

**Время жизни катодных пятен на поверхности титана
при возбуждении микроплазменного разряда***В. А. Иванов, М. Е. Коньжев, Т. И. Камолова, А. А. Дорофеюк*

Экспериментально исследована структура свечения микроплазменного разряда, инициируемого в вакууме импульсным потоком внешней плазмы на поверхности титанового образца, покрытого естественной сплошной оксидной пленкой толщиной 2–6 нм. При воздействии плазмы с плотностью около 10^{13} см⁻³ и электронной температурой 10 эВ на поверхность образца, с отрицательным потенциалом –400 В относительно потенциала плазмы, внешняя поверхность оксидной пленки приобретает положительный электрический заряд в результате потока ионов из плазмы. При этом внутри диэлектрической пленки возникает сильное электрическое поле около 4 МВ/см. Электрической пробой между заряженной поверхностью пленки и металлом инициирует возбуждение микроплазменного разряда на поверхности титана. Интегральное свечение микроплазменного разряда в макромасштабе представляет собой разветвленную структуру типа дендрита, которая в микромасштабе состоит из большого количества ярко светящихся «точечных» образований – локализованных на поверхности металла катодных пятен и свечения ореола вокруг них. С помощью высокоскоростного фоторегистратора IMACON-468 исследован фрагмент поверхности титана площадью 0,5×0,4 мм² в области свечения катодных пятен. На основе анализа оптического свечения катодных пятен на 7 последовательных кадрах фоторегистратора с экспозицией каждого кадра 100 нс и интервалом между кадрами 400 нс рассчитано ожидаемое «время жизни» катодных пятен в интервале значений 0,5±0,2 мкс. По пространственному распределению свечения микроплазменных разрядов определено, что средний диаметр катодных пятен составляет величину около 16±4 мкм, при этом средний размер светящегося ореола вокруг отдельного катодного пятна достигает значения 100 мкм.

Ключевые слова: микроплазменный разряд, вакуум, поверхность, титан, диэлектрическая пленка, свечение, катодное пятно, время жизни, характерный размер, микрократер.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-5-425-439

Введение

Хорошо известно, что в вакууме импульсный поток плазмы с плотностью около

Иванов Вячеслав Алексеевич, гл.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Коньжев Михаил Евгеньевич, н.с.**Дорофеюк Анна Александровна**, н.с., к.т.н.**Камолова Татьяна Ивановна**, н.с., к.т.н.

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2022 г.

© Иванов В. А., Коньжев М. Е., Дорофеюк А. А.,

Камолова Т. И., 2022

10^{11} см⁻³ и длительностью более 1 мкс может инициировать с высокой степенью вероятности микроплазменный разряд (МПР) на поверхности металлов (титан, алюминий, сталь и др.), частично покрытых диэлектрической пленкой толщиной $d \sim 0,5\text{--}2$ мкм [1–6]. При этом для устойчивого возбуждения этих разрядов необходимо, чтобы электрический потенциал металла имел отрицательное значение около –400 В, а диэлектрическая пленка имела хотя бы один разрыв (разрез), граничащий с открытой поверхностью металла [1–6]. В этом случае поток внешней плазмы взаимодействует одновременно с внешней поверхностью ди-

электрической пленки и открытой поверхностью металла в местах разрыва пленки. При этом за счет потока положительно заряженных ионов 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 определяется потенциалом внешнего источника напряжения и обычно составляет величину $\varphi_m = -400$ В. При этих условиях, напряженность электрического поля на срезе диэлектрической пленки, т. е. между внешней поверхностью пленки и открытой поверхностью металла, определяется формулой [6]:

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

Таким образом, микроплазменный разряд – это разряд, который возбуждается в результате поверхностного электрического пробоя по срезу диэлектрической пленки, которая частично покрывает металлический образец. При этом внешняя поверхность диэлектрической пленки заряжается потоком положительно заряженных ионов из плазмы, а металлический образец имеет отрицательный электрический потенциал, определяемый внешним источником напряжения.

Ранее в наших экспериментах диэлектрическая оксидная пленка толщиной около 1 мкм предварительно формировалась на поверхности металлических образцов в результате их нагревания в воздушной атмосфере при температуре 400–450 °С в течение 1 часа, или в результате напыления в вакууме сплошной диэлектрической пленки на поверхность металлов [1–6]. После этого на поверхности пленки делался разрез для устойчивого возбуждения микроплазменного разряда на металле. Таким образом, при воздействии потока плазмы с плотностью около 10^{11} см⁻³ на металлический образец, находящийся под электрическим потенциалом –400 В и частично покрытый диэлектрической пленкой толщиной 1 мкм, напряженность электрического поля на срезе пленки может достигать значения

$E \approx |\varphi_m| / d = 4$ МВ/см. При этом численное моделирование процесса накопления электрического заряда на внешней поверхности диэлектрической пленки вблизи её среза (т. е. непосредственно на границе разрыва пленки и открытой поверхности металла) уточняет [1–4, 6], что за счёт краевого эффекта реальное электрическое поле на срезе плёнки будет приблизительно в 1,5–2 раза меньше максимального значения электрического поля и составит величину 2,7–2 МВ/см. Такое электрическое поле является достаточно сильным для инициирования поверхностного электрического пробоя по срезу диэлектрической пленки в местах её разрыва и контакта с открытой поверхностью металла [1–4, 6].

При поверхностном электрическом пробое по срезу плёнки на открытой поверхности металла происходит образование катодных пятен, плотная плазма которых контактирует с металлом и диэлектрической пленкой. В результате в замкнутой электрической цепи (металлический образец – группа катодных пятен – плазма – стенки вакуумной камеры – источник напряжения и тока) возбуждается электрический ток микроплазменного разряда 200–400 А, ограниченный внешним балластным резистором 2–1 Ом. В процессе развития микроплазменного разряда на поверхности металла происходят следующие явления: автоэлектронная и затем взрывная эмиссия, формирование катодных пятен, локальное плавление металла с образованием микрократеров и испарение диэлектрической плёнки в результате взаимодействия с плотной плазмой катодных пятен [1–6]. В результате, при достаточной длительности микроплазменных разрядов происходит полное испарение диэлектрической пленки и формирование сплошного переплавленного слоя на поверхности металлического образца в виде перекрывающихся оплавленных микрократеров. При этом происходит термическая закалка приповерхностного слоя металла в результате быстрого отвода тепла от расплавленной области вглубь металла, и, таким образом, формируется прочный микрорельеф с характерным размером шероховатости около 1 мкм [5].

Возбуждение микроплазменных разрядов на поверхности титана, частично покрытого оксидной пленкой толщиной $d \approx 0,5$ –2 мкм,

происходит в плазменном потоке с плотностью ионов водорода около 10^{11} см^{-3} с вероятностью около 90 % [6]. Для титановых образцов, частично покрытых более толстыми или более тонкими оксидными пленками, вероятность возбуждения микроплазменных разрядов значительно снижается [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 с концентрации заряженных частиц 10^{11} см^{-3} . При уменьшении толщины пленки на титане от 0,5 мкм до 0,01 мкм ее электропроводность сильно возрастает [7, 8], а плотность электрического заряда на ее поверхности заметно уменьшается, поскольку поток положительных ионов из плазмы с плотностью 10^{11} см^{-3} и длительностью 25 мкс 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 на титане с оксидной пленкой толщиной 0,01 мкм снижается до значения около 1 % [6]. Аналогичные экспериментальные результаты по иницированию микроплазменных разрядов на поверхности других конструктивных металлов (алюминий, сталь) в потоке внешней плазмы представлены в работах [9, 10].

Таким образом, при оптимальной толщине диэлектрической оксидной пленки 0,5–1 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, возникающих на металле. В результате возбуждения 5–10 импульсных микроплазменных разрядов с длительностью каждого импульса 20 мс на поверхности металлических образцов с площадью 2 см^2 , покрытых диэлектрической пленкой толщиной

около 1 мкм, формируется сплошной переплавленный слой металла в виде большого количества оплавленных перекрывающихся микрократеров. Этот переплавленный слой на поверхности металла характеризуется прочным микрорельефом с шероховатостью около 1 мкм [9–12]. Такой новый способ формирования прочного микрорельефа на поверхности металлов с использованием микроплазменных разрядов может быть востребован в медицине, включая ортопедию и стоматологическое протезирование, а также в промышленности при производстве композиционных материалов [9–14].

Фундаментальный научный и прикладной интерес представляет также исследование микроплазменных разрядов, возбуждаемых внешним потоком плазмы на поверхности титана, покрытого очень тонкой сплошной диэлектрической оксидной пленкой толщиной до 6 нм. В частности, тонкая оксидная пленка толщиной 2–6 нм образуется естественным образом на поверхности титана в воздушной атмосфере при комнатной температуре в течение от нескольких дней до одного года в результате процесса окисления поверхности металла кислородом воздуха [15, 16]. Важно отметить, что такая оксидная пленка является сплошной и полностью покрывает поверхность металлического образца. Таким образом, внешний поток плазмы взаимодействует с поверхностью оксидной пленки и не контактирует с открытой поверхностью титана. При этом электрическое поле, возникающее между внешней поверхностью оксидной пленки и металлом, сосредоточено внутри объема тонкой пленки. Следовательно, сама возможность поверхностного электрического пробоя диэлектрической пленки исключается. Для возбуждения микроплазменного разряда на титане, покрытого сплошной оксидной пленкой толщиной 2–6 нм, необходимо возникновение такого сильного локального электрического поля, которое может инициировать электрический пробой в объеме пленки.

Ранее нами были проведены исследования структуры микроплазменного разряда (амплитуда электрического тока 200–400 А, длительность 100 мкс), инициируемого импульсным потоком плазмы на поверхности титана, покрытого тонкой оксидной пленкой толщиной 2–6 нм [9, 17].

При этом в отличие от экспериментов с пленками толщиной около 1 мкм [1–6] для стабильного инициирования микроплазменных разрядов на поверхности титана с более тонкими диэлектрическими пленками толщиной 2–6 нм необходимо было увеличить плотность внешнего импульсного потока плазмы в 100 раз, до значения $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, с тем, чтобы поток положительных ионов из плазмы в течение длительности импульса 25 мкс, смог зарядить внешнюю поверхность пленки до значения, близкого к плавающему потенциалу плазмы, несмотря на утечку электрического заряда с поверхности оксидной пленки вследствие ее электропроводности [7, 8, 15, 16].

При возбуждении одиночного микроплазменного разряда на титановых образцах, покрытых тонкой оксидной пленкой толщиной 2–6 нм, свечение разряда визуально в макромасштабе имеет разветвленную структуру типа дендрита, которая в микромасштабе состоит из большого количества ярко светящихся «точечных» образований – локализованных на поверхности металла катодных пятен. При этом возникающая эрозионная структура на титане, визуально аналогичная структуре свечения микроплазменного разряда, состоит из большого количества отдельных неперекрывающихся микрократеров с характерными размерами от 0,3 мкм до 10 мкм, которые образуются в местах локализации катодных пятен. Вся совокупность микрократеров в макромасштабе также образует разветвленную структуру типа дендрита [17].

Установлено, что микроплазменный разряд (амплитуда электрического тока 200–400 А, длительность 100 мкс) распространяется по поверхности титана, покрытого тонкой диэлектрической пленкой толщиной 2–6 нм, с высокой средней скоростью до 70 м/с. При этом распространение микроплазменного разряда в микромасштабе имеет «прыжковый» характер: плазма практически «неподвижных» горящих катодных пятен (в течение оценочного времени жизни около 1 мкс) иницирует возбуждение новых горящих катодных пятен на расстояниях локализации 3–30 мкм от них [17].

Важно отметить, что при электрическом токе разряда 200–400 А, процессы распространения микроплазменных разрядов по

поверхности титана, покрытого (i) «толстой» диэлектрической пленкой (0,5–1 мкм), или (ii) «тонкой» диэлектрической пленкой (2–6 нм), существенно отличаются друг от друга как по характеру и величине средней скорости распространения разрядов, так и по структуре свечения и возникающей эрозии на поверхности титана.

Так, при наличии «толстых» оксидных пленок (0,5–1 мкм) на титане микроплазменный разряд и катодные пятна сначала иницируются внешним импульсным потоком плазмы, а затем новые катодные пятна возникают и медленно перемещаются вдоль границы диэлектрической пленки и открытой поверхности металла со скоростью около 1 м/с. В результате этого, вдоль границы «толстой» оксидной пленки на поверхности титана образуется «непрерывная» цепочка перекрывающихся оплавленных микрократеров. При достаточно большой суммарной длительности микроплазменных разрядов оксидная пленка постепенно полностью испаряется, и на поверхности титана формируется сплошной переплавленный слой металла в виде большого количества перекрывающихся оплавленных микрократеров. После этого на переплавленной поверхности титана новые микроплазменные разряды в потоке внешней плазмы с плотностью 10^{11} см^{-3} уже не возбуждаются, т.к. оксидная пленка полностью испарилась с поверхности титана. [4, 6].

При возбуждении микроплазменных разрядов на титане со сплошной «тонкой» оксидной пленкой толщиной 2–6 нм микроплазменные разряды на поверхности титана устойчиво иницируются внешним импульсным потоком плазмы только при высокой плотности $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. После этого, уже в отсутствие внешнего потока плотной плазмы, поток положительных ионов из отдельных горящих катодных пятен заряжает поверхность тонкой пленки в некоторой окрестности этих первичных катодных пятен до значения плавающего потенциала плазмы. В результате последующего электрического пробоя в объеме тонкой оксидной пленки в локальных местах на поверхности титана происходит возбуждение новых катодных пятен, которые возникают на некотором расстоянии от предшествующих пятен. Таким образом, распространение микроплазменного разряда (при электрическом

токе разряда 200–400 А) по поверхности титана, покрытого «тонкой» сплошной диэлектрической пленкой толщиной 2–6 нм, в микромасштабе имеет «прыжковый» характер: плазма первичных горящих катодных пятен инициирует возбуждение новых (последующих) катодных пятен на расстояниях локализации 3–30 мкм от них за характерное оценочное время около 1 мкс [17].

Авторами данной работы проводятся также исследования процессов инициирования (внешним импульсным потоком плотной плазмы) и последующего самостоятельного развития (уже в отсутствие внешнего потока плотной плазмы) микроплазменного разряда на поверхности титана, покрытого тонкой сплошной оксидной пленкой толщиной 2–6 нм, при амплитуде электрического тока разряда 50 А.

Для построения физической модели возбуждения и развития микроплазменного разряда на поверхности металла с диэлектрической пленкой в техническом вакууме 0,001 Па важно измерить среднее время жизни отдельных катодных пятен и их характерные размеры. Эти величины могут существенно отличаться от аналогичных величин для пятен, возникающих на чистых металлах без диэлектрических пленок в высоком вакууме [18, 19].

Известно, что титан находит широкое применение в различных отраслях промышленности и медицине, и на его поверхности всегда присутствует естественная оксидная пленка. Поэтому исследования возбуждения МПР на поверхности титана (с естественной оксидной пленкой толщиной 2–6 нм) для создания на ней контролируемого микро рельефа представляют как фундаментальный, так и прикладной интерес.

Цель работы состояла в измерении временных и пространственных характеристик катодных пятен, возникающих в микроплазменном разряде на поверхности титана, покрытого естественной диэлектрической оксидной пленкой толщиной 2–6 нм при амплитуде электрического тока разряда 50 А.

Результаты экспериментальных исследований и обсуждение

Исследования по воздействию плазмы на образцы титана проводились в экспериментальной установке «Сфера» [1–6, 9–14, 17],

представляющей собой металлическую вакуумную камеру сферической формы диаметром 50 см, откачиваемой до остаточного давления воздуха около 0,001 Па (рис. 1). На боковой патрубке камеры устанавливался плазменный инжектор цилиндрического типа, в котором в результате высоковольтного электрического разряда по поверхности полиметилметакрилата формировался импульсный поток полностью ионизованной водородной плазмы длительностью около 20–25 мкс. Электронная температура плазмы, плотность заряженных частиц, длительность импульса потока плазмы измерялись ленгмюровскими зондами [20–23]. Поток импульсной плазмы по мере распространения расширялся от инжектора к центру камеры, при этом плотность плазмы снижалась. Это позволяло проводить эксперименты по возбуждению микроплазменных разрядов при различной плотности плазмы. В данных исследованиях образец титана с естественной диэлектрической (оксидной) пленкой толщиной 2–6 нм размещался в центре плазменного потока на расстоянии 2 см от среза инжектора, где в течение интервала времени 4–5 мкс от начала генерации плазмы плотность ионов водорода достигала значения $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Электронная температура плазмы в течение всей длительности импульса плазмы находилась в интервале значений 10 эВ – 8 эВ.

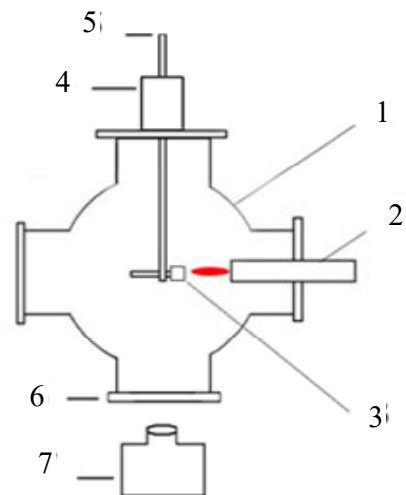


Рис. 1. Схема экспериментальной установки «Сфера» для возбуждения и исследования микроплазменных разрядов на поверхности металлических образцов: 1 – вакуумная камера, 2 – плазменный инжектор, 3 – металлический образец с оксидной пленкой, 4 – манипулятор с вакуумным вводом, 5 – металлический держатель образцов, 6 – оптическое окно, 7 – фоторегистратор ИМАСОН-468

Образцы, изготовленные из титана марки ВТ1, имели химический массовый процентный состав: Ti (титан) – 99 %; Al (алюминий) – 0,7 %; Fe (железо) – 0,15 %; C (углерод) – 0,05 %; прочие примеси – 0,01 %. Образцы из титана в форме пластин с размерами $20 \times 20 \times 0,6$ мм³ после предварительной механической шлифовки и длительной промывки в деионизованной воде, выдерживались в воздушной атмосфере (температура 20 °С, давление воздуха 10^5 Па) в течение нескольких дней. При этом на поверхности титана естественным образом формировалась сплошная диэлектрическая оксидная плёнка толщиной 2–6 нм [16]. При длительном выдерживании образцов в воздушной атмосфере в течение многих сотен часов, сформированная таким образом оксидная пленка на титане остается стабильной и практически не увеличивает свою толщину в течение года.

Образец титана устанавливался в вакуумную камеру на расстоянии 2 см от плазменного инжектора. До воздействия плазмы отрицательный электрический потенциал образца имел величину –400 В. Вектор скорости плазменного потока составлял угол 10 градусов с плоскостью поверхности пластины из титана, а характерный размер плазмы при взаимодействии с образцом был равен 3 см. В результате взаимодействия импульсного потока плазмы с титановым образцом на его поверхности возбуждался микроплазменный разряд (МПР), интегральное свечение которого в видимом диапазоне длин волн имеет характерную раз-

ветвленную пространственную структуру типа дендрита (рис. 2). Микроплазменный разряд сначала инициируется потоком внешней плазмы с плотностью 2×10^{13} см⁻³, и далее поддерживается в течение 100 мкс источником импульсного электрического тока 50 А при отрицательном электрическом потенциале образца около –50 В. Временная эволюция импульсов потенциала образца и электрического тока, протекающего через образец, представлена на осциллограммах на рис. 3. Как было установлено ранее, средняя скорость распространения микроплазменного разряда при электрическом токе разряда 50 А составляла около 15 м/с [24].



Рис. 2. Свечение микроплазменного разряда на поверхности пластины из титана, покрытого оксидной пленкой толщиной 2–6 нм. Разряд инициируется потоком внешней плазмы (2×10^{13} см⁻³) справа и далее поддерживается в течение 1–2 мс источником импульсного электрического тока 50 А. Размер изображения $17,5 \times 17,5$ мм²

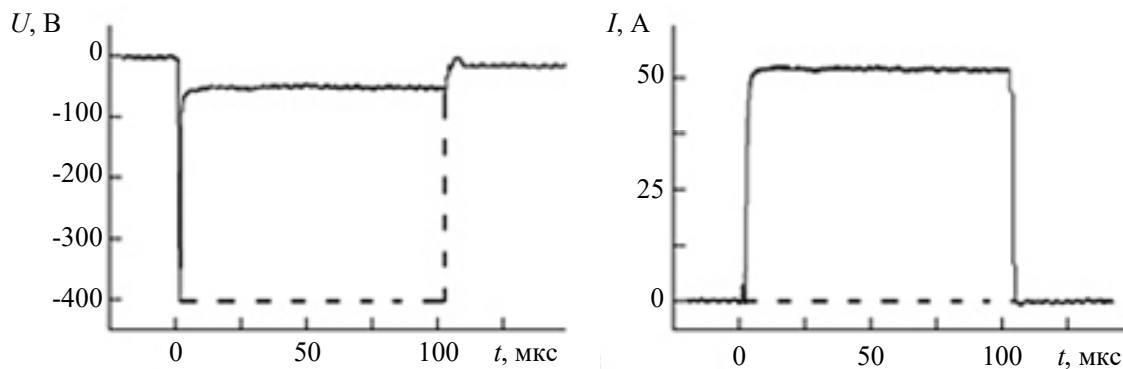


Рис. 3. Временная эволюция импульсов длительностью 100 мкс напряжения U и тока I на титановом образце. Сплошная линия слева – напряжение на титановом образце, справа – ток через образец в результате возбуждения микроплазменного разряда. Пунктирные линии – напряжение и ток в отсутствие микроплазменного разряда

Для исследования временных и пространственных характеристик структуры свечения катодных пятен на поверхности титана в течение коротких временных интервалов применялся высокоскоростной фоторегистратор IMACON-468. Для этого с использованием макрообъектива изображение фрагмента титанового образца с размерами $0,5 \times 0,4 \text{ мм}^2$ фокусировалось на приемной CCD матрице регистратора с высоким пространственным разрешением с линейным размером каждого пикселя $1,73 \text{ мкм}$ и площадью единичного пикселя около 3 мкм^2 . IMACON-468 работал в режиме регистрации 7 последовательных кадров, длительность каждого кадра составляла 100 нс , пауза между двумя последовательными кадрами 400 нс .

На рис. 4 представлена временная диаграмма импульсов, соответствующих длительностям экспозиции всех 7 кадров регистратора. Величина временного интервала, в течение которого проводилась фоторегистрация развития микроплазменного разряда на титановом образце с диэлектрической оксидной пленкой $2\text{--}6 \text{ нм}$, составляла $3,6 \text{ мкс}$. Задержка импульса первого кадра относительно момента контакта внешнего потока плазмы с титановым образцом составляет около 80 нс . Данное соотношение между задержкой первого кадра (80 нс), длительностью экспозиции каждого кадра (100 нс) и интервалов между ними (400 нс) было выбрано в результате многочисленных пробных экспериментов, которые позволили оптимизировать соотношение этих временных интервалов так, чтобы получить несколько серий изображений структуры свечения катодных пятен на фрагмента титанового образца, для проведения достоверной обработки последовательных изображений на этих 7 кадрах.

На рис. 5 представлены 7 кадров с последовательными изображениями свечения в оптическом диапазоне длин волн ($400\text{--}650 \text{ нм}$) фрагмента микроплазменного разряда на титановом образце в течение первых $3,6 \text{ мкс}$ после его возбуждения внешним потоком плазмы через 80 нс после контакта плазмы с титановым образцом. Длительность экспозиции каждого изображения 100 нс , временной интервал между кадрами 400 нс . Размер фрагмента поверхности образца $0,5 \times 0,4 \text{ мм}^2$. Кадр # 8 является калибровочным: более темная

вертикальная полоса является фотографией проволоочки диаметром $0,1 \text{ мм}$, расположенной в плоскости титанового образца.

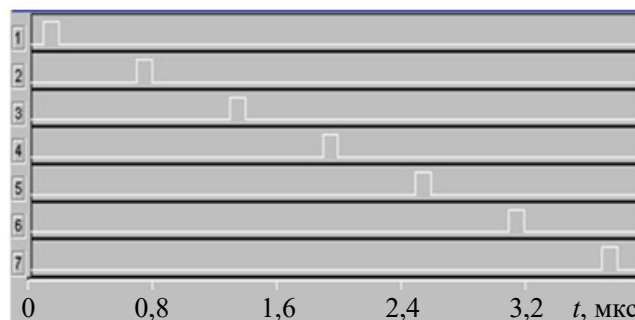


Рис. 4. Временная диаграмма импульсов, синхронизованных с длительностью кадров фоторегистратора (рис. 5). Длительность каждого кадра 100 нс , временной интервал между кадрами 400 нс , всего 7 кадров. Задержка первого импульса и первого кадра относительно момента контакта внешнего потока плазмы с титановым образцом составляет 80 нс

На кадре #1 (рис. 5) видно, что через 80 нс (рис. 4) после контакта плазмы с титановым образцом на его поверхности возникает область квазиоднородного свечения с характерным размером около $0,2 \text{ мм}$, при этом наиболее яркое свечение наблюдается на ребре титановой пластины, которое обращено к плазменному потоку. Свечение плазменного потока справа от ребра образца отсутствует (темная область, прилегающая к правому краю фотографий на кадрах #1–7), т. к. полностью ионизованная водородная плазма в вакууме (остаточное давление воздуха $0,001 \text{ Па}$) практически не излучает свет в видимом диапазоне длин волн. По-видимому, квазиоднородное свечение титановой пластины связано с люминесценцией оксидной пленки титана [25, 26] при взаимодействии с плазмой. Эта люминесценция возникает при воздействии на пленку оксида титана потока положительно заряженных ионов из внешней плазмы [27]. Спустя $0,5 \text{ мкс}$ на кадре #2 уже регистрируется 9 ярких локализованных образований – катодных пятен, при этом через титановый образец протекает электрический ток 50 А , величина которого ограничивается внешним балластным резистором величиной 8 Ом (рис. 3). В этих условиях электрический потенциал образца изменяется от значения -400 В до -50 В (рис. 3), что типично для развития вакуумного разряда с катодными пятнами [18, 19]. Свечение на кадрах #1–7 пока-

зывает, что одно катодное пятно (самое крайнее правое пятно) практически не перемещается, т.к. за время экспозиции этих кадров (3,6 мкс) оно не изменяет своего местоположения. На кадрах #3–4 третье пятно слева от ребра образца также существует без измене-

ния своего положения. Остальные катодные пятна существуют только в течение длительности отдельных единичных кадров, т. е. около 0,1 мкс без учета паузы между кадрами, или около 0,5 мкс с учетом паузы между кадрами.

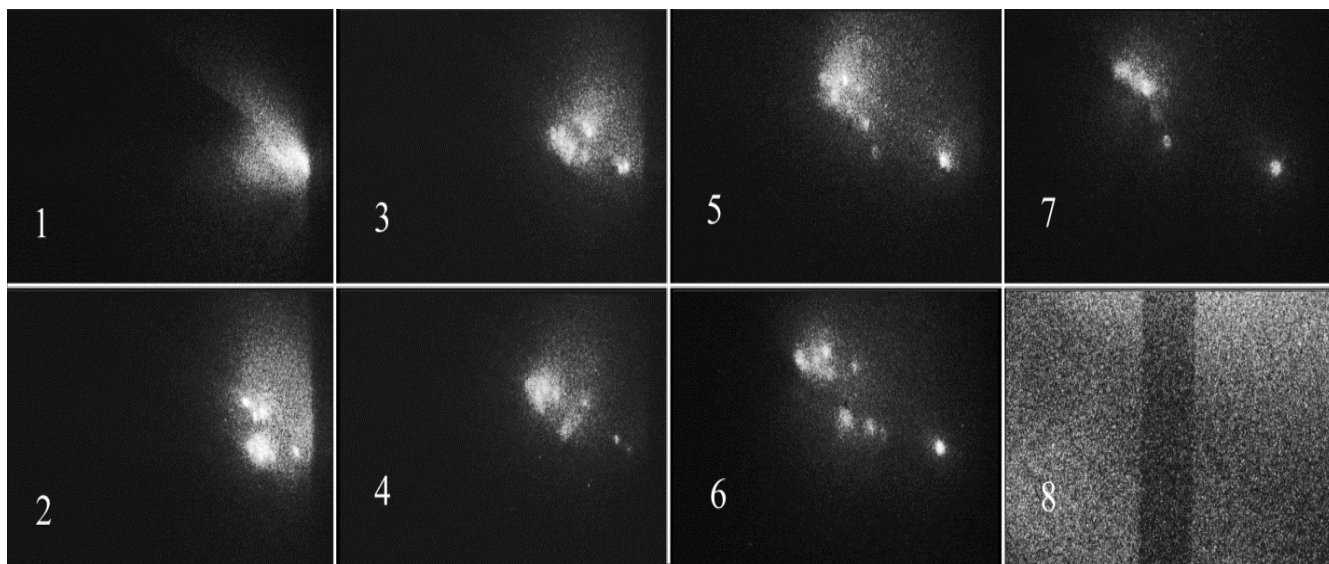


Рис. 5. 7 кадров с последовательными изображениями свечения катодных пятен в видимом диапазоне длин волн на поверхности титана в течение первых 3,6 мкс после возбуждения микроплазменного разряда внешним потоком плазмы через 80 нс после контакта плазмы с титановым образцом. Длительность экспозиции каждого изображения 100 нс, временной интервал между кадрами 400 нс. Размер фрагмента поверхности образца $0,5 \times 0,4$ мм². Кадр #8 является калибровочным – более темная вертикальная полоса является фотографией проволоочки диаметром 0,1 мм, расположенной в плоскости титанового образца

На основании представленных фотографий был сделан анализ значений характерного времени жизни катодных пятен, зарегистрированных на кадрах рис. 5. Для этого был выполнен расчёт значений времени жизни пятен в двух вариантах. В первом варианте расчёта предполагалось, что если катодное пятно наблюдается только в одном кадре, то минимальное время его жизни определялось по длительности экспозиции кадра 0,1 мкс. Во втором варианте расчёта принималось, что пятно существует как во время длительности кадра, так и во время паузы 0,4 мкс между кадрами, т. е. максимальное время жизни пятна считалось равным 0,5 мкс. Если пятно существует более одного кадра, то минимальное время жизни рассчитывалось по длительности двух кадров и одной паузы между ними, а максимальное значение приравнивалось суммарной длительности двух кадров и двух пауз. Всего проанализированы изображения 33 катодных пятен, из которых 26 пятен существо-

вали только в одном кадре, 6 пятен – в двух кадрах, и одно пятно во всех семи кадрах.

Из экспериментальных данных следует, что среднее максимальное ожидаемое время жизни катодных пятен (т. е. с учетом пауз длительностью 0,4 мкс) составляет 0,7 мкс, а среднее минимальное ожидаемое время жизни катодных пятен (т. е. без учета пауз длительностью 0,4 мкс) – около 0,3 мкс. Таким образом, среднее время жизни катодного пятна составляет значение $(0,5 \pm 0,2)$ мкс. На гистограмме рис. 6 видно, что для 97 % катодных пятен время жизни находится во временном интервале $\tau = 0,1-1,0$ мкс, при этом 80 % катодных пятен имеет время жизни в интервале $\tau = 0,1-0,5$ мкс. И только одно катодное пятно существовало около 3,6 мкс.

Из анализа изображений на рис. 5 можно заключить, что следует отвергнуть непрерывный характер движение катодных пятен, т. к. при допущении такого движения их скорость должна достигать около 100 м/с, а изображе-

ния катодных пятен при этом должны быть в виде вытянутых линий или эллипсов в направлении их движения. Но это не соответствует изображениям катодных пятен, представленным на кадрах #2–7 (рис. 5).

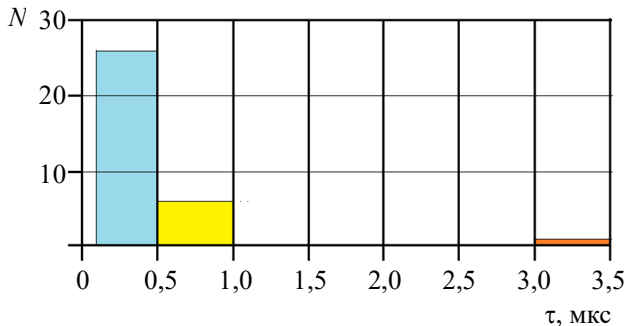


Рис. 6. Гистограмма распределения количества катодных пятен с временем жизни в интервалах $\tau = 0,1–0,5$ мкс (голубой цвет), $\tau = 0,5–1$ мкс (желтый цвет), $\tau = 3,0–3,5$ мкс (оранжевый цвет)

Для изучения формы катодных пятен были измерены пространственные распределения интенсивности свечения некоторых пятен, результаты которых представлены на рис. 7.

Как видно из представленных пространственных распределений свечения все исследованные катодные пятна имеют форму, близкую к круговой, что указывает на то, что они практически не движутся в течение длительности кадра 0,1 мкс. При этом средний диаметр катодных пятен составляет величину около 16 ± 4 мкм, а средний размер светящегося ореола вокруг отдельного катодного пятна достигает размера около 100 мкм.

Важно отметить, что свечение микроплазменного разряда представляет собой множество локализованных ярких микрозарядов (катодных пятен), которые практически не перемещаются в течение времени их жизни, т. к. сохраняют «точечную» структуру свечения в течение даже более длительного времени фоторегистрации 1–2 мс (рис. 2). То, что многочисленные микрозаряды остаются неподвижными в течение времени их жизни подтверждается также фотографиями микрократеров, которые образуются на поверхности титана в результате развития микрозарядов в местах их локализации [17, 24]. Эти микро-

кратеры имеют размеры 3–20 мкм и форму, близкую к круговой.

Необходимо пояснить, как происходит процесс электрической зарядки внешней поверхности оксидной плёнки положительно заряженными ионами, вылетающими из горящего катодного пятна за его пределы на расстояния до 30 мкм. Действительно, так как в катодном пятне диаметром 10–20 мкм плотность плазмы достигает значения порядка 10^{19} см⁻³ при температуре 1–2 эВ [23], то характерный дебаевский радиус этой плазмы составляет величину 3–6 нм, соизмеримую с толщиной плёнки. При этом внутренние области плотной плазмы катодного пятна полностью экранированы от воздействия внешнего электрического поля на поверхности титана. В противоположность этому, во внешних слоях плазмы катодного пятна происходит разделение зарядов и разлёт электронов и ионов. Под действием электрического поля образца, электрический потенциал которого в течение длительности микроплазменного разряда составляет –50 В (рис. 2), положительные ионы из внешних слоёв плазмы катодного пятна заряжают внешнюю поверхность оксидной плёнки титана. При этом поток положительных ионов из отдельных горящих катодных пятен заряжает поверхность тонкой пленки в некоторой окрестности этих первичных катодных пятен до значения плавающего потенциала плазмы. В результате последующего электрического пробоя в объеме тонкой оксидной пленки в локальных местах на поверхности титана происходит возбуждение новых микрозарядов и образование новых катодных пятен, которые возникают на некотором расстоянии от предшествующих пятен. Таким образом, распространение микроплазменного разряда по поверхности титана, покрытого «тонкой» сплошной диэлектрической пленкой толщиной 2–6 нм, в микромасштабе имеет «прыжковый» характер: плазма первичных горящих катодных пятен инициирует возбуждение новых (последующих) катодных пятен на расстояниях локализации до 30 мкм от них за характерное время жизни пятен ~1 мкс [17, 24].

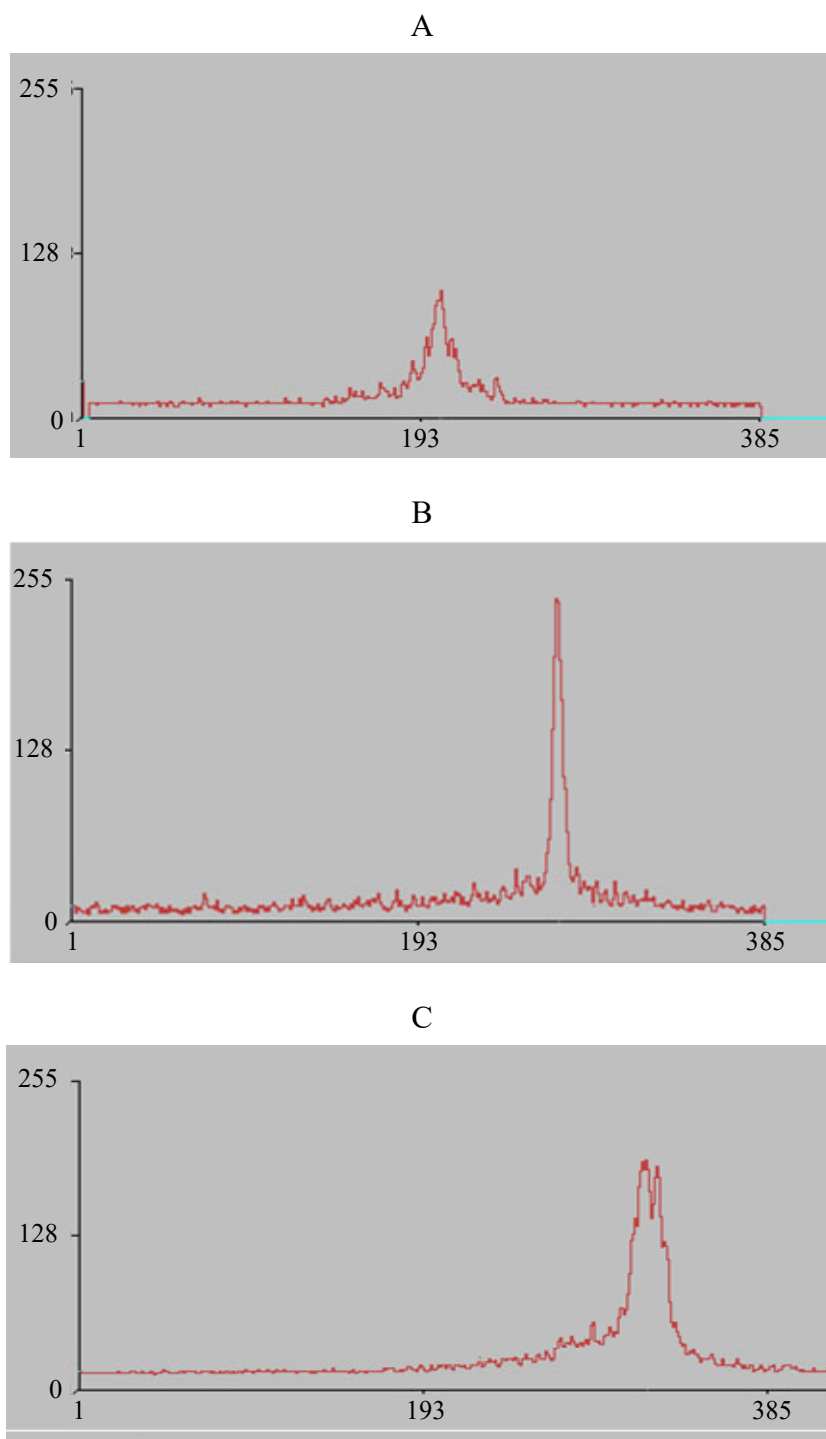


Рис. 7. Распределение интенсивности свечения при сканировании изображений катодных пятен по горизонтальной оси на поверхности титановой пластины с естественной оксидной пленкой титана толщиной 2–6 нм. По горизонтали расположена шкала в микрометрах, по вертикали – интенсивность свечения в относительных единицах. Длительность регистрации распределения интенсивности свечения каждого катодного пятна составляет 100 нс.

А) Распределение интенсивности свечения в пятом катодном пятне (отсчет от правого ребра образца) кадра #4 (рис. 5), характерный поперечный размер пятна по уровню 0,5 от максимального значения интенсивности свечения составляет около 20 мкм.

В) Распределение интенсивности свечения в верхнем катодном пятне кадра #5 (рис. 5); характерный размер пятна составляет около 10 мкм.

Распределение интенсивности свечения в пятом катодном пятне (отсчет от правого ребра образца) кадра #6 (рис. 5); характерный поперечный размер катодного пятна составляет около 18 мкм

С) Распределение интенсивности свечения в пятом катодном пятне (отсчет от правого ребра образца) кадра #6 (рис. 5); характерный поперечный размер катодного пятна составляет около 18 мкм

Полученные в данной работе новые экспериментальные данные о времени жизни катодных пятен ($0,5 \pm 0,2$) мкс и их характерных размерах (16 ± 4) мкм в микроплазменном разряде согласуются с результатами, полученными нами ранее [17, 24] о прыжковом характере движения катодных пятен по поверхности титана с тонкой оксидной плёнкой. Если формально рассчитать скорость распространения МПР по данным кадров #1–7 (рис. 5), то получится, что в первые 3,6 мкс возбуждения МПР скорость распространения катодных пятен составит величину около 100 м/с, что в 7 раз превышает скорость прыжкового движения пятен 15 м/с при использовании длительных импульсов МПР 1–2 мс [24]. Эту разницу в значениях средней скорости распространения катодных пятен для различных интервалов времени можно объяснить тем, что размер области наблюдения очень маленький и составляет всего $0,5 \times 0,4$ мм², поэтому при характерном размере неоднородности внешнего потока плазмы около 1 см и его длительности около 25 мкс, в первые несколько микросекунд на исследуемую область образца воздействует плотная однородная плазма, и вся площадь фрагмента находится в одинаковых условиях для возбуждения МПР. В этом случае возбуждение МПР и первичных катодных пятен может происходить практически одновременно на всей поверхности фрагмента титана площадью $0,5 \times 0,4$ мм², что и обуславливает такие большие кажущиеся скорости распространения МПР по поверхности титана. При увеличении длительности МПР более 100 мкс роль потока внешней плазмы длительностью 25 мкс исчезает, и далее «включается» механизм локального прыжкового распространения микроплазменного разряда с возникновением: а) новых микрозарядов в результате электрического пробоя оксидной плёнки и б) новых катодных пятен на титане, инициируемых плазмой пробоя оксидной пленки. Эти процессы в микромасштабе имеют циклический характер и повторяются многократно в течение всей длительности существования микроплазменного разряда. При этом скорость распространения МПР в макромасштабе составляет всего 15 м/с.

Заключение

В результате экспериментальных исследований установлено, что в вакууме при воздействии потока водородной плазмы плотностью 2×10^{13} см⁻³ и электронной температурой 10 эВ на титане, покрытом естественной оксидной пленкой толщиной 6 нм, происходит возбуждение микроплазменного разряда на поверхности титана. Структура свечения микроплазменного разряда имеет характерную разветвленную пространственную форму типа дендрита. При этом на интегральных фотографиях микроплазменного разряда видно, что в микромасштабе свечение представляет собой множество локализованных плазменных объектов, которые практически не перемещаются в течение времени существования микроплазменного разряда. Среднее ожидаемое время жизни катодных пятен в разрядах на титане с тонкой оксидной плёнкой находится в интервале ($0,5 \pm 0,2$) мкс. Исследование микроструктуры фрагмента микроплазменного разряда с пространственным увеличением около $\times 100$ с помощью фоторегистратора с IMACON-468 в режиме регистрации 7 последовательных кадров (длительность каждого кадра 100 нс, пауза между двумя последовательными кадрами 400 нс) показало, что микроплазменный разряд состоит из множества катодных пятен, средний размер которых составляет (16 ± 4) мкм.

Полученные новые экспериментальные данные подтверждают предложенный нами ранее [17, 24] механизм прыжкового распространения микроплазменного разряда в виде многочисленных локальных циклических процессов возникновения, горения и последующего погасания новых катодных пятен на поверхности металла с тонкой оксидной пленкой. При этом плазма предшествующих горящих катодных пятен заряжает диэлектрическую пленку в окрестности до 30 мкм локализации этих пятен, и возникающее при этом сильное локальное электрическое поле инициирует электрический пробой пленки и образование новых микрозарядов и катодных пятен в окрестности своей локализации в тех местах, где напряжённость электрического поля максимальна. В макромасштабе микроп-

лазменный разряд распространяется по поверхности титана, покрытого тонкой оксидной плёнкой толщиной 2–6 нм, со скоростью до 15 м/с при токе разряда 50 А.

Исследования выполнены в рамках государственного задания «Фундаментальные основы плазменных и микроволновых технологий» и представляют как фундаментальный, так и прикладной интерес, поскольку титан с естественной оксидной пленкой применяется в медицине и особенно широко в ортопедической стоматологии, где с помощью микроплазменных разрядов на титане возможно создание прочного микрорельефа с заданными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В. А., Сахаров А. С., Коныжев 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., Коныжев М. Е., Куksenova Л. И., Лантева В. Г., Сахаров А. С., Дорофеюк А. А., Камолова Т. И., Сатунин С. Н., Летунов А. А. Воздействие микроплазменных разрядов на поверхность алюминия // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 57. <https://applphys.orion-ir.ru/appl-10/10-6/PF-10-6-57.pdf>
4. Иванов В. А., Коныжев М. Е., Куksenova Л. И., Лантева В. Г., Сахаров А. С., Камолова Т. И., Дорофеюк А. А., Сатунин С. Н. Сильное локализованное взаимодействие микроплазменных разрядов с титаном // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 76. <https://applphys.orion-ir.ru/appl-09/09-6/PF-09-6-76.pdf>
5. Иванов В. А., Коныжев М. Е., Куksenova 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., Коныжев 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. <https://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. Issues 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., Krunks 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. Issue 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., Kuksenova 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. Ivanov V. A., Konyzhev M. E., Kuksenova L. I., Lapteva V. G., Khrennikova I. A. Strengthening surface layers of samples made of steel 45 using microplasma treatment // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. № 4. P. 384. <https://doi.org/10.3103/S1052618815040032>
11. Ivanov V. A., Konyzhev M. E., Kuksenova L. I., Lapteva V. G., Alekseeva M. S., Khrennikova I. A., Letunov A. A., Sakharov A. S., Kamolova T. I., Dorofeyuk A. A., Satunin S. N. 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. 2012. Vol. 38. № 13. P. 1105. <https://doi.org/10.1134/S1063780X12080144>
12. Ivanov V. A., Kuksenova L. I., Lapteva V. G., Konyzhev M. E. Application of the microplasma method for strengthening of the near-surface layer of samples made from steel 45 // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2008. Vol. 37. № 3. P. 278. <https://doi.org/10.3103/S1052618808030126>
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. Ivanov V. A., Kuksenova L. I., Lapteva V. G., Konyzhev M. E. 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. 2007. Vol. 36. № 6. P. 569. <https://doi.org/10.3103/S1052618807060118>
15. Textor Marcus, Sittig Caroline, Frauchiger Vincent, Tosatti Samuele, Brunette Donald M. Properties and Biological Significance of Natural Oxide Films on Titanium and Its Alloys: In book: Titanium in Medicine (pp. 171–230) Springer, January 2001. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56486-4_7
16. Sittig C., Textor M., Spencer N. D., Wieland M., Vallotton P. H. Surface characterization of implant materials CP Ti, Ti–6Al–7Nb and Ti–6Al–4V with different pre-treatments // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. 1999. Vol. 10. P. 35. <https://doi.org/10.1023/a:1008840026907>
17. Иванов В. А., Коныжев М. Е., Камолова Т. И., Дорофеюк А. А. Распространение микроплазменного разряда по поверхности титана, покрытого тонкой диэлектрической пленкой // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 4. С. 239. <https://advance.orion-ir.ru/UPF-20/4/UPF-8-4-239.pdf>
18. Vacuum Arcs: Theory and Application, Ed. by J. M. Lafferty. – New York: Wiley, 1980.

19. 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.
20. Иванов В. А. Трехэлектродный несимметричный зонд для непрерывного измерения температуры и плотности плазмы // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1988. № 6. С. 33.
21. Ivanov V. A. Triple Probe Method for Characterization of Arc Cathode Plasmas // Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Elektronenphysik. Preprint 85–1. Pp. 1–9.
22. 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. 157–160.
23. Ivanov V. A., Juttner B., Pursch H. "Time-Resolved Measurements of the Parameters of Arc Cathode Plasmas in Vacuum" // IEEE Transactions on Plasma Science. 1985. Vol. 13. № 5. P. 334.
<https://doi.org/10.1109/TPS.1985.4316432>
24. Иванов В. А., Коныжев М. Е., Камолова Т. И., Дорофеев А. А. Характер распространения микроплазменных разрядов по поверхности титана, покрытого тонкой оксидной пленкой // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 6. С. 449.
<https://doi.org/10.51368/2307-4469-2021-9-6-449-463>
25. Иевлев В. М., Куцев С. Б., Латышев А. Н., Овчинников О. В., Леонова Л. Ю., Смирнов М. С., Синельников А. А., Возгорьков А. М., Ивкова М. А. Люминесценция тонких пленок диоксида титана // Конденсированные среды и межфазные границы. 2012. Т. 14. № 2. С. 141.
26. Сериков Т. М., Ибраев Н. Х., Исайкина О. Я., Савилов С. В. Нанокристаллические пленки TiO₂: синтез, низкотемпературные люминесцентные и фотовольтаические свойства // Журнал неорганической химии. 2021. Т. 66. № 1. С. 107.
27. Botov M. A., Kuznetsov A. Yu., Sobolev A. B. Near-surface centers of luminescence in titanium dioxide // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2466. P. 030008.
<https://aip.scitation.org/doi/epdf/10.1063/5.0088939>

PACS: 52.40.Hf

Lifetime of cathode spots on the titanium surface when exciting a microplasma discharge

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
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Received September 30, 2022

The structure of the glow of a microplasma discharge initiated in vacuum by a pulsed flow of external plasma on the surface of a titanium sample coated with a natural 2–6-nm-thick oxide film has been experimentally investigated. When a plasma with a density of about 10^{13} cm^{-3} and an electron temperature of 10 eV interacts with a sample under a negative potential of –400 V relative to the plasma potential, the outer surface of the oxide film acquires a positive electric charge as a result of the flow from the plasma. In this case, a strong electric field of about 4 MV/cm arises inside the dielectric film. An electrical breakdown between the charged surface of the film and the metal initiates the excitation of a microplasma discharge on the surface of titanium. The integral glow of a microplasma discharge at the macroscale is a branched structure of the dendrite type, which at the microscale consists of a large number of brightly glowing "point" formations – cathode cells localized on the metal surface. Using the IMACON-468 high-speed photo recorder, a fragment of the titanium surface with an area of $0.5 \times 0.4 \text{ mm}^2$ in the area of the cathode spots glow was studied. Based on the analysis of the optical glow of cathode spots on 7 consecutive frames of the high-speed photo recorder with an exposure of each frame of 100 ns and an interval between frames of 400 ns, the expected "lifetime" of cathode spots in the range of values of

0.5±0.2 microseconds is calculated. According to the spatial distribution of the glow of micro-discharges, it was determined that the average diameter of the cathode spots is about 16±4 microns, while the average size of the luminous halo around a single cathode spot reaches a value of 100 microns.

Keywords: microplasma discharge, interaction, titanium surface, oxide dielectric film, optical glow, propagation, cathode spot, microcrater, erosion.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-5-425-439

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. Krunks, 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://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/907/1/012023/pdf>
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", *Applied Physics*, No. 2, 35 (2009) [in Russian].
14. V. A. Ivanov, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, and 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>
15. Marcus Textor, Caroline Sittig, Vincent Frauchiger, Samuele Tosatti, and Donald M. Brunette, Properties and Biological Significance of Natural Oxide Films on Titanium and Its Alloys: In book: *Titanium in Medicine* (pp. 171–230) Springer, January 2001.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-56486-4_7
16. C. Sittig, M. Textor, N. D. Spencer, M. Wieland, and P. H. Vallotton, "Surface characterization of implant materials CP Ti, Ti–6Al–7Nb and Ti–6Al–4V with different pretreatments", *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* **10**, 35 (1999).
<https://doi.org/10.1023/a:1008840026907>

17. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, T. I. Kamolova, and A. A. Dorofeyuk, "Propagation of Microplasma Discharge over Titanium Surface Covered with Thin Dielectric Film", *Plasma Physics Reports* **47** (6), 603 (2021).
<https://doi.org/10.1134/S1063780X21060076>
18. *Vacuum Arcs: Theory and Application*, Ed. by J. M. Lafferty. (Wiley, New York, 1980).
19. 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.
20. V. A. Ivanov, "Three-electrode asymmetric probe for continuous measurement of plasma temperature and density", *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, No. 6, 33 (1988).
21. 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.
22. 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.
23. V. A. Ivanov, B. Juttner, and H. Pursch, "Time-Resolved Measurements of the Parameters of Arc Cathode Plasmas in Vacuum," *IEEE Transactions on Plasma Science* **13** (5), 334 (1985).
<https://doi.org/10.1109/TPS.1985.4316432>
24. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, T. I. Kamolova, and A. A. Dorofeyuk, "The characteristics of propagation of microplasma discharges over the surface of titanium coated with a thin oxide film", *Usp. Prikl. Fiz.* **9** (6), 449 (2021) [in Russian]; [V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, T. I. Kamolova, and A. A. Dorofeyuk, "The characteristics of microplasma discharge propagation over the titanium surface covered with a thin oxide film", *Plasma Physics Reports*, to be published (2022).]
25. V. M. Ievlev, S. B. Kushchev, A. N. Latyshev, O. V. Ovchinnikov, L. Yu. Leonova, M. S. Smirnov, A. A. Sinelnikov, A. M. Vozgorkov, and M. A. Ivkova, "Luminescence of thin films of titanium dioxide", *Condensed media and interphase boundaries* **14** (2), 141 (2012) [in Russian].
26. T. M. Serikov, N. H. Ibraev, O. Ya. Isaikina, and S. V. Savilov, "Nanocrystalline TiO₂ films: synthesis, low-temperature luminescent and photovoltaic properties", *Journal of inorganic chemistry* **66** (1), 107 (2021) [in Russian].
27. M. A. Botov, A. Yu. Kuznetsov, and A. B. Sobolev, "Near-surface centers of luminescence in titanium dioxide", *AIP Conference Proceedings* **2466**, 030008 (2022).
<https://aip.scitation.org/doi/epdf/10.1063/5.0088939>