

УДК 537.525

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ РАЗРЯДЕ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2023 г. Д. Л. Кирко*

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

**E-mail: dmitri.kirko@gmail.com*

Поступила в редакцию 28.05.2022 г.

После доработки 01.07.2022 г.

Принята к публикации 13.10.2022 г.

Изучено возникновение микроструктур на поверхности вольфрамовых и титановых электродов при разряде в электролите в присутствии магнитного поля. Получены электротехнические характеристики разряда в различных режимах. Измерена температура плазмы в приэлектродной области с помощью спектральных методов. На вольфрамовых электродах происходит возникновение конических и острых образований с размерами до 10 мкм. На титановых электродах наблюдается появление микросфер и пористых поверхностей. Под воздействием магнитного поля происходят ускорение роста данных поверхностных структур и улучшение их характеристик. Обсуждается механизм роста наблюдаемых микроструктур.

DOI: 10.31857/S0040364423030146

ВВЕДЕНИЕ

При разрядах в электролитах происходит достаточно много явлений, связанных с плазмохимическими реакциями и электролизом в среде электролита, а также с процессами на поверхности электродов и материалов, погруженных в электролит. Разряд может формироваться между электродом над поверхностью электролита и электролитом, а также и между двумя электродами в среде электролита [1–5]. Токи слабых разрядов могут составлять миллиамперы, сильных разрядов — единицы ампер. При слабых токах разряд над поверхностью электролита напоминает тлеющий разряд и может иметь синий или фиолетовый цвет, для мощных разрядов цвет, как правило, зависит от свечения атомных линий элементов, входящих в состав электролита. Разряд над поверхностью электролита может иметь сложную многоканальную структуру, состоящую из токовых нитей толщиной менее десятой миллиметра [1]. Прохождение тока и электролиз раствора вызывают образование пузырьков газа на электродах, которые влияют на процессы пробоя и формирования разряда [2].

При разрядах в электролитах наблюдаются колебательные процессы в цепи разряда с частотами в широком диапазоне от 10 Гц до 100 МГц [1, 4, 6]. Для диапазона частот от 100 кГц до 100 МГц было предложено связать наблюдаемые частоты с возникновением плазменных электронно-циклотронных и ионно-циклотронных волн в среде разряда [6].

Практическое применение разрядов в электролитах связано со следующими направлениями. При использовании в качестве одного из электродов металлической детали со сложной поверхностью может наблюдаться эффект полировки поверхности материала детали при разряде в электролите с заданными параметрами [1]. Сильный ток в электролите вызывает быстрый нагрев жидкости и образование пара, что может быть использовано для формирования потока пароводяной плазмы [7]. Достаточно хорошо известны системы очистки воды, в которых используются барьерный разряд в электролите вблизи поверхности жидкости и методы с участием пузырьков [8]. В то же время разряды в электролитах могут применяться для проведения элементного анализа растворов [3], а также получения плазмохимических реакций [9]. Различные процессы между поверхностью электролита и электродом исследуются в работах [10–12]. Подробное описание вольт-амперных характеристик и процессов при разрядах в электролитах приводится в работах [4, 5, 9, 13].

При мощных разрядах с использованием инертных газов и водорода наблюдается образование нановеществ [14, 15]. Вместе с тем возникновение микроструктур на поверхности электродов регистрируется и при разрядах в электролитах [16–20]. Ввиду этого представляют интерес процессы на поверхности электродов при разряде в электролитах, приводящие к изменению свойств поверхности материала и формированию наноструктур.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Для проведения экспериментов использовалась установка, изображенная на рис. 1. Электролит на основе карбоната Na_2CO_3 или гидрокарбоната натрия NaHCO_3 при концентрации $C = 0.2\text{--}0.5\text{ М}$ (1 М соответствует молярному весу в граммах на 1 л воды) помещается в корпус из оргстекла объемом $150\text{--}400\text{ см}^3$, применялась дистиллированная вода. Катод *1*, имеющий форму стержня с диаметром $1\text{--}3\text{ мм}$ (материал: вольфрам, титан, молибден), размещался в среде электролита в керамической трубке. Рабочая часть катода составляет площадь около $0.5\text{--}1.0\text{ мм}^2$. Для экспериментов предпочтительным является вертикальное расположение электродов. На катоде происходит выделение молекулярного водорода, а на аноде — молекулярного кислорода. Для анода *5* применялись пластины из нержавеющей стали и молибдена, которые располагались около стенок корпуса. Для питания разряда использовался источник, работающий с частотой 50 и 100 Гц. Около боковой стенки камеры размещались сборки из постоянных магнитов *9*, которые создавали варьируемое магнитное поле в объеме электролита. Электротехнические измерения проводились с помощью шунтов, расположенных в цепи разряда. Вне камеры помещались магнитные зонды для исследования высокочастотных составляющих колебаний тока данного разряда.

Зависимости напряжения и тока разряда представляют собой последовательности импульсов с заданной частотой 100 Гц (рис. 2а). В начале каждого импульса тока наблюдаются высокочастотные колебания. Вблизи поверхности катода расположена прикатодная область *2* (рис. 1) толщиной $1\text{--}2\text{ мм}$, имеющая наибольшие излучательные характеристики [21]. Далее находится средняя плазменная область размером $1\text{--}2\text{ см}$, окруженная парогазовой оболочкой. Фотография разряда в электролите в режиме нормального горения представлена на рис. 3. Для фоторегистрации применялась камера Panasonic Lumix DMC-FZ45 (временное разрешение — 1 мс). При наличии турбулентных потоков происходит перемешивание областей, близлежащих к катоду, и форма области разряда имеет неправильную конфигурацию.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) разряда в электролите на основе карбоната натрия Na_2CO_3 при концентрации электролита 0.4 М для вольфрамовых электродов представлена на рис. 2б. Начальный участок характеристики описывает ток через электролит при отсутствии разряда и представляется линейной зависимостью. В верхней части данного участка на заостренной части катода наблюдается возникновение маленьких пузырьков водорода с размерами $0.1\text{--}0.5\text{ мм}$. Данные пузырьки окружают поверхность катода, по-

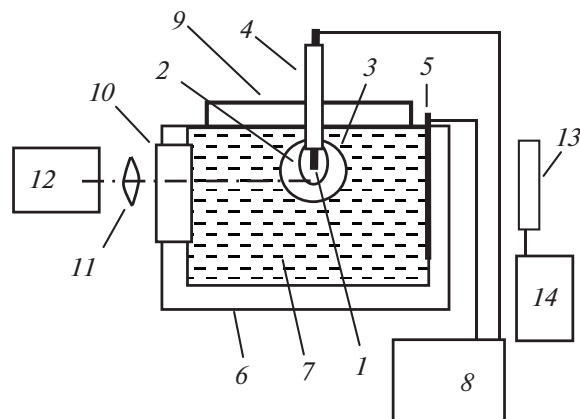


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* — катод, *2* — прикатодная область, *3* — граница разряда, *4* — керамическая трубка, *5* — анод, *6* — корпус, *7* — электролит, *8* — источник питания, *9* — постоянные магниты, *10* — окно, *11* — линза, *12* — спектрометр, *13* — магнитный зонд, *14* — анализатор спектра.

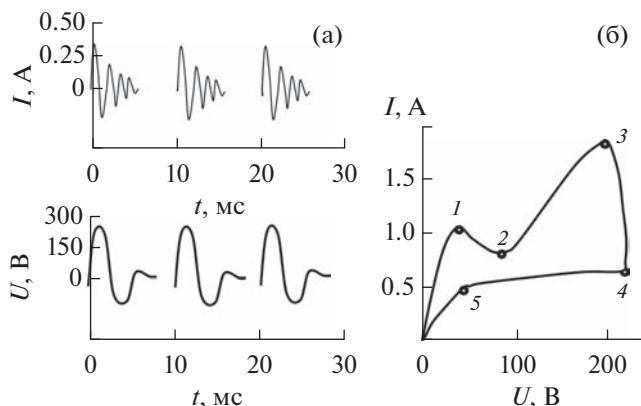


Рис. 2. Электротехнические характеристики разряда в электролите: (а) — осциллограммы тока и напряжения, (б) — вольт-амперная характеристика разряда при вольфрамовом катоде.

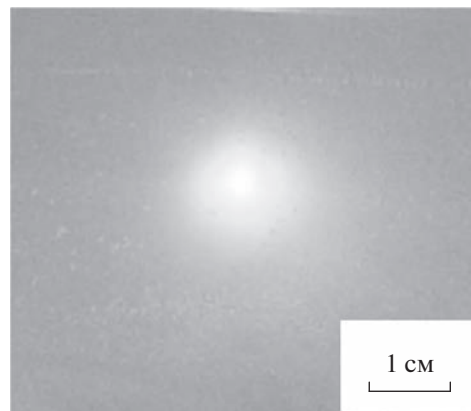


Рис. 3. Изображение разряда в электролите при нормальном горении (экспозиция 20 мс).

этому сопротивление электролита возрастает и зависимость немного искривляется. Вблизи точки 1 на заостренной части катода наблюдается искрение и в точке 1 происходит зажигание разряда при напряжении 38 ± 2 В. Наиболее вероятным представляется искровой характер пробоя разряда. С момента зажигания разряда и при дальнейшем его горении в цепи наблюдаются высокочастотные колебания [4, 6, 21]. На следующем участке характеристики ($I-2$) при увеличении напряжения происходит формирование парогазовой оболочки, окружающей катод и обладающей удельным сопротивлением, большим по сравнению с удельным сопротивлением электролита, из-за чего ток на данном участке уменьшается. При увеличении напряжения постепенно разгорается разряд и формируется его прикатодный слой [21]. На участке ($2-3$) зависимость приобретает вид, близкий к линейному. Наблюдается стабильное горение разряда. Данный участок является рабочим для проведения исследований разряда. При приближении к точке 3 увеличивается количество парогазовой смеси, окружающей катод и обладающей низкой проводимостью, поэтому работа разряда правее точки 3 становится прерывистой. При движении от точки 3 к точке 4 промежутки времени прерывания тока становятся более продолжительными, и сила тока уменьшается. В точке 4 происходит погасание разряда. Последующие участки характеристики связаны с прохождением тока через среду электролита. По мере движения тока температура электролита повышается, что приводит к изменению удельной проводимости электролита. Форма вольт-амперной характеристики напоминает петлю гистерезиса. При уменьшении концентрации вещества электролита график становится уже, площадь данной замкнутой зависимости (петли гистерезиса) уменьшается [6, 21].

С помощью электростатических зондов проводились измерения хода потенциала между катодом и анодом. Было установлено, что приблизительно около $2/3$ падения потенциала приходится на область разряда, остальная $1/3$ — на среду электролита между анодом и границей разряда. Согласно работам [6, 21, 22], наиболее вероятным представляется искровой механизм пробоя данного разряда в электролите на пузырьках водорода размерами 50–300 мкм, выделяющихся на катоде. Длительность пробоя, согласно оценкам, составляет $\Delta t = 10^{-7} - 10^{-6}$ с при характерной плотности тока в диапазоне $j = 10 - 50$ А/см².

Ранее были зарегистрированы электрические колебания в цепи разряда в широком диапазоне от 10 Гц до 100 МГц [1, 4, 6]. В области частот 150–300 кГц колебания представляют собой шумовой характер. Для возможного объяснения данных колебаний было предложено возникновение элек-

тронно-циклотронных и ионно-циклотронных волн [6, 21, 23].

Для измерений обзорного спектра в диапазоне 200–1100 нм были использованы спектрометр Ava Spec 2048 при спектральном разрешении 0.3 нм и монохроматор МУМ для временных измерений в области 200–800 нм при спектральном разрешении 0.2 нм. В качестве детектора излучения применялся ФЭУ-85 с временным разрешением 10 нс. Калибровка спектральной аппаратуры по абсолютным интенсивностям производилась с помощью лампы СИРШ8-200. Для учета коэффициента пропускания раствора электролита использовался спектрофотометр Спекорд-М40. В качестве электролита применялся карбонат натрия ($C = 0.4$). В экспериментах излучение регистрировалось из интенсивно излучающей области прикатодной плазмы вблизи острия катода приблизительно цилиндрической формы с размерами: длина — 1–1.5 мм, диаметр — 1–1.5 мм. Данная область окружена средней областью (размером 1–2 см), обладающей менее интенсивным излучением, которая являлась оптически тонкой для излучения прикатодной плазмы. Самопоглощение зарегистрированных спектральных линий отсутствовало.

Рассмотрим спектр разряда в электролите с вольфрамовым катодом для рабочего участка вольт-амперной характеристики разряда. Максимальная интенсивность наблюдается у линий атома натрия Na I 589 нм, 819 нм. В спектре также содержатся линии атомов: натрия Na I 519 нм, вольфрама W I 569 нм, кислорода O I 395.5 нм. Также регистрировались линии водорода серии Бальмера H_α 656 нм, H_β 486 нм, H_γ 434 нм, а линии данной серии, соответствующие высоковозбужденным уровням атома водорода, отсутствовали. Ранее проводилось изучение контуров данных линий, и по штарковскому уширению линий H_α и H_β определена концентрация плазмы, которая составила $n_e \sim 3 \times 10^{15}$ см⁻³ при токе разряда $I \sim 1.2$ А [21]. В экспериментах для катодов из тантала наблюдался непрерывный спектр в диапазоне 400–800 нм [20], для вольфрамовых и титановых катодов присутствие непрерывного спектра проявлялось более слабо в области 400–600 нм. Для прикатодной области реализуется высокая плотность тока, достигающая максимальных значений 100–150 А/см². Длительность импульсов тока ~ 1 мс значительно превышает время упругих столкновений электронов $\tau \sim 10^{-9}$ с. В литературе описывается реализация модели локального термодинамического равновесия для дугового разряда атмосферного давления на аргоне с добавками водорода при токе около 10 А и электронной концентрации порядка 10^{17} см⁻³ [24]. Было сделано предположение, что прикатодная область плазмы может локально термализоваться за время импульса тока. В этом случае для прикатодной обла-

сти плазмы может реализоваться модель локального термодинамического равновесия. Для расчета температуры методом относительных интенсивностей спектральных линий использовались три возможные отношения интенсивностей линий атома водорода H_α , H_β , H_γ . С учетом погрешностей получены близкие значения температуры. Среднее значение температуры составило $T = 2900 \pm 200$ К. Ввиду большей температуры плавления вольфрама ($T_{пл} = 3400^\circ\text{C}$) значения тока выбирались в верхней части рабочей части ВАХ вблизи величины 1.7 А.

Для разряда с титановым катодом наибольшая интенсивность присутствует у линий атома натрия Na I 589 нм, 424 нм. Менее интенсивны следующие линии: атома титана Ti I 337 нм, 323 нм, атома натрия Na I 515 нм, 819 нм, атома водорода H_α 656 нм, H_β 486 нм, H_γ 434 нм, атома кислорода O I 555 нм, 627 нм. Температура в данном случае рассчитывалась таким же методом, как и в случае вольфрамовых электродов по отношениям водородных линий H_α , H_β , H_γ . Среднее значение температуры было 2400 ± 200 К. Для титановых электродов (температура плавления $T_{пл} = 1670^\circ\text{C}$) значения тока находились в нижней части рабочей части ВАХ или около значения 1.2 А. Разряд в электролите с вольфрамовым катодом проходил при большей силе тока (превышение около 0.5 А), что, соответственно, обеспечивало больший энергетический вклад в плазму по сравнению с разрядом с титановым катодом. Поэтому для вольфрамового электрода была получена более высокая температура плазмы.

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ

Ранее было обнаружено, что воздействие разряда в электролите приводит к образованию различных микроструктур на поверхности электродов [19, 20]. Было сделано предположение, что на приэлектродные процессы при разряде в электролите может влиять магнитное поле. Для проверки этого вблизи боковых стенок камеры располагались сборки из постоянных магнитов (рис. 1). Индукция магнитного поля могла варьироваться в диапазоне 100–800 Гс. Дискретность изменения магнитного поля составляла $\Delta B = 25$ Гс. Для приготовления электролитов использовалась дистиллированная вода. Влияние магнитного поля на потоки электролита изучалось в специальном сосуде из оргстекла объемом около 250 см³ в виде усеченного конуса, в который помещались электроды [21, 25]. Под сосудом располагались постоянные магниты. Проводилась регистрация с помощью кинокамеры. При разряде в объеме электролита и прохождении тока под действием магнитного поля жидкость приходила во вращательное движение против часовой стрелки со скоростью 3–6 см/с. Наблюдалось ламинарное движение потоков жид-

кости, турбулентные течения практически не возникали.

В экспериментах разряд включался в режиме нормального горения на участке 2–3 (рис. 26) в течение промежутка времени 5–20 мин. Поверхность вольфрамовых катодов исследовалась с помощью микроскопов Hitachi TM1000 и VEGA 3 SEM. Особенно тщательно изучалась область вблизи оконечности катода.

Рассмотрим взаимодействие разряда с поверхностью вольфрамового катода. После воздействия разряда поверхность содержала небольшие трещины шириной 20–30 мкм и длиной 40–50 мкм. Вблизи данных трещин располагались поверхности, содержащие “острийные” образования размером 1–10 мкм (рис. 4а). Формирование данных структур может происходить благодаря слоистому строению вольфрамовой проволоки. Также наблюдаются участки с более упорядоченными острийными структурами, похожими на тонкие нити. Элементный состав данных острийных структур показал преимущественное содержание вольфрама (до 96%) и небольшое количество натрия (до 4%), ввиду внедрения атомов натрия, содержащихся в электролите.

Также изучались выпуклые участки поверхности вольфрамовых катодов вблизи оконечности электродов. Были зарегистрированы поверхностные структуры, напоминающие “конусы” с размерами высотой 0.2–5 мкм и шириной 0.1–3 мкм (рис. 4б). Форма данных образований имеет преимущественно неправильную заостренную форму. Их расположение на поверхности хаотическое, нерегулярное. Элементный состав данных структур: вольфрам около 95% и натрия около 5%. В качестве характеристики содержания данных конусов на поверхности можно ввести величину среднего количества конусов на единице площади поверхности. В этом случае есть возможность проследить зависимость этой величины от магнитного поля.

Для титановых электродов характерно возникновение микропористых поверхностей. Наблю-

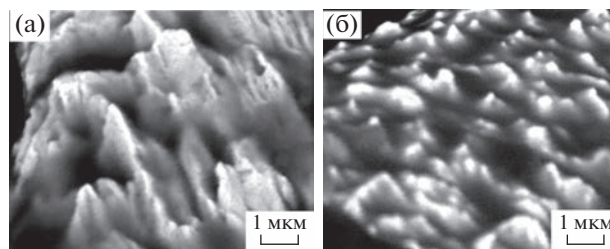


Рис. 4. Микроструктуры на поверхности катода: острийные (а) и конические (б) вольфрамовые образования.

дается хаотичное расположение пор с размерами в диапазоне 0.1–2 мкм.

В различных экспериментах с изучением электродов при разряде в электролите на поверхности вольфрамовых электродов появляются структуры, напоминающие “мох”, “лепестки”, а также поверхности сложной формы с микропорами. Рассмотрим образования, напоминающие небольшие “лепестки” длиной до 15–20 мкм и шириной 5–10 мкм. Толщина “лепестков” составляет 1–2 мкм, они достаточно плотно прилегают друг к другу. Элементный состав данных структур: вольфрам около 80%, натрий около 20%.

Другим видом структур на поверхности вольфрамовых электродов являются образования неправильной формы, содержащие маленькие поры размером 0.1–3 мкм. Элементный состав данных структур: вольфрам около 98%, натрий около 2%.

На поверхности титановых катодов наблюдается появление образований с формой, близкой к сферической, размером 0.2–60 мкм (рис. 5). В данных экспериментах вся область разряда и прилегающих слоев электролита была расположена в магнитном поле. При этом наблюдается ускорение роста сфер, первые сферы появляются в течение 5–7 мин. Возникновение данных микросфер происходит из небольших зародышей размером 0.1–0.2 мкм, расположенных на поверхности вблизи острия катода. Как правило, данные микросферы располагаются на пористой поверхности. Состав данных микросфер был определен ранее — это гидроксид титана(IV) $\text{TiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ [20].

У некоторых микросфер в центре может наблюдаться отверстие (рис. 5б). Данную форму можно объяснить захватом магнитного поля микросферой, в этом случае возникает торообразная поверхность, повторяющая торообразную конфигурацию магнитного поля. Это предположение может являться гипотезой для объяснения такой необычной формы.

Ввиду присутствия в прикатодной плазме электронов и протонов рассмотрим их ларморовские радиусы. Для используемого магнитного поля в диапазоне 800–100 Гс это следующие величины радиусов: для электронов 25–200 мкм, для протонов 1.1–8.6 мм. Размеры сфер на поверхности титановых катодов (рис. 5) достигают 30–40 мкм. Соответственно, ларморовские радиусы электронов при 25 мкм (магнитное поле около 800 Гс) близки к размерам данных сфер.

Представим зависимость количества конических микроструктур на поверхности вольфрама при помещении катода в магнитное поле (рис. 6). В отсутствие магнитного поля рост данных образований практически не наблюдался. С увеличением магнитного поля количество конусов на поверхности, взятой за единицу (20 мкм²), начинает расти. Дискретность значений поля $\Delta B = 25$ Гс

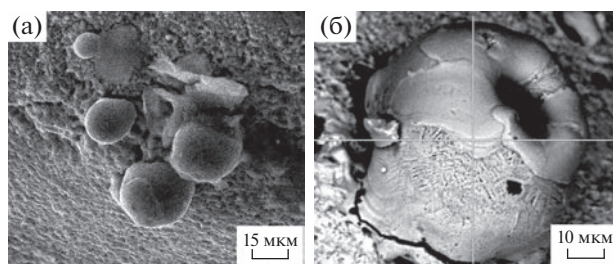


Рис. 5. Образования на поверхности титановых катодов: (а) — сферы, (б) — сфера с отверстием.

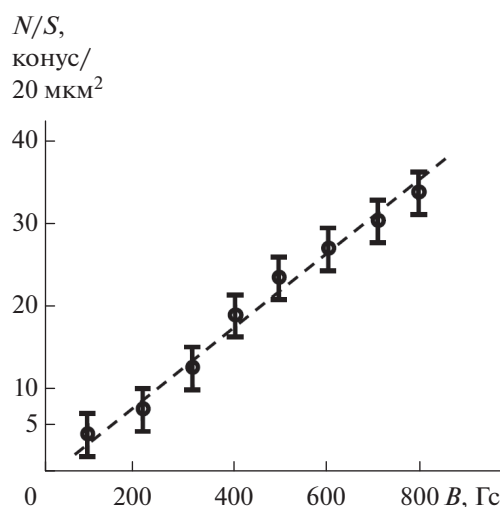


Рис. 6. Зависимость среднего количества конусов на поверхности вольфрамового катода от магнитного поля.

определяется использованием постоянных магнитов, из которых формировалась сборка, создающая поле в области разряда. Длительность горения разряда составляла около 15 мин. Осреднение проводилось по серии из 10 экспериментов. Полученная зависимость может быть аппроксимирована линейной.

В ходе экспериментов была также построена зависимость среднего количества сферических образований на поверхности титановых электродов в зависимости от магнитного поля. Время работы разряда составляло около 15 мин. Для осреднения была проведена серия из 10 экспериментов. Общей тенденцией является увеличение количества сферических образований с ростом магнитного поля.

Рассмотрим процесс возникновения на поверхности вольфрамового катода микроконусов (рис. 7) и приведем качественные оценки. Ранее было сделано предположение о возможности filamentации тока разряда вблизи поверхности катода [20]. Ввиду слоистой структуры используемого материала (вольфрамовой проволоки) поверхность катода содержит большое количество

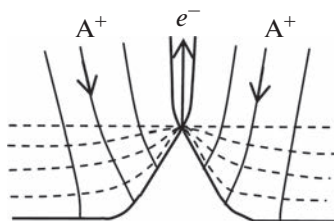


Рис. 7. Распыление поверхности вольфрама и формирование конусов.

неоднородностей. В результате ток начинает приобретать филаментную микроструктуру, состоящую из токовых нитей толщиной 0.2–1 мкм, при этом образуются микроуглубления. Можно предположить, что отдельные неоднородности поверхности становятся вершинами конусов из-за большей напряженности электрического поля. Через данные вершины будет наблюдаться эмиссионный ток электронов. Ввиду содержания натрия в поверхности электродов (до 5%) допустимо интенсивное воздействие ионов натрия на поверхность электрода вблизи данного конуса. Рассматривая данные предположения, можно также учитывать движение электронов и ионов у поверхности металла в магнитном поле по ларморовским радиусам. В магнитном поле токи могут приобретать спиральную конфигурацию. Можно предположить наличие механизма распыления поверхности по аналогии с распылением поверхностей металлов ионными пучками в вакууме [26]. В результате поверхность электрода между вершинами начинает распыляться, образуя микроконусы. В качестве величины, характеризующей распыление, приведем оценку средней скорости уменьшения вещества на единице поверхности вольфрамового электрода:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t S} \approx 6.4 \times 10^{-5} \text{ г/см}^2\text{с}.$$

Присутствие магнитного поля, вероятно, начинает сжимать ток ионов вблизи отдельного растущего конуса и увеличивать плотность тока, следовательно, усиливать распыление вещества около конуса. Вместе с тем можно допустить влияние магнитного поля на процесс филаментации тока разряда, или явление образования токовых нитей. Если магнитное поле увеличивает среднее количество токовых нитей, то это также способствует ускорению роста микроконусов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучалось влияние постоянного магнитного поля на рост микроструктур на поверхности электродов при разряде в электролите. Величина магнитного поля составляла 100–800 Гс. С помощью спектральных методов определены

значения температуры плазмы вблизи поверхности исследуемых электродов. Для вольфрамовых электродов среднее значение температуры составило $2900 \pm 300 \text{ К}$, а в случае титановых электродов – $2400 \pm 300 \text{ К}$.

На поверхности вольфрамовых катодов было обнаружено возникновение конических и острых микроструктур размером до 10 мкм. Присутствие магнитного поля в проводимых экспериментах ускорило рост данных структур, увеличивало их среднее количество и повышало вероятность их образования. Полученные количественные зависимости показывают увеличение числа микроконусов и острых микроструктур при усилении магнитного поля.

Происходило стимулирование роста различных поверхностных структур, которых не было в отсутствие магнитного поля. Наблюдалось возникновение структур типа “моха” длиной до 20 мкм и образований неправильной формы с микропористой поверхностью на вольфрамовых катодах. При появлении микросфер на поверхности титановых катодов воздействие магнитного поля приводило к образованию торообразных форм. Наблюдаемый процесс образования микроконусов на поверхности вольфрама, по-видимому, связан с филаментацией тока разряда, которая проявляется в волокнистой структуре разряда, состоящей из микронных нитей. Образование данных поверхностных структур предполагает проведение дальнейших подробных исследований.

Автор выражает признательность коллективу кафедры Физика плазмы НИЯУ МИФИ за помощь в проведении экспериментов по тематике данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайсин Ал.Ф., Насибуллин Р.Т. Об особенности электрического разряда между электролитическим катодом и металлическим анодом // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 10. С. 959.
2. Bruggeman P., Leys C. Non-thermal Plasmas in and in Contact with Liquids // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 053001.
3. Mezei P., Cserfalvi T. Electrolyte Cathode Atmospheric Glow Discharges for Direct Solution Analysis // Appl. Spectrosc. Rev. 2007. V. 42. P. 573.
4. Канарев Ф.М. Низкоамперный электролиз воды. Краснодар: Изд-во Краснодарск. ун-та, 2010. 81 с.
5. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. Возникновение и развитие объемного разряда между твердыми и жидкими электродами // Химия плазмы. 1990. Вып. 16. С. 120.
6. Кирко Д.Л., Савелов А.С., Визгалов И.В. Колебательные процессы в плазме разряда в электролите // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 11. С. 3.
7. Tazmeev G.Kh., Tazmeev Kh.K., Tazmeeva R.N., Talipova I.P., Tazmeev B.Kh. Gas Discharge with a Liquid Electrolyte Cathode in Creating a Flow of Stream Water Plasma // Int. Res. J. 2021. V. 1. P. 25.

8. Смирнов Б.М., Бабаева Н.Ю., Найдис Г.В., Панов В.А., Сон Э.Е., Терешонок Д.В. Пузырьковый метод очистки воды // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 286.
9. Словецкий Д.И., Терентьев С.Д., Плеханов В.Г. Механизм плазменно-электролитного нагрева металлов // ТВТ. 1986. Т. 24. № 2. С. 353.
10. Pongrac B., Machala Z. Electrospraying of Water with Streamer Corona Discharge // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. V. 39. № 11. P. 2664.
11. Gaisin A.I., Son E.E., Kashapov N.F. Discharge between the Jet and Dropping Liquid Cathode and Metal Anode // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 927. P. 012018.
12. Гайсин Аз.Ф., Садриев Р.Ш., Багаутдинова Л.Н., Насыбуллин Р.Т., Гайсин Ф.М., Мастюков Ш.Ч. Электрические разряды малой мощности с металлическими, диэлектрическими и электролитическими электродами при низких частотах и атмосферном давлении // ТВТ. 2020. Т. 58. № 6. С. 860.
13. Лукомский Ю.Я., Гамбург Ю.Д. Физико-химические основы электрохимии. Долгопрудный.: Интеллект, 2013. 448 с.
14. Крауз В.И., Химченко Л.Н., Мялтон В.В., Виноградов В.П., Виноградова Ю.В., Гуреев В.М., Койдан В.С., Смирнов В.П., Фортков В.Е. Формирование наноструктур в разряде типа плазменный фокус // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 4. С. 326.
15. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Никитин Д.С. Прямой динамический синтез нанодисперсных фаз оксидов титана при распылении электроразрядной плазмы титана в воздушную атмосферу // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 23. С. 21.
16. Nomine A.V., Gries Th., Noel C., Nomine A., Milichko V., Belmonte T. Synthesis of Nanomaterials by Electrode Erosion Using Discharges in Liquids // J. Appl. Phys. 2021. V. 120. P. 151101.
17. Glad X., Gorry J., Cha M.S., Hamdan A. Synthesis of Core-shell Copper-graphite Submicronic Particles and Carbon Nano-onions by Spark Discharges in Liquid Hydrocarbons // Sci. Rep. 2021. V. 11. Article number 7516. 11 p.
18. Kashapov R.N., Kashapov L.N., Kashapov N.F. Research of Plasma-electrolyte Discharge in the Processes of Obtaining Metallic Powders // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 927. P. 012086(6).
19. Kirko D.L., Sayjolv A.S. Investigation of Plasma Properties of Discharge in Electrolyte Surface Layer // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 941. P. 012018.
20. Кирко Д.Л. Исследование приэлектродной плазмы и поверхности электродов при разряде в электролите // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 6. С. 496.
21. Кирко Д.Л. Колебательные процессы в плазме разряда в электролите в магнитном поле // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 4. С. 28.
22. Коробейников С.М., Мелехов А.В., Бесов А.С. Зажигание разряда с помощью пузырьков // ТВТ. 2002. Т. 40. № 5. С. 706.
23. Кролл Н., Трайвелтис А. Основы физики плазмы. М.: Мир, 1975. 525 с.
24. Хаддлстоун Р., Леонард С. Диагностика плазмы. М.: Мир, 1967. 515 с.
25. Кирко Д.Л., Савелов А.С., Егоров И.Д. Свойства разряда в электролите во внешнем магнитном поле // Матер. XI Междун. науч. конф. "Волновая электрогидродинамика проводящей жидкости". Ярославль: ЯрГУ, 2015. С. 82.
26. Behrisch R., Eckstein W. Sputtering by Particle Bombardment. Experiments and Computer Calculations from Threshold to MeV Energies. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. 526 p.