

Распространение микроплазменного разряда по поверхности титана, покрытого тонкой диэлектрической пленкой*В. А. Иванов, М. Е. Коньжев, Т. И. Камолова, А. А. Дорофеюк*

Экспериментально исследованы распространение и структура импульсного микроплазменного разряда (длительность разряда 100 мкс, амплитуда электрического тока в разряде 200 А), инициируемого на поверхности титанового образца, покрытого тонкой диэлектрической пленкой толщиной около 10 нм, широкоапертурным потоком плазмы с плотность плазмы $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и длительностью импульса 25 мкс. Обнаружено, что свечение микроплазменного разряда визуалью в макромасштабе имеет разветвленную структуру типа дендрита, которая в микромасштабе состоит из большого количества ярко светящихся «точечных» образований – локализованных на поверхности металла катодных пятен. В результате взаимодействия микроплазменного разряда с образцом титана происходит эрозия его поверхности. При этом эрозионная структура визуалью «идентична» структуре свечения разряда и состоит из большого количества отдельных микрократеров с характерными размерами от 0,3 до 10 мкм, локализованных на поверхности металла в пределах области площадью $\approx 1 \text{ см}^2$. Вся совокупность микрократеров в макромасштабе образует разветвленную структуру типа дендрита. Установлено, что микроплазменный разряд распространяется вдоль поверхности титана, покрытого тонкой диэлектрической пленкой, со средней скоростью 70 м/с. Причём, распространение микроплазменного разряда имеет «прыжковый» характер: плазма «неподвижных» горящих катодных пятен инициирует возбуждение новых катодных пятен на расстояниях локализации 3–30 мкм от них.

Ключевые слова: микроплазменный разряд, взаимодействие, титан, диэлектрическая пленка, распространение, микрократер.

Ссылка: Иванов В. А., Коньжев М. Е., Камолова Т. И., Дорофеюк А. А. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 4. С. 239.

Reference: V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, T. I. Kamolova, and A. A. Dorofeyuk, Usp. Prikl. Fiz. **8** (4), 239 (2020).

Введение

Известно, что в вакууме импульсная плазма плотностью более 10^{11} см^{-3} и длитель-

ностью более 1 мкс может возбуждать микроплазменный разряд на поверхности металлов (титан, алюминий, сталь и др.), покрытых тонкой диэлектрической пленкой толщиной $d \sim 1 \text{ мкм}$ [1–6]. Для устойчивого возбуждения этих разрядов необходимо, чтобы электрический потенциал металла имел отрицательное значение 100–400 В, а диэлектрическая пленка имела хотя бы один разрыв (разрез), граничащий с открытой поверхностью металла [1–6].

В этом случае, плазма взаимодействует одновременно с диэлектрической пленкой и открытой поверхностью металла. При этом, за счет потока положительно заряженных ионов

Иванов Вячеслав Алексеевич, гл.н.с., к.ф.-м.н.
Коньжев Михаил Евгеньевич, н.с.
Камолова Татьяна Ивановна, н.с., к.т.н.
Дорофеюк Анна Александровна, н.с., к.т.н.
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Статья поступила в редакцию 24 августа 2020 г.

© Иванов В. А., Коньжев М. Е., Камолова Т. И.,
Дорофеюк А. А., 2020

плазмы, внешняя поверхность диэлектрической пленки заряжается до плавающего электрического потенциала плазмы φ_f , значение которого, как правило, близко к потенциалу заземленной стенки вакуумной камеры, т. е. $\varphi_f \approx 0$. Отрицательный электрический потенциал металлического образца до начала разряда обычно составляет величину $\varphi_m = -400$ В. При этих условиях напряженность электрического поля между внешней поверхностью диэлектрической пленки и открытой поверхностью металла определяется формулой [6]:

$$E = |\varphi_m - \varphi_f|/d \approx |\varphi_m|/d. \quad (1)$$

Ранее в наших экспериментах плазменный поток возбуждал микроплазменный разряд на поверхности металла, частично покрытого диэлектрической оксидной пленкой толщиной 1 мкм. Такая пленка формировалась естественным образом на поверхности образцов в результате их нагревания в воздушной атмосфере при температуре 400 °С [1–6].

В этом случае при воздействии потока плазмы на образец напряженность электрического поля, возникающего на срезе диэлектрической пленки толщиной 1 мкм, составляет величину около 4 МВ/см. Такое электрическое поле является достаточно сильным для иницирования электрического пробоя по срезу диэлектрической пленки в местах разрыва пленки и ее контакта с открытой поверхностью металла [1–6]. При поверхностном электрическом пробое по срезу пленки на открытой поверхности металла происходит образование катодных пятен, плотная плазма которых контактирует с металлическим образцом. В результате в замкнутой цепи «металл – плазма – стенка камеры – источник напряжения и тока» возбуждается электрический ток микроплазменного разряда 200 А, ограниченный внешним балластным резистором 2 Ом. На стадии развития микроплазменного разряда происходит разрушение пленки и образование микрократеров в локальных расплавленных областях на поверхности металла [4–6]. На стадии горения катодных пятен микроплазменного разряда отрицательный потенциал металла уменьшается до значения 30–50 В.

Возбуждение микроплазменных разрядов на поверхности титана, частично покрытого

оксидной пленкой толщиной $d \sim 1$ мкм, происходит с вероятностью около 90 % [5, 6]. Для титановых образцов, частично покрытых более толстыми или более тонкими пленками, вероятность возбуждения микроплазменных разрядов значительно уменьшается [5, 6]. Действительно, как видно из приведенной выше формулы (1) при увеличении толщины пленки от 1 мкм до 10 мкм величина электрического поля на срезе пленки уменьшается на порядок, и, следовательно, значительно снижается вероятность возбуждения микроплазменного разряда потоком плазмы. При уменьшении толщины пленки на титане от 1 до 0,01 мкм ее электропроводность сильно возрастает [7, 8], а плотность электрического заряда на ее поверхности заметно уменьшается, поскольку поток ионов из плазмы с плотностью $\sim 10^{11}$ см⁻³ уже не может зарядить внешнюю поверхность пленки до плавающего потенциала плазмы. Следовательно, напряженность электрического поля между внешней поверхностью пленки и металлом значительно уменьшается, а вероятность возбуждения микроплазменных разрядов снижается до значения ~ 1 % [6]. Близкие результаты по иницированию микроплазменных разрядов на поверхности других конструкционных металлов в потоке плазмы представлены в работах [9, 10].

Таким образом, при оптимальной толщине диэлектрической пленки 1 мкм на образцах титана, стали и алюминия микроплазменный разряд всегда возникает на границе разрыва диэлектрической пленки и открытой поверхности металла. При этом скорость движения микроплазменного разряда по поверхности металла составляет величину около 1 м/с и определяется скоростью испарения диэлектрической пленки и плавлением локальных участков металла плотной плазмой катодных пятен (микроразрядов). В результате возбуждения 5–10 импульсных микроплазменных разрядов (длительность каждого импульса 20 мс) поверхность металлических образцов, покрытых диэлектрической пленкой толщиной 1 мкм, полностью очищается от пленки. При этом на ней формируется сплошной переплавленный слой металла, который характеризуется прочным микрорельефом с характерной шероховатостью 1–2 мкм [10–12]. Такой новый способ формирования прочного

микрорельефа на поверхности металлов с использованием микроплазменных разрядов весьма востребован в медицине, включая ортопедию и стоматологическое протезирование, а также в промышленности при производстве композиционных материалов [12–13].

Фундаментальный и прикладной интерес представляет также исследование микроплазменного разряда, возбуждаемого потоком плазмы на поверхности титана, покрытого очень тонкой сплошной диэлектрической пленкой толщиной 2–10 нм. Такая тонкая пленка образуется на поверхности титана в воздушной атмосфере (температура 20 °С, давление 1 атм) в течение нескольких минут в результате процесса окисления металла кислородом воздуха [14]. В дальнейшем, при длительном выдерживании образца в воздушной атмосфере в течение многих сотен часов, сформированная таким образом оксидная пленка на титане очень стабильна и практически сохраняет свою исходную толщину около 10 нм [15].

Важно отметить, что такая тонкая диэлектрическая оксидная пленка является сплошной (без разрывов и разрезов) и полностью покрывает металлический образец. Таким образом, внешний поток плазмы при взаимодействии с образцом, не контактирует с открытой поверхностью металла. При этом электрическое поле, возникающее между внешней поверхностью оксидной пленки и металлом, сосредоточено внутри (в «объёме») тонкой пленки. Следовательно, сама возможность поверхностного электрического пробоя диэлектрической пленки исключается. Таким образом, для возбуждения микроплазменного разряда на титане, покрытого сплошной оксидной пленкой толщиной 10 нм, необходимо возникновение такого сильного локального электрического поля, которое может инициировать электрический пробой в «объёме» очень тонкой диэлектрической плёнки.

Данная работа посвящена исследованию процессов инициирования (импульсным потоком плотной плазмы) и последующего самостоятельного развития (уже в отсутствие внешнего потока плазмы) микроплазменного разряда на поверхности титана, покрытого тонкой диэлектрической пленкой. С этой целью были изучены и сопоставлены друг с другом (в различных пространственных и вре-

менных масштабах): 1) структура свечения одиночного микроплазменного разряда, и 2) структура образовавшейся эрозии на поверхности титана.

В наших экспериментах микроплазменный разряд на поверхности титана инициируется в течение 1–5 мкс на переднем фронте широкоапертурного импульсного плазменного потока, генерируемого инжектором.

В последующие моменты времени после инициирования микроплазменный разряд длительностью 100 мкс поддерживается электрическим током амплитудой 200 А от внешнего источника напряжения и тока.

При этом в отсутствие плотной плазмы во внешнем потоке, дальнейшее развитие микроплазменного разряда длительностью 100 мкс происходит за счёт большого количества циклических процессов сильного локального взаимодействия плотной плазмы «горящих» катодных пятен с поверхностью титана, покрытой сплошной диэлектрической пленкой.

Экспериментальные исследования

Исследования проводились в экспериментальной установке «Сфера» [1–12, 16], представляющей собой металлическую вакуумную камеру сферической формы диаметром 50 см, откачиваемой до остаточного давления воздуха ~ 1 Па (рис. 1). На боковом патрубке устанавливался плазменный инжектор цилиндрического типа, в котором в результате высоковольтного электрического разряда по поверхности полиметилметакрилата (органическое стекло) формировался импульсный поток плазмы длительностью около 25 мкс. Основные характеристики потока плазмы (электронная температура плазмы, плотность заряженных частиц, длительность импульса потока плазмы) измерялись одноэлектродным и трехэлектродным ленгмюровскими зондами [17, 18]. Поток импульсной плазмы направлялся в камеру, и по мере распространения расширялся от инжектора к центру камеры, при этом его плотность на расстоянии 2 см от среза инжектора составляла величину около $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а в центре камеры плотность была существенно ниже $5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Электронная температура на переднем фронте (1–5 мкс)

импульса потока плазмы на различных расстояниях от инжектора составляла величину около 10 эВ и практически не изменялась в процессе расширения плазменного потока.

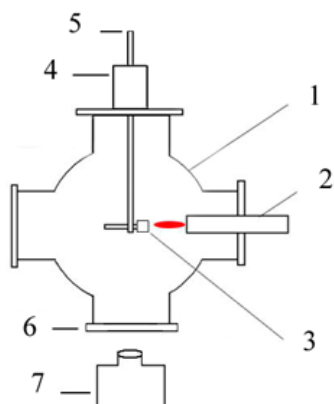


Рис. 1. Схема экспериментальной установки «Сфера» для возбуждения и исследования микроплазменных разрядов на металлических образцах: 1 – вакуумная камера; 2 – плазменный инжектор; 3 – металлический образец; 4 – манипулятор с вакуумным вводом; 5 – металлический держатель образцов; 6 – оптическое окно; 7 – фоторегистратор.

В эксперименте использовалась пластина из титана размерами $20 \times 20 \times 1$ мм³, покрытая сплошной диэлектрической оксидной пленкой толщиной около 10 нм. Такая плёнка сформировалась естественным образом на поверхности образца при его выдерживании в воздушной атмосфере при комнатной температуре в течение нескольких часов [19].

Поскольку тонкая диэлектрическая пленка толщиной 10 нм имеет заметную электропроводность [7, 8], то вероятность возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности титана (покрытого тонкой пленкой) в потоке плазмы плотностью 10^{11} см⁻³ составляет менее 1% [6]. Поэтому для более устойчивого накопления электрического заряда на внешней

поверхности пленки и соответственно для надежного возбуждения микроплазменного разряда на титане необходимо было использовать поток плазмы с существенно более высокой плотностью около 2×10^{13} см⁻³. Пластина из титана размерами $20 \times 20 \times 1$ мм³ была установлена ребром навстречу набегающему потоку плазмы от инжектора. Ближайшее к инжектору ребро пластины находилось на расстоянии 2 см от среза плазменного инжектора, где максимальная концентрация плазмы 2×10^{13} см⁻³ достигалась на фронте плазменного потока на 5-й микросекунде от начала генерации импульса плазмы (рис. 2).

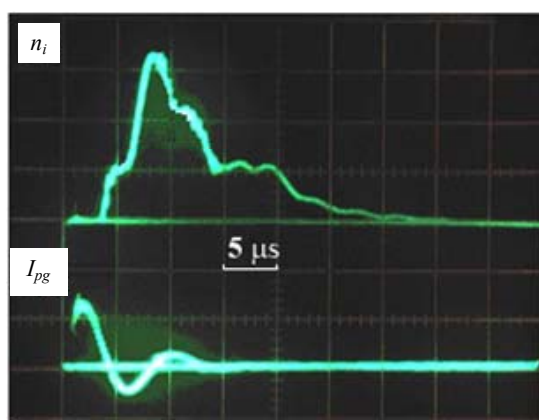


Рис. 2. n_i – осциллограмма плотности плазмы, полученная с помощью ленгмюровского зонда в режиме ионного тока насыщения, расположенного на расстоянии 15 см от среза инжектора. I_{pg} – осциллограмма разрядного электрического тока в плазменном инжекторе.

При воздействии единичного импульсного потока плазмы на образец титана на его поверхности был инициирован микроплазменный разряд, который характеризовался напряжением горения около 50 В с амплитудой электрического тока в разряде 200 А и длительностью импульса 100 мкс. Осциллограммы напряжения и тока в микроплазменном разряде представлены на рис. 3.

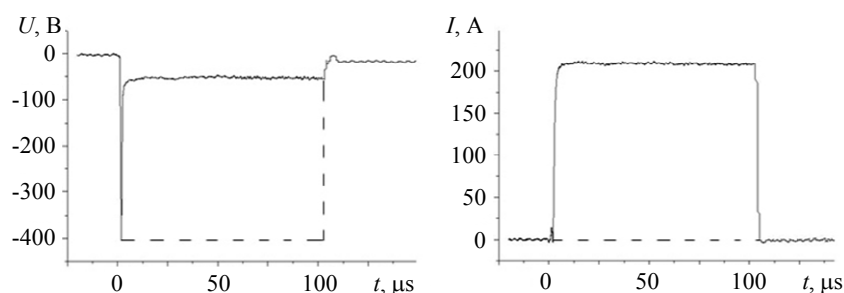


Рис. 3. Сплошные линии: осциллограммы напряжения (слева) и электрического тока (справа) в микроплазменном разряде на образце титана, покрытом диэлектрической пленкой толщиной 10 нм. Пунктирные линии: осциллограммы напряжения (слева) и тока (справа) на образце титана в отсутствие микроплазменного разряда на его поверхности.

С помощью фотокамеры Nikon D7100 была зарегистрирована структура свечения микроплазменного разряда, возбужденного на поверхности титанового образца единичным импульсом плазмы (рис. 4). Поскольку фотокамера работала с открытым затвором, то длительность экспозиции кадра при фотографировании определялась длительностью свечения микроплазменного разряда 100 мкс и определялась длительностью импульса электрического тока.

Обнаружено, что структура свечения микроплазменного разряда на титане с тонкой оксидной пленкой 10 нм является сильно неоднородной и имеет характерную древовидную ветвящуюся форму в виде дендрита (рис. 4).

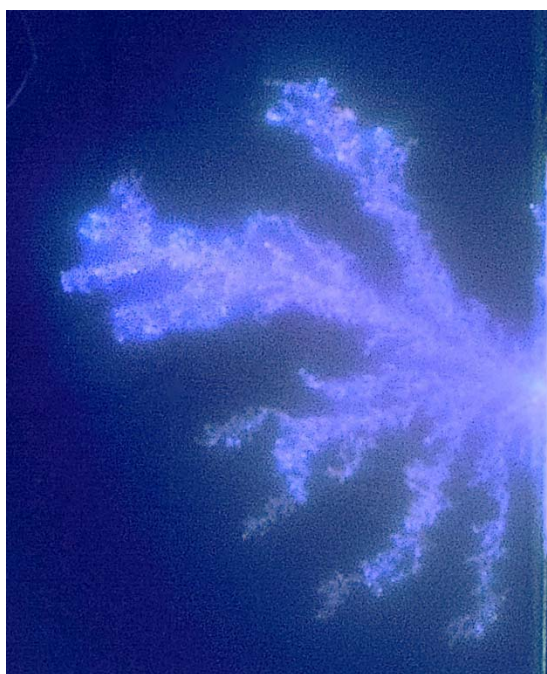


Рис. 4. Фотография свечения одиночного микроплазменного разряда, возбуждённого на поверхности титанового образца, покрытого диэлектрической пленкой толщиной 10 нм. Внешний импульсный поток плазмы с плотностью $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ набегаёт на образец справа, где был установлен плазменный инжектор. Пластина из титана размерами $20 \times 20 \times 1 \text{ мм}^3$ установлена ребром навстречу набегающему потоку плазмы. Ребро образца имеет длину 20 мм, светящаяся область разряда в виде дендрита имеет размеры $\approx (7 \times 8,6) \text{ мм}^2$.

Известно также, что микроплазменный разряд всегда возникает в тех областях образца, которые находятся в более плотном потоке плазмы, т. е. ближе к плазменному инжектору.

Более четко это видно на черно-белой фотографии при усилении контрастности изображения и при снижении светимости ореола (рис. 5).

На рис. 4 и рис. 5 видно, что свечение микроплазменного разряда представляет собой множество светящихся локализованных («точечных») объектов, большинство из которых практически не перемещаются в течение времени экспозиции фотографии 100 мкс. Так как минимальный характерный диаметр одиночных «неподвижных» микроплазменных разрядов (катодных пятен) не превышает значения 0,2 мм, то средняя скорость перемещения отдельных катодных пятен в течение 100 мкс не превышает величины 20 см/с.

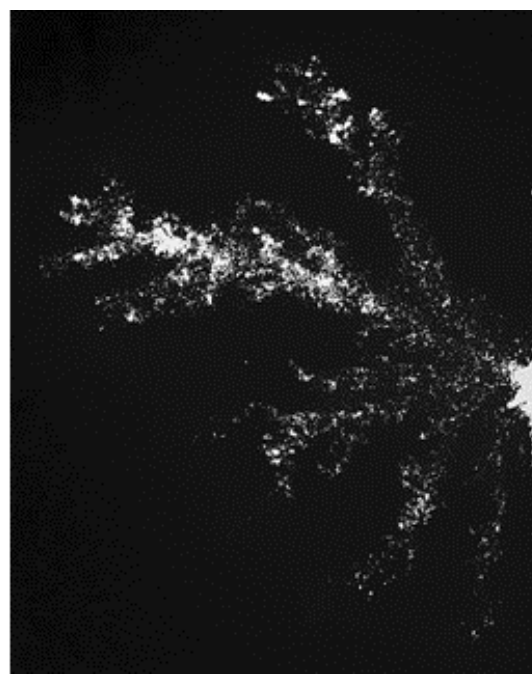


Рис. 5. Высококонтрастное изображение свечения микроплазменного разряда в течение длительности экспозиции 100 мкс. Размеры реального изображения составляют $(7 \times 8,6) \text{ мм}^2$. Микроплазменный разряд возбуждается на поверхности пластины из титана (покрытой диэлектрической пленкой толщиной 10 нм) импульсным потоком плазмы, падающим на неё справа. Это изображение получено из фотографии (рис. 4) в результате преобразования цветного изображения в черно-белое и удаления ореола свечения плазмы.

Действительно, в нашем случае микроплазменный разряд был инициирован потоком плазмы на ребре пластины, который расположен ближе всего к плазменному инжектору, и,

следовательно, в более плотной плазме потока инжектора. После этого микроплазменный разряд распространялся от ребра пластины к её центру, т. е. справа налево. Поскольку светящаяся область разряда размерами около $7 \times 8,6 \text{ мм}^2$ сформировалась в течение 100 мкс, то оценка средней скорости распространения микроплазменного разряда по поверхности титана составляет величину около 70 м/с.

Для объяснения столь высокой скорости распространения микроплазменного разряда 70 м/с на титане с тонкой пленкой толщиной около 10 нм по сравнению со скоростью распространения разряда 1 м/с на титане с толстой пленкой 1 мкм была детально изучена локальная эрозия, образовавшаяся на поверх-

ности титанового образца в результате воздействия одиночного микроплазменного разряда.

На рис. 6 и 7 представлены фотографии эрозии на поверхности пластины из титана, которая образовалась в результате возбуждения одиночного микроплазменного разряда (длительность 100 мкс, амплитуда электрического тока 200 А). Микроплазменный разряд был инициирован на ребре пластины импульсным потоком плазмы от инжектора, и далее стал самостоятельно распространяться вдоль поверхности пластины. Отчётливо видна древовидная структура (паттерн) эрозии на поверхности титана, аналогичная структуре свечения микроплазменного разряда (рис. 4, 5).



Рис. 6. Макрофотография зоны эрозии на поверхности пластины из титана, покрытой оксидной пленкой толщиной 10 нм, в результате возбуждения одиночного микроплазменного разряда с длительностью 100 мкс и амплитудой электрического тока 200 А. Размер изображения $7 \times 8,6 \text{ мм}^2$.

На основании сравнительного анализа изображений на рис. 4–7 можно заключить, что при одинаковом увеличении изображений структура эрозии на поверхности титана и структура свечения микроплазменного разряда визуально «идентичны»: эрозия образца и свечение микроплазменного разряда представляют собой сильно неоднородные образования древовидной структуры (дендриты), ко-



Рис. 7. То же изображение, что и на рис. 6, после инверсии цвета и увеличения контрастности исходного изображения для улучшения качества и наглядности локальной структуры зоны эрозии. Размер изображения $7 \times 8,6 \text{ мм}^2$.

торые возникают в результате возбуждения микроплазменного разряда на поверхности титана.

Детальная структура эрозии представлена на микрофотографии фрагмента эрозии на поверхности титанового образца, которая появляется в результате возбуждения одиночного микроплазменного разряда с амплитудой электрического тока 200 А и длительностью

импульса 100 мкс (рис. 8). Эта микрофотография получена с помощью сканирующего электронного микроскопа с увеличением $\times 800$.

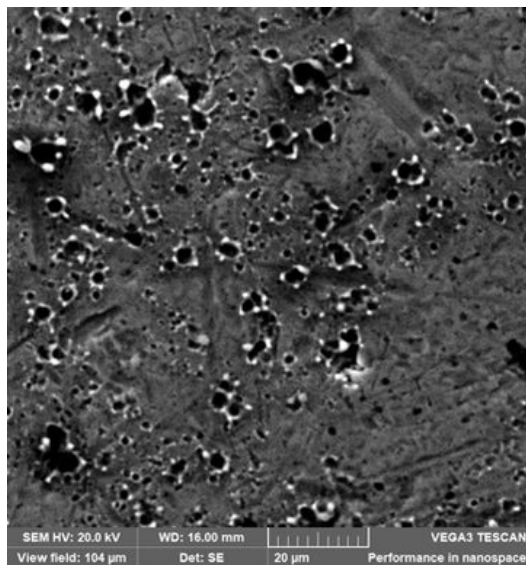


Рис. 8. Микрофотография фрагмента эрозии на поверхности титанового образца, возникшей в результате возбуждения одиночного микроплазменного разряда с амплитудой электрического тока 200 А и длительностью импульса 100 мкс. Микрофотография получена с помощью сканирующего электронного микроскопа при напряжении на катоде электронной пушки 20 кВ. Размер изображения по горизонтали 104 мкм по вертикали 112 мкм.

Эрозия поверхности титана представляет собой множество хаотично расположенных на поверхности образца отдельных микрократеров с характерными размерами 0,3–10 мкм, которые возникают в области локализации ярко светящихся катодных пятен микроплазменного разряда (рис. 8). Эти микрократеры возникают на образце в результате локального расплавления титана, характерного для процесса взрывной электронной эмиссии на поверхности металла в сильном локальном электрическом поле [20–24]. Характерно, что расстояние между отдельными микрократерами варьируется от 3 до 30 мкм.

Важно отметить, что на образце не обнаружено протяженных следов эрозии в виде «цепочки» перекрывающихся микрократеров, которые образуют единый расплавленный трек в виде канала. Из этого следует, что микрократеры, инициированные в локальных областях, не перемещаются непрерывно в виде расплавленных катодных пятен по поверхно-

сти металла, а возникают и горят «неподвижно» в течение короткого промежутка времени, а потом погасают. В процессе своего горения первичные микрократеры на поверхности титана инициируют в соседних локальных областях (на расстояниях 3–30 мкм) возникновение новых вторичных микрократеров. При этом количество микрократеров и микрократеров на единице площади поверхности эрозии образца достигает значения 10^5 – 10^6 см⁻² (рис. 8).

Поскольку минимальный ток, необходимый для горения одного катодного пятна, равен 10–20 А [25], можно предположить, что при суммарном токе разряда 200 А одновременно могут гореть приблизительно 10–20 катодных пятен. Следовательно, для возникновения 10^5 – 10^6 эрозийных кратеров необходимо, чтобы в течение длительности микроплазменного разряда произошло 10^4 – 10^5 циклов возбуждения новых вторичных катодных пятен.

Таким образом, эти регулярные циклические процессы возникновения, горения и последующего погасания микрократеров на поверхности титана повторяются многократно – не менее 10^4 – 10^5 циклов в течение длительности микроплазменного разряда 100 мкс.

Обсуждение

На основании сравнительного анализа изображений, представленных на рис. 4–7, можно сделать вывод, что при одинаковом увеличении изображений структуры поверхностной эрозии и свечения микроплазменного разряда визуально почти «идентичны» и возникают в результате возбуждения микроплазменного разряда на поверхности титана. Подробная структура эрозии показана на микрофотографии фрагмента зоны эрозии на поверхности образца титана, которая появляется в результате возбуждения одного микроплазменного разряда с амплитудой электрического тока 200 А и длительностью импульса 100 мкс (рис. 8). Эта микрофотография была получена с помощью сканирующего электронного микроскопа с увеличением $\times 800$. Из микрофотографии поверхности титана видно, что зона эрозии состоит из большого числа отдельных микрократеров с характерными размерами 0,3–10 мкм, случайным образом распределен-

ными по поверхности фрагмента образца, и их положения соответствуют ярко светящимся «точкам» микроплазменного разряда. Эти микрократеры возникают на образце в результате локального плавления титана, что характерно для процесса взрывной электронной эмиссии на поверхности металла в сильном локальном электрическом поле [20–24, 26].

Важно отметить, что хотя длительность внешнего потока плазмы составляет 25 мкс, максимальная плотность плазмы $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ в этом потоке существует всего лишь 2 мкс (рис. 2). Тем не менее, именно в течение этих 2 мкс «внешняя» плазма с плотностью $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ инициирует микроплазменный разряд на ребре пластины из титана, поверхность которого покрыта тонкой диэлектрической пленкой толщиной около 10 нм. При этом внешний поток плазмы только инициирует микроплазменный разряд. Дальнейшее развитие и распространение микроплазменного разряда на поверхности титана происходит «самостоятельно», без существенного влияния внешнего потока плазмы. А именно, все последующие локализованные микрократеры (катодные пятна) суммарной длительностью около 98 мкс возбуждаются уже не внешней плазмой инжектора, а плотной плазмой первичных, вторичных и т. д. микрократеров, образующихся в последующие моменты времени после инициирования микроплазменного разряда. При многократном повторении циклов возбуждения, горения и возбуждения новых микрократеров в течение импульса 100 мкс формируется как структура свечения в виде дендрита, так и структура эрозии в виде множества кратеров, которые в совокупности формируют эрозионную зону также в форме дендрита. При этом вновь возникающие микрократеры возбуждаются и локализуются на расстояниях 3–30 мкм от своих предшественников, плотная плазма [27, 28] которых является для них инициатором.

Таким образом, распространение микроплазменного разряда по поверхности титана, происходит со средней скоростью около 70 м/с и носит «прыжковый» характер: отдельные микрократеры возбуждаются, практически «неподвижно» горят и погасают, успевая в течение своего существования инициировать новые микрократеры в соседних областях.

В каких местах возникают новые вторичные локализованные микрократеры? Очевидно, что плотная плазма микрократера, находящегося в состоянии горения, наиболее сильно воздействует на поверхность прилегающих к нему областей, так как именно здесь возникает самое сильное электрическое поле между диэлектрической пленкой и металлом. Поэтому новые микрократеры будут с большей вероятностью инициироваться в непосредственной близости от горящих микрократеров на расстояниях 3–30 мкм. Однако важно определить в каком конкретно месте это реализуется. Диэлектрическая оксидная пленка, образовавшаяся в воздушной атмосфере на титане, является неоднородной [14, 15], при этом её толщина варьируется от $d_1 = 2 \text{ нм}$ до $d_2 = 10 \text{ нм}$. Так как после инициирования микроплазменного разряда (и последующего его горения в течение 100 мкс) напряжение на металле снижается до величины $\varphi_m = -50 \text{ В}$ (рис. 3), то для двух значений толщины пленки $d_1 = 2 \text{ нм}$, $d_2 = 10 \text{ нм}$, при $\varphi_f \approx 0$, формула (1) даёт следующие значения напряженности электрического поля: $E_1 \approx 250 \text{ МВ/см}$, $E_2 \approx 50 \text{ МВ/см}$.

Оба эти значения электрического поля вполне достаточны для возникновения взрывной электронной эмиссии с поверхности металла с образованием кратера [20–24, 26]. Однако известно [7, 8], что более тонкие оксидные пленки $d_1 = 2 \text{ нм}$ обладают существенно более высокой электропроводностью, которая увеличивается с уменьшением толщины непропорционально сильнее для более тонких пленок. Это препятствует накоплению заряда на поверхности сверхтонких оксидных пленок даже в плотном потоке плазмы от ближайших микрократеров, и, тем самым, может существенно снижать как величину электрического поля на ее поверхности, так и вероятность возбуждения новых вторичных микрократеров в присутствии плотной плазмы горящих микрократеров. Так как для более толстых оксидных пленок $d_2 = 10 \text{ нм}$ электропроводность оказывается существенно ниже, то на поверхности такой пленки более эффективно происходит накопление электрического заряда до стационарного значения, и величина её потенциала приближается к значению плавающего потенциала плазмы. С учётом этих

соображений, в действительности электрическое поле E_2 на более толстых участках оксидной пленки $d_2 = 10$ нм может оказаться больше, чем поле E_1 на более тонких участках пленки $d_1 = 2$ нм, и тогда возбуждение новых микрозарядов (катодных пятен) окажется более вероятным в местах утолщения оксидной пленки на поверхности титана.

Заключение

Экспериментально исследована пространственная структура свечения импульсного микроплазменного разряда, инициируемого на поверхности титанового образца, покрытого сверхтонкой сплошной диэлектрической оксидной пленкой толщиной 2–10 нм. Микроплазменный разряд инициировался на поверхности пластины из титана ($20 \times 20 \times 1$ мм³) потоком внешней плазмы (плотность 2×10^{13} см⁻³, длительность импульса 25 мкс) и поддерживался импульсом электрического тока амплитудой 200 А и длительностью импульса 100 мкс. Установлено, что структура свечения микроплазменного разряда имеет форму разветвленного дендрита, который состоит из большого количества ярко светящихся локализованных микрозарядов.

В результате воздействия микроплазменного разряда на образец, на его поверхности возникает эрозия, структура которой «идентична» структуре свечения разряда и представляет собой множество отдельных микрократеров с характерными размерами от 0,3 мкм до 10 мкм на площади около 1 см². Эти микрократеры образуются в тех локальных местах, где были инициированы, ярко светили и погасали многочисленные микрозаряды. В процессе своего горения и последующего погасания первичные микрозаряды на поверхности титана инициируют в соседних областях на расстояниях 3–30 мкм возникновение новых вторичных микрозарядов, и, таким образом, эти циклические процессы возникновения новых и погасания «старых» первичных микрозарядов повторяются многократно не менее 10^4 – 10^5 циклов в течение длительности 100 мкс.

Таким образом, показано, что распространение одиночного микроплазменного разряда вдоль поверхности титана, покрытого тонкой

диэлектрической пленкой, происходит со средней скоростью 70 м/с и носит «прыжковый» характер от одного катодного пятна к другому, оставляя за собой «след» в виде множества хаотично расположенных микрократеров, которые в совокупности приобретают в макромасштабе форму разветвленного дендрита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В. А., Сахаров А. С., Коньжев М. Е. Иницирование микроплазменных разрядов на краю диэлектрической пленки, нанесенной на поверхность металла // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 2. С. 171.
2. Ivanov V. A., Sakharov A. S., Konyzhev M. E. "Plasma initiation of vacuum arcs on a metal surface partially covered with a dielectric film," 2008 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Bucharest. 2008. Vol. 2. P. 575–578, <https://doi.org/10.1109/DEIV.2008.4676859>.
3. Иванов В. А., Коньжев М. Е., Куксенова Л. И., Лантева В. Г., Сахаров А. С., Дорофеев А. А., Камолова Т. И., Сатунин С. Н., Летунов А. А. Воздействие микроплазменных разрядов на поверхность алюминия // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 57.
4. Иванов В. А., Коньжев М. Е., Куксенова Л. И., Лантева В. Г., Сахаров А. С., Камолова Т. И., Дорофеев А. А., Сатунин С. Н. Сильное локализованное взаимодействие микроплазменных разрядов с титаном // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 76.
5. Иванов В. А., Коньжев М. Е., Куксенова Л. И., Лантева В. Г., Хренникова И. А. Влияние микроплазменной обработки на структуру, микрогеометрию поверхности и триботехнические характеристики конструкционных сплавов // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 4. С. 396.
6. Иванов В. А., Сахаров А. С., Коньжев М. Е. Формирование сильного электрического поля, приводящего к возбуждению микроплазменных разрядов на краю диэлектрической пленки на металле в потоке плазмы // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 697, <http://advance.orion-ir.ru/UPF-13/6/UPF-1-6-697.pdf>
7. Stamate M. D. On the dielectric properties of dc magnetron TiO₂ thin films // Applied Surface Science. 2003. Vol. 218. Iss. 1–4. P. 317. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00624-X](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00624-X).
8. Oja Acik I., Mere A., Krunk M., Nisumaa R., Solterbeck C.-H., Ec-Souni M. Structural and electrical characterization of TiO₂ films grown by spray pyrolysis // Thin Solid Films. 2006. Vol. 515. Iss. 2. P. 674, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.12.243>
9. Ivanov V. A., Sakharov A. S., Konyzhev M. E., Kamolova T. I., Dorofeyuk A. A., Kuxsenova L. I. Microplasma discharges excited by a plasma flow on constructional metals // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 907 (1). P. 012023, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/907/1/012023>

10. Иванов В. А., Коньжжев М. Е., Куксенова Л. И., Лантева В. Г., Хренникова И. А. Упрочнение приповерхностных слоев образцов из стали 45 с помощью микроплазменной обработки // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 4. С. 96.
11. Иванов В. А., Коньжжев М. Е., Куксенова Л. И., Лантева В. Г., Алексеева М. С., Хренникова И. А., Летунов А. А., Сахаров А. С., Камолова Т. И., Дорофеев А. А., Сатунин С. Н. Создание прочного микрорельефа на поверхности титана при воздействии микроплазменных разрядов с амплитудой тока 200 А и длительностью импульсов 20 мс // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 59.
12. Иванов В. А., Куксенова Л. И., Лантева В. Г., Коньжжев М. Е. Применение микроплазменного метода для упрочнения приповерхностного слоя образцов из стали 45 // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 3. С. 84.
13. Димитрович Д. А., Бычков А. И., Иванов В. А. Влияние физических методов обработки поверхности титана на рост колоний клеток костной биологической ткани // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 35.
14. Пульцин Н. М. Взаимодействие титана с газом. – М.: Металлургия, 1969.
15. Окисление металлов. Том 2 / Под ред. Ж. Бенара / Пер с франц. – М.: Металлургия, 1969.
16. Иванов В. А., Коньжжев М. Е., Спиринов А. М., Дорофеев А. А., Камолова Т. И., Куксенова Л. И., Лантева В. Г., Залавутдинов Р. Х. Формирование прочного микрорельефа на поверхности Ni-Cr сплава при взаимодействии с микроплазменными разрядами // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 97.
17. Иванов В. А. Трехэлектродный несимметричный зонд для непрерывного измерения температуры и плотности плазмы // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1988. № 6. С. 33.
18. Ivanov V. A. Triple Probe Method for Characterization of Arc Cathode Plasmas // Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Elektronenphysik. Preprint 85–1. P. 1–9.
19. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1965.
20. Месяц Г. А. Эктон – лавина электронов из металла // Успехи физических наук. 1995. Т. 165. № 6. С. 601, <https://doi.org/10.3367/UFNr.0165.199506a.0601>
21. Mesyats G. A. Ecton mechanism of the vacuum arc cathode spot // IEEE Transactions on Plasma Science. 1995. Vol. 23. № 6. P. 879.
22. Mesyats G. A. Ecton mechanism of the cathode spot phenomena in a vacuum arc // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. Vol. 41. № 4. P. 676.
23. Mesyats G. Ectons and their Role in Electrical Discharges in Vacuum and Gases // Journal de Physique IV Colloque. 1997. Vol. 07 (C4). P. C4-93-C4-112.
24. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots To Energetic Condensation (Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics). Vol. 50. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2008.
25. Вакуумные дуги: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Лафферти. – М.: Мир, 1982.
26. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Импульсный электрический разряд в вакууме. – Новосибирск: Наука, 1984.
27. Ivanov V. A., Juttner B., Pursch H. Time Resolved Measurements of Arc Cathode Plasma in Vacuum // Proceedings XI th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 1984. Berlin, DDR. Vol. 1. P. 157.
28. Ivanov V. A., Juttner B., Pursch H. “Time-Resolved Measurements of the Parameters of Arc Cathode Plasmas in Vacuum”: in IEEE Transactions on Plasma Science. 1985. Vol. 13. № 5. P. 334, <https://doi.org/10.1109/TPS.1985.4316432>

PACS: 52.40.Hf

Microplasma discharge propagation over the titanium surface covered with a thin dielectric film

V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, T. I. Kamolova, and A. A. Dorofeyuk

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov st., Moscow, 119991, Russia

Received August 24, 2020

The propagation and structure of the pulsed microplasma discharge (the discharge duration is 100 μs; the electric current amplitude in the discharge is 200 A) were studied experimentally. The discharge was initiated on the titanium sample surface covered with the thin (~10 nm) dielectric film, which was exposed to the wide-aperture plasma flow with a density of $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ and pulse duration of 25 μs. It was found that, on a macroscale, the microplasma discharge glow has the dendrite-type branched structure, which, on a microscale, consists of a large number of brightly glowing “point” formations (the cathode spots) localized on the metal surface. As a result of the interaction of the microplasma discharge with

the titanium sample, the metal surface becomes eroded. In this case, the erosion structure is visually “identical” to the discharge glow structure and consists of a large number of individual microcraters with characteristic sizes from 0.3 to 10 μm localized on the metal surface within an area of $\approx 1 \text{ cm}^2$. On a macroscale, the entire aggregation of microcraters forms the dendrite-type branched structure. It was found that the microplasma discharge propagates along the titanium surface covered with the thin dielectric film at an average velocity of 70 m/s. Moreover, the microplasma discharge propagation has the “jumping” character: the plasma of “motionless” burning cathode spots initiates the excitation of new cathode spots at distances of 3–30 μm from them.

Keywords: microplasma discharge, interaction, titanium, dielectric film, propagation, microcrater, cathode spot.

REFERENCES

1. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov, and M. E. Konyzhev, "Initiation of microplasma discharges at the edge of a dielectric film deposited on a metal surface", *Plasma Physics Reports* **34** (2), 150 (2008).
<https://doi.org/10.1134/S1063780X08020074>.
2. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov and M. E. Konyzhev, "Plasma initiation of vacuum arcs on a metal surface partially covered with a dielectric film", 2008 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Bucharest **2**, 575 (2008).
<https://doi.org/10.1109/DEIV.2008.4676859>.
3. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, A. S. Sakharov, A. A. Dorofeyuk, T. I. Kamolova, S. N. Satunin, and A. A. Letunov, "Effect of Microplasma Discharges on Aluminum Surfaces", *Plasma Physics Reports* **37** (13), 1230 (2011).
<https://doi.org/10.1134/S1063780X11060109>.
4. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, A. S. Sakharov, T. I. Kamolova, A. A. Dorofeyuk, and S. N. Satunin, *Strong Localized Interaction of Microplasma Discharges with Titanium*, *Plasma Physics Reports* **36** (13), 1241 (2010).
<https://doi.org/10.1134/S1063780X10130258>.
5. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, and I. A. Khrennikova, *Influence of microplasma machining on the surface structure and microgeometry and tribological behavior of structural alloys*, *Journal of Friction and Wear* **30** (4), 290 (2009).
<https://doi.org/10.3103/S1068366609040114>.
6. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov, and M. E. Konyzhev, *Formation of a strong electric field resulting in the excitation of microplasma discharges at the edge of a dielectric film on a metal in a plasma flow*, *Plasma Physics Reports* **42** (6), 619 (2016).
<https://doi.org/10.1134/S1063780X16060039>.
7. M. D. Stamate, *On the dielectric properties of dc magnetron TiO₂ thin films*, *Applied Surface Science* **218** (1–4), 317 (2003).
[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00624-X](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00624-X).
8. I. Oja Acik, A. Mere, M. Krunk, R. Nisumaa, C.-H. Solterbeck, and M. Ec-Souni, *Structural and electrical characterization of TiO₂ films grown by spray pyrolysis*, *Thin Solid Films* **515** (2), 674 (2006).
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.12.243>.
9. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov, M. E. Konyzhev, T. I. Kamolova, A. A. Dorofeyuk, and L. I. Kuksenova, *Microplasma discharges excited by a plasma flow on constructional metals*, *Journal of Physics: Conference Series* **907** (1), 012023 (2017).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/907/1/012023>.
10. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, and I. A. Khrennikova, *Strengthening surface layers of samples made of steel 45 using microplasma treatment*, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* **44** (4), 384 (2015).
<https://doi.org/10.3103/S1052618815040032>.
11. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, M. S. Alekseeva, I. A. Khrennikova, A. A. Letunov, A. S. Sakharov, T. I. Kamolova, A. A. Dorofeyuk, and S. N. Satunin, *Creation of a Hard Microrelief on a Titanium Surface Processed by Microplasma Discharges with a Current Amplitude of 200 A and Pulse Duration of 20 ms*, *Plasma Physics Reports* **38** (13), 1105 (2012).
<https://doi.org/10.1134/S1063780X12080144>.
12. V. A. Ivanov, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, and M. E. Konyzhev, *Application of the microplasma method for strengthening of the near-surface layer of samples made from steel 45*, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* **37** (3), 278 (2008).
<https://doi.org/10.3103/S1052618808030126>.
13. D. A. Dimitrovich, A. I. Bychkov, and V. A. Ivanov, *Influence of physical methods of titanium surface treatment on the growth of colonies of cells of bone biological tissue*, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 35 (2009) [in Russian].
14. N. M. Pultsin, *The interaction of titanium with gases* (Metallurgy, Moscow, 1969) [in Russian].
15. *Oxidation of Metals (two-volume edition), Vol. 2 / Ed. by Zh. Benar.* (Metallurgy, Moscow, 1969) [in Russian: translated from French].
16. V. A. Ivanov, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, M. E. Konyzhev, *The effect of microplasma treatment on the properties of a near-surface layer in specimens of a Ni-Cr alloy*, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* **36** (6), 569 (2007).
<https://doi.org/10.3103/S1052618807060118>.
17. V. A. Ivanov, *Three-electrode asymmetric probe for continuous measurement of plasma temperature and*

density, Brief Communications on Physics of the FIAN 6, 33 (1988) [in Russian].

18. V. A. Ivanov, *Triple Probe Method for Characterization of Arc Cathode Plasmas*, Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Elektronenphysik. Preprint 85–1. Pp. 1–9.

19. O. Kubaschewski and B. E. Hopkins, *Oxidation of metals and alloys* (Butterworths, London, 1962).

20. G. A. Mesyats, "Ecton or electron avalanche from metal", Phys. Usp. **38**, 567 (1995); Physics–Uspekhi **38**:6, 567 (1995).

<https://doi.org/10.1070/PU1995v038n06ABEH000089>.

21. G. A. Mesyats, *Ecton mechanism of the vacuum arc cathode spot*, IEEE Transactions on Plasma Science **23** (6), 879 (1995).

22. G. A. Mesyats, *Ecton mechanism of the cathode spot phenomena in a vacuum arc*, IEEE Transactions on Plasma Science **41** (4), 676 (2013).

<https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2247064>.

23. G. Mesyats, *Ectons and their Role in Electrical Discharges in Vacuum and Gases*, Journal de Physique IV Colloque **07** (C4), C4-93-C4-112 (1997).

24. A. Anders, *Cathodic Arcs: From Fractal Spots To Energetic Condensation (Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics)*. Vol. 50. New York, NY, USA: Springer–Verlag, (2008).

25. J. M. Lafferty (ed), *Vacuum Arcs – Theory and Application* (Wiley, New York, 1980).

26. G. A. Mesyats and D. I. Proskurovsky, *Pulsed Electrical Discharge in Vacuum* (Springer–Verlag, Berlin, 1989).

27. V. A. Ivanov, B. Juttner, and H. Pursch, *Time Resolved Measurements of Arc Cathode Plasma in Vacuum*, Proceedings XI th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 1984. Berlin, DDR. Vol. 1. P. 157–160.

28. V. A. Ivanov, B. Juttner, and H. Pursch, "Time-Resolved Measurements of the Parameters of Arc Cathode Plasmas in Vacuum", in IEEE Transactions on Plasma Science **13** (5), 334 (Oct. 1985).

<https://doi.org/10.1109/TPS.1985.4316432>.