

СПЕЦИФИКА ДУГОВОГО РАЗРЯДА В КАТОДНЫХ ПРОЦЕССАХ.

Арустамов Владимир Николаевич

Институт Ионно-плазменных и лазерных технологий имени
У.А.Арифова Академии наук Республика Узбекистон, 100125 Ташкент,
ул.Дўрмон йўли,33. Заведующий лаборатория ионно-плазменных
технологий кандидат физико-математических наук, с.н.с.

Кахрамонов Бобуржон Рузибоевич

Институт Ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А.Арифова
Академии наук Республика Узбекистон, 100125 Ташкент, ул.Дўрмон йўли,33.
Лаборатория ионно-плазменных технологий м.н.с.

Худайкулов Илёс Холмурадович

Институт Ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А.Арифова
Академии наук Республика Узбекистон, 100125 Ташкент, ул.Дўрмон йўли,33.
Лаборатория ионно-плазменных технологий с.н.с. PhD.

Тел: (90)189 85 10 e-mail: v.arustamov@iplt.uz.

Тел: (97)141 22 85 e-mail: boburjon2285@gmail.com.

Тел: (90)352 07 86 e-mail: i_khudaykulov@mail.ru.

Аннотация. Среди различных процессов, происходящих в процессе дугового разряда, процессы, которые происходят на катоде и катодном предкатодном пограничном слое, всегда были в центре внимания. Этот интерес возник, с одной стороны, из-за решающего влияния катодных процессов на горение заряда, а с другой стороны, из-за серьезных трудностей при их изучении. В настоящее время существует множество научных и технологических обзоров, посвященных катодно-дуговым процессам.

Ключевые слова: вакуумная дуга, плазма, предкатодные процессы, плазменное облако, анод, катод, дугового разряда, диффузия, термоэмиссия, автоэмиссия, вторичная эмиссия, плотность тока, катодного пятна, электрического поля, напряжение.

KATOD JARAYONLARIDA YOY RAZRYADINING XUSUSIYATLARI.

Arustamov Vladimir Nikolaevich

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi U.A.Arifov nomidagi Ion plazmasi
va lazer texnologiyalari instituti, 100125 Toshkent sh., Do‘rmon yo‘li ko‘chasi, 33-
uy. Ion plazma texnologiyalari laboratoriyasi mudiri, fizika-matematika fanlari
nomzodi, katta ilmiy xodim

Kaxramonov Boburjon Ro'ziboevich

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi U.A.Arifov nomidagi Ion plazmasi
va lazer texnologiyalari instituti, 100125 Toshkent sh., Do‘rmon yo‘li ko‘chasi, 33-
uy. Ion plazma texnologiyalari laboratoriyasi kichik ilmiy xodim

Khudayqulov Ilyos Xolmurodovich
O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi U.A.Arifov nomidagi Ion plazmasi
va lazer texnologiyalari instituti, 100125 Toshkent sh., Do'rmon yo'li ko'chasi, 33-
uy. Ion plazma texnologiyalari laboratoriyasi katta ilmiy xodim PhD.

[Tel: \(90\)189 85 10](tel:901898510) e-mail: v.arustamov@iplt.uz.
[Tel: \(97\)141 22 85](tel:971412285) e-mail: boburjon2285@gmail.com.
[Tel: \(90\)352 07 86](tel:903520786) e-mail: i_khudaykulov@mail.ru.

Annotatsiya. Yoy razryadi jarayonida sodir bo'ladigan turli jarayonlar orasida katod va katoddan oldingi chegara qatlamida sodir bo'ladigan hodisalar doimo diqqat markazida bo'lib kelgan. Bu qiziqish, bir tomondan, katod jarayonlarining zaryadning yonishiga hal qiluvchi ta'siri tufayli, ikkinchi tomondan, ularni o'rganishdagi jiddiy qiyinchiliklar tufayli paydo bo'ladi. Hozirgi vaqtda katod-yoy jarayonlariga bag'ishlangan ko'plab ilmiy va texnologik sharhlar mavjud.

Kalit so'zlar: vakuum yoyi, plazma, katod oldi jarayonlari, plazma buluti, anod, katod, yoy razryadlari, diffuziya, termoemissiyasi, avtoemissiyasi, ikkilamchi emissiya, tok zichligi, katod dog'i, elektr maydoni, kuchlanish.

SPECIFICITY OF ARC DISCHARGE IN CATHODE PROCESSES.

Arustamov Vladimir Nikolaevich

Institute of Ion Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov of the
Academy of Sciences Republic of Uzbekistan, 100125 Tashkent, Durmon Yuli St.,
33. Head of the Laboratory of Ion Plasma Technologies, Candidate of Physical and
Mathematical Sciences, Senior Researcher

Kakharamonov Boburjon Ruziboevich

Institute of Ion Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov of the
Academy of Sciences Republic of Uzbekistan, 100125 Tashkent, Durmon Yuli St.,
33. Laboratory of Ion Plasma Technologies Junior Researcher

Khudaykulov Ilyos Kholmuradovich

Institute of Ion Plasma and Laser Technologies named after U.A. Arifov of the
Academy of Sciences Republic of Uzbekistan, 100125 Tashkent, Durmon Yuli St.,
33. Laboratory of Ion Plasma Technologies Senior Researcher PhD.

[Phone: \(90\)189 85 10](tel:901898510) e-mail: v.arustamov@iplt.uz.
[Phone: \(97\)141 22 85](tel:971412285) e-mail: boburjon2285@gmail.com.
[Phone: \(90\)352 07 86](tel:903520786) e-mail: i_khudaykulov@mail.ru.

Abstract. Among the various processes occurring in the arc discharge process, the processes that occur at the cathode and cathode pre-cathode boundary layer have always been the focus of attention. This interest arose, on the one hand, due to the decisive influence of cathodic processes on charge combustion, and on the other hand, due to serious difficulties in studying them. Currently, there are many scientific and technological reviews devoted to cathode-arc processes.

Keywords: vacuum arc, plasma, pre-cathode processes, plasma cloud, anode, cathode, arc discharge, diffusion, thermal emission, field emission, secondary emission, current density, cathode spot, electric field, voltage.

ВВЕДЕНИЕ

Специфика дугового разряда в катодных процессах заключается в том, что катод – это электрод, на котором происходит основная часть разрядного процесса. Катод обычно имеет отрицательный потенциал относительно анода, что позволяет электронам двигаться к нему и образовывать плазменное облако [1-3]. Важное свойство катодного разряда – это возможность поддерживать стабильный ток и высокую температуру разряда. Высокая температура обеспечивается за счет испарения материала катода и его ионизации, что ведет к образованию плазмы. При поддержании стабильного тока дугового разряда [4,5] можно достичь высокой плотности тока и энергии, что является важным фактором для эффективного использования в различных процессах.

В катодных процессах дуговой разряд может использоваться для термической обработки материалов [6-8], включая плавку и испарение металлов, а также для освещения и сварки. В последние годы разработаны новые методы и установки, которые позволяют управлять особенностями катодного разряда, такие как его форма, тепловое распределение и энергетическая эффективность [9,10].

Однако катодный разряд также имеет свои ограничения и проблемы. Один из них – это быстрое изнашивание материала катода из-за высокой температуры и агрессивной среды плазмы [11]. Другая проблема – это возможность возникновения электрических дуг в указанной области, что может привести к повреждению электродов и снижению производительности процесса [12]. Поэтому для успешного использования катодного разряда необходимо учитывать данные факторы и выбирать соответствующие материалы катода, методы охлаждения и управления разрядом.

Таким образом, специфика дугового разряда в катодных процессах заключается в возможности поддержания стабильного тока и высокой температуры разряда, что позволяет эффективно использовать его для различных

технологических процессов. Однако эти процессы также имеют свои ограничения и проблемы, которые необходимо учитывать для обеспечения надежной и эффективной работы.

Плазменный столб дугового разряда может быть прикреплен к поверхности катода различными способами: разнесенные и сократительные связи разделены (рис. 1). Диффузное склеивание обычно нестабильно; Его можно получить только из тугоплавких материалов (графит, вольфрам) на нагретых катодах и хранить в течение длительного времени. В других случаях происходит сжатие: катодная связь протягивается в небольшой области, называемой катодной точкой, то есть на коаксиальных электродах.

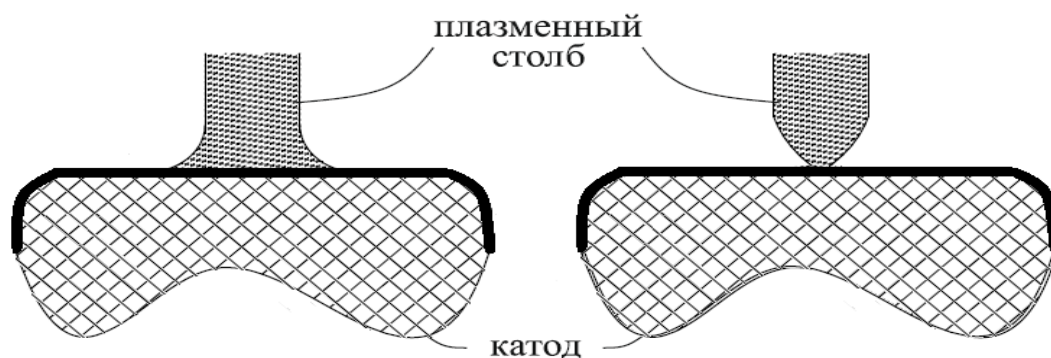


Рис 1. Диффузная (слева) и контрагированная (справа) привязки столба дуги к катоду.

Экстремальные значения плотности, температуры и другие значения, присутствующие в катодной точке, долгое время мешали ее экспериментальному изучению. Особенности катодных процессов независимой дуги во многом обусловлены их сходством с катодными процессами при инъекции плазмы. Основная функция катодных процессов заключается в удалении электронов от катода к плазменному столбу. Это обеспечивается различными механизмами, одним из важнейших из которых является термоэмиссия. Другие механизмы (автоэмиссия, вторичная эмиссия и т. д.) доступны [13,14]. Специфические механизмы тепловыделения, локального нагрева и сохранения температуры катода в области пятна, эрозии материала катода и т. д. на сегодняшний день они не полностью изучены и активно изучаются. В частности, сравнительно недавние

результаты [15-17] показывают, что процессы на катоде и взрывная эмиссия электронов существенно близки.

Тем не менее, существует ряд надежных, экспериментально доказанных доказательств катодных пятен. Плотность тока эмиссии, проводимого в месте расположения катода, может быть достигнута только при очень высоких температурах. Даже если катод полностью холодный, то есть в точечной плазменной области он переходит в жидкую, газообразную и плазменную фазы. Проверка автографа (после завершения разряда) позволяет сделать вывод, что столб дуги укорочен, а расположение катода работает, даже если во время зажигания трубки не проводится никаких наблюдений. Таким образом, было установлено, что точка состоит из одинаковых элементов определенного типа (клетки, фрагменты, пятна, разные авторы, которые ввели разные термины). Каждая ячейка обеспечивает свою долю потока выбросов. В этом случае поток полимера I_0 имеет свое значение для каждого материала катода. Ячейка работает с током $I_0 \leq I \leq 2I_0$. То есть, если он не может обеспечить более высокий ток, чем ток, который вызывает коррозию внешних контактов. $I < I_0$, тогда клетка гаснет. Когда большой ток $I > 2I_0$, ячейка распадается на две части. Ясно, что дуга с катодной точкой может существовать в месте разряда, когда работает хотя бы одна ячейка. Следовательно, ниже по течению от ячейки также находится ниже по потоку от всего разряда. Значение потребляемого тока определяется тепловыми механизмами в локальной части места.

Первоначально, для описания образования тепла в катодном слое можно использовать модель Джоуля. Соответственно, вырабатываемая мощность пропорциональна уменьшению тока и напряжения рядом с катодом. Во-вторых, величина тока также зависит от материала катода и составляет около 5-20 ампер. Падение напряжения около катода сильно зависит от величины тока; при простейшем случае его можно считать равным первому потенциалу ионизации материала катода. Экспериментальные данные показывают, что независимый дуговой разряд возникает только при нормальном падении напряжения рядом с катодом и не возникает при более низком напряжении.

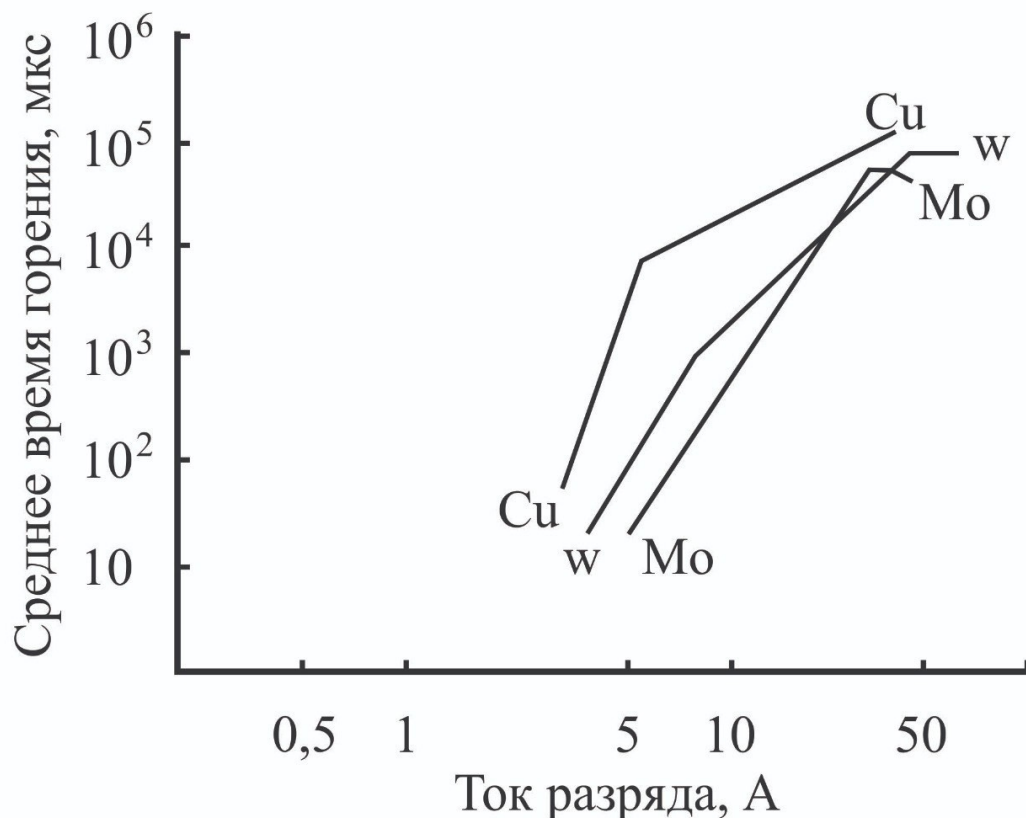


Рис. 2. Зависимость среднего времени горения (до самопроизвольного погасания) дуги от разрядного тока для разных материалов катода.

Из проведенных исследований было выяснено, что процесс вымирания каждой отдельной клетки можно рассматривать как случайный. Если клеток находится немного, и они все выходят одновременно, то это провоцирует нестабильность всего места. В таком случае заряд исчезает естественным образом. Наоборот, если ток дуги большой, то вероятность того, что элементы начнут работать одновременно, увеличивается, а вероятность того, что они все погаснут одновременно, уменьшается. В таком случае заряд становится стабильным. Эта тенденция наблюдается независимо от материала катода (см. рисунок 2). Известно, что исчезновение одной из точечных ячеек приводит к увеличению тока, проходящего через другие ячейки, так как ток перераспределяется. Увеличение потока, в свою очередь, приводит к разделению одной из клеток на две. Таким образом, одна ячейка погаснет, а другая будет гореть. На макроскопическом уровне этот процесс проявляется в виде точечного

движения вдоль поверхности катода. Этот процесс подтверждают характерные автографы, которые можно наблюдать во многих экспериментах. На рисунке 2 показана зависимость среднего времени горения дуги (до ее самостоятельного исчезновения) от тока разряда для разных катодных материалов. Проведенная оценка плотности тепло, создаваемого термоэлектронной эмиссией, показала, что даже при очень высоких температурах термоионного механизма недостаточно для получения требуемой мощности на катоде. Следовательно, тепловыделение усиливается за счет полевых процессов. Поверхность настоящих катодов всегда различна: она может быть шероховатой, содержать посторонние включения, границы зерен, а также поглощенный газ и другие неоднородности. Эти дисбалансы приводят к локальному увеличению электрического поля, которые называются концентраторами напряжений.

Концентраторы напряжения представляют собой наиболее подходящие места для работы ячеек катодного пятна, так как они обладают механизмом эмиссии поля. Однако из-за сильной эрозии в области ячейки, концентраторы напряжения разрушаются очень быстро, в течение наносекунд. В таком случае ячейка перемещается в следующее неоднородное состояние по поверхности катода, получая энергию. Это приводит к уменьшению тока эмиссии и выделению тепла в плазменном слое около катода. Если тепла, передаваемого от катода к элементу, недостаточно для поддержания желаемой температуры, элемент перестает функционировать. При снижении температуры происходит уменьшение эмиссии и, в результате, уменьшение тока. Это приводит к элементарным процессам деления и гибели клеток за очень короткий период времени. Кроме локальных факторов, влияющих на стабильность и нестабильность клеток, существуют также макро-факторы, определяемые плазменным столбом и внешней электрической цепью разряда. Ранее неизвестно было, что процессы в точечных клетках происходят в нано- и субнаносекундном диапазоне. В квазистационарном подходе эквивалентная схема разрядного контура представлена источником ЭДС, балластным сопротивлением и, возможно, индуктивностью. Исчезновение ячейки катодного пятна эквивалентно

увеличению сопротивления катодного слоя, что приводит к увеличению тепловыделения. Присутствие индуктивности в цепи увеличивает напряжение при разряде. Этот процесс является отрицательной обратной связью, повышающей устойчивость системы. Коррозия внешних контактов также способствует стабилизации, но в данном исследовании этот эффект нежелателен, так как может препятствовать изучению процессов разряда. Поэтому для правильной работы системы все элементы внешнего соединения должны быть учтены как распределенные. Дизайн выходной силовой цепи должен быть выбран с учетом широкой сети.

Заключения

Вакуумно-дуговой разряд в значительной степени зависит от формы катода, степени его поверхностной шероховатости и определенного значения электрического тока. Основываясь на этих факторах, были представлены следующие рекомендации:

1. В процессе дугового разряда происходит множество различных процессов, однако особое внимание уделяется процессам, происходящим на катоде и катодном предкатодном пограничном слое.

2. Интерес к катодным процессам обусловлен их важностью в горении заряда и одновременно сложностью изучения этих процессов.

3. В настоящее время существует множество научных и технологических обзоров, посвященных исследованию катодно-дуговых процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muhl S., Pérez A. The use of hollow cathodes in deposition processes: A critical review //Thin Solid Films. – 2015. – Т. 579. – С. 174-198. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.02.066>
2. Anders A., Anders A. The physics of cathode processes //Cathodic arcs: from fractal spots to energetic condensation. – 2008. – С. 75-174. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-79108-1>.
3. Beilis, Isak I. "State of the theory of vacuum arcs." IEEE transactions on Plasma Science 29.5 (2001): 657-670. DOI: [10.1109/27.964451](https://doi.org/10.1109/27.964451)

4. Zhang X. et al. Modeling the development of low current arcs and arc resistance simulation //IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2018. – T. 25. – №. 6. – C. 2049-2057. **DOI:** [10.1109/TDEI.2018.007100](https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007100).
5. Chaly A. M. et al. High-current vacuum arc appearance in nonhomogeneous axial magnetic field //IEEE transactions on plasma science. – 2003. – T. 31. – №. 5. – C. 884-889. **DOI:** [10.1109/TPS.2003.818414](https://doi.org/10.1109/TPS.2003.818414)
6. Wang F., Wu Q., Peng Z. Processing of heat-treated steel by arc discharge machining //Materials and Manufacturing Processes. – 2020. – T. 35. – №. 1. – C. 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.11.016>
7. Deegan D. et al. The thermal treatment of hazardous waste materials using plasma arc technology //IMEchE Conference. Delivering Waste Solutions—Balancing Targets, Incentives and Infrastructure. – 2006. – T. 9.
8. Nerovnyi V. M. Thermal characteristics of the arc discharge used for vacuum welding processes //Welding international. – 2002. – T. 16. – №. 7. – C. 561-565. <https://doi.org/10.1080/09507110209549577>
9. Zhao R. et al. A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system //Journal of Power Sources. – 2015. – T. 299. – C. 557-577. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.09.001>
10. Tomaszewska A. et al. Lithium-ion battery fast charging: A review //ETransportation. – 2019. – T. 1. – C. 100011. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100011>
11. Singh, H., et al. "Use of plasma spray technology for deposition of high temperature oxidation/corrosion resistant coatings—a review." Materials and Corrosion 58.2 (2007): 92-102. <https://doi.org/10.1002/maco.200603985>
12. Riba, Jordi-Roger, et al. "Arc tracking control in insulation systems for aeronautic applications: Challenges, opportunities, and research needs." Sensors 20.6 (2020): 1654. <https://doi.org/10.3390/s20061654>

13. Arustamov, V. N., et al. "Parameters of the cathode spot upon field emission." Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 8 (2014): 828-831. <https://doi.org/10.1134/S102745101402031113>
14. Arustamov, V. N., et al. "Structure and parameters of vacuum arc cathode spots." Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics 78 (2014): 558-562. <https://doi.org/10.3103/S1062873814060069>
15. Mesyats G. A. IEEE Marie Sklodowska-Curie Award 2012 Lecture, 39th ICOPS Edinburgh, UK. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. Vol. 41.
16. Месяц Г.А. Взрывная электронная эмиссия. М.: Физматлит, 2011.
17. Bochkarev M.B., Uimanov I.V. Wavelet analysis of arc noises at threshold currents // Proc. ISDEIV XX. -Tours, France. 2002.