроля межэлектродного расстояния, было замечено изменение формы шаровидной законцовки, что говорило о значительной эрозии образца, поэтому эксперимент был остановлен после пяти разрядов на его поверхности. Для второго образца значения коэффициента лежали в диапазоне 80–120. На микрофотографии этого образца, приведенной на рис. 5, заметно, что размер кратеров при таком токе может достигать 30 мкм,

а размеры застывших струй и валиков металла, формирующих выступы получившейся микроструктуры, достигают 10 мкм и более. Это может объяснить стабильно возросшие по сравнению с током 24 А значения коэффициента β_{micr} . Эрозия такого масштаба действительно могла быть заметна в оптический микроскоп, т.к. с определенных ракурсов форма законцовки значительно отличается от сферической.

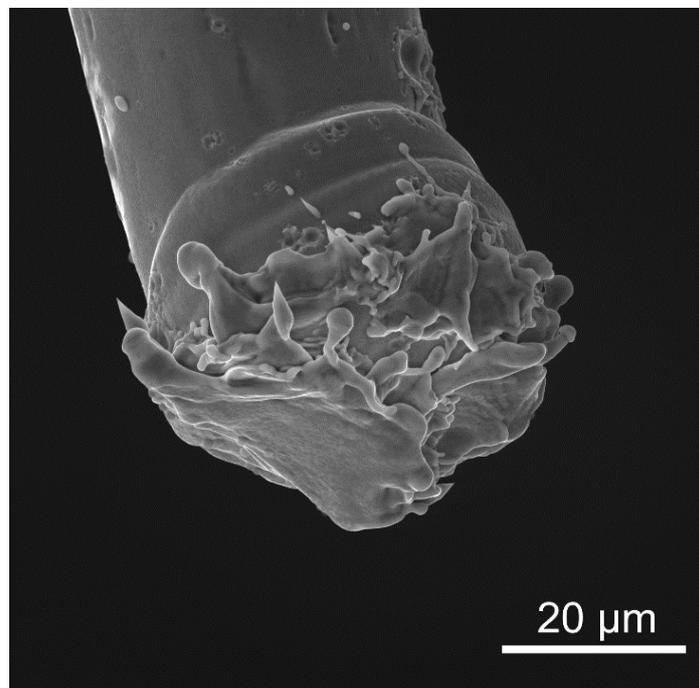


Рис. 5. СЭМ-изображение второго образца после 5 разрядов с током 45 А

Fig. 5. SEM-image of the second sample after 5 discharges with 45 A current

Геометрические параметры третьего образца были следующие: диаметр шарика около 38 мкм, а стержня – около 30 мкм. Оцененный коэффициент $\beta_{\text{macr}} = 370,36 \text{ см}^{-1}$. Данный образец был подвергнут пяти разрядам с током дуги около 63 А (см. рис. 6), хотя значительное разрушение законцовки было очевидно при наблюдении в оптический микроскоп уже после третьего разряда.

Значения коэффициента β_{micr} для третьего образца лежали в диапазоне 70–130, за исключением первого разряда, после которого β_{micr} был около 20.

Микрофотография третьего образца после пяти дуговых разрядов на его поверх-

ности приведена на рис. 7. Заметно, что шарообразная законцовка была практически разрушена, а размеры кратеров при таком токе могут превышать 40 мкм (равномерно оплавлен весь торец образца). Застывшие струи металла могут иметь размеры порядка 20 мкм. Однако, по оценке пространственного распределения свечения экрана автоэлектронного проектора и соотношения его с пространственной ориентацией образца, основными эмиттерами являлись два острия, расположенные на снимке слева и справа на границе валика расплавленного металла, растекавшегося с торца катода.

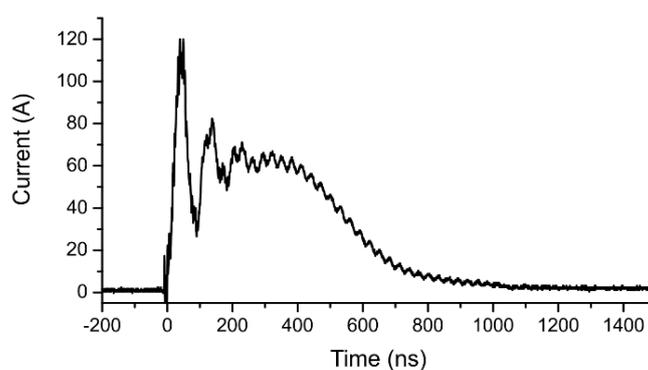


Рис. 6. Пример осциллограммы тока дуги (третий образец, 63 А)

Fig. 6. Example of the arc current waveform (third sample, 63 A)

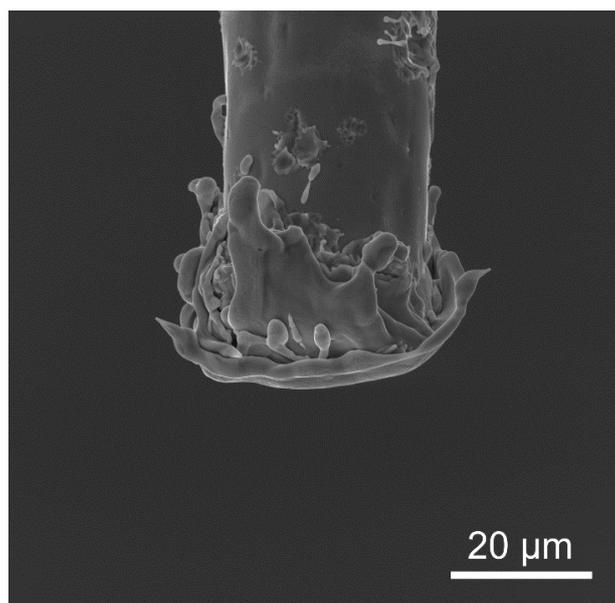


Рис. 7. СЭМ-изображение третьего образца после 5 разрядов с током 63 А

Fig. 7. SEM-image of the third sample after 5 discharges with 63 A current

Диаграмма, демонстрирующая изменение коэффициента усиления электрического поля в ходе эксперимента, приведена на рис. 8. Пунктирной линией на диаграмме показано изменение среднего значения коэффициента β_{micr} по всем полученным ВАХ, включая выбивающиеся из типичного диапазона. С учетом результатов съемки поверхности образцов в сканирующем электронном микроскопе можно сказать, что при повышении тока дугового разряда с 24 до 45 А микромасштабный коэффициент усиления поля растет вместе с характерным размером микрорельефа, оставленного катодным пятном дугового разряда. При дальнейшем увеличении тока эродирующего разряда размеры области, занятой катодным пятном, становятся сравнимы с площадью поверхности образца или даже превышают

ее. По-видимому, при таком соотношении формирование кратеров происходит не так, как в случае достаточно большой поверхности электрода. Поэтому интерпретация результатов измерения эмиссионных характеристик третьего образца (эродированного током 63 А) может быть существенно неточной.

Диапазон значений коэффициента локального усиления поля β_{micr} без учета упомянутых ранее «аномальных» значений имеет сравнимые величины для всех образцов – около 60 единиц. Однако в процентном отношении вариативность этого коэффициента (а значит, и состояния микрорельефа) гораздо выше для тока порядка 20 А, где он мог изменяться от разряда к разряду по меньшей мере в 4 раза, тогда как для больших токов можно ожидать изменений в 1,5–2 раза.

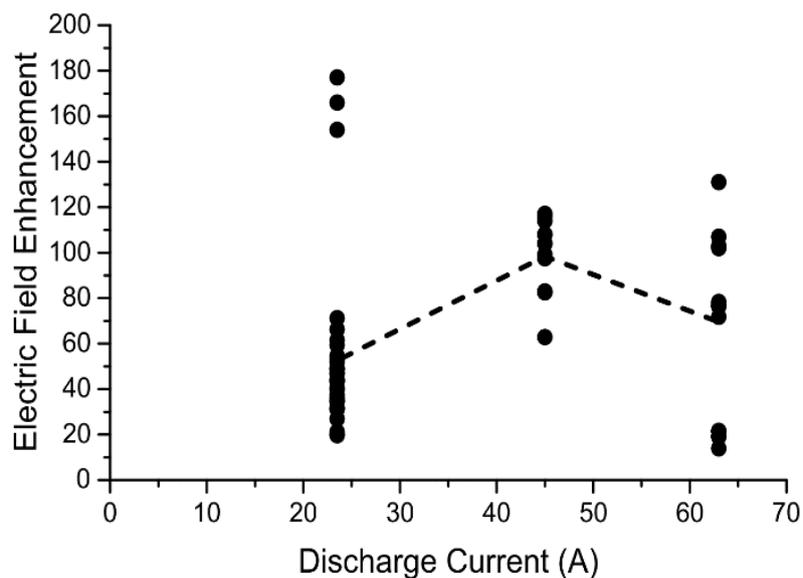


Рис. 8. Значения коэффициента локального усиления электрического поля, измеренные после эрозии образца тока вакуумными дуговыми разрядами с различной величиной тока.

Пунктирной линией отмечены средние значения коэффициента

Fig. 8. Values of the local electric field enhancement factor, obtained after the vacuum arc erosion at different magnitudes of the arc current.

Dashed line marks average values of the factor

Выводы

Проведен комплексный анализ микро-рельефа поверхности и автоэмиссионных характеристик медных образцов, рельеф на которых формировался в результате функционирования катодных пятен вакуумного дугового разряда при различных значениях разрядного тока в диапазоне 20–70 А. Съемка вольт-амперных характеристик и определение микроскопического коэффициента усиления электрического поля производилась после каждого разряда. Показана связь характерных размеров объектов микро-рельефа с величиной тока дуги и локальным коэффициентом усиления поля β_{micr} . В диапазоне от 20 до 70 А размер микровыступов увеличивается с 5–7 до 20 и более микрометров. Среднее значение коэффициента β_{micr} растет с 40 до 100 единиц с увеличением тока с 24 до 45 А. Дальнейший рост коэффициента с током вероятен, но его трудно объективно оценить при выбранных параметрах эксперимента, т.к. объекты микро-рельефа оказываются сравнимыми по размеру с самим образцом при токах порядка 60 А. Для расширения диапазона рассматриваемых параметров требуется коррекция техники исследования. Полученные данные могут иметь ценность для моделирования процессов формирования кратеров на катодах с ограниченным теплоотводом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mesyats G. A. Cathode phenomena in a vacuum discharge: the breakdown, the spark and the arc. Moscow: Nauka, 2000. P. 399.
2. Barenholts S. A., Mesyats G. A., Chentsov A. G. Spontaneous extinguishing of a vacuum arc in terms of the ecton model // IEEE transactions on plasma science. 1999. V. 27, Iss. 4. P. 817–820. DOI: 10.1109/27.782244.
3. Mesyats G. A., Proskurovsky D. I., Yankelevich E. B. Cathode surface microrelief formation at the explosive electron emission // Proc. 7th Intl. Symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, (Novosibirsk, USSR), 1976. P. 230–237.
4. Latham R.V. High voltage vacuum insulation: the physical basis. Academic Press, 1981. P. 245.
5. Daalder J. E. Cathode erosion of metal vapour arcs in vacuum: Thesis Tech. Univ. Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven, 1978. P. 556. DOI: 10.6100/IR22411.
6. Vogel N., Cebulla H. The electrical conductivity of break arcs: A diffusion dominated phenomenon // Beiträge aus der Plasmaphysik. 1986. V. 26, Iss. 6. P. 399–412. DOI: 10.1002/ctpp.19860260604.
7. Jüttner B. Erosion craters and arc cathode spots in vacuum // Beiträge aus der Plasmaphysik. 1979. V. 19, Iss. 1. P. 25–48. DOI: 10.1002/ctpp.19790190104.
8. Puchkarev V. F., Murzakayev A. M. Current density and the cathode spot lifetime in a vacuum arc at threshold currents // J. Phys. D: Appl. Phys. 1990. V. 23, No. 1. Article number 26. DOI: 10.1088/0022-3727/23/1/005.
9. Uimanov I. V., Shmelev D. L., Oks E. M., Yushkov G. Yu., Barenholts S. A. Cathode and plasma phenomena in vacuum-arc sources of hydrogen isotope ions: I. Desorption of hydrogen isotopes during the operation of vacuum arc cathode spots // Plasma Sources Science and Technology. 2020. V. 29, No. 1. Article number 015021. DOI: 10.1088/1361-6595/ab62da.
10. Gashkov M. A., Mesyats G. A., Uimanov I. V., Zubarev N. M. Molten metal jets formation in the cathode spot of a vacuum arc // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. V. 47, Iss. 8. P. 3456–3461. DOI: 10.1109/TPS.2019.2906396.
11. Mesyats G. A., Uimanov I. V. Semiempirical model of the microcrater formation in the cathode spot of a vacuum arc // IEEE transactions on plasma science. 2017. V. 45, Iss. 8. P. 2087–2092. DOI: 10.1109/TPS.2017.2713484.
12. Mesyats G. A., Uimanov I. V. Hydrodynamics of the molten metal during the crater formation on the cathode surface in a vacuum arc // IEEE Transactions on plasma science. 2015. V. 43, Iss. 8. P. 2241–2246. DOI: 10.1109/TPS.2015.2431317.
13. Farrall G. A., Owens M., Hudda F. G. Further studies of electron emission areas on electropolished copper surfaces in vacuum // J. Appl. Phys. 1975. V. 46, Iss. 2. P. 610–617. DOI: 10.1063/1.321665.
14. Hurley R. E., Dooley P. J. Electroluminescence produced by high electric fields at the surface of copper cathodes // J. Phys. D: Appl. Phys. 1977. V. 10, No. 15. Article number L195. DOI: 10.1088/0022-3727/10/15/002.
15. Jüttner B. Erosion phenomena on contaminated cathodes caused by electrical discharges in ultra high vacuum // Beiträge aus der Plasmaphysik. 1978. V. 18, Iss. 4. P. 265–269. DOI: 10.1002/ctpp.19780180409.
16. Mamontov Yu. I., Zemskov Yu. A., Uimanov I. V., Zubarev N. M., Kaziev A. V., Kharkov M. M., Barenholts S. A. Emission Properties and Dielectric Strength

of a Nanostructured Tungsten Field-Emissive Cathode // IEEE Trans.on Plasma Sci. 2022. V. 50, Iss. 9. P. 2720–2728. DOI: 10.1109/TPS.2022.3193177.

17. Mamontov Yu. I., Zemskov Yu. A., Uimanov I. V., Zubarev N. M., Kaziev A. V., Barenholts S. A. Electrical properties of He-induced W “fuzz” within the pre-breakdown and breakdown regimes // Proceedings of 29th ISDEIV, (Padova, Italy), 2021. P. 69–72. DOI: 10.1109/ISDEIV46977.2021.9587227.

18. Zemskov Yu. A., Mamontov Yu. I., Uimanov I. V., Zubarev N. M., Kaziev A. V., Kharkov M. M., Barenholts S. A. Instabilities of electrical properties of He-

induced W “fuzz” within the pre-breakdown and breakdown regimes // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2064, Iss. 1. Article number 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/2064/1/012004.

19. Alpert D., Lee D., Lyman E., Tomaschke H. Initiation of electrical breakdown in ultrahigh vacuum // J. Vac. Sci. Technol. 1964. V. 1, Iss. 2. P. 35–50. DOI: 10.1116/1.1491722.

20. Fowler R. H., Nordheim L. Electron emission in intense electric fields // Proc. R. Soc. Lond. Series A. 1928. V. 119, Iss. 781. P. 173–181. DOI: 10.1098/rspa.1928.0091.