

Характер распространения микроплазменных разрядов по поверхности титана, покрытого тонкой оксидной пленкой*В. А. Иванов, М. Е. Коныжев, Т. И. Камолова, А. А. Дорофеюк*

Экспериментально исследованы распространение и структура микроплазменного разряда, инициируемого в вакууме импульсным потоком плазмы с плотностью $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ на поверхности титанового образца, покрытого тонкой сплошной диэлектрической оксидной пленкой титана толщиной 2–6 нм, при изменении электрического тока разряда от 50 А до 400 А. 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. Возникающая при этом эрозионная структура на поверхности титана «идентична» структуре свечения разряда и состоит из большого количества отдельных неперекрывающихся микрократеров с характерными размерами 0,1–3 мкм, которые образуются в местах локализации катодных пятен на расстояниях до 20 мкм друг от друга. Распространение одиночного микроплазменного разряда по поверхности титана происходит со средней скоростью 15–70 м/с при токах разряда 50–400 А. Распространение микроплазменного разряда в микромасштабе имеет «прыжковый» характер: плазма «неподвижных» горящих катодных пятен, в течение времени их жизни ~ 1 мкс, инициирует возбуждение новых микрократеров, которые создают новые катодные пятна на расстояниях локализации от 1 мкм до 20 мкм от первичных катодных пятен. Такой процесс повторяется многократно в течение импульса микроплазменного разряда длительностью от 0,1 мс до 20 мс.

Ключевые слова: микроплазменный разряд, свечение, распространение, титан, тонкая диэлектрическая оксидная пленка, катодное пятно, микрократер, эрозия поверхности.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-6-449-463

Введение

Хорошо известно, что в вакууме импульсный поток плазмы с плотностью около 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 $-(100\text{--}400) \text{ В}$, 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 диэлектрической пленки и открытой поверхностью

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

Коныжев Михаил Евгеньевич, н.с.

E-mail: viatcheslav-ivanov@yandex.ru

Камолова Татьяна Ивановна, н.с., к.т.н.

Дорофеюк Анна Александровна, н.с., к.т.н.

Институт общей физики им. А. М. Прохорова
Российской академии наук.

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

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2021 г.

© Иванов В. А., Коныжев М. Е., Камолова Т. И.,
Дорофеюк А. А., 2021

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]:

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

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 положительных 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 нагрева в воздушной атмосфере при температуре 400–450 °С в течение 1 часа, или в результате напыления 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 диэлектриче-

ской 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 иницирования 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 ~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 образ-

цов, 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 $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ 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 $\sim 1\%$ [6]. Аналогичные экспериментальные результаты по иницированию микроплазменных разрядов на поверхности других конструкционных 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

микроратеров. 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 иницировать 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 [17, 18].

При этом в отличие от экспериментов с пленками толщиной около 1 мкм [1–6] для стабильного иницирования микроплазмен-

ных 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 визуальнo 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 разряда, визуальнo 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, 18].

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 времени жизни около 1 мкс) инициирует возбуждение новых горящих катодных пятен на расстояниях локализации 3–30 мкм от них [17, 18].

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 инициируются внешним импульсным потоком плазмы, а затем новые катодные пятна возникают и медленно перемещаются вдоль границы диэлектрической пленки и открытой поверхности металла со скоростью $\sim 1 \text{ м/с}$. 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 (рис. 1). После этого на переплавленной поверхности титана новые микроплазменные разряды в потоке внешней плазмы с плотностью $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ уже не возбуждаются, т. к. оксидная пленка полностью испарилась с поверхности титана [4, 6].

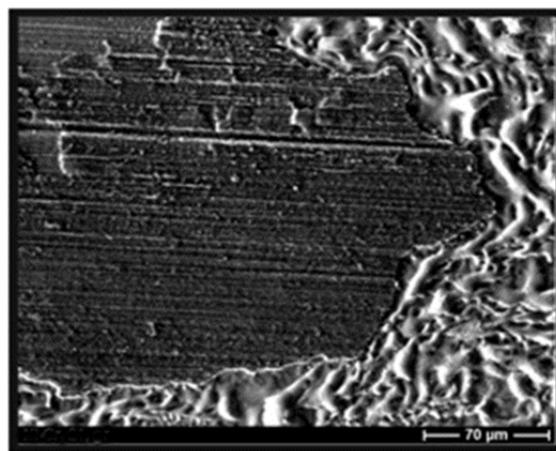


Рис. 1. Микрофотография ($280 \times 220 \text{ мкм}^2$) частичной эрозии на поверхности титана (покрытого оксидной пленкой толщиной 1 мкм) в результате воздействия микроплазменного разряда (400 А, 20 мс). Резкая граница разделяет область сплошной эрозии и исходной поверхности титана, на которой микроплазменные разряды не возбуждались. В правой и нижней частях фотографии – переплавленная поверхность металла, в центре и слева – исходная поверхность образца с оксидной пленкой без эрозии.

При возбуждении микроплазменных разрядов на титане со сплошной «тонкой» оксидной пленкой толщиной 2–6 нм микроплазменные разряды на поверхности титана устойчиво инициируются 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 время $\sim 1 \text{ мкс}$ [17, 18].

Данная работа посвящена исследованию 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.

При этом предполагалось, что при значительном уменьшении тока микроплазменного разряда от значений 200–400 А до величины 50 А, скорость распространения разряда по поверхности титана значительно уменьшится, и возможно, произойдут существенные изменения в характере взаимодействия микроплазменного разряда с поверхностью титана. А именно, мы полагали, что в микромасштабе произойдет «переход» от быстрого прыжкового механизма движения катодных пятен (со скоростью около 70 м/с) к медленному непрерывному движению катодных пятен (со скоростью $\sim 1 \text{ м/с}$) и образованию непрерывной цепочки перекрывающихся микрократеров

вдоль границы диэлектрической пленки. В конечном итоге, при достаточной длительности микроплазменного разряда, эти процессы, возможно, приведут к испарению оксидной пленки и формированию сплошного переплавленного слоя с прочным микрорельефом на поверхности титана. Это позволило бы существенно улучшить трибологические свойства приповерхностного слоя титана, снизить в этом слое концентрацию возможных микротрещин, а также значительно уменьшить энергетические затраты при разработке новых перспективных технологий модификации поверхности металлических изделий.

Экспериментальные условия и результаты исследований

Исследования проводились в экспериментальной установке «Сфера» [1–6, 9–14, 17, 18], представляющей собой металлическую вакуумную камеру сферической формы диаметром 50 см, откачиваемой до остаточного давления воздуха около 5 Па (рис. 2). На боковом патрубке устанавливался плазменный инжектор цилиндрического типа, в котором в результате высоковольтного электрического разряда по поверхности полиметилметакрилата формировался импульсный поток водородно-углеродной плазмы длительностью около 25 мкс. Основные характеристики потока плазмы (электронная температура плазмы, плотность заряженных частиц, длительность импульса потока плазмы) измерялись одноэлектродным, двухэлектродным и трехэлектродным лэнгмюровскими зондами [19, 20]. Поток импульсной плазмы по мере распространения расширялся от инжектора к центру камеры.

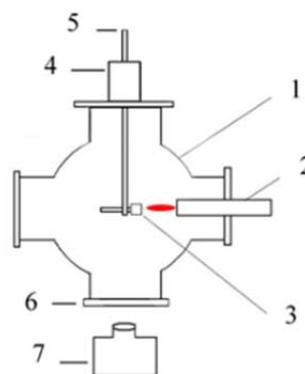


Рис. 2. Схема экспериментальной установки «Сфера» для возбуждения и исследования микроплазменных разрядов на металлических образцах: 1 – вакуумная камера; 2 – плазменный инжектор; 3 – металлический образец; 4 – манипулятор с вакуумным вводом; 5 – металлический держатель образцов; 6 – оптическое окно; 7 – фотокамера Nikon D7100.

Рис. 2. 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 – фотокамера Nikon D7100.

Вектор скорости плазменного потока составляет угол около 10 градусов с плоскостью поверхности пластины из титана. При этом в области расположения титанового образца (на расстоянии 2 см от среза инжектора) в течение интервала времени 4–5 мкс от начала генерации плазмы плотность ионов водорода достигала максимального значения $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а плотность ионов углерода не превышала 2 % от этой величины. Ближе к концу импульса плазмы (в течение интервала времени 15–25 мкс от начала генерации плазмы) соотношение однозарядных ионов водорода и однозарядных ионов углерода в потоке изменялось и достигало значений 60 % (H^+) и 40 % (C^+) соответственно. Электронная температура плазмы на переднем фронте (1–5 мкс) импульса на различных расстояниях от инжектора составляла величину 8–10 эВ и слабо изменялась в процессе расширения плазменного потока. Все эксперименты по возбуждению микроплазменных разрядов на поверхности титана проводились в условиях, когда плотность импульсного потока плазмы достигала максимального значения $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ в течение интервала времени 4–5 мкс от начала генерации плазмы.

В экспериментах использовались образцы, изготовленные из титана ВТ1, имеющего следующий химический состав (массовая доля, %): Ti (титан) 99,24–99,7; Al (алюминий) 0,7; Fe (железо) 0,15; C (углерод) 0,05; Si (кремний) 0,08; N (азот) 0,04; O (кислород) 0,10; H (водород) 0,01; прочие примеси 0,10. Образцы из титана в форме пластин с размерами $40 \times 20 \times 0,6 \text{ мм}^3$ и $20 \times 20 \times 0,6 \text{ мм}^3$ после предварительной механической шлифовки и очистки в деионизованной воде, выдерживались в воздушной атмосфере (температура 20°C , 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 [15, 16]. В дальнейшем, при длительном выдерживании образцов в воздушной атмосфере в течение многих сотен часов, сформированная таким образом оксидная плёнка на титане остается стабильной и практически сохраняет свою толщину.

В процессе экспериментов импульсный плазменный поток длительностью 25 мкс, уже

в течение первых 1–5 мкс инициирует процесс возбуждения микроплазменного разряда и первичных катодных пятен на поверхности титана (рис. 3). Далее, в последующие моменты времени после окончания внешнего плазменного потока, микроплазменный разряд (с длительностью импульсов до 3,2 мс) поддерживается импульсным источником электрического напряжения -400 В и тока 50 А . При этом, в течение интервала времени $\sim 1 \text{ мкс}$ поток положительных ионов из плотной плазмы ($\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$) горящих первичных катодных пятен [21, 22] заряжает внешнюю поверхность оксидной плёнки (в некоторой окрестности этих пятен на расстояниях локализации $\sim 10 \text{ мкм}$ от них) до значения плавающего потенциала плазмы. Таким образом, между тонкой плёнкой и металлом формируется сильное локальное электрическое поле, которое в результате электрического пробоя в объёме сплошной оксидной плёнки вызывает возникновение на поверхности титана нескольких микрозарядов и катодных пятен с суммарным электрическим током 50 А . Этот элементарный цикл эволюции отдельных катодных пятен в микромасштабе соответствует «прыжковому» механизму их перемещения на расстояния $\sim 10 \text{ мкм}$. В результате последующего многократного повторения этих мелкомасштабных циклических процессов инициирования, горения и погасания групп вторичных (третичных, и т. д.) катодных пятен происходит макроскопическое распространение микроплазменного разряда по поверхности титана и формирование сложной структуры его свечения и эрозии в форме дендрита.

Так как оксидная плёнка на титане толщиной до 6 нм имеет большую электропроводность [7, 8], то вероятность возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности титана, покрытого такой тонкой плёнкой, в потоке плазмы плотностью около 10^{11} см^{-3} составляет менее 1 % [6]. Поэтому, для накопления достаточно большого электрического заряда на внешней поверхности плёнки, формирования сильного электрического поля между плёнкой и металлом, и, следовательно, для надежного возбуждения микроплазменного разряда на титане, необходимо было использовать поток плазмы с высокой плотностью около $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

На пластинах с размерами $40 \times 20 \times 0,6 \text{ мм}^3$ исследовались свечение и эрозия на поверхности титана в результате возбуждения на образцах одиночных импульсных микроплазменных разрядов длительностью $0,8\text{--}3,2 \text{ мс}$. На пластинах с размерами $20 \times 20 \times 0,6 \text{ мм}^3$ исследовалось свечение одиночных микроплазменных разрядов длительностью $0,8\text{--}1,6 \text{ мс}$, а также структура «суммарной» эрозии на поверхности титана после возбуждения на образцах нескольких последовательных импульсных разрядов.

Пластины из титана с размерами $40 \times 20 \times 0,6 \text{ мм}^3$ устанавливались в вакуумной камере «Сфера» ребром навстречу набегающему потоку внешней плазмы от инжектора. Ближайшее к инжектору ребро пластины находилось на расстоянии 2 см от среза плазменного инжектора, где максимальная концентрация плазмы $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ достигалась через $4\text{--}5 \text{ мкс}$ от переднего фронта импульса плазмы (рис. 3).

При воздействии одиночного импульсного потока плазмы (рис. 3) на образец титана на его поверхности инициировался микроплазменный разряд, который характеризовался

напряжением горения $30\text{--}50 \text{ В}$, постоянной амплитудой электрического тока в разряде 50 А и длительностью импульса разряда $0,8\text{--}3,2 \text{ мс}$. Типичные осциллограммы импульсов напряжения и тока в микроплазменном разряде представлены на рис. 4.



Рис. 3. Осциллограммы сигналов, иллюстрирующие генерацию импульсного потока внешней плазмы длительностью 25 мкс .

n_i – осциллограмма ионной плотности плазмы, полученная с помощью ленгмюровского зонда в режиме ионного тока насыщения.

I_{pg} – осциллограмма разрядного электрического тока в плазменном инжекторе.

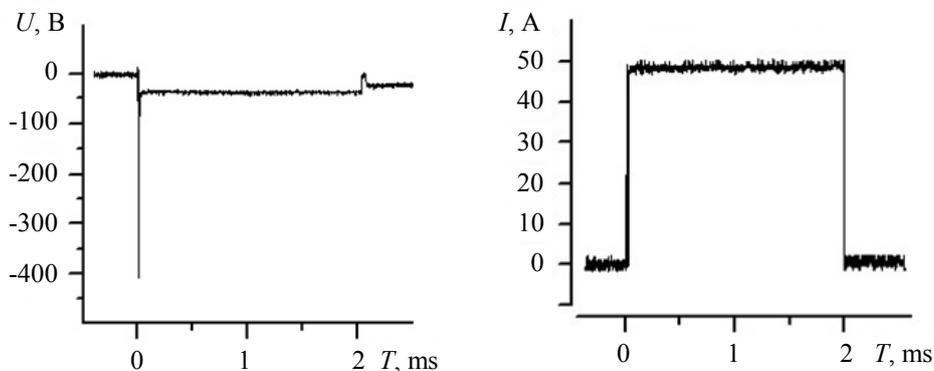


Рис. 4. Типичные осциллограммы импульсов напряжения (слева) и электрического тока (справа) в микроплазменном разряде (МПР) на поверхности титана, покрытого диэлектрической оксидной пленкой толщиной $2\text{--}6 \text{ нм}$. Длительность МПР: 2 мс ; электрический ток МПР: 50 А ; напряжение на титане: -400 В , в отсутствие МПР; -50 В , в процессе горения МПР.

Для изучения и анализа структуры свечения одиночных импульсных микроплазменных разрядов и структуры эрозии, образовавшейся на поверхности титана, применялись методы фоторегистрации с хорошим пространственным разрешением (макро-фото-съемка). В дополнение к этому также исследовалась детальная структура эрозии на по-

верхности титана с помощью электронного сканирующего микроскопа при увеличении изображения от 100 до 2000 раз.

С помощью фотокамеры Nikon D7100 и макро-объектива Nikkor AF-S Micro 105mm/2.8 G ED регистрировалась структура свечения микроплазменных разрядов, инициируемых на поверхности титана одиночными им-

пульсами внешней плазмы (рис. 5). Поскольку фотокамера работала с открытым затвором, то длительность экспозиции кадров при фотографировании определялась длительностью свечения одиночных микроплазменных разрядов 0,8–3,2 мс (т. е. определялась длительностью импульсов электрического напряжения и тока 0,8–3,2 мс от внешнего источника энергии).

В результате экспериментов было обнаружено, что структура свечения микроплазменного разряда на титане с тонкой оксидной пленкой толщиной 2–6 нм при силе электрического тока 50 А является сильно неоднородной, имеет сложную разветвленную форму типа дендрита, но при этом не имеет ярко выраженного направления распространения (как это имеет место при токе разряда 400 А). Поскольку точка максимального удаления

светящейся структуры импульсного микроплазменного разряда длительностью 3,2 мс расположена на расстоянии 5 см от точки инициирования разряда, то средняя скорость распространения разряда составляет величину ≈ 15 м/с. Размер изображения $\approx 17,5 \times 17,5$ мм² на лицевой стороне пластины титана соответствует заключительной стадии свечения разряда: $\approx (2,1-3,2)$ мс (рис. 5).

Обнаружено также, что свечение микроплазменного разряда представляет собой разветвленную структуру типа дендрита, которая в микромасштабе состоит из множества ярких локализованных («точечных») объектов (рис. 5). Соответствующая структура эрозии на поверхности титана (рис. 6), покрытого тонкой оксидной пленкой толщиной 2–6 нм, визуально «идентична» структуре свечения разряда (рис. 5).

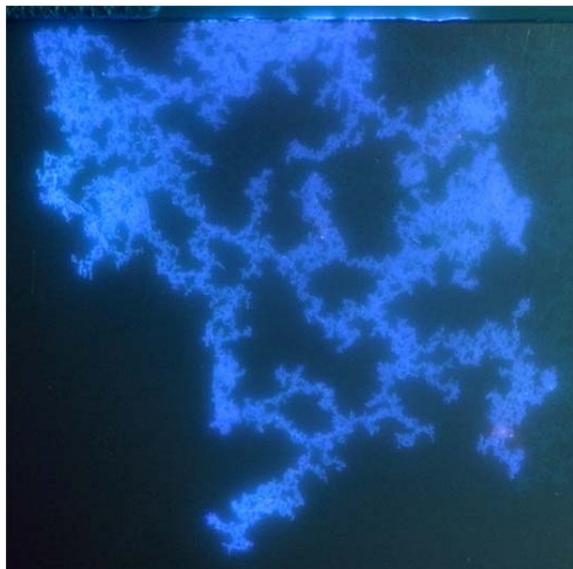


Рис. 5. Фрагмент свечения микроплазменного разряда на поверхности пластины из титана ($40 \times 20 \times 0,6$ мм³), покрытого оксидной пленкой толщиной 2–6 нм. Разряд инициируется потоком плазмы (2×10^{13} см⁻³) справа и поддерживается источником импульсного электрического тока (50 А) и напряжения (–400 В). Размер изображения $17,5 \times 17,5$ мм².

На рис. 5 видно, что свечение микроплазменного разряда представляет собой множество светящихся локализованных («точечных») объектов, которые практически не перемещаются в течение времени экспозиции фотографии 1,1 мс.

На рис. 7 видно, что эрозия на поверхности титана в микромасштабе представляет собой совокупность микрократеров с размерами

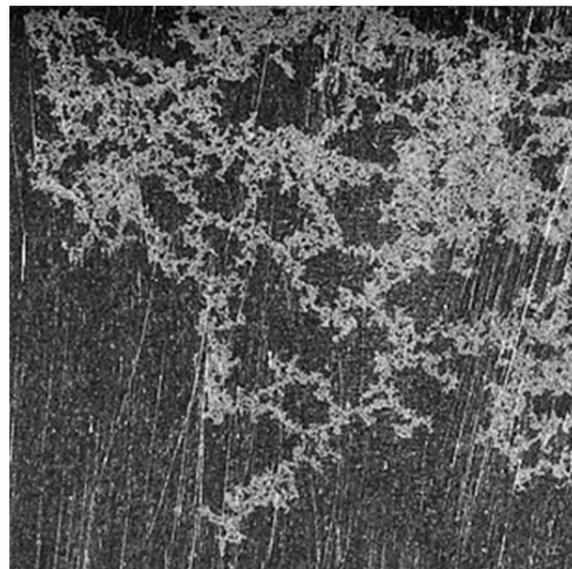


Рис. 6. Фрагмент эрозии на поверхности пластины из титана ($40 \times 20 \times 0,6$ мм³), покрытого оксидной пленкой толщиной 2–6 нм. Изображение размером $17,5 \times 17,5$ мм² соответствует области свечения микроплазменного разряда на рис. 5.

от 0,3 мкм до 6 мкм, которые образовались в результате процессов возбуждения, горения и погасания на поверхности титана большого количества локализованных катодных пятен при амплитуде электрического тока микроплазменного разряда 50 А.

Для сравнения на рис. 8 приведена микрофотография фрагмента эрозии на поверхности титана, покрытого тонкой диэлектриче-

ской оксидной пленкой толщиной 2–6 нм, при амплитуде электрического тока микроплазменного разряда 400 А [17, 18].

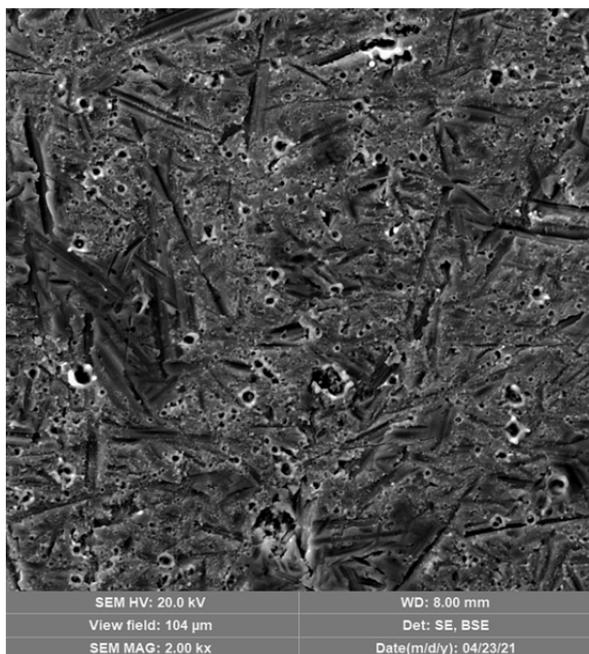


Рис. 7. Микрофотография фрагмента поверхности титана с эрозией, образовавшейся в результате возбуждения микроплазменного разряда (ток разряда 50 А, длительность импульса 1,6 мс). Исходная поверхность образца была покрыта оксидной пленкой 2–6 нм. Размер изображения 104×104 мкм².

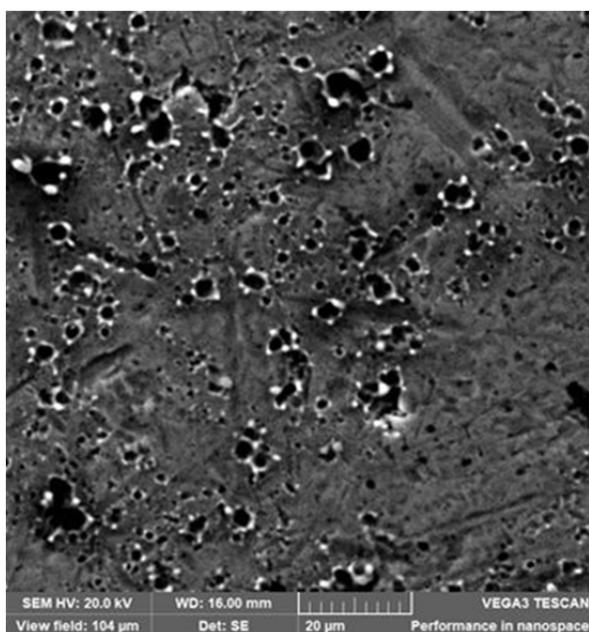


Рис. 8. Микрофотография фрагмента поверхности титана с эрозией, образовавшейся в результате возбуждения микроплазменного разряда (ток разряда 400 А, длительность импульса 100 мкс). Исходная поверхность образца была покрыта оксидной пленкой 2–6 нм. Размер изображения 104×104 мкм².

Для сравнения на рис. 1 представлена микрофотография эрозии, возникающая в результате возбуждения одиночного микроплазменного разряда (при токе разряда 400 А) на поверхности титана, покрытого «толстой» оксидной пленкой толщиной 1 мкм. Из сравнения микрофотографий на рис. 1, 7, 8 видно, что характер эрозии на поверхности титана в основном определяется толщиной оксидной пленки и её физическими свойствами, и очень слабо зависит от силы тока разряда в интервале значений 50–400 А. При этом существенная особенность горения катодных пятен на титане с «толстой» оксидной пленкой толщиной 1 мкм состоит в том, что новые катодные пятна возбуждаются плазмой предыдущих катодных пятен только на границе оксидной пленки и открытой поверхности металла. При достаточной длительности микроплазменного разряда это приводит к формированию сплошного переплавленного приповерхностного слоя металла, площадь которого увеличивается в процессе испарения оксидной пленки до полного её исчезновения с поверхности титана.

На основании дополнительных исследований и сравнительного анализа структур свечения микроплазменных разрядов и соответствующих структур эрозии на поверхности титана (покрытого оксидной пленкой толщиной 2–6 нм), возникающих при электрическом токе 50 А и длительности импульсов 0,1–3,2 мс микроплазменных разрядов, можно заключить, что:

во-первых, максимальные значения «дальности распространения» свечения (и эрозии) на поверхности титана монотонно возрастают при увеличении длительности импульсов разрядов от 0,1 до 3,2 мс;

во-вторых, значение средней скорости 15 м/с распространения разрядов по поверхности титана практически не изменяется при увеличении длительности импульсов разрядов 0,1–3,2 мс.

Важно отметить, что при увеличении тока от 50 А до 400 А скорость распространения микроплазменного разряда по поверхности титана (с оксидной пленкой толщиной до 6 нм) возрастает от 15 м/с до 70 м/с.

Установлено также, что имеющиеся на исходной поверхности титана царапины, образовавшиеся после её предварительной ме-

ханической шлифовки и очистки, не оказывают заметного влияния на: (i) структуру свечения микроплазменных разрядов, (ii) траекторию движения и скорость распространения разрядов по поверхности титана, (iii) структуру эрозии, возникающей на поверхности пластины (рис. 5, 6).

Обнаружено, что структура свечения микроплазменного разряда, траектория его движения, и средняя скорость распространения по поверхности титана не зависят от характера «суммарной» эрозии, образовавшейся в результате воздействия на пластину титана нескольких предыдущих импульсных микроплазменных разрядов.

Важно также отметить, что при заданных значениях амплитуды электрического тока (50–400 А) и длительности импульсов (0,1–3,2 мс) микроплазменных разрядов любой отдельный фрагмент (в макромасштабе) в структурах свечения (или эрозии) на поверхности титана непосредственно примыкает к своим соответствующим соседним участкам (т. е. является их продолжением). Другими словами, в структурах свечения (или эрозии) разрядов не обнаружены отдельные локальные «островки», которые «топологически» не связаны с соседними участками. Таким образом, в макромасштабе все отдельные участки свечения (или эрозии) разряда «непрерывным образом» связаны друг с другом, образуя сложные пространственные структуры типа дендрита.

При этом в процессе развития разряда на поверхности титана с тонкой оксидной пленкой до 6 нм формирование новой области свечения (и соответствующей области эрозии) происходит тогда, когда плазма горящих катодных пятен инициирует возбуждение новых катодных пятен на расстояниях 1–20 мкм локализации от горящих катодных пятен. При этом в микромасштабе не формируется сплошная переплавленная область титана, а возникает структура из одиночных перекрывающихся микрократеров (или их группы), которые в макромасштабе формируют эрозионную структуру дендрита на поверхности образцов. 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. 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 мкм до 30 мкм. При этом количество микрократеров и микрократеров на единице площади 1 см^2 поверхности эрозии образца составляет 10^5 – 10^6 при токе 400 А и 10^4 – 10^5 при токе 50 А. Аналогичные оценки этих величин получаются исходя из средних значений электрического тока горения отдельного катодного пятна (от 1 А до 10 А) и времени его жизни (~ 1 мкс). Тогда, при амплитуде тока микроплазменного разряда 400 А на поверхности титана с тонкой оксидной пленкой до 6 нм возникает 10^6 – 10^5 катодных пятен и эрозионных кратеров, а при токе разряда 50 А – возникает 10^5 – 10^4 катодных пятен и эрозионных кратеров.

Обсуждение

Из экспериментальных данных следует, что свечение микроплазменного разряда и эрозия на поверхности титана, покрытого тонкой оксидной пленкой ~ 6 нм, визуально аналогичны (рис. 5–8): они представляют собой сильно неоднородные образования в форме дендрита, которые в микромасштабе состоят из большого количества отдельных перекрывающихся горящих катодных пятен и микрократеров с размерами 0,1–10 мкм. 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 [23–29].

В экспериментах короткий импульс внешней плазмы инициирует процесс развития на поверхности образцов последовательной цепочки микрократеров, при этом возникшие ранее разряды создают поток плазмы для инициирования новых разрядов, перемещающихся по поверхности титана. При этом микроплазменный разряд распространяется по поверхности титана, покрытого диэлектрической оксидной пленкой толщиной 2–6 нм,

со средней скоростью около 15 м/с и имеет «прыжковый» характер: отдельные катодные пятна возбуждаются, практически «неподвижно» горят и погасают, успевая в течение своего существования инициировать новые микроразряды и катодные пятна в соседних областях.

Свойства микроплазменных разрядов и характер эрозии на титане с более «тонкой» оксидной пленкой 2–6 нм (рис. 5–8) принципиально отличаются от свойств микроплазменных разрядов и сплошной эрозии на титане с более «толстой» оксидной пленкой толщиной ~1 мкм (рис. 1). Это указывает на то, что определяющую роль в формировании структуры эрозии играет толщина оксидной пленки на поверхности титана, тогда как амплитуда импульса электрического тока разряда и длительность разряда практически не влияют на структуру поверхностной эрозии.

Заключение

1. Экспериментально исследована пространственная структура свечения импульсного микроплазменного разряда, инициируемого на поверхности титанового образца, покрытого сверхтонкой сплошной диэлектрической оксидной пленкой толщиной 2–6 нм. Микроплазменный разряд инициировался на поверхности пластин из титана (размеры $20 \times 20 \times 0,6 \text{ мм}^3$, $40 \times 20 \times 0,6 \text{ мм}^3$) потоком внешней плазмы (плотность $2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, длительность импульса 25 мкс) и поддерживался импульсом электрического тока амплитудой 50 А и длительностью 0,8–3,2 мс. Установлено, что структура свечения микроплазменного разряда имеет разветвленную форму типа дендрита, который состоит из большого количества ярко светящихся локализованных катодных пятен.

2. В результате возбуждения и воздействия микроплазменного разряда на титан с тонкой оксидной пленкой 2–6 нм, на его поверхности возникает эрозия, структура которой аналогична структуре свечения разряда и представляет собой множество отдельных микрократеров с характерными размерами от 0,3 мкм до 10 мкм. Эти микрократеры образуются в тех локальных местах, где были инициированы микроразряды, ярко светили и по-

гасали возникшие в разряде катодные пятна. В процессе своего горения и последующего погасания первичные катодные пятна на поверхности титана инициируют в соседних областях на расстояниях 1–20 мкм возникновение новых микроразрядов и вторичных катодных пятен, и, таким образом, эти циклические процессы возникновения новых и погасания первичных микроразрядов и катодных пятен повторяются многократно в течение одиночного микроплазменного разряда.

3. Свойства микроплазменных разрядов и характер эрозии на титане с тонкой оксидной пленкой 2–6 нм принципиально отличаются от свойств микроплазменных разрядов и сплошной эрозии на титане с более «толстой» оксидной пленкой 1 мкм. Это указывает на то, что определяющую роль в формировании структуры эрозии играет толщина оксидной пленки на поверхности титана, тогда как амплитуда импульса электрического тока разряда и длительность разряда практически не влияют на структуру поверхностной эрозии.

4. Установлено, что распространение одиночного микроплазменного разряда по поверхности титана, покрытого тонкой оксидной пленкой толщиной до 6 нм, происходит со средней скоростью 15 м/с и 70 м/с для импульсов с током 50 А и 400 А соответственно, и имеет «прыжковый» характер от одного катодного пятна к другому, оставляя за собой «след» в виде множества хаотично расположенных микрократеров, которые в совокупности приобретают в макромасштабе разветвленную форму типа дендрита.

5. В совокупности все экспериментальные данные свидетельствуют в пользу того, что предложенный нами ранее физический механизм распространения микроплазменного разряда по поверхности титана с тонкой оксидной пленкой толщиной до 6 нм в микромасштабе имеет «прыжковый» характер: плазма первичных горящих катодных пятен инициирует возбуждение новых микроразрядов и вторичных катодных пятен на расстояниях локализации от 1 мкм до 20 мкм от первичных катодных пятен. Этот процесс имеет циклический характер и повторяется многократно в течение времени горения микроплазменного разряда с длительностью импульса от 0,1 мс до 20 мс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В. А., Сахаров А. С., Конышев 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, pp. 575–578.
<https://doi.org/10.1109/DEIV.2008.4676859>
3. Иванов В. А., Конышев М. Е., Куksenova 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.
<https://applphys.orion-ir.ru/appl-10/10-6/PF-10-6-57.pdf>
4. Иванов В. А., Конышев М. Е., Куksenova 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.
<https://applphys.orion-ir.ru/appl-09/09-6/PF-09-6-76.pdf>
5. Иванов В. А., Конышев 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., Конышев 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. 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., 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://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/907/1/012023/pdf>
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 pretreatments // J. Mater Sci: Mater Med. 1999. Vol. 10(1). P. 35.
<https://doi.org/10.1023/a:1008840026907>
17. 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://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/907/1/012023/pdf>
18. Иванов В. А., Конышев М. Е., Камолова Т. И., Дорофеев 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>
19. Иванов В. А. Трехэлектродный несимметричный зонд для непрерывного измерения температуры и плотности плазмы // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1988. № 6. С. 33.
20. 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.
21. 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.
22. 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>

23. Сахаров А. С., Иванов В. А. Автоэлектронная эмиссия как механизм иницирования микроплазменных разрядов на металле в потоке плазмы // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 150.

<https://advance.orion-ir.ru/UPF-16/2/UPF-4-2-150.pdf>

24. 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>

25. Mesyats G. A. Ecton mechanism of the vacuum arc cathode spot // IEEE Transactions on Plasma Science. 1995. Vol. 23. № 6. P. 879.

<https://doi.org/10.1109/27.476469>

26. 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.

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

27. Mesyats G. Ectons and their Role in Electrical Discharges in Vacuum and Gases // Journal de Physique IV Proceedings, EDP Sciences. 1997. Vol. 07 (C4). P. C4-93.

<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00255563/document>

28. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Импульсный электрический разряд в вакууме. – Новосибирск: Наука, 1984.

29. 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.

PACS: 52.40.Hf

The characteristics of microplasma discharge propagation over the titanium surface covered with a thin oxide 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
E-mail: viatcheslav-ivanov@yandex.ru

Received November 22, 2021

The propagation and structure of a microplasma discharge initiated in vacuum by a pulsed plasma flow with a density of $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ on the surface of a titanium sample covered with a thin continuous dielectric titanium oxide film with a thickness of 2–6 nm were studied experimentally when the electric current of the discharge changes from 50 A to 400 A.

It was found that the microplasma discharge glow visually at the macroscale has a branched structure of the dendrite type, which at the microscale consists of a large number of brightly glowing “point” formations – cathode spots localized on the metal surface. The resulting erosion structure on the titanium surface is visually “identical” to the structure of the discharge glow and consists of a large number of separate non-overlapping microcraters with characteristic sizes from 0.1–3 μm , which are formed at the sites of localization of cathode spots at distances of up to 20 μm from each other. It was found that the propagation of a single microplasma discharge over the titanium surface covered with a thin oxide film a thickness of 2–6 nm occurs at an average velocity of 15–70 m/s when the amplitude of the discharge electric current changes in the range of 50–400 A. In this case, the microplasma discharge propagation on the microscale has a “jumping” character: the plasma of “motionless” burning cathode spots, during their lifetime $\sim 1 \mu\text{s}$, initiates the excitation of new microdischarges, which create new cathode spots at localization distances of 1–20 μm from the primary cathode spots. This process repeated many times during a microplasma discharge pulse with a duration from 0.1 ms to 20 ms.

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

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-6-449-463

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", *23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, (Bucharest, 2008), Vol. 2, pp. 575–578.
<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://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", *J. Mater Sci: Mater Med* **10** (1), 35 (1999).
<https://doi.org/10.1023/a:1008840026907>
17. 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>
18. 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>

19. V. A. Ivanov, "A three-electrode asymmetric probe for continuous measurement of plasma temperature and density", *Kratkiye soobshcheniya po fizike FIAN*, No. 6, 33 (1988) [in Russian].
20. V. A. Ivanov, "Triple Probe Method for Characterization of Arc Cathode Plasmas", *Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Electronenphysik*. Preprint 85-1. P. 1-9.
21. 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.
22. 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>
23. A. S. Sakharov and V. A. Ivanov, "Field emission as a mechanism for initiating microplasma discharges on a metal in a plasma flow", *Usp. Prikl. Fiz.* **4** (2), 150 (2016) [in Russian].
<https://advance.orion-ir.ru/UPF-16/2/UPF-4-2-150.pdf>
24. G. A. Mesyats, "Ecton or electron avalanche from metal", *Phys. Usp.* **38** (6), 567 (1995).
<https://doi.org/10.1070/PU1995v038n06ABEH000089>
25. G. A. Mesyats, "Ecton mechanism of the vacuum arc cathode spot", *IEEE Transactions on Plasma Science* **23** (6), 879 (1995).
<https://doi.org/10.1109/27.476469>
26. 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>
27. G. Mesyats, "Ectons and their Role in Electrical Discharges in Vacuum and Gases", *Journal de Physique IV Proceedings*, *EDP Sciences* **07** (C4), C4-93 (1997).
<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00255563/document>
28. G. A. Mesyats and D. I. Proskurovsky, *Pulsed Electrical Discharge in Vacuum* (Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1989).
<https://doi.org/10.1002/ctpp.2150300505>
29. 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.