ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2020, том 46, № 6, с. 495–502

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9.087.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЫ И ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ РАЗРЯДЕ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ

© 2020 г. Д. Л. Кирко*

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия

**e-mail: dlkirko@mephi.ru*

Поступила в редакцию 24.10.2019 г.
После доработки 12.12.2019 г.
Принята к публикации 19.12.2019 г.

Исследованы прикатодная плазма разряда в электролите на основе карбоната натрия и гидроксида натрия и ее взаимодействие с поверхностью электродов из вольфрама, тантала и титана. Измерены электротехнические параметры разряда с помощью спектральных методов, определена температура прикатодной плазмы. При использовании вольфрамовых электродов на их поверхности возникают нитевидные структуры диаметром 0.2–1.5 мкм. Воздействие тока разряда приводит к разрушению танталовых электродов. На поверхности титановых электродов наблюдаются появление сфероподобных образований диаметром 1–40 мкм и пористой поверхности с размерами пор 0.1–1 мкм. Обсуждается механизм формирования данных поверхностных структур.

Ключевые слова: разряд в электролите, взаимодействие плазмы с поверхностью металла, сфероподобные образования, нитевидные структуры

DOI: 10.31857/S0367292120060049

1. ВВЕДЕНИЕ

Возникновение разряда в электролите происходит при увеличении плотности тока вблизи одного из электродов, около которого появляется свечение [1–3]. Электроды в экспериментах располагаются в среде электролита, или один может находиться вблизи поверхности жидкости. Плазменная область разряда в жидкости окружается парогазовой оболочкой, которая постоянно находится в состоянии интенсивного кипения. При импульсно-периодическом режиме разряда присутствует фаза пробоя и последующее увеличение тока разряда. Были обнаружены электрические колебания в цепи разряда в широком частотном диапазоне: 30 кГц–200 МГц [1, 4, 5]. Изучались спектры данных колебаний, и обсуждалось их возможное появление ввиду возникновения плазменных волн.

Рассматриваются практические направления использования разрядов в электролите связанные с модификацией поверхности материалов и полировкой металлических поверхностей [1, 2, 6]. При горении разряда над поверхностью электролита данный разряд может быть использован для создания систем очистки воды и воздуха [1, 7–10].

При работе плазменных установок с сильноточными газовыми разрядами на поверхности электродов (графит, пирографит и вольфрам) или на стенках камеры регистрировалось возникновение наноструктур [11–13]. При разряде в электролите возникновение микронных образований обнаружено на поверхности электродов из титана [14]. В данной работе исследованы возможности появления микронных структур также на поверхности электродов из вольфрама и тантала в зависимости от характеристик приэлектродной плазмы.

2. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА

В данной работе применялись камеры цилиндрической формы объемом 200–350 см^3 и диаметром 8–14 см, изготовленные из оргстекла. Использовались электролиты на основе карбоната натрия и гидроксида натрия. Экспериментальная установка представлена на рис. 1. Для катодов применялись стержни из вольфрама, титана и тантала диаметром 1–2 мм, и для анодов – пластины из нержавеющей стали и молибдена толщиной 0.2–0.4 мм. В качестве источника питания использовался двухполупериодный выпрямитель с напряжением 0–240 В при частоте следования импульсов 100 Гц. Катод помещался в керамическую трубку и располагался вертикально в электролите на различной глубине относительно поверхности. Рабочей поверхностью катода являлась небольшая площадь величиной 0.5–1.5 мм^2.

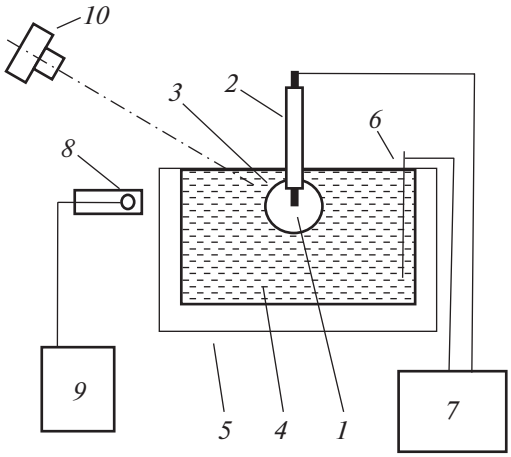

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – катод, *2* – керамическая трубка, *3* – область разряда, *4* – электролит, *5* – корпус, *6* – анод, *7* – источник питания, *8* – магнитный зонд, *9* – анализатор спектра, *10* – камера.

Разряд в опытах создавался внутри электролита и сопровождался появлением свечения. Для регистрации изображения разряда использовалась серийная камера (фотоаппарат) Nikon 1G (временное разрешение 1 мс согласно паспортным данным). Данная камера располагалась под углом 20°–30° к поверхности электролита. Для более качественных снимков разряда использовалась камера из оргстекла с боковыми окнами из оргстекла. Изображение разряда при расположении катода на глубине ≈1.5 см ниже поверхности электролита представлено на рис. 2а. Снимок был сделан через боковое окно камеры. Размеры светящейся области разряда в экспериментах находились в диапазоне 1.5–2.5 см. Наибольшей интенсивностью излучения обладает прикатодная область размером 3—5 мм, которая показана на рис 2б. Характерными цветами разряда, в зависимости от состава и концентрации электролита, являются желто-красный и синий.

Рассмотрим измерение электротехнических характеристик разряда в электролите. Значения концентрации карбоната натрия выбирались в диапазоне C = 0.4–0.6 М. Концентрация Na_2CO_3 C = 1 М: 106 г на 10^3 см^3 дистиллированной воды. На рис. 3 представлена ВАХ для титанового катода при разряде в электролите на основе карбоната натрия Na_2CO_3 при концентрации C = 0.5 М. Для тока I и напряжения U указаны действующие значения. На электроды подавалось напряжение после двухполупериодного выпрямителя (рис. 4а). Представим наиболее характерные точки данной зависимости. Начальный участок ВАХ является приблизительно линейным. В точке 1 при напряжении 54 ± 2 В и токе 1.1 ± 0.1 А происходит пробой и зажигание разряда вблизи поверхности катода. Толщина прикатодной области составляет 1–2 мм. Величина напряжения зажигания зависит от концентрации электролита [5]. На участке 1–2 при увеличении тока размеры плазменной области увеличиваются до 5–10 мм. При этом на границе плазменной области и электролита возникает парогазовая область [5]. По мере возрастания напряжения и увеличения мощности, вкладываемой в разряд, сопротивление парогазовой области уменьшается. Участок 2–3 близок к линейному и, как правило, имеет устойчивый режим горения разряда, поэтому измерения производились на этом участке ВАХ. После достижения максимума интенсивность разряда ослабевает и в точке 4 разряд погасает. Последний участок ВАХ 5-0 обычно также близок к линейному. Общий вид ВАХ для вольфрамового и танталового катодов соответствует ВАХ для титанового катода (рис. 3), но имеет другие значения напряжения зажигания (точка 1) и положения точек 2–5. В предшествующих работах были установлены зависимости влияния концентрации вещества электролита на форму ВАХ [15]. Общий

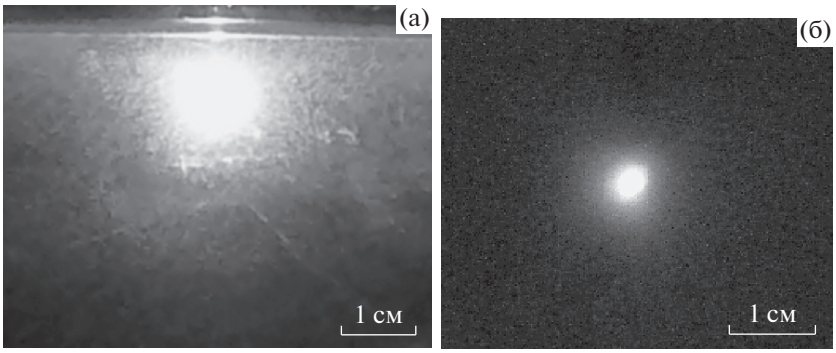

Рис. 2. Фотографии разряда в электролите: интегральное изображение разряда (экспозиция 10 мс) (а), и изображение прикатодной области разряда (экспозиция 1 мс) (б).

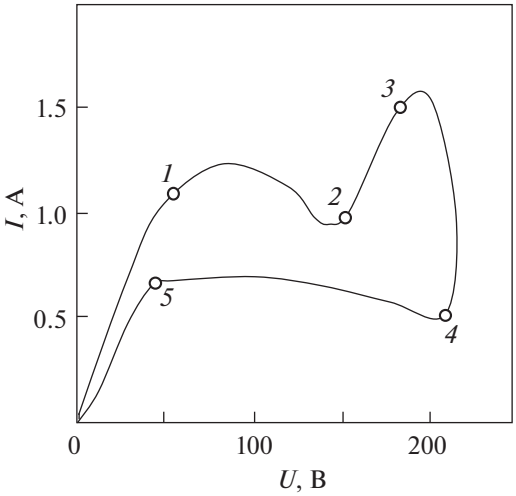

Рис. 3. Вольтамперная характеристика разряда для титанового катода.

вид ВАХ напоминает гистерезис и зависит от концентрации электролита в растворе. При уменьшении концентрации электролита общая площадь характеристики уменьшается, а при увеличении – площадь возрастает.

При использовании частоты следования импульсов 100 Гц, происходит пробой и периодическое зажигание разряда в электролите с данной частотой (рис. 4а). Отдельный импульс тока представляет собой затухающую синусоиду с периодом ≈0.9 мс при количестве периодов n = 3–4 (рис. 4в). Высокочастотные колебания наблюдаются в начале первого периода тока. Ранее регистрировались электрические колебания разряда в электролите в следующих частотных диапазонах: 20–300 кГц и 5–80 МГц [5, 14, 15]. Были рассмотрены ионно-циклотронные и электронно-циклотронные волны для плазмы разряда [16]. В качестве возможного объяснения было предложено возникновение данных плазменных волн в среде разряда.

Для описания стадии пробоя разряда в электролите была рассмотрена модель искрового пробоя жидкости, содержащей газовые пузырьки [17]. Согласно этим представлениям были сделаны оценки для ионизации среды, состоящей из пузырьков водорода, окружающих катод [14, 15].

3. СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРОЛИТЕ

Для получения обзорного спектра излучения разряда применялся спектрометр AvaSpec 2048 (диапазон 200–1000 нм, спектральное разрешение 0.3 нм). Временной ход спектральных линий регистрировался с помощью монохроматора МУМ (рабочий 200–800 нм, спектральное разрешение 0.2 нм) и фотоэлектронного умножителя ФЭУ-85 (временное разрешение 5 нс). Калибровка аппаратуры производилась с помощью лампы СИРШ8-200. Излучение из разряда в электролите фокусировалось на входную щель прибора с помощью ахроматического конденсора. Интегральное излучение регистрировалось из всей области разряда. Максимальная светимость соответствует прикатодной области разряда, окружающей катод. Для изучения пропускания электролита использовался спектрофотометр Спекорд М40. Коэффициент пропускания электролита на основе карбоната натрия (C = 0.5) в области длин волн 300–850 нм находится в диапазоне k = 70–83% для толщины раствора 1 см. При расчетах интен-

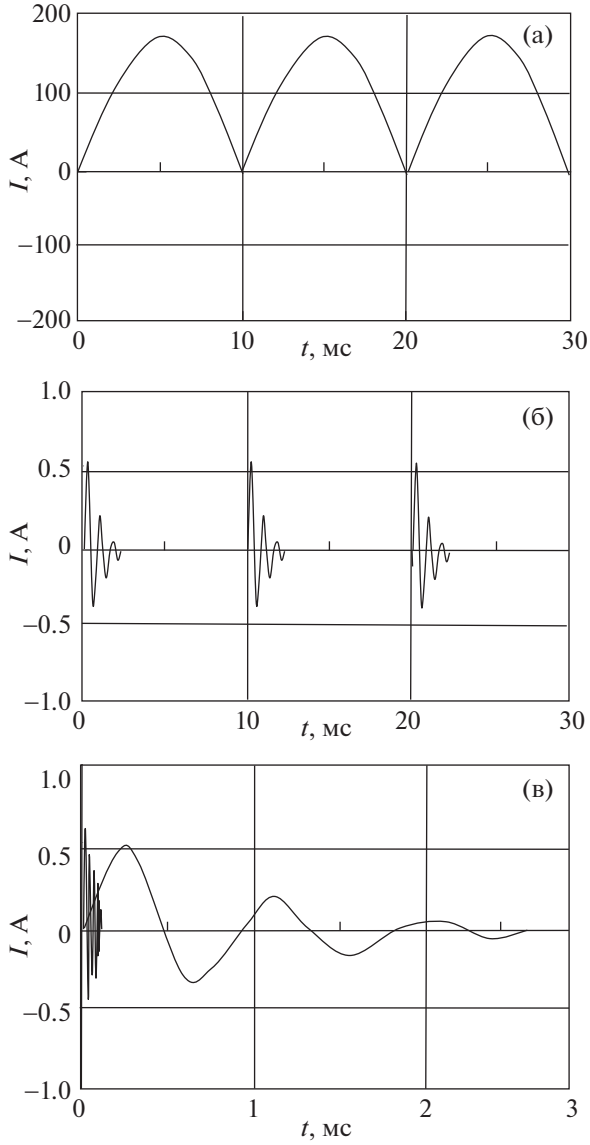

Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжения (а) на разряде и тока (б)разряда при титановом катоде: синхронизованный вариант, отдельный импульс тока (в).

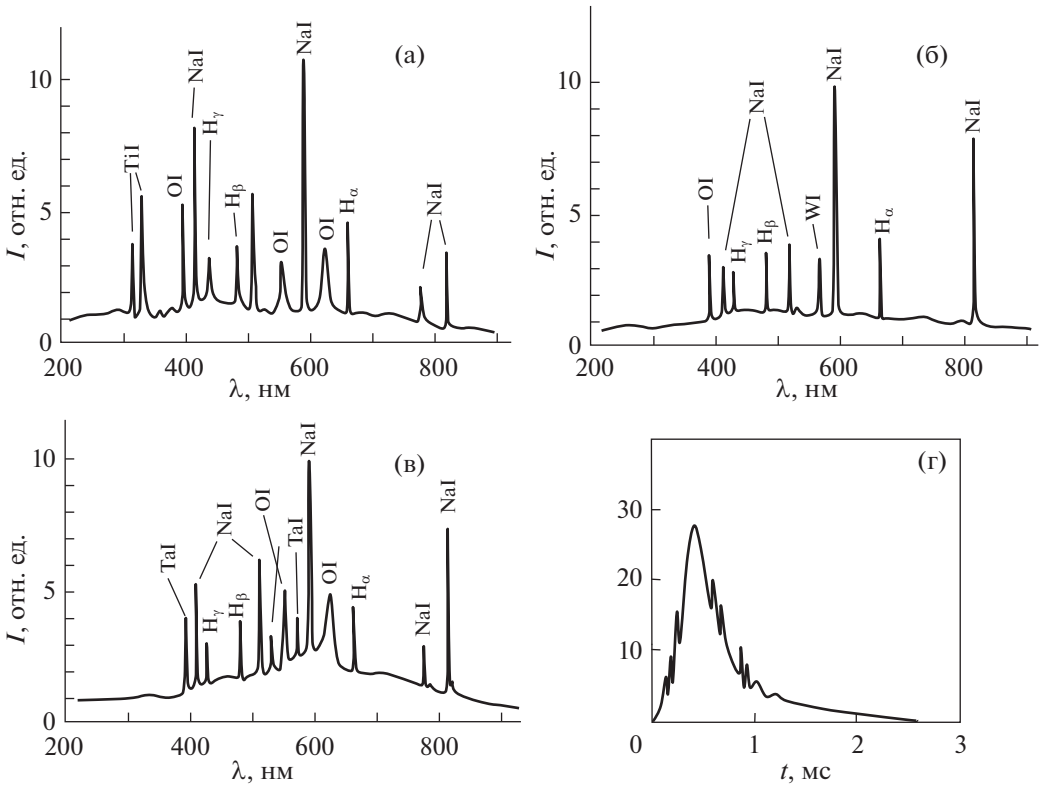

Рис. 5. Излучение разряда в электролите в зависимости от материала катода и спектр при катоде из титана (а), спектр при катоде из вольфрама (б), спектр при катоде из тантала (в), временная зависимость излучения линии атома натрия NaI 589 нм для титанового катода (г) (ток разряда во всех экспериментах $I \approx 1.4$А).

сивностей спектральных линий учитывалось поглощение излучения в электролите.

В экспериментах проводилось изучение различных режимов соотношения между интенсивностями спектральных линий в зависимости от тока разряда на линейном участке 2–3 (рис. 3). Спектры излучения разряда в электролите для используемых электродов представлены на рис. 5.

Рассмотрим спектр излучения разряда при использовании катода из титана (рис. 5а). Разряд создавался на карбонате натрия ($C = 0.5$) в рабочем режиме разряда при величине тока $I \approx 1.4$А (участок 2–3) (рис. 3). Наибольшей интенсивностью обладают линии атома натрия NaI: 589 нм, 424 нм. Меньшая интенсивность излучения присутствует для следующих линий: атома титана TiI: 337 нм, 323 нм, атома натрия NaI:515 нм, 819 нм, 781 нм, атома водорода H_α 656 нм, H_β 486 нм, H_γ 434 нм, атома кислорода OI: 395.5 нм, 555 нм, 627 нм. Для данного режима работы разряда было сделано предположение, что состояние плазмы может соответствовать модели локального термического равновесия [18]. По линиям атомарного водорода H_α и H_β методом относительных интенсивностей была рассчитана температура плазмы в прикатодной области разряда, которая составила $T = 2800 \pm 200$ K (величина тока $I \approx 1.4$А).

Для спектра разряда с катодом из вольфрама (рис. 5б) при величине тока $I \approx 1.4$А (участок 2–3) (рис. 3) в электролите из карбоната натрия ($C = 0.5$) наибольшей интенсивностью обладают линии натрия NaI: 589 нм, 819 нм. Меньшей интенсивностью обладают линии натрия NaI: 424 нм, 519 нм, вольфрама WI 569 нм, кислорода OI 395.5 нм, водорода H_α 656 нм, H_β 486 нм, H_γ 434 нм. В этом режиме разряда было сделано допущение о возможности существования локального термического равновесия [18]. Температура плазмы в прикатодной области разряда была определена методом относительных интенсивностей с помощью линий атомарного водорода H_α и H_γ, и имеет величину $T = 3100 \pm 200$ K (величина тока $I \approx 1.4$ А).

При катоде из тантала и электролите на карбонате натрия ($C = 0.5$) для получения спектра было использовано значение тока $I \approx 1.4$ А (участок 2–3) (рис. 3). Отличительной особенностью спектра является присутствие непрерывной составляющей в диапазоне 400–900 нм (рис. 5в). Максимальной интенсивностью обладают линии натрия NaI: 589 нм, 819 нм. Меньшая интенсив-

ность присутствует у линий атома натрия NaI: 424 нм, 519 нм, 781 нм, атома кислорода OI: 555 нм, 627 нм, атома водорода H_α 656 нм, H_β 486 нм, H_γ 434 нм, атома тантала TaI: 397 нм, 546 нм, 566 нм. В данном режиме разряда предполагалось, что состояние плазмы также соответствует модели локального термического равновесия [18]. Для нахождения температуры был использован метод относительных интенсивностей линий атомарного водорода H_α и H_β, которая составила $T = 3200 \pm 200$ K (величина тока $I \approx 1.4$ A).

Характерная временная зависимость линии атомарного натрия NaI 589 нм для титанового катода представлена на рис. 5г. В излучении данной линии были зарегистрированы колебательные процессы с частотами 11.5 ± 0.3 кГц и 14.2 ± ± 0.3 кГц. Ранее присутствие колебаний с частотами ≈5.9 кГц и ≈5.3 кГц было зафиксировано для линий водорода и вольфрама при разряде в электролите [5].

4. ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С РАЗРЯДОМ

Нами были проведены эксперименты по взаимодействию разряда в электролите с поверхностью электродов из вольфрама, титана и тантала. Продолжительность экспериментов по взаимодействию выбиралась в диапазоне 5–60 мин. Площадь поверхности катода, через которую проходил ток при горении разряда, составляла 0.5–1.5 мм^2. Плотность тока в экспериментах находилась в диапазоне 0.2–3 А/мм^2. Температура плазмы в прикатодной области согласно проведенным спектральным измерениям составляла 2800–3200 K. Измеренные значения температуры в прикатодной области превосходят температуры плавления титана ($t_{Ti} \approx 1608$°C) итантала ($t_{Ta} \approx$ ≈ 2996°C), но менее температуры плавления вольфрама ($t_W \approx 3420$°C).

В данных экспериментах разряд включался на заданное время в рабочем режиме ВАХ (участок 2–3 (рис. 3)), а затем проводилось изучение изменения структуры поверхности электродов после воздействия разряда в электролите. Для исследования поверхности электродов были использованы микроскопы VEGA 3 SEM и HitachiTM1000.

В случае вольфрамового катода исходная используемая вольфрамовая проволока диаметром 1 мм имела волокнистую структуру. Это можно было определить при разрезании данной проволоки ножницами по металлу, при этом образовывались трещины размерами 0.1–0.2 мм в продольном направлении проволоки и тончайшие осколки неправильной формы величиной 0.1–0.3 мм. (Микроскопическое изображение поверхности вольфрамового электрода до воздействия разряда будет рассмотрено позже.) Ввиду этого слоистость вольфрама проявляется на микроуровне. На рис. 6а изображена область вблизи оконечности катода после взаимодействия с разрядом в электролите. Наблюдается слоистая структура вольфрама и образование нитей диаметром около 0.3–1.5 мкм. Длина данных нитей составляет 100–200 мкм. Некоторые нити содержат на концах утолщения, похожие на следы оплавлений.

После разряда на поверхности вольфрама возникали глубокие трещины длиной около 50–250 мкм и шириной 5–10 мкм. При более подробном изучении поверхности вблизи трещин были обнаружены области, содержащие нити (рис. 6б) диаметром около 0.1–1.2 мкм. Возникновение данных нитей, по-видимому, происходит под действием разряда. Можно предположить, что наблюдается филаментация тока при разряде в электролите на микронные токовые нити диаметром 0.1–1 мкм. Изучение данного явления требует проведения дальнейших экспериментов.

Вместе с тем, на оконечности вольфрамового катода присутствуют участки, содержащие ячеистую структуру (рис. 6в) размерами 0.2–1.0 мкм. Данная форма грануляции наблюдается достаточно часто при быстром остывании расплавов металлов [19].

Другим интересным видом объектов на поверхности вольфрамового электрода является возникновение сферопободных образований (рис. 6г) размерами 2–15 мкм, имеющим пористую поверхность с размерами пор 0.2–1.0 мкм. Некоторые подобные образования имеют неправильную форму, и небольшие лепестки, отслоения материала на поверхности. Изображение исходной поверхности вольфрамового электрода до воздействия разряда представлено на рис. 6д. Для данной поверхности было свойственно присутствие отверстий неправильной формы размерами 1–4 мкм.

На поверхности титановых электродов наблюдается возникновение сфероподобных образований с размерами в диапазоне 1–40 мкм. Вместе с тем встречаются сгустки неправильной формы, расположенные рядом со сферами. На поверхности также находятся маленькие образования сфероподобной и неправильной форм с размерами 0.1–2.0 мкм, расположенные с большой плотностью. Возможно, маленькие образования являются зародышами для возникновения сфероподобных структур. Также на поверхности наблюдаются трещины шириной 0.2–1.0 мкм.

Путем энергодисперсионного анализа элементного состава данной поверхности были получены значения процентного содержания элементов: кислород 71%, титан 25%, натрий 4% (погрешность определения процентного содержания ±2%). Для проведения данного анализа исполь-

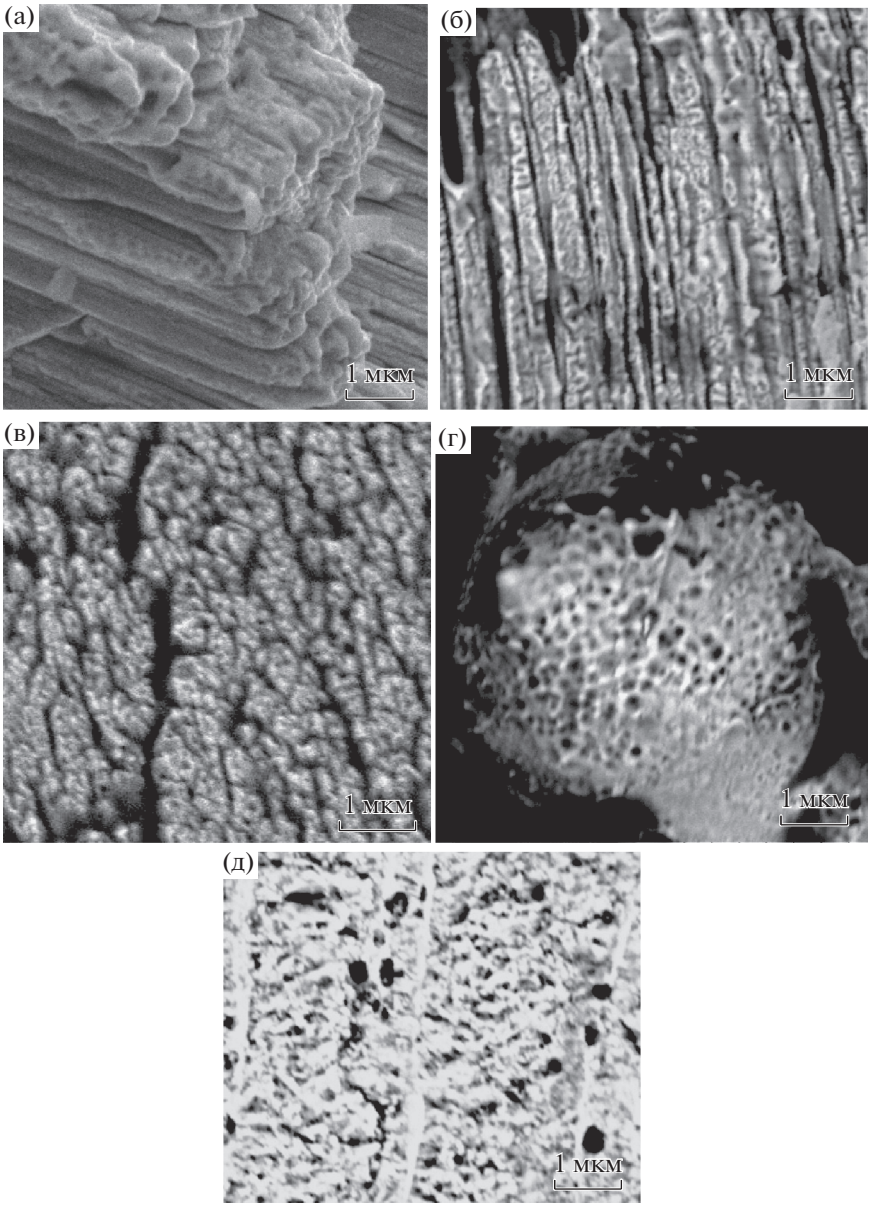

Рис. 6. Изображения поверхности вольфрамового катода после воздействия разряда в электролите: оконечность катода (а), нитевидные структуры (б), ячеистые структуры (в), сфероподобные объекты (г), поверхность электрода до воздействия разряда (д).

зовался модуль, установленный на микроскопе VEGA 3 SEM. Исходный материал катода до погружения в электролит и воздействия разряда содержал титан 98% (погрешность ± 2%). Содержание кислорода по сравнению с титаном-материалом электрода достаточно велико. Натрий в виде ионов входит в состав электролита и может незначительно внедряться в поверхность. При анализе сфероподобных образований были получены близкие значения: кислород 71%, титан 29% (погрешность определения процентного содержания ±2%). В качестве соединения титана, содержащего большое количество кислорода можно предположить образование гидроксида титана IV:$TiO_2 \cdot nH_2O$ ($TiO_2 \cdot 2H_2O$ или $Ti(OH)_4$). В этом случае содержание кислорода в поверхности может быть в 4 раза выше. Применяемые микроскопы, к сожалению, не фиксируют водород. Вблизи поверхности катода также может происходить электролиз воды и образование кислорода. Ввиду этого другим возможным соединением может быть диоксид титана TiO_2. Глубина поверхностного слоя, в котором анализируется содержание элементов, определяется глубиной проникновения зондирующего электронного пучка микроскопа VEGA 3 SEM и составляет 3.5–4.2 мкм.

Другим видом поверхностной структуры на титановом катоде является пористая поверхность (рис. 7а). На поверхности электрода наблюдается нерегулярное расположение пор с размерами в диапазоне 0.1–1 мкм. Типичная форма отверстий пор овальная. Наблюдаются скопления мелких пор с размерами 0.1–0.3 мкм. На поверхности также присутствуют трещины неправильной формы с шириной 0.2–0.5 мкм. Поверхность титанового электрода до воздействия разряда показана на рис 7б. Для данной поверхности свойственны ребристые структуры с периодом в диапазоне 1–3 мкм и технологические углубления, полученные при изготовлении титановой проволоки.

Ввиду присутствия пористой структуры на поверхности титанового электрода рассмотрим свойства электрического тока вблизи данного электрода. Можно предположить, что вблизи поверхности катода происходит филаментация тока разряда на множество отдельных токовых каналов диаметром 0.1–2 мкм при величине тока для одного канала в диапазоне 10^{-8}–10^{-6} А.

На поверхности танталовых катодов после взаимодействия с разрядом регистрируется образование глубоких трещин шириной 10–100 мкм и длиной 100–500 мкм. Также происходит возникновение микроуглублений размерами 1–5 мкм. При большой длительности воздействия разряда (50–60 мин) размеры трещин увеличиваются, и наблюдается откалывание кусочков поверхности размерами 100–400 мкм. Рассмотренные эффекты приводят к интенсивному разрушению поверхности танталовых электродов.

Рассмотрим рекомендации к использованию катодов из вольфрама, титана и тантала для экспериментов при разряде в электролите. Начальная форма катода в данных экспериментах является конической, которая затем деформируется и разрушается под действием разряда. Использование танталовых катодов крайне нежелательно ввиду их сильного разрушения в используемых режимах при разряде в электролите.

Применение вольфрамовой проволоки требует достаточно качественной обработки оконечности катода, что затруднено ввиду большой хрупкости и слоистости вольфрама. В то же время вольфрамовые катоды обладают наибольшей долговечностью и дольше остальных сохраняют свою форму при взаимодействии с разрядом.

При использовании титановой проволоки в качестве катодов можно получить желаемую форму оконечности катода. Ввиду меньшей температуры плавления оконечность титановых катодов быстрее разрушается по сравнению с вольфрамовыми катодами при работе разряда и требует использования большего диаметра катода. Для катодов из вольфрама и титана также необходимо проводить контроль структуры поверхности материала на предмет присутствия микротрещин и микроотверстий.

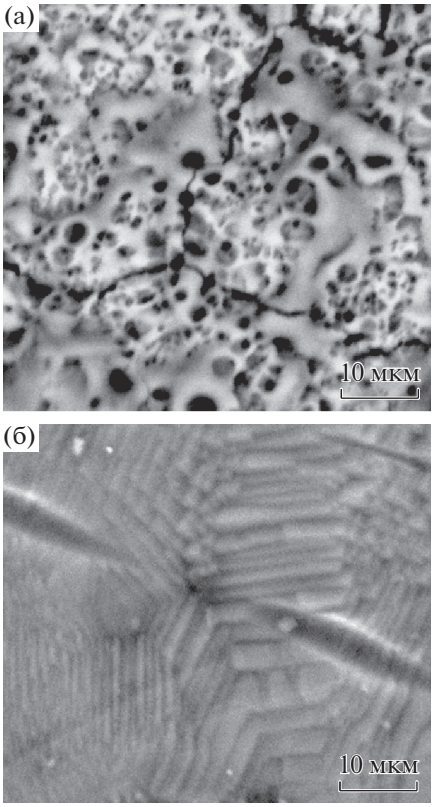

Рис. 7. Изображения поверхности титанового катода после воздействия разряда в электролите: пористая поверхность (а), поверхность электрода до воздействия разряда (б).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование приэлектродной плазмы разряда в электролите и взаимодействия плазмы разряда с поверхностью электродов. Изучалась зависимость характеристик данного разряда от материала катода из вольфрама, титана и тантала. С помощью спектральных измерений была определена температура разряда в прикатодной области, которая для используемых катодов находится в диапазоне T = 2800–3200 K.

Для вольфрамовых катодов на поверхности наблюдается возникновение нитевидных структур диаметром 0.1–1.5 мкм и длиной 100–200 мкм. Вместе с тем, в некоторых местах появляется грануляция поверхности с размером ячеек 0.2–1.0 мкм, и происходит возникновение сфероподобных объектов диаметром 2–15 мкм с микропористой поверхностью. Рост рассмотренных структур на поверхности вольфрамового электро-

да, по-видимому, происходит в результате филаментации тока разряда и взаимодействия отдельных микротоков разряда в электролите с поверхностью металла.

В случае поверхности танталовых катодов регистрируются трещины шириной 10–100 мкм и микроуглубления, которые приводят к разрушению поверхности.

На поверхности титановых катодов наблюдается появление сфероподобных образований с размерами в диапазоне 0.5–40 мкм. Также регистрируется возникновение пористой поверхности с размерами пор 0.1–1 мкм. Элементный анализ поверхности титанового электрода и сфероподобных образований показал присутствие гидроксида титана IV. Появление маленьких сфероподобных зародышей размерами 0.5–1 мкм свидетельствует о существовании процесса роста данных образований. Возможной причиной роста образований может являться минимизация поверхностной энергии связи молекул гидроксида титана IV, что наблюдается при сферической форме поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гайсин Ал.Ф., Кашапов Н.Ф., Купутдинова А.И., Мухаметов Р.А.* // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 5. С. 717.
2. *Kayumov R.R., Gaysin Al.F., Son E.E., Gaysin Az.F., Gaysin F.M.* // Physica Scripta. 2010. V. T142. P. 014038.
3. *Гайсин Ф.М., Сон Э.Е.* Электрофизические процессы в разрядах с твердыми и жидкими электродами. Свердловск: Изд-во Уральского ун-та, 1989.
4. *Канарев Ф.М.* Низкоамперный электролиз воды. Краснодар: Изд-во Краснодарского ун-та, 2010.
5. *Кирко Д.Л.* //ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 4. С. 28.
6. *Сулимов И.В., Эпельфельд А.В.* // Приборы. 2001. Т. 9. С. 13.
7. *Samukawa S., Hori M., Rauf S. et al.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 253001 (37 pp).
8. *Bruggeman P., Leys Ch.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 053001.
9. *Рыбкин В.В., Шутов Д.А.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 929.
10. *Pongrac B., Machala Z.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. V. 39. P. 2664.
11. *Крауз В.И., Мартыненко Ю.В., Свечников Н.Ю., Смирнов В.П., Станкевич В.Г., Химченко Л.Н.* // УФН. 2010. Т. 180. Вып. 10. С. 1055.
12. *Крауз В.И., Химченко Л.Н., Мялтон В.В., Виноградов В.П., Виноградова Ю.В., Гуреев В.М., Койдан В.С., Смирнов В.П., Фортов В.Е.* // Физика плазмы. 2013. Т. 39. С. 326.
13. *Смирнов Б.М.* // УФН. 2017. Т. 187. Вып. 12. С. 1329.
14. *Kirko D.L., Savjolov A.S.* // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 941. P. 012018.
15. *Kirko D.L., Savjolov A.S.* // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 747. P. 012002.
16. *Кролл Н., Трайвелпис А.* Основы физики плазмы. М.: Мир, 1975.
17. *Коробейников С.М., Мелехов А.В., Бесов А.С.* // ТВТ. 2002. Т. 40. Вып. 5. С. 706.
18. *Хаддлстоун Р., Леонард С.* Диагностика плазмы. М.: Мир, 1967.
19. *Глезер А.М., Пермякова И.Е.* Нанокристаллы, закаленные из расплава. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.
20. *Цао Гочжун, Ван Ив.* Наноструктуры и наноматериалы. Синтез, свойства и применение. М.: Научный мир, 2012.