

## Эрозия катодов в вакуумном дуговом разряде с микросекундной длительностью импульса

*Г.Ю. Юшков\**, *В.Д. Гридилев*, *П.В. Москвин*, *А.Г. Николаев*,  
*Е.М. Окс*, *Н.А. Прокопенко*, *М.Е. Рыгина*, *К.П. Савкин*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*  
*\*gyushkov@mail.ru*

**Аннотация.** Удельная эрозия катодов из различных материалов в импульсном вакуумном дуговом разряде была исследована методом "уноса массы" катода с помощью весовых измерений. Параметры импульса вакуумной дуги были типичными для источника ионов Mevva-V.Ru: длительность импульса 250 мкс, амплитуда тока дуги 200 А. Установлено, что общая удельная эрозия катодов из более легкоплавких материалов с температурой плавления менее 378 °С кратно превышает эрозию катодов из более тугоплавких материалов. Измерение температуры рабочей поверхности катода быстродействующим инфракрасным пирометром показало, что она может превышать температуру плавления в случае катодов, выполненных из более легкоплавких материалов. На основании исследования продуктов эрозии сделан вывод, что большая величина эрозии катодов из более легкоплавких материалов связана с возрастанием капельной составляющей эрозии за счет эффекта разбрызгивания расплавленной поверхности катода в этом случае.

**Ключевые слова:** вакуумная дуга, удельная эрозия, катодные пятна

### 1. Введение

Интерес к исследованию вакуумной дуги связан как с широким спектром его практического применения [1–3], так и отсутствием законченной физической модели катодного пятна вакуумной дуги. На настоящий момент существует несколько гипотез функционирования катодного пятна вакуумной дуги, из которых наиболее известной и признанной является эктонная гипотеза ак. Г.А. Месяца [4]. Одним из важных параметров вакуумной дуги является эрозия катода. С одной стороны, эрозия определяет время непрерывной работы устройства на основе вакуумной дуги, а с другой стороны, отражает особенности физических процессов функционирования катодного пятна вакуумной дуги. Настоящая работа посвящена исследованию удельной эрозии катодов при функционировании вакуумного дугового разряда с квазипрямоугольным импульсом тока дуги с амплитудой 200 А, и длительностью импульса 250 мкс, что является типичными параметрами разрядного импульса вакуумных дуговых ионных источников [5, 6]. Были исследованы катоды из 13 различных материалов, обладающих различными теплофизическими свойствами [7]. Выявлено влияние температуры плавления материала катода на величину удельной эрозии катода в импульсной вакуумной дуге.

### 2. Методика и техника экспериментов.

Исследования проводились на экспериментальном стенде Mevva-V.Ru, с разрядной системой, представленной на рис. 1. Принцип функционирования разрядной системы детально рассмотрен в работе [6]. Для установки катода дуги и электрического ввода поджигающего электрода использован высоковольтный вакуумный ввод MDC – 12 kV с посадочным фланцем CF40. Катод диаметром 6.3 мм и длиной 40 мм был помещен в керамическую трубку, на внешней стороне которой был расположен кольцевой анод "поджигающего" разряда. На расстоянии 5 см от катода располагался анод дугового разряда, в котором было отверстие диаметром 2.5 см для измерения температуры поверхности катода инфракрасным пирометром Kleiber 740-LO с диапазоном от 350 до 3500 °С и временем

отклика менее 10 мкс. Разрядная система размещалась на вакуумной камере, откачиваемой криогенным насосом до остаточного давления менее  $10^{-6}$  Торр.

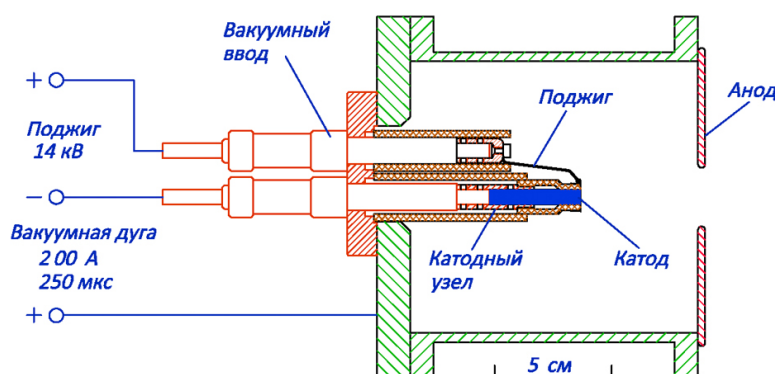


Рис. 1. Схема экспериментальной разрядной системы.

Вакуумная дуга инициировалась при высоковольтном пробое торцевой поверхности керамической трубки между электродом "поджига" и катодом. Параметры разряда были следующие: амплитуда импульса тока дуги квазипрямоугольной формы  $I_{\text{дуги}} = 200$  А, длительность импульса – 250 мкс, частота следования импульсов 0.2 Гц. При измерении эрозии подавалась серия из 500 разрядных импульсов, при этом через электрическую цепь дуги протекал заряд около 20 Кл. Все импульсы дуги регистрировались и усреднялись аппаратными возможностями осциллографа Tektronix-3024, а затем проводилось интегрирование усредненного импульса дуги по времени для определения точного значения электрического заряда в каждом конкретном эксперименте. Величина общей удельной эрозии катода  $\gamma$  при функционировании вакуумного дугового разряда измерялась методом "уноса массы" в разряде, т.е. измерением массы катода до и после воздействия на него серии разрядных импульсов при помощи аналитических весов ВЛ-220М с точностью измерения  $\pm 10$  мкг.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В результате проведения экспериментов была измерена удельная эрозия  $\gamma$  для 13 различных материалов катода. Анализ полученных результатов показал, что в зависимости от величины температуры плавления материала катода  $T_{\text{пл}}$ , удельная эрозия заметно различается. Зависимость удельной эрозии катодов из различных материалов от их температуры плавления представлена на рис. 2. Для зависимости характерно существование двух участков. Первый – это правый линейный участок зависимости для более тугоплавких материалов, который включает в себя материалы от магния до вольфрама, имеющие диапазон значений  $T_{\text{пл}}$  от 650 °С до 3422 °С. Значения удельной эрозии для этих материалов составляют менее 90 мкг/Кл. И второй – левый участок зависимости для материалов катодов от свинцово-оловянного сплава  $\text{Sn}_{60}\text{Pb}_{40}$  до свинца с температурами плавления от 183 °С до 328 °С, значения  $\gamma$  для которых многократно выше и лежат в пределах 500–1000 мкг/Кл. Для более легкоплавких материалов катода второй группы после функционирования дуги на рабочей поверхности катода наблюдались следы плавления, а для первой группы таких следов не было.

При измерении температуры поверхности катодов  $T_{\text{катод}}$  в вакуумном дуговом разряде пирометром было выявлено, что  $T_{\text{катод}}$  увеличивается в течение всего импульса дугового разряда и к концу импульса может достигать, в зависимости от материала катода, значений от 400 °С до 550 °С. Это значение  $T_{\text{катод}}$  ниже  $T_{\text{пл}}$  для материала группы тугоплавких катодов,

но выше, чем для группы более легкоплавких. Отметим, что интегральная температура всего катода при используемой в экспериментах частоте следования импульсов дуги 0.2 Гц не превышала 50 °С, поскольку при импульсной мощности в разряде уровня 5 кВт, средняя мощность при воздействии разрядных импульсов не превышала 0.25 Вт. Таким образом, различия в величине  $\gamma$  для катодов из различных материалов может быть связано с импульсным нагревом тонкого слоя материала катода вблизи его рабочей поверхности в течение импульса дуги до температуры, превышающей  $T_{пл}$ .

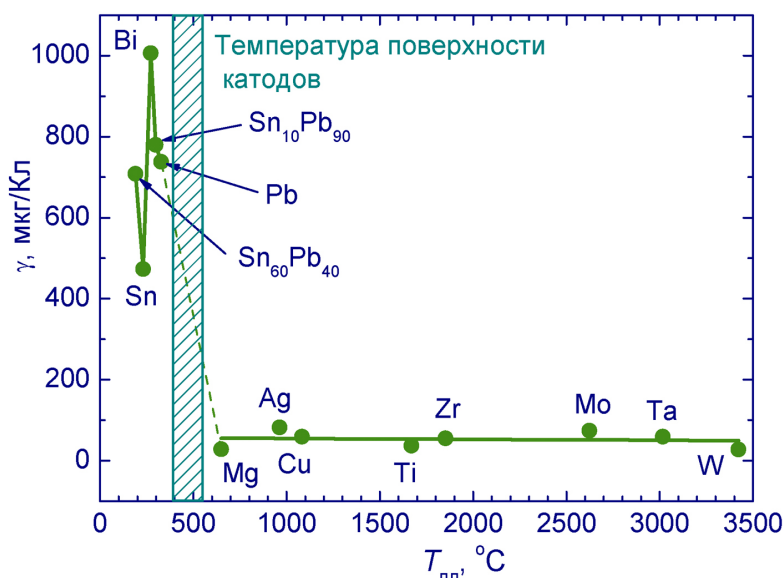


Рис. 2. Зависимость удельной эрозии катода от температуры плавления материала катода.

Для подтверждения реализации нагрева только тонкого слоя материала катода вблизи его рабочей поверхности в течение импульса вакуумной дуги были проведены модельные расчеты распределения температуры в катоде с применением модуля Heat Transfer in Solid программного пакета COMSOL Multiphysics. Пример распределения температуры по глубине в случае свинцового катода представлен на рис.3а. Из представленного распределения следует, что в конце импульса температура поверхности катода достигает 470 °С, что выше температуры плавления свинца – 327 °С, но на глубине 0.3 мм она составляет всего 21 °С. Согласно расчетам, толщина расплавленного слоя вблизи рабочей поверхности катода в конце импульса дуги составляет около 30 мкм. Таким образом, расчеты подтвердили возможность плавления тонкого слоя материала катода вблизи его рабочей поверхности для второй, более легкоплавкой группы материалов катода, и показали, что плавление поверхности для первой, более тугоплавкой группы материалов в условиях эксперимента не реализуется.

Экспериментальное подтверждение плавления только приповерхностного слоя рабочей поверхности катода было получено с использованием катода из силумина. При нагреве силумина выше температуры плавления (около 600 °С) его структура претерпевает изменения и на микрофотографиях поперечных шлифов выглядит в виде гомогенной, хорошо идентифицируемой белой области. Пример микрофотографии шлифа катода из силумина, который использовался при функционировании дуги с  $I_{дуги} = 600$  А представлен на рис. 3б. На микрофотографии отчетливо виден белый приповерхностный слой застывшего расплава силумина толщиной 40–60 мкм. Большая толщина расплавленного слоя, по сравнению с данными рис. 3а связана с большим током дуги, а, следовательно, и с большей

плотностью мощности разряда, нагревающего поверхность катода. Таким образом, экспериментально тоже была подтверждена возможность плавления тонкого слоя материала катода вакуумной дуги вблизи его рабочей поверхности.

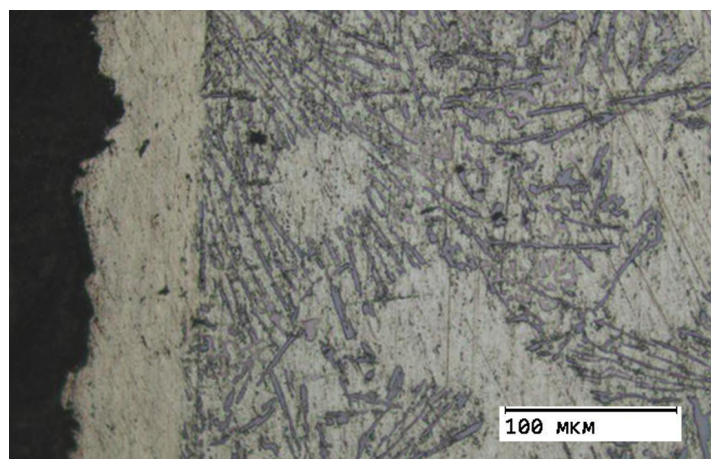
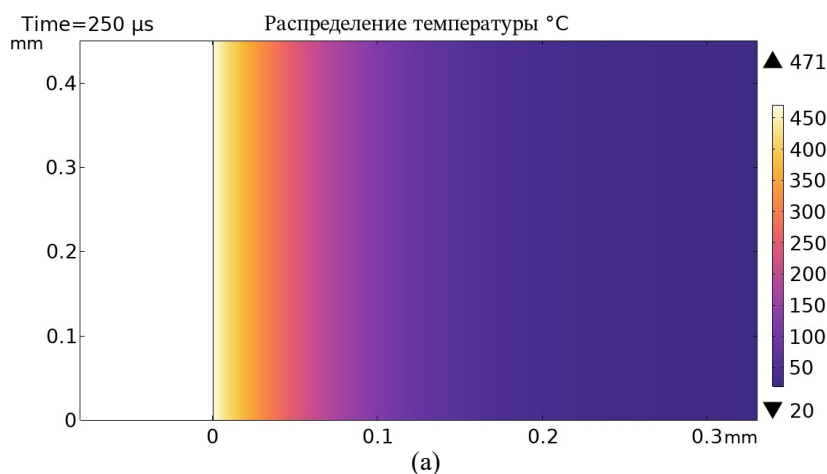


Рис. 3. Расчетное распределение температуры поверхностного слоя свинцового катода,  $I_{\text{дуги}} = 200 \text{ А}$  (а) и микроскопическое изображение шлифа поверхностного слоя катода из силумина,  $I_{\text{дуги}} = 600 \text{ А}$  (б).

При снижении амплитуды тока вакуумной дуги до уровня 200 А, на шлифах катода из силумина, аналогичных рис. 3б, сплошного слоя расплава не наблюдалось. На поверхности катода наблюдались отдельные, редко расположенные относительно друг друга участки расплава глубиной до 10 мкм и протяженностью около 20–30 мкм, появление которых ассоциируется с нагревом и плавлением поверхности в локальных областях катодных пятен вакуумной дуги. Кроме этого, поскольку температура плавления магния и силумина близки, отсутствие сплошной зоны расплава у поверхности катода из силумина при  $I_{\text{дуги}} = 200 \text{ А}$  косвенно экспериментально подтверждает, что плавление поверхности катода из магния, самого легкоплавкого материала из группы материалов катода с малой эрозией, при такой амплитуде тока дуги (см. рис. 2) тоже не происходит.

Оценки потоков, испаренных с расплавленной поверхности катода атомов, не могут объяснить многократное различие  $\gamma$  для двух групп материалов катодов на зависимости рис. 2. Различия в значениях ионной эрозии также не могут объяснить этот экспериментальный факт. Так, например, доля ионного тока от тока разряда в плазме дуги, в случае медного и висмутового катодов, составляют 11.4% и 10.5%, соответственно [8, 9] и,

несмотря на то, что ион висмута в 3.3 раза тяжелее иона меди, а его средний ионный заряд в 1.7 раза меньше, значения  $\gamma$  у этих материалов, согласно зависимости рис. 2, различаются почти в 20 раз. В связи с этим, было выдвинуто предположение, что за большую эрозию легкоплавких катодов ответственна микрокапельная фракция.

Для выяснения роли микрокапельной фракции были проведены эксперименты по конденсации продуктов эрозии на подложках, размещенных на расстоянии 5 см от поверхности катода. Микрофотографии поверхности подложек с продуктами эрозии дуги в случае медного и висмутового катодов, снятые при одинаковом увеличении, приведены на рис. 4. Видно, что количество микрокапель в случае катода из висмута многократно превышает количество микрокапель в случае меди. Кроме того, микрокапли в случае висмута существенно крупнее. Таким образом, было подтверждено, что большая эрозия для катодов из легкоплавких материалов происходит за счет микрокапельной фракции. Это может объясняться тем, что при горении катодного пятна вакуумной дуги на расплавленном слое материала катода толщиной в десятки микрон происходит его разбрызгивание за счет давления плазмы катодного пятна, аналогично механизму, рассмотренному в работе [10]. И это, в свою очередь, приводит к существенно большим значениям  $\gamma$  для группы легкоплавких катодов. Для группы более тугоплавких катодов, генерация микрокапель при горении дуги также происходит. Но в этом случае микрокапли образуются только за счет вытеснения объема расплавленного материала катода давлением плазмы из пространственно ограниченной области, локализованной только вблизи катодного пятна вакуумной дуги [11]. Именно поэтому количество микрокапель и их характерный размер в дуге с более тугоплавкими катодами меньше, а значения  $\gamma$  для таких материалов катодов – ниже.

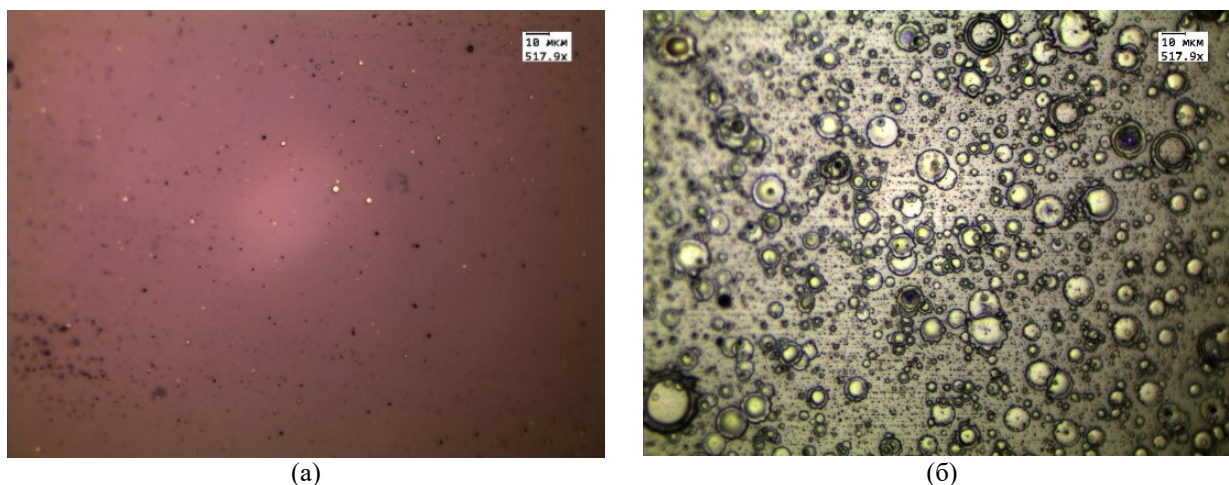


Рис. 4. Микрофотографии поверхности подложек с продуктами эрозии вакуумной дуги с катодами из меди (а) и висмута (б) снятые при одинаковом увеличении.

Регистрация в настоящих экспериментах большого количества микрокапель в случае расплавленной поверхности катода вакуумной дуги косвенно свидетельствует о том, что давление плазмы на область катодного пятна вакуумной дуги многократно превышает значения, необходимые для генерации капель в каждом элементарном цикле катодного пятна. Это, в свою очередь, свидетельствует в пользу гипотезы о цикличности катодных процессов в катодном пятне за счет взрывных процессов на поверхности струи расплавленного материала катода из области пятна. В этом случае такая струя выполняет роль микронеоднородности катодной поверхности, врывозмиссионные процессы на которой являются причиной возникновения нового катодного пятна.

#### 4. Заключение

В ходе исследования общей удельной эрозии катодов из различных материалов в вакуумном дуговом разряде субмиллисекундной длительности импульса была определена зависимость эрозии от температуры плавления материала катода. Показано, что для группы катодов с меньшей температурой плавления их материалов, удельная эрозия многократно выше, чем для катодов из более тугоплавких материалов. Определено, что это связано с плавлением материала рабочей поверхности катода на глубину около десятков микрон в течение импульса и возрастанием микрокапельной составляющей эрозии таких катодов за счет давления плазмы катодного пятна на расплавленную поверхность катода.

#### Благодарность

Авторы благодарны проф. Ю.Ф. Иванову за совет по использованию катода из силумина. Работа выполнена в рамках госзадания ИСЭ СО РАН, проект FWRM-2021-0006.

#### 5. Список литературы

- [1] I.G. Brown, *The Physics and Technology of Ion Sources*. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.
- [2] E. Sokullu Urkas, A. Oztarhan, N. Kaya, F. Tihminlioglu, D. Ila, C. Muntele, S. Budak, E. Oks, A. Nikolaev, A. Ezdesir, and Z. Tek, Thermal characterization of Ag and Ag + N ion implanted ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, **261**, 699, 2007, doi: 10.1016/j.nimb.2007.04.102
- [3] A.A. Ivanova, M.A. Surmeneva, V.V. Shugurov, N.N. Koval, I.A. Shulepov, and R.A. Surmenev, Physico-mechanical properties of Ti-Zr coatings fabricated via ion-assisted arc-plasma deposition *Vacuum*, **149**, 129, 2018, doi: 10.1016/j.vacuum.2017.12.024
- [4] G.A. Mesyats, *Cathode Phenomena in a Vacuum Discharge: The Breakdown, The Spark, and the Arc*. Moscow: Nauka, 2000.
- [5] I.G. Brown, Vacuum arc ion sources, *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 3061, 1994, doi:10.1063/1.1144756
- [6] A.G. Nikolaev, K.P. Savkin, G.Y. Yushkov, and E.M. Oks, Ion angular distribution in plasma of vacuum arc ion source with composite cathode and elevated gas pressure, *Rev. Sci. Instrum.*, **85**, 02B501, 2014, doi: 10.1063/1.4824641
- [7] A.P. Babichev, N.A. Babushkina, and A.M. Bratkovsky, *Physical quantities: handbook*. M: Energoatomizdat, 1991.
- [8] E.M. Oks, K.P. Savkin, G.Yu. Yushkov, A.G. Nikolaev, A. Anders, and I.G. Brown, Measurements of total ion current from vacuum arc plasma sources, *Rev. Sci. Instrum.*, **77**, 03B504, 2006, doi: 10.1063/1.2164967
- [9] A. Anders, Y. Brown, E.M. Oks, G.Yu. Yushkov, K.P. Savkin, and A.G. Nikolaev, Determination of the specific ion erosion of the vacuum arc cathode by measuring the total ion current from the discharge plasma, *Tech. Phys.*, **51**, 1311, 2006, doi: 10.1134/S1063784206100082
- [10] M.A. Gashkov, N.M. Zubarev, G.A. Mesyats, and I.V. Uimanov, The mechanism of liquid metal jet formation in the cathode spot of vacuum arc discharge, *Tech. Phys. Lett.*, **42**, 852, 2016, doi: 10.1134/S1063785016080228
- [11] M.A. Gashkov, G.A. Mesyats, N.M. Zubarev, and O.V. Zubareva, Criteria for the formation of liquid-metal jets in the cathode spot of a vacuum arc discharge, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **47**, 3448, 2019, doi: 10.1109/TPS.2019.2899619