

Исследование эрозии поверхности вольфрамового катода в коротком вакуумном разряде

Ю.А. Земсков*, И.Л. Музюкин

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**yurzem@mail.ru*

Аннотация. Исследовались образцы с гладкой поверхностью, полученные методом плавления в вакууме. Заготовками служили вольфрамовые проволоочки с исходным диаметром 90 мкм, подвергнутые электрохимической полировке. Дальнейшие этапы эксперимента проводились в той же вакуумной камере без нарушения вакуумных условий. Эти образцы использовались в качестве катодов вакуумного разряда. Анодом служил вольфрамовый проволоочный электрод диаметром 90 мкм. Вакуумный разряд питался от импульсного источника на основе кабельной линии. Длительность импульсов находилась в диапазоне десятков наносекунд. Ток разряда не превышал 10 А. Разряд запускался методом самопробоя при подаче импульса на электродный промежуток. Одиночные разряды инициировались на различных участках поверхности образцов. При этом проводилась фоторегистрация разрядного промежутка при помощи длиннофокусного оптического микроскопа и цифровой камеры. По окончании экспериментальной серии поверхность образцов исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии. Результаты фоторегистрации разрядов позволили установить соответствие эрозионных следов на поверхности образцов параметрам конкретных разрядов. В результате были выявлены некоторые особенности эрозии поверхности при функционировании коротких вакуумных разрядов в малых межэлектродных промежутках.

Ключевые слова: вакуумный разряд, эрозия катода, вольфрам.

1. Введение

Эрозия поверхности катода представляет большой интерес из-за ее большого влияния в различных области применения вакуумных разрядов. Кроме того, эрозия поверхности катода является ключевым процессом в функционировании катодного пятна. Катодные пятна оставляют на поверхности катода следы, похожие на кратеры. Следы эрозии катода выглядят как цепочка кратеров, где следующий кратер появляется на краю предыдущего [1, 2]. Основная проблема заключается в том, что кратер, появляющийся на краю предыдущего, искажает его форму. Когда ток разряда значительно превышает пороговый ток, а продолжительность разряда намного превышает время жизни катодного пятна на одном месте, результирующий след эрозии представляет собой очень сложный рельеф, который трудно проанализировать. Для получения эрозионного следа, сформированного в течение времени жизни одиночного катодного пятна, необходимо использовать короткий слаботочный вакуумный разряд. Продолжительность разряда должна соответствовать оценкам времени жизни катодного пятна – несколько десятков наносекунд. Разряд должен быть выполнен на чистой поверхности. Ток разряда должен составлять несколько ампер. Ранее проведенное исследование [3] не позволило собрать достаточное количество данных о характере эрозии поверхности катода в коротких разрядах. В качестве главной причины этого рассматривалась трудность поиска эродированных участков с размером порядка единиц микрон на недостаточно хорошо подготовленной поверхности. Поэтому в данном исследовании было проведено некоторое усовершенствование методики. Во-первых, новая методика предполагала получение кратеров на более гладкой поверхности, для чего помимо травления была нужна и переплавка участка поверхности в вакууме. Во-вторых, было решено произвести меньшее количество разрядов, но с более точной их локализацией, для чего нужно было уменьшить расстояние между анодом и катодом, а также вести фотофиксацию свечения разрядной плазмы. Обе меры значительно облегчили поиск

эрозионных следов на образце, однако, как будет показано далее, не позволили устранить все связанные с этим трудности.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальное исследование проводилось в условиях высокого вакуума с давлением остаточных газов не хуже 10^{-8} Торр. Схема экспериментальной установки приведена на Рис. 1. Все электроды устанавливались на подвижных вводах с сильфонами и винтовыми манипуляторами, что позволяло перемещать их в камере без нарушения вакуумных условий. Вводы допускали перемещения в диапазоне порядка нескольких миллиметров. Таким образом, можно было совмещать электроды в различных сочетаниях. Позиционированию помогал длиннофокусный микроскоп с цифровой фотокамерой, взаимное расположение электродов устанавливалось с точностью до 10 мкм.

Катод представлял собой набор из вольфрамовых проволочек, закрепленных на общем плоском держателе на расстоянии около 0.5 мм друг от друга. Исходный диаметр вольфрамовой проволоки составлял 90 мкм. Длина свободной части проволочек была около 6 мм. Для очистки поверхности уже закрепленные на держателе проволочки были обработаны травящей полировкой в растворе NaOH, так что на длине около 5 мм от концов их диаметр уменьшился до 70–80 мкм.

Чтобы получить более гладкую и чистую поверхность концы проволочек были оплавлены в вакууме за счет резистивного нагрева. Для этого использовался вспомогательный электрод из вольфрамовой проволоки диаметром 200 мкм, очищенной таким же образом. Вспомогательный электрод совмещался с одной из проволочек катода и через них пропусклся постоянный ток до 1.5 А, что приводило к оплавлению кончика катода и последующему прекращению тока.

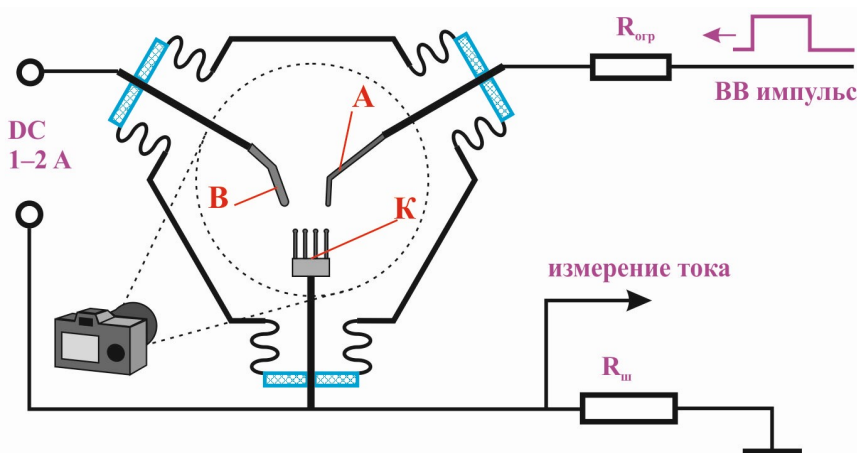


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: А – анод; К – катод; В – вспомогательный электрод для оплавления.

Анод был также вольфрамовый, диаметром около 90 мкм. Анод совмещался с определенной областью оплавленного конца катода до появления электрического контакта в цепи, а затем отводился на расстояние порядка 20–50 мкм. После этого инициировался вакуумный разряд в промежутке методом самопробоя при подаче высоковольтного импульса. Источником импульсов выступал кабельный генератор, заряжаемый до 20 кВ. Ток разряда ограничивался резистором в цепи анода и составлял около 3.5 А. Измерялся ток низкоиндуктивным резистивным шунтом с сопротивлением 0.3 Ом в цепи катода. Осциллограммы тока импульса по сигналу с этого шунта фиксировались при помощи

осциллографа с полосой пропускания 1 ГГц. Длительность импульса напряжения определялась длиной заряжаемого кабеля и составляла в данной серии экспериментов 20 и 45 нс. Пример осциллограмм разрядного тока, полученной в режиме короткого замыкания электродов приведен на Рис. 2.

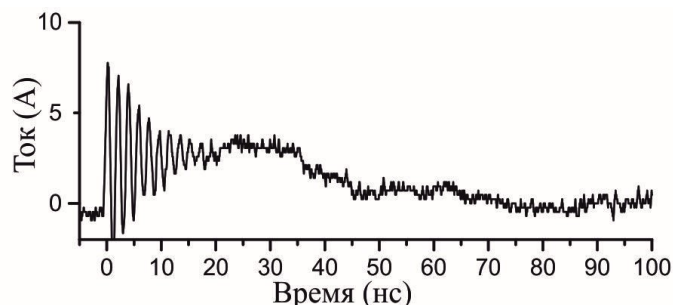


Рис. 2. Осциллограмма токового сигнала с резистивного шунта, полученная при короткозамкнутом разрядном промежутке.

Свечение плазмы разряда фиксировалось фотокамерой при съемке с длинной выдержкой (4 с). Эти снимки позволяли уточнить локализацию пробоя промежутка. Это помогало при поиске эрозионных следов на поверхности катода методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). СЭМ-изображения поверхности катодов, приведенные далее, получены при помощи микроскопа TESCAN MIRA в ЦКП «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН.

Часть катодных проволочек использовались в ходе настройки установки, а остальные служили катодами в рамках основного эксперимента. К концам этих катодов анод подводился с трех разных сторон (слева, справа и по центру оплавленной области). Позиция контролировалась с помощью оптического микроскопа. В каждой позиции производилось по одному разряду. Выбор малых расстояний между электродами был продиктован, с одной стороны, необходимостью пробить этот промежуток без дополнительного поджига при том, что гладкая поверхность катода требовала высокой напряженности внешнего поля, а доступный диапазон напряжений был ограничен. С другой стороны, малое межэлектродное расстояние было призвано сократить площадь, где вероятнее всего может развиться пробой, с целью опять же его более точной локализации. Следует отметить, что оптическая система позволяла контролировать взаимное положение электродов только в плоскости изображения. Трехточечные винтовые манипуляторы не отличаются высокой воспроизводимостью выставляемых положений электродов. Поэтому реальные расстояния между электродами могли отличаться от проекционных (на изображении) ввиду не всегда очевидного положения проволочки относительно плоскости фокусировки оптической системы.

3. Результаты

К сожалению, удалось обнаружить и однозначно связать с этапами эксперимента только эрозионные следы для разрядов с длительностью импульса около 20 нс. На одном из катодов, предназначенных для 45 нс разрядов, все разрядные процессы происходили на одном и том же месте, связанном со значительным искривлением поверхности, хотя фотофиксация свечения плазмы демонстрировала различные области на заметном удалении друг от друга (~ 100 мкм). Этот выступ катода имеет область значительного оплавления, кратеры на нем различить не представляется возможным. В случае другого катода оплавленная область была, вероятно, наоборот слишком гладкой, и преимущественной областью развития катодных процессов разряда стали неровности и загрязнения на

неоплавленной части проволоочки, где не удалось их уверенно различить. На интегральных снимках свечения в разрядном промежутке яркость анодной плазмы, по-видимому, значительно превосходила яркость катодной. В областях поверхности катода, ближайших к зонам наибольшей яркости свечения плазмы, эрозионных следов выявить не удалось. Таким образом, локализация области разряда по положению даже малоразмерного анода не всегда дает удовлетворительные результаты.

Более результативными оказались эксперименты с катодными проволоочками, предназначенными для разрядов длительностью 20 нс. На Рис. 3а приведено СЭМ-изображение эрозионного следа одного из таких разрядов и соответствующая осциллограмма тока, полученная по сигналу омического шунта. В данном случае межэлектродное расстояние было довольно большим (не менее 50 мкм), а развитие катодных процессов было, по-видимому, простимулировано дефектом поверхности. На изображении можно различить не менее 7 кратеров разного размера, в некоторых случаях наслаивающихся один на другой. Это число заметно больше ожидаемого (1–2). По осциллограмме тока можно предположить, что в начале разряда существовали условия для горения одновременно нескольких ячеек катодного пятна, т.к. ток заметно превышал пороговое значение для вольфрама (1.6 А) [4]. Однако, наслаивание кратеров друг на друга показывает, что длительность процесса была достаточно велика для нескольких циклов взрывной эмиссии электронов. Таким образом, время жизни ячейки катодного пятна на вольфраме может быть заметно меньше 20 нс.

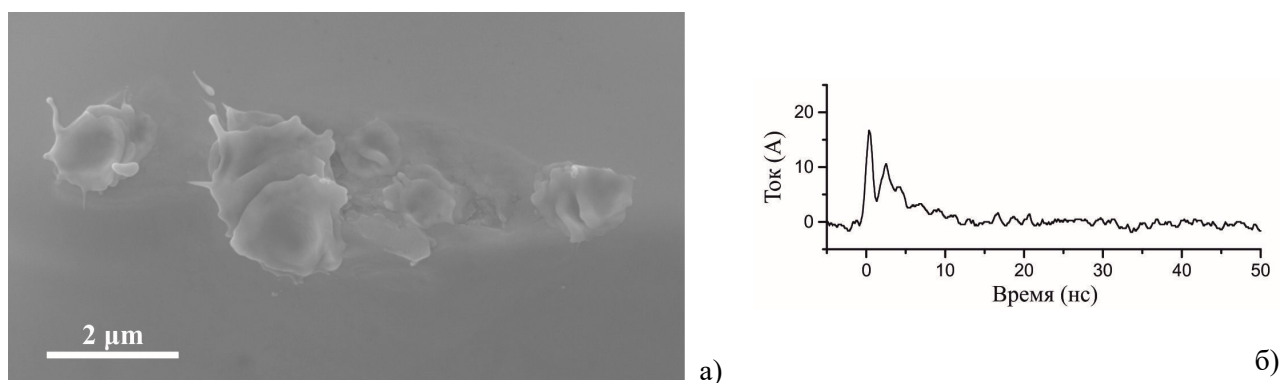


Рис. 3. СЭМ-изображение группы кратеров, сформировавшихся в результате разряда и соответствующая осциллограмма разрядного тока.

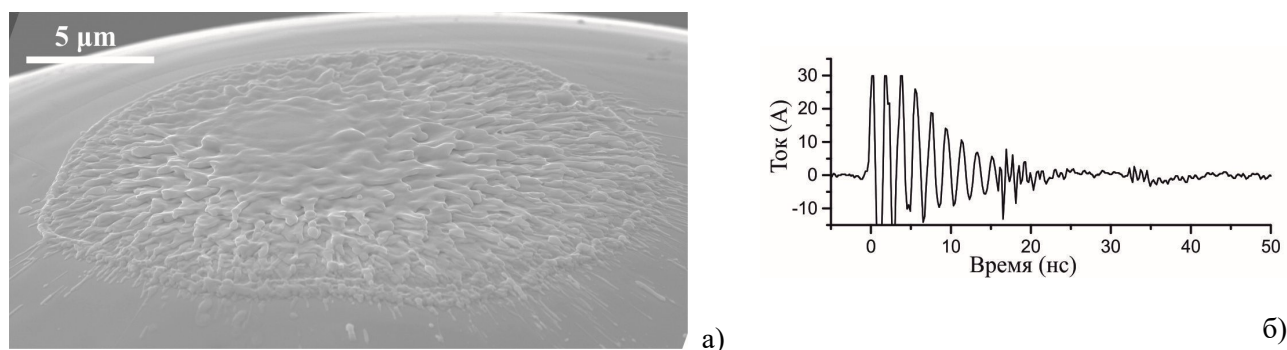


Рис. 4. СЭМ-изображение эродированной зоны, сформировавшейся в результате разряда и соответствующая осциллограмма разрядного тока.

На большинстве других областей, связанных по фоторегистрации с разрядами, кратеры катодного процесса были уничтожены за счет значительного последующего оплавления, как можно видеть на Рис. 4а. По-видимому, в этих случаях межэлектродное расстояние было слишком мало, промежуток быстро перемыкался плазмой, эффективно развивались анодные

процессы и фактически горел дуговой разряд в очень малом промежутке. Об этом свидетельствуют и осциллограммы тока, приведенные на Рис. 4б и Рис. 5б, с формой импульса, очень сильно отличающейся от таковой на Рис. 3б. появление колебательного процесса на осциллограмме может свидетельствовать о сильно изменившемся сопротивлении промежутка.

Аналогичные процессы шли и в области поверхности катода, показанной на Рис. 5а. Однако там есть уцелевшие кратеры, сформированные катодным процессом, а оплавленная область разделена на три участка. Направление растекания расплавленного металла указывает на общий источник потоков энергии, приведших к такому поражению поверхности. Разделение же этих потоков может свидетельствовать о нестационарности и/или неоднородности процессов на аноде.

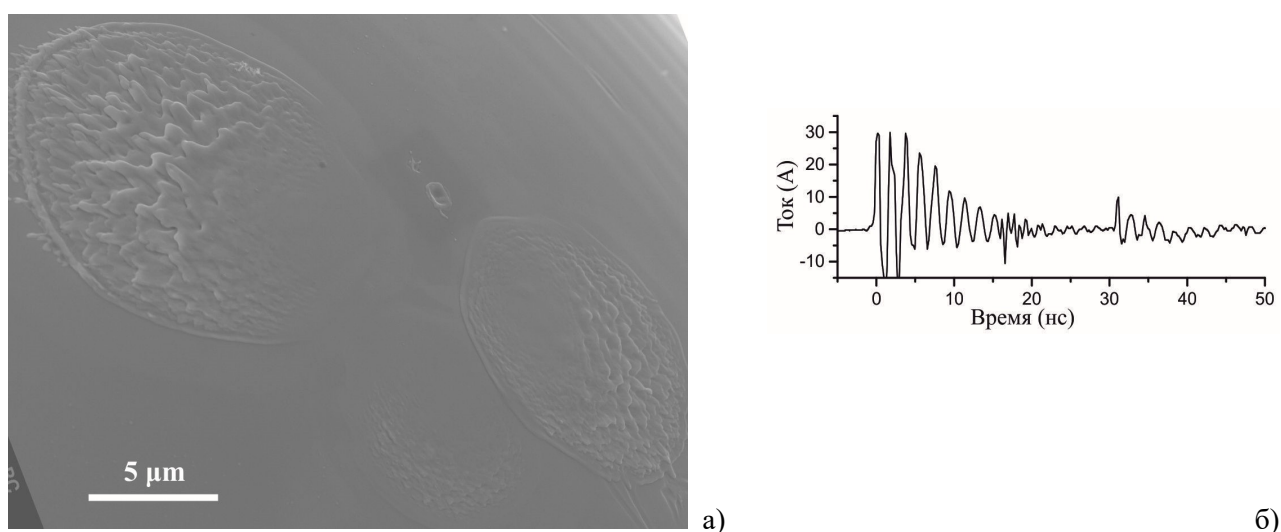


Рис. 5. СЭМ-изображение эродированной зоны с кратером и следами оплавления, сформировавшейся в результате разряда и соответствующая осциллограмма разрядного тока.

Приведенные результаты показывают, что попытка облегчить локализацию катодных пятен за счет сокращения межэлектродного промежутка не дает удовлетворительных результатов даже на катодах из тугоплавких материалов, поскольку вовлечение в разрядный процесс анодной плазмы способно уничтожить искомые эрозионные следы. Вероятно, более эффективной методикой могло бы послужить искусственное формирование неоднородностей на поверхности катода, которое бы позволило достичь высоких значений напряженности электрического поля у поверхности при больших межэлектродных расстояниях.

4. Заключение

Были получены СЭМ-изображения участков поверхности катода, ассоциированных с протеканием вакуумного разряда, питаемого импульсом длительностью 20 нс. В ходе данной работы получены свидетельства в пользу гипотезы о том, что время жизни ячейки катодного пятна на вольфраме может быть менее 20 нс. Также продемонстрированы недостатки методики локализации эрозионных следов катодного пятна за счет уменьшения межэлектродного расстояния. Положительной стороной методики оказалась возможность наблюдать эрозионные следы анодной плазмы в коротком вакуумном разряде. Показано, что взаимодействие анодной плазмы с катодом может носить существенно неоднородный характер.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00360, <https://rscf.ru/project/23-19-00360/>.

5. Список литературы

- [1] В. Jüttner, Erosion craters and arc cathode spots in vacuum, *Beiträge aus der Plasmaphysik*, vol. **19**, No. 1, 25, 1979; doi: 10.1002/ctpp.19790190104
- [2] V.F. Puchkarev, A.M. Murzakayev, Current density and the cathode spot lifetime in a vacuum arc at threshold currents, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. **23**, No. 1, 26, 1990; doi: 10.1088/0022-3727/23/1/005
- [3] I.L. Muzyukin, Yu.A. Zemskov, I.V. Uimanov, The experimental investigation of cathode erosion in a short vacuum discharge, *Proc. 28th ISDEIV*, Greifswald, Germany, vol. **2**, 435, 2018; doi: 10.1109/DEIV.2018.8537060
- [4] И.Г. Кесаев, *Катодные процессы электрической дуги*, М: Наука, 1968.