

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТИТАНОВЫХ БИПОЛЯРНЫХ ПЛАСТИНАХ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ТВЕРДЫМ ПОЛИМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ\*

*М.А. Климова<sup>1</sup>, С.И. Нефедкин<sup>1</sup>, Е.А. Коломейцева<sup>1</sup>, А.В. Чижов<sup>1</sup>,  
Р.Г. Болдин<sup>1</sup>, С.Б. Симакин<sup>2</sup>, А.Н. Фокин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»

д. 14, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Россия  
тел.: +7 (495) 362-73-55; e-mail: snfedkin@mail.ru

<sup>2</sup>ООО «ИОНТЕК-сервис»

д. 34–38, ул. Б. Ордынка, г. Москва, 119017, Россия  
тел.: +7 (495) 580-34-10; e-mail: plasma@iontecs.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.07-18.101-114

Заключение совета рецензентов: 06.03.20 Заключение совета экспертов: 03.04.20 Принято к публикации: 07.05.20

Рассмотрены различные типы биполярных элементов и материалы, которые используются для их изготовления в технологии топливных элементов. Биполярные элементы играют важную роль при коммутации отдельных топливных ячеек в батарее, составляют самую большую долю ее массы (до 80 %), что влияет на удельные массовые мощностные характеристики энергосистемы. Биполярные элементы на основе тонкой титановой фольги и гофрированного воздуховода имеют высокую механическую прочность при минимальной массе, являются важным элементом батареи топливных элементов, а их применение позволяет существенно улучшить массовые удельные характеристики энергосистемы на основе топливных элементов с твердым полимерным электролитом и прямой подачей воздуха. Защитные покрытия должны обеспечить низкоомный контакт при коммутации отдельных топливных ячеек и не допустить его изменение при длительной работе топливного элемента. Нанесение покрытий в магнетронной установке позволяет с предварительной ионной очисткой на больших поверхностях получать тонкие покрытия с воспроизводимым составом и свойствами. Для исследований использовались мишени из графита, платины, а также композитные мишени графита с вставками платины в зоне распыления. С помощью общепринятых процедур изучено влияние состава и условий нанесения композитных покрытий на коррозионную стойкость и поверхностное контактное сопротивление биполярных элементов. Показано, что применение графитовой мишени и сегментов из платины позволяет получать защитные покрытия, близкие по техническим требованиям к покрытиям по коррозионной устойчивости и поверхностному контактному сопротивлению. Такие покрытия на титане имеют лучшие проводящие и защитные свойства, чем тонкопленочные покрытия на основе платины и тонких пленок золота. Установлено, что защитные покрытия на основе карбидов титана имели высокое поверхностное сопротивление, а на основе нитрида титана более низкие защитные свойства. Таким образом, магнетронная технология может быть рекомендована в качестве промышленной для производства биполярных элементов.

Ключевые слова: топливные элементы; водород; твердый полимерный электролит; биполярные пластины; титан; защитные покрытия; магнетронное распыление.

## RESEARCH OF PROTECTIVE COATINGS ON TITANIUM BIPOLAR PLATES OF HYDROGEN FUEL CELLS WITH SOLID POLYMER ELECTROLYTE

*M.A. Klimova<sup>1</sup>, S.I. Nefedkin<sup>1</sup>, E.A. Kolomeytseva<sup>1</sup>, A.V. Chizhov<sup>1</sup>,  
R.G. Boldin<sup>1</sup>, S.B. Simakin<sup>2</sup>, A.N. Fokin<sup>1</sup>*

\*Климова М.А., Нефедкин С.И., Коломейцева Е.А., Чижов А.В., Болдин Р.Г., Симакин С.Б., Фокин А.Н. Исследование защитных покрытий на титановых биполярных пластинах водородных топливных элементов с твердым полимерным электролитом // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2020;07-18:101-114.

<sup>1</sup>Research University of MPEI  
14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russia  
tel.: +7 (495) 362 73 55, e-mail: snefedkin@mail.ru

<sup>2</sup>IONTEK-service LLC  
34–38 B. Ordynka Str., Moscow, 119017, Russia  
tel.: +7 (495) 580 34 10, e-mail: plasma@iontecs.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.07-18.101-114

Referred 6 March 2020 Received in revised form 3 April 2020 Accepted 7 May 2020

The paper considers the various types of bipolar elements and materials which are used for their manufacture in fuel cell technology. They play an important role in switching individual fuel cells in a battery, and make up the largest fraction of its mass (up to 80%), which affects the specific mass power characteristics of the power system. Bipolar cells based on thin titanium foil and a corrugated duct have high mechanical strength with minimum weight, are important elements of a fuel cell battery, and their use can significantly improve the mass specific characteristics of a power system based on fuel cells with a solid polymer electrolyte and direct air supply. Protective coatings should provide low-resistance contact when switching individual fuel cells and prevent its change during prolonged operation of the fuel cell. Coating in a magnetron setup allows preliminary coatings on large surfaces to produce thin coatings with reproducible composition and properties. For research, we have used graphite and platinum targets, as well as composite graphite targets with platinum inserts in the spray zone. Using generally accepted procedures, we have studied the influence of the composition and conditions of applying composite coatings on the corrosion resistance and surface contact resistance of bipolar elements. The use of a graphite target and segments made of platinum is shown to allow obtaining protective coatings close to the requirements of technical targets for coatings in terms of corrosion resistance and surface contact resistance. Such titanium coatings have better conductive and protective properties than thin-film coatings based on platinum and thin films of gold. The production of protective coatings based on titanium carbides have a high surface resistance, and based on titanium nitride – lower protective properties. Thus, magnetron technology can be recommended as industrial for the production of bipolar elements.

Keywords: fuel cells; solid polymer electrolyte; bipolar plates; titanium; protective coatings; magnetron sputtering.



Мария Андреевна Климова  
Mariia Klimova

**Сведения об авторе:** аспирант Национального исследовательского университета «МЭИ».

**Образование:** Национальный исследовательский университет «МЭИ» (магистратура, 2016 г.).

**Область научных интересов:** электрокатализ; топливные элементы; водородная и электрохимическая энергетика.

**Публикации:** 5.

**Information about the author:** Post-graduate Student of the National Research University MPEI.

**Education:** National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (2016, M.Sc.).

**Research interests:** electrocatalysis; fuel cells; hydrogen and electrochemical power engineering.

**Publications:** 5.



Сергей Иванович Неведкин  
Sergey Nefedkin

**Сведения об авторе:** д-р техн. наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ».

**Образование:** МЭИ (1977 г.), аспирантура (1980 г.) и докторантура (2004 г.) МЭИ.

**Область научных интересов:** электрокатализ; топливные элементы; водородная и электрохимическая энергетика; энергообеспечение робототехнических устройств и БПЛА.

**Публикации:** более 145, включая 15 патентов.

*H*-index 4, ORCID 0000-0001-8432-320X

**Information about the author:** D.Sc. in Engineering, Professor at the National Research University of MPEI.

**Education:** MPEI, 1977; postgraduate studies, 1980; D.Sc. studies, 2004, MPEI.

**Research interests:** electrocatalysis; fuel cells; hydrogen and electro-chemical power engineering; the energy supply of robotic devices and UAVs.

**Publications:** more than 145, including 15 patents.



Елена Александровна  
Коломейцева  
Elena Kolomeitseva

**Сведения об авторе:** выпускник аспирантуры НИУ «МЭИ».

**Образование:** Национальный исследовательский университет «МЭИ»: (магистратура 2016 г., аспирантура 2018 г., преподаватель-исследователь).

**Область научных интересов:** электрокатализ; водородная и электрохимическая энергетика.

**Публикации:** 1.

**Information about the author:** Postgraduate Student of the MPEI.

**Education:** National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (M.Sc., 2016; postgraduate 2018, Researcher).

**Research interests:** electrocatalysis; hydrogen and electrochemical power engineering.

**Publications:** 1.



Алексей Вадимович Чижов  
Alexey Chizhov

**Сведения об авторе:** магистр Национального исследовательского университета «МЭИ».

**Образование:** Национальный исследовательский университет «МЭИ» (бакалавр, 2019 г.).

**Область научных интересов:** электрокатализ; топливные элементы; водородная и электрохимическая энергетика.

**Публикации:** 1.

**Information about the author:** M.Sc. of the National Research University MPEI.

**Education:** National Research University MPEI (B.Sc., 2019).

**Research interests:** electrocatalysis; fuel cells; hydrogen and electrochemical power engineering.

**Publications:** 1.



Роман Григорьевич Болдин  
Roman Boldin

**Сведения об авторе:** магистр Национального исследовательского университета «МЭИ».

**Образование:** Национальный исследовательский университет «МЭИ» (бакалавр, 2019 г.).

**Область научных интересов:** электрокатализ; топливные элементы; водородная и электрохимическая энергетика.

**Публикации:** 1.

**Information about the author:** M.Sc. of the National Research University MPEI.

**Education:** National Research University MPEI (B.Sc., 2019).

**Research interests:** electrocatalysis; fuel cells; hydrogen and electrochemical power engineering.

**Publications:** 1.



Сергей Борисович  
Симакин  
Sergey Simakin

**Сведения об авторе:** д-р техн. наук, генеральный директор ООО «Ионтек-нано».

**Образование:** механико-технологический факультет Воронежского политехнического института (1982 г.), аспирантура «НИИВТ им. С.А. Векшинского» (1986 г.), докторантура МИСиС.

**Область научных интересов:** формирование функциональных тонкопленочных покрытий в вакууме.

**Публикации:** более 76, включая 6 патентов.

**Information about the author:** D.Sc. in Engineering, General Director of Iontek-nano LLC.

**Education:** Faculty of Mechanics and Technology of the Voronezh Polytechnic Institute, 1982; postgraduate school "NIIVT named after S.A. Vekshinsky" 1986; D.Sc. studies at MISiS.

**Research interests:** formation of functional thin-film coatings in vacuum

**Publications:** more than 76, including 6 patents.



Александр Николаевич Фокин  
Aleksander Fokin

**Сведения об авторе:** выпускник Национального исследовательского университета «МЭИ».

**Образование:** Национальный исследовательский университет «МЭИ» (магистр, 2017 г.).

**Область научных интересов:** электрокатализ; топливные элементы; водородная и электрохимическая энергетика.

**Публикации:** 1.

**Information about the author:** Graduate of the National Research University MPEI.

**Education:** National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (M.Sc., 2017).

**Research interests:** electrocatalysis; fuel cells; hydrogen and electrochemical power engineering.

**Publications:** 1.



## 1. Введение

Использование водорода в топливных элементах (ТЭ) позволяет реализовать новые технологии генерации электрической энергии с высоким КПД и без вредных выбросов в окружающую среду. Водород-воздушные ТЭ с твердым полимерным электролитом (ТПЭ) и открытым катодом для подачи воздуха активно выходят на рынок энергоустановок малой мощности как легкие и энергоемкие источники питания, в частности, для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и робототехнических устройств [3–9]. Биполярные пластины (БП) являются основой биполярных элементов (БЭ), которые коммутируют отдельные топливные ячейки (ТЯ) в многоэлементной сборке батареи [10–14]. Потери напряжения при прохождении тока через БЭ должны быть минимальными, а сам элемент легким, прочным, устойчивым к механическим и коррозионным нагрузкам. Учитывая то, что БЭ составляют существенную долю от массы единичной ТЯ, именно характеристики этих элементов являются важными для реализации высоких

удельных характеристик батареи ТЭ с открытым катодом (более 1 кВт/кг). Актуальными являются исследования новых защитных покрытий и методов их формирования.

В данной работе исследованы коррозионностойкие покрытия на титановом БЭ, полученные при магнетронном распылении платиновой мишени, титановой мишени в среде реактивного газа, а также композитных мишеней. Впервые показана возможность получения эффективных низкоомных защитных покрытий на титановых БЭ ТЭ ТПЭ при магнетронном распылении графитовой мишени с вставками платины.

Магнетронная технология является промышленной и позволяет в одном технологическом процессе наносить покрытия на большие поверхности с предварительной ионной очисткой. Данная технология является надежной и экономичной, так как не требует использования реагентов и многостадийных процессов травления, нанесения и отмывки при получении покрытий.

<b>Список обозначений</b>	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
$\alpha_{(Pt/C + Pt)}$	Доля платины в зоне распыления составной мишени
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
$E$	Потенциал, В
$I_{кор}$	Сила тока коррозионного, мкА/см <sup>2</sup>
$k_{Pt}$	Коэффициент распыления Pt, мг/см мин
$k_C$	Коэффициент распыления C, мг/см мин
$m_{(Pt + C)}$	Удельная масса смешанного катализатора, мг/см <sup>2</sup>
$P$	Давление, Па
$R_{конт}$	Контактное сопротивление, Ом·см <sup>2</sup>
$t$	Продолжительность процесса распыления, мин
<i>Индексы нижние</i>	
конт	Контактное сопротивление
кор	Коррозия
<i>Аббревиатуры</i>	
DOE	Министерство энергетики США
БП	Биполярная пластина
БПЛА	Беспилотный летательный аппарат
БТЭ	Батарея топливных элементов
БЭ	Биполярный элемент
ВАХ	Вольтамперная характеристика
ГДЭ	Газодиффузионный электрод
МЭБ	Мембранно-электродный блок
СЭМ	Сканирующий электронный микроскоп
ТЭ ТПЭ	Топливный элемент с твердым полимерным электролитом
ТЯ	Топливная ячейка

## 2. Теоретический анализ

Материал для изготовления БЭ должен отвечать целому набору требований: высокая тепло- и электропроводность; высокая механической прочность; низкая плотность; минимальное контактное поверх-

ностное сопротивление на границе с газодиффузионным электродом (ГДЭ); низкая стоимость материалов; технологичность изготовления.

В табл. 1 представлены характеристики некоторых возможных материалов для изготовления БП.

Таблица 1

Физические характеристики материалов для изготовления БП ТЭ [15]

Table 1

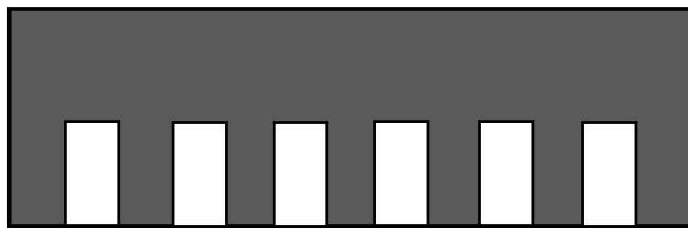
Physical characteristics of materials for the manufacture of bipolar plates of fuel cells [15]

Материал	Плотность	Модуль Юнга	Твердость по Бринеллю	Теплопроводность	Электро-сопротивление
	г/см <sup>3</sup>	ГПа	НВ	Вт/м·К	Ом·мм <sup>2</sup> /м
Алюминий	2,69	70	15	237	0,029
Медь	8,92	110	35	401	0,018
Сталь 316L	8,00	200	123	16	0,072
Титан	4,54	112	160	21,9	0,556
Графит	2,27	<11	392÷588	170/130(27 °С)	8

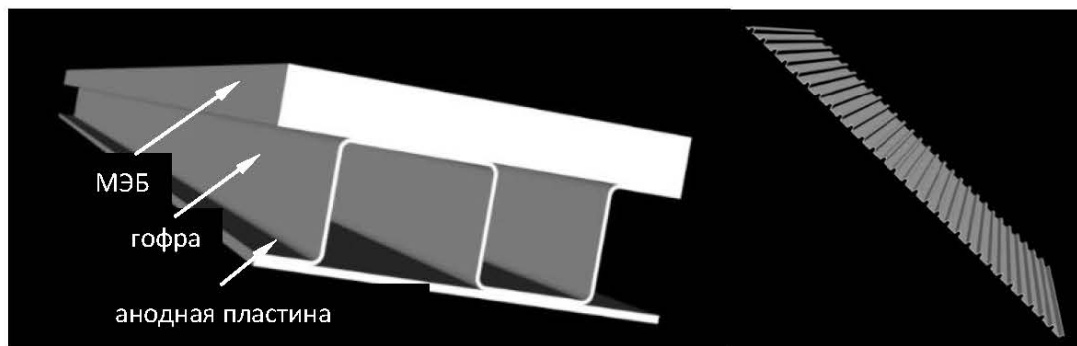
Анализ табл. 1 показал, что графит, наиболее дешевый и доступный материал, имеет ряд положительных свойств, которые способствовали его широкому применению в ранних моделях ТЭ. В частности, коэффициент теплопроводности графита относительно высок, несмотря на то что отличается в направлении, параллельном и перпендикулярном базисной плоскости. При рассмотрении графита в качестве материала БП нужно учитывать, что его механические свойства существенно хуже металлов, даже при введении пластификаторов. Причем раз-

рушение графита при механическом воздействии в первую очередь происходит вследствие перемещения базисных плоскостей относительно друг друга с разрывом слабых межслоевых связей. Модуль Юнга графита также является низким (максимальное значение 11 ГПа) [15].

Механические свойства графита не позволяют сделать из него тонкие и прочные биполярные пластины, при этом неизбежно часть канала для подачи воздуха занимает толстое ребро (рис. 1а).



а



б

Рис. 1 – Примеры изготовления БЭ из графита (а) и титана (б)

Fig. 1 – Examples of the manufacture of bipolar elements from graphite (a) and titanium (b)

Удельный вес единицы поверхности готового БЭ составляет 0,5÷0,8 г/см<sup>2</sup> при минимальных толщинах 4÷6 мм. В связи с этим масса БП на основе графита является значительной, что сказывается на массогабаритных характеристиках батареи ТЭ. Так, блок мощностью 1 кВт имеет массу около 4 кг только за счет массивных графитовых БП. Графит по сравне-

нию с металлами уступает и с точки зрения электропроводности, однако имеет относительно низкие значения контактного сопротивления на границе с ГДЭ, состоящим из углеродных волокон. Использование титана в качестве материала БП позволяет существенно повысить массовые удельные характеристики энергосистемы на основе водород-воздушных



ТЭ с открытым катодом. Это особенно важно для мобильных приложений, в частности в БПЛА.

Однако применение Ti может привести к существенным омическим потерям, так как сам титан не является лучшим проводником (проводимость в 30 ниже, чем у меди). Применение тонких сварных элементов позволяет избежать существенных омических потерь по телу БЭ, которые при плотности тока  $1 \text{ A/cm}^2$  оцениваются в 3 мВ). Более существенным может быть контактное поверхностное сопротивление на границе с тыльной стороной ГДЭ, через которую в ТЭ подается воздух (рис. 1b). Поверхность необработанного титана, например в виде фольги, покрыта толстым слоем оксида, который не позволяет эффективно использовать его в качестве материала БЭ без специальной обработки поверхности. Анализ предлагаемых научно-технических решений по нанесению защитных покрытий из патентной и библиографической литературы показал, что исследование покрытий на титане не представлено в достаточном объеме по сравнению с покрытиями на БЭ из стали [10]. БП, как правило, выполняются из тонких фольг титана ( $30\div 100 \text{ мкм}$ ) и покрываются защитными покрытиями на основе карбида титана, нитрида титана, а также серебра и ряда других [10, 16–19]. Такие покрытия должны остановить постепенное нарастание толщины пленки оксида титана и сопротивления при непосредственном контакте с поверхностью ГДЭ катода. Установлены основные требования к БП и защитным покрытиям [20] – коррозионная стойкость: ток коррозии  $\leq 1 \text{ мкА/см}^2$  после длительной поляризации в трехэлектродной ячейке при потенциале  $E = + 0,6 \text{ Ag/AgCl}$  в 0,01 ppm растворе HF после 24 часового контакта с воздухом (пассивный ток  $< 0,05 \text{ мкА/см}^2$ ); контактное поверхностное сопротивление  $0,02 \text{ МОм}\cdot\text{см}^2$  (при стандартном сжатии  $138 \text{ н/см}^2$ ).

Графит обычно используют в качестве материала БП, однако хрупкость графита вызывает сомнения в его долговечности [21–22]. Кроме того, механические свойства графита не позволяют сделать БП тонкими и прочными. Некоторые решения на основе графит-полимерных БП несколько снижают остроту этой проблемы [23]. Однако БТЭ энергоустановки остается в целом тяжелым и объемным, что неприемлемо для целого ряда мобильных приложений.

Защитные покрытия на основе углерода на стальных БП (например из стали 316L) позволяют выполнить батарею ТЭ более компактной, но ее масса в значительной степени зависит от используемого металла для изготовления БП и в этом случае остается высокой [24]. Так, удельный вес стали в 1,8 раза выше, чем у титана, и в 3 раза выше, чем у алюминия (см. табл. 1).

Алюминий – более легкий металл, но менее подходящий для изготовления БП, поскольку является более мягким и хуже переносит нагрузки при сжатии в батарее фильтр-прессом конструкции. Медь, самый электропроводный из представленных металлов,

также имеет высокий удельный вес, но является мягким материалом. Нержавеющая сталь коррозионно-стойкий и прочный металл, является хорошим проводником теплоты. Но БЭ на основе меди и нержавеющей стали при коррозионном воздействии могут быть источником ионов, которые отравляют катализатор и являются нежелательными для протонпроводящей мембраны.

Итак, применение титана в качестве материала БП позволяет существенно повысить удельные массовые характеристики ТЭ PEM FC, что особенно важно для их мобильных приложений. Титан имеет прекрасные механические свойства, высокую коррозионную устойчивость, малый удельный вес, что позволяет изготавливать тонкие, легкие и прочные сварные титановые БЭ. Это является важным, так как доля БЭ в БТЭ составляет около 80 % от его массы [25]. В качестве защитных покрытий на титане используются покрытия на основе углерода, нитрида титана [26]. В работе [27] исследованы потенциостатические значения тока коррозии TiN защитного покрытия на титане в растворе электролита на основе 0,5 М раствора  $\text{H}_2\text{SO}_4$  при 0,6 В (Ag/AgCl) в течение 8 часов. Показано, что коррозионная стойкость такого защитного покрытия почти на порядок выше, чем у Ti-подложки. Недостаток нитрида титана заключается в том, что безпористое покрытие в магнетроне можно получить только при толщинах, которые при сцеплении из-за различных механических свойств могут деформировать тонкие фольги из титана. В связи с этим приемлемые свойства покрытия по проводимости на начальной стадии эксплуатации ухудшаются ввиду нарастания оксида на поверхности титана под защитным покрытием.

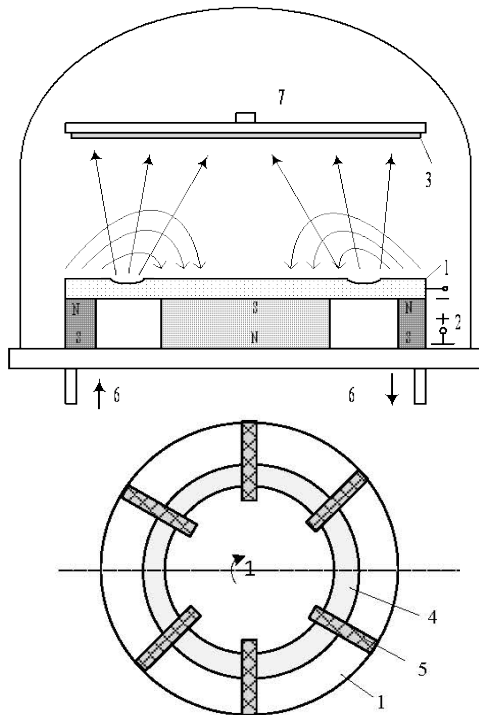
Ранее в [28–31] было показано, что распыление платины из массивной мишени и композитных С-Pt мишеней позволяет получать не только каталитические слои, но и тонкие плотные пленки, которые могут рассматриваться как защитные на поверхности БЭ на основе титана. В данной работе изучены многокомпонентные защитные покрытия на титане, полученные магнетронным распылением на установке Краудион-М-11/1 из композитных мишеней на основе титана, графита с вставками платины в виде волокон или полосок. Такие ультратонкие покрытия не изменяют механических свойств БЭ, изготовленных из тонких фольг, а присутствие в покрытии небольшого количества платины позволяет обеспечить защиту от окисления поверхности титановой основы.

### 3. Экспериментальная часть

#### 3.1. Методика нанесения защитных покрытий на титане

Защитные композиции С-Pt на титановой фольге получены на магнетронной установке Краудион-М-11/1 (ООО «ИОНТЕК-сервис») (рис. 2).





**Рис. 2** – Схема магнетронной установки системы при напылении защитного покрытия из композитной мишени: 1 – графитовая мишень; 2 – анод; 3 – подложка; 4 – зона распыления мишени; 5 – вставки из платины

**Fig. 2** – Diagram of the magnetron installation of the system during the deposition of a protective coating from a composite target: 1 – carbon target; 2 – anode; 3 – substrate; 4 – target sputtering zone; 5 – insert from platinum

В тороидальной зоне распыления DC-магнетрона в поле постоянного тока создавалась низкотемпературная плазма, и под воздействием бомбардировки ионов плазмообразующего газа ( $Ar^+$ ) материал мишени распылялся на подложку титана (титановая фольга марки ВТ-1-0). Для удаления оксида и очистки поверхности, титановая фольга подвергалась травлению в 50% серной кислоте при температуре 100 °С с последующей отмывкой водой. Для нанесения защитных С-Рt композиций на титановой фольге

в качестве основной мишени магнетрона использовали массивный графит, титан, платину, а также композитные мишени (С-Рt и С-Тi). Композитная мишень С-Рt представляла собой диск графита толщиной 6 мм и диаметром 100 мм (МЧ ООО «Гирмет») и сегментированных вставок Рt толщиной 1 мм. Размер вставки составлял 5 мм по ширине, а их число менялось от 2 до 6. Удельное содержание покрытия определяли взвешиванием на аналитических весах АВ600М-1х.

### 3.2. Определение структуры, состава и свойств защитных покрытий

Для исследования структуры и элементного состава образцов защитных покрытий С-Рt применялся растровый электронный микроскоп (РЭМ) JSM-6390 LA (JEOL USA, Inc.) с приставкой для энергодисперсионного анализа Oxford. Для получения дифрактограмм применяли дифрактометр Rigaku D/Max RC (CuK $\alpha$  излучение, графитовый кристалл-анализатор, фокусировка по Бреггу – Brentано) в шаговом режиме с шагом  $\Delta 2q = 0,05^\circ$  в интервале углов  $2q = 20-125^\circ$ .

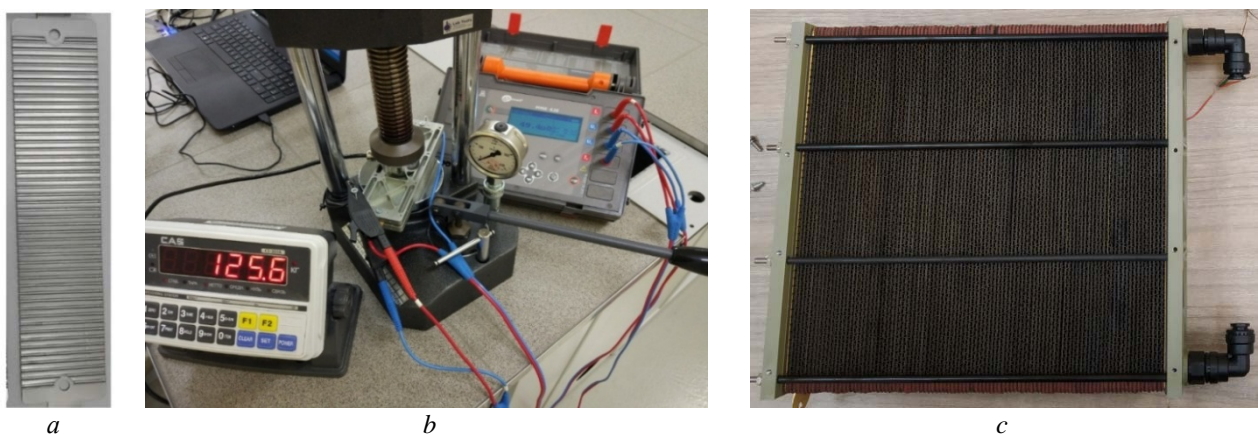
Определение толщины покрытия проводили по шаровому шлифу с помощью системы шарового истирания Calotest (CSM Instruments).

#### 3.2.1. Коррозионные исследования

В трехэлектродной электрохимической ячейке исследуемый образец выдерживали при  $E = 0,6$  В (ХСЭ) в 0,01 ppm растворе HF при 60 °С (использовали термостат). Для поляризации применяли потенциостат Solartron 1287. Ячейка непрерывно продувалась воздухом. После 2 ч поляризации определяли ток коррозии ( $I_{k1}$ ) (мкА/см $^2$ ).

#### 3.2.2. Определение контактного сопротивления

Контактное поверхностное сопротивление определяли с помощью четырехзондового метода измерения в ячейке с золотыми электродами при фиксированном сжатии БП (рис. 3).



**Рис. 3** – Определение поверхностного контактного сопротивления БЭ (а) на стенде 4-зондовым методом под давлением (b); БТЭ (с)  
**Fig. 3** – Determination of the surface contact resistance of the bipolar element (a) on the stand by the 4-probe method under pressure (b); fuel cell battery (c)



## 4. Результаты и их обсуждение

### 4.1. Исследование защитных покрытий на БП из титана ТЭ с протонпроводящими мембранами

В отличие от графитовых БЭ, использование титановой фольги при изготовлении БЭ позволяет расширить сечение для прохождения воздуха. Такой БЭ состоит из титановой гофры (толщиной от 50 мкм), которая приваривается к анодной пластине, выполненной также из титана (толщиной от 100 мкм (см. рис. 1b). Воздух проходит через гофры сварного БЭ, причем по одному из каналов он идет к тыльной части ГДЭ катода, а по другому – охлаждает анодную пластину. Анодная пластина разделяет потоки воздуха и водород, который с другой стороны контактирует с ГДЭ анода. БТЭ с ТПЭ представляет собой многоэлементную сборку, состоящую из однотипных ТЭ, электрически последовательно соединенных БЭ [24]. Сварной БЭ из титановой фольги, исследованный в данной работе, представлен на рис. 3b. При прохождении больших токов важно иметь низкое значение контактного поверхностного сопротивления на границе БЭ с тыльной стороной ГДЭ, через которую в ТЭ подается воздух. Сам титан является легким и прочным материалом, однако наличие на его поверхности окисной пленки повышает контактное сопротивление на границе «ГДЭ – гофра». Травление в кислоте снимает эту пленку, однако со временем она вновь образуется. В работе рассмотрены различные типы защитных покрытий, которые должны обеспечить выполнение требований по контактному поверхностному сопротивлению ( $\leq 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ) [20].

### 4.2. Покрытия титана на основе тонких пленок платины

Платина является благородным и дорогостоящим металлом, наличие которого в составе катализатора ТЭ с ТПЭ сегодня является неизбежным, если необходимо обеспечить высокие удельные характеристики источника питания и длительный ресурс. БЭ является не менее важной составной частью батареи ТЭ, поэтому использование тонких пленок платины на титане может решить задачу создания низкоомного и коррозионно-стойкого контакта на границе с мембранно-электродным блоком (МЭБ). С целью минимизации закладки платины необходимо, чтобы поверхность титана была ровной и подготовленной для нанесения тонкой плотной пленки из этого металла. Травление титана в растворе серной кислоты придает поверхности микрошероховатость, которая необходима для адгезии пленки к поверхности титана.

Как было указано, вакуумная магнетронная технология может обеспечить нанесение тонких пленок

дозированной толщины и необходимой плотной структуры. Однако, если для нанесения каталитических пленок необходима дисперсная структура, и для этого к плазмообразующему газу аргону добавляют реакционный газ – кислород [28, 30], то в случае получения тонких плотных защитных пленок необходима только аргоновая плазма. Микроструктура поверхности и природа защитного покрытия (платина) обеспечивают низкоомный контакт, а плотная пленка благородного металла защищает поверхность титана от коррозионного воздействия.

При магнетронном напылении мишени в зоне распыления образуются потоки атомного пара компонентов мишени, перемещающиеся в направлении подложки, на которой формируется тонкопленочное покрытие. Процесс роста пленки зависит от энергии частиц и идет в 2 этапа – от образования зародыша на поверхности подложки и дальнейшего его роста. При взаимодействии двух адсорбированных на поверхности подложки атомов, между ними может возникнуть химическая связь. Затем эти атомы могут объединяться в мелкие кластеры, присоединяя другие атомы, подходящие к подложке или мигрирующие по ее поверхности. Таким образом, на поверхности подложки формируется сеть кластеров, происходит их объединение и образование сплошной пленки.

В зависимости от скорости осаждения, природы и текстуры подложки, а также типа осаждаемого материала можно говорить о трех типах роста пленки: островковом, послонном или смешанном. Островковый механизм роста пленки превалирует, когда осаждаемые атомы взаимодействуют между собой сильнее, чем с атомами подложки. Послойный механизм роста преобладает при образовании больших по площади двумерных зародышей на поверхности подложки вследствие того, что атомы напыляемого материала имеют более сильную связь с атомами подложки, чем связь между собой. Смешанный тип роста имеет место, когда островки начинают расти уже после того, как сформируется пленка толщиной в несколько атомных слоев. Таким образом, структурные характеристики и свойства пленки определяются условиями и продолжительностью процесса ее формирования. На рис. 4 представлены увеличенные изображения таких защитных пленок на поверхности титана, полученных на магнетронной установке «Краудион».

Слева на рис. 4 показаны изображения титановой фольги после травления, а справа – образцы, покрытые тонкой пленкой платины (толщина около 0,05 мкм). Как видно, тонкие пленки практически не влияют на текстуру и микрошероховатость исходной поверхности, но покрывают ее тонким слоем платины. При применении данных пленок следует учитывать их стоимость.





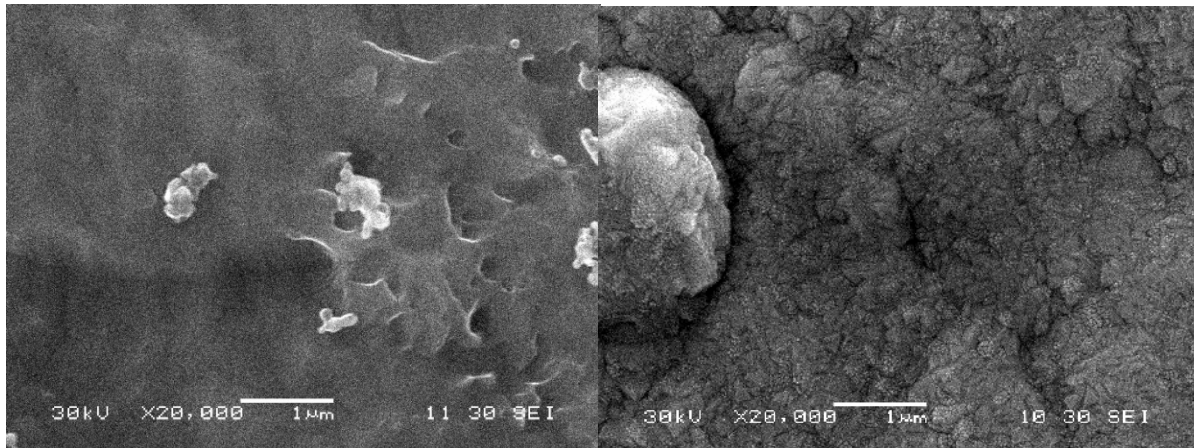


Рис. 4 – Поверхность титана, покрытая платиной (увеличение x20 000)  
 Fig. 4 – Platinum coated titanium surface (x20000 magnification)

Сводные данные по коррозионной устойчивости защитными покрытиями представлены в табл. 2. и контактному сопротивлению титановых БЭ с за-



Таблица 2

Сводные данные по образцам защитных покрытий

Table 2

Protective coating sample summary

Наименование покрытия на анодной пластине из титана	$R_{\text{конт}}$ , Ом·см <sup>2</sup>	$I_{\text{кор}}$ , мкА/см <sup>2</sup>	Длительное воздействие в коррозионной среде *
Требования DOE	0,02 Ом·см <sup>2</sup>	2 мкА/см <sup>2</sup>	
Титан до травления	2,23	6,45	–
Титан после травления в 50% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,357	3,3	–
Pt тонкопленочный на Ti фольге (после травления)	0,104	2,4	+
Покрытие на основе карбида титана (TiC/Ti)	10,9	2,255	+
Золото гальваническое на Ti	0,032	6,1	+

\* тест на длительное воздействие в коррозионной среде

#### 4.3. Покрытия на основе тонких пленок C-Pt композиций

Для подбора защитных покрытий БП ТПТЭ проведен подбор композитных мишеней и исследованы свойства полученных покрытий. Зона максимального распыления композитной мишени C-Pt в виде диска графита представляет кольцо в середине мишени, положение которого определяется магнитной системой магнетрона (см. рис. 2). Если в зону максимального распыления поместить вставку платины в виде нескольких пластинок (или проволок), то происходит совместное их распыление с материалом мишени (углерод). Изменяя содержание вставок платины в секционной мишени  $\alpha$  (Pt/C+Pt), можно получать защитные композиции C-Pt переменного состава. Для оценки удельного содержания компонентов  $m_s$  в каталитической композиции при распылении составной мишени, например C-Pt, можно использовать следующее соотношение:

$$m_{s(\text{Pt+C})} = [k_{\text{Pt}} \alpha_{(\text{Pt/C+Pt})} + k_{\text{C}} (1 - \alpha_{(\text{Pt/C+Pt})})] t, \quad (4)$$

где  $\alpha_{(\text{Pt/C+Pt})}$  – доля платины в зоне распыления составной мишени;  $k_{\text{Pt}}$  – коэффициент распыления Pt, мг/см мин;  $k_{\text{C}}$  – коэффициент распыления C, мг/см мин;  $m_{s(\text{Pt+C})}$  – удельная масса смешанного катализатора, мг/см<sup>2</sup>;  $t$  – продолжительность процесса распыления, мин.

Коэффициент распыления каждого из компонентов составной мишени магнетрона  $k_i$  зависит от их индивидуальных свойств и устойчивости при бомбардировке ионами плазмообразующего газа (аргона). Для исследований были приготовлены C-Pt- $n$ /Ti защитные покрытия из составной мишени при различном содержании количества вставок платины  $n$  в графитовую мишень ( $n = 2, 4, 6$ )  $\alpha_i = 0,06; 0,13; 0,19$ .

Характерные изображения C-Pt покрытий представлены на рис. 5

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

International Publishing House for scientific periodicals "Space"



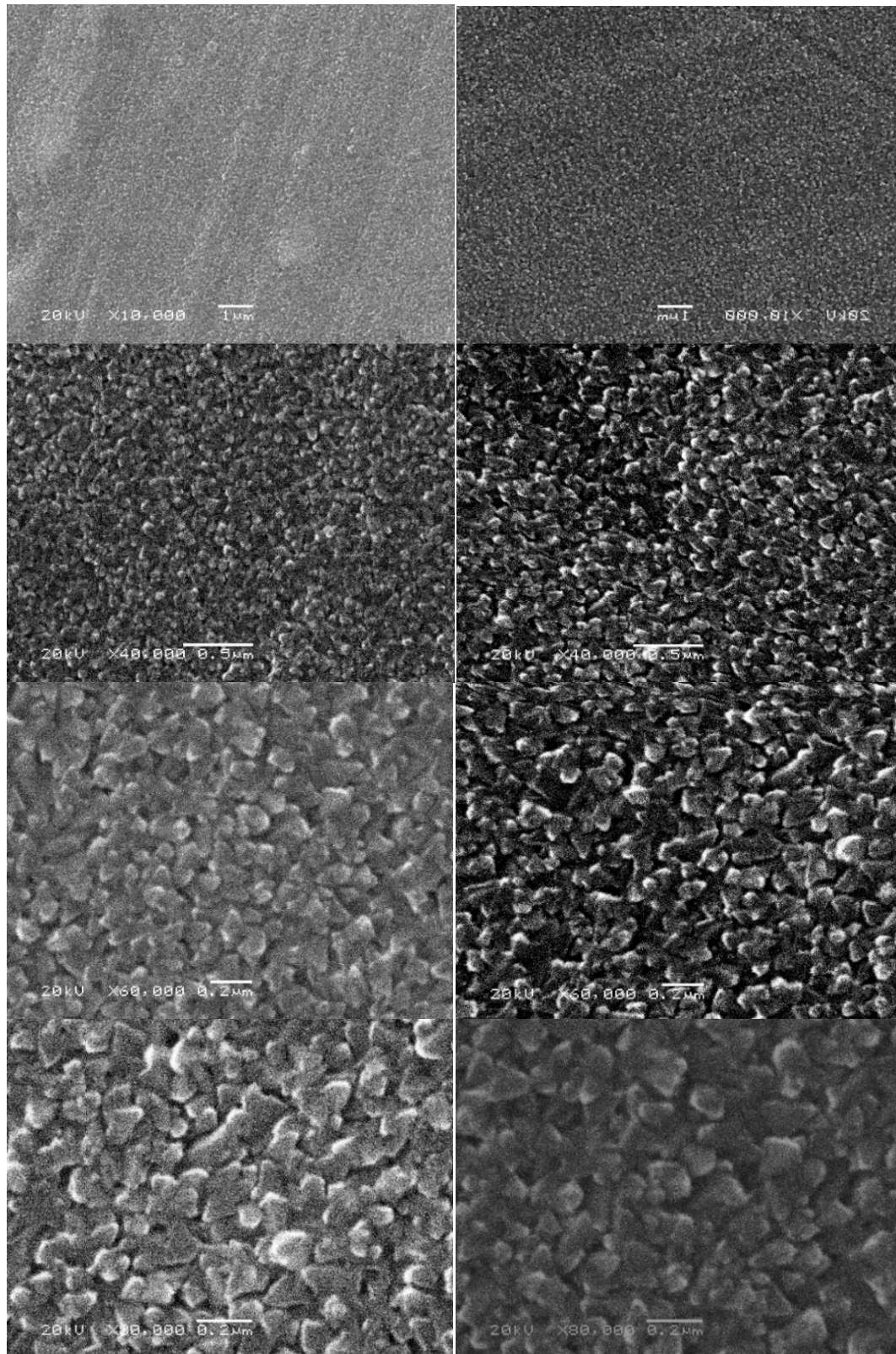


Рис. 5 – Изображения титановой фольги с удаленным оксидом (слева) и с защитным композитным покрытием C-Pt (0,05 мкм)  
Fig. 5 – Images of titanium foil with oxide removed (left) and with a protective composite coating C-Pt (0.05 μm)

Параметры полученных защитных композиций C-Pt приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры полученных защитных композитных (С-Pt) покрытий на титане

Table 3

The parameters of the obtained protective composite (C-Pt) coatings on titanium

Требования DOE			0,02 Ом·см <sup>2</sup>	2 мкА/ см <sup>2</sup>
Образец	$\alpha$ (Pt/C+Pt)	$m_{s(Pt)}^*$ /см <sup>2</sup>	$R_{\text{конт}}$ , Ом см <sup>2</sup>	$I_{\text{кор}}$ , мкА/ см <sup>2</sup>
C/Ti	0	–	1,950	0,925
C-Pt-2 /Ti	0,06	0,08	0,960	0,9
C-Pt-4 /Ti	0,13	0,12	0,140	0,8
C-Pt-6 /Ti	0,19	0,18	0,054	0,7
C-Pt-8 /Ti	0,24	0,21	0,075	0,57
Pt/Ti	1	1,315	0,104	2,4

\*расчетное значение исходя из индивидуальных коэффициентов распыления Pt и С

Приведенные в табл. 3 данные позволяют оценить влияние индивидуальных свойств Pt и С при распылении композитной мишени. Снижение удельной скорости распыления мишени будет тем больше, чем ниже содержание платины в композитной С-Pt мишени. Это вызвано тем, что индивидуальный коэффициент распыления у платины в плазме аргона с учетом ее удельного веса выше по сравнению с углеродом в 3,9 раза. Дифрактометрия образцов Pt-С на титановой подложке (табл. 4) позволила получить информацию о характерном размере доменов, формирующих пленку.

Обнаружено, что совместное распыление Pt и С приводит к изменению характерных размеров образующихся доменов от 25 нм на чистой платине при  $\alpha$  (Pt/C+Pt) = 1 до 5,6 нм при  $\alpha$  (Pt/C+Pt) = 0,06, то есть само присутствие углерода в совместном потоке атомов к подложке приводит к снижению размеров характерных доменов покрытия, формирующегося на подложке титана. Оксиды платины в пленках не обнаружено. Таким образом, установлено, что размеры частиц Pt зависят от условий напыления катализатора из составной С-Pt мишени.

Таблица 4

Данные рентгенографического анализа

Table 4

X-ray analysis data

	$\alpha$	1	0,19	0,13	0,06
$\gamma = 0$	Фазовый состав	Pt	Pt	Pt	Pt
	$D$ , нм*	19,8(6)	15,1(2)	4,1(3)	4,0(3)

\* $D$  – средний диаметр сферического когерентно-рассеивающего домена

Как видно в табл. 3, при увеличении доли платины снижается сила тока коррозии, а контактное сопротивление защитных композитных С-Pt покрытий на титановой фольге имеет экстремальный характер. Видимо, здесь влияет размер доменов, которые формируют пленку, в том числе, за счет того, что частицы, формирующие покрытие, становятся более мелкими. Кроме того, тонкопленочное платиновое покрытие на титане имеет большее значение силы тока коррозии, чем у композиций С-Pt. Это также может быть связано с тем, что защитную пленку на основе С-Pt покрытия образуют более мелкие частицы, и покрытие получается более плотным и функциональным.

#### 4.2.2. Покрытия на основе карбида титана (TiC)

Представляло интерес заменить платину в составе защитного покрытия на другой более дешевый металл, например, титан. Покрытия на основе карбида титана (TiC) получали в магнетронной установке путем распыления титановой мишени в атмосфере

плазмообразующего газа аргона с добавками реактивного газа диоксида углерода. Пленки получались черного цвета с равномерным распределением. Однако (см. табл. 3) контактные поверхностные сопротивления оказались значительно выше требуемых, несмотря на то что сила тока коррозии была близка к требуемому диапазону.

## 5. Заключение

В многоэлементной сборке последовательно соединенных ТЭ протекает электрический ток и, соответственно, возникают омические потери как при переносе тока в ГДЭ, материале БП, ионного тока в протонпроводящей мембране, так и на границах фаз, где возникают контактные сопротивления. Контактные поверхностные сопротивления на границе БП могут существенно отличаться при использовании различных материалов БП и защитных покрытий на ее поверхности.

Результаты исследования композитных защитных покрытий на БП из титана для ТЭ с протонпроводящими мембранами показали, что с помощью магнетронных технологий можно получить покрытия с близкими к требуемым характеристикам по поверхностному контактному сопротивлению и коррозионной устойчивости.

Композитные защитные покрытия на основе углерода с микродобавками платины (C-Pt) обладают высокими эксплуатационными свойствами (низкие значения тока коррозии и поверхностного контактного сопротивления) и являются менее дорогими по сравнению с покрытиями на основе сплошных пленок благородных металлов.

#### Благодарности

Авторы выражают благодарность Левину И.И. (ООО «ИОНТЕК-сервис») за консультации по процессам напыления на магнетроне и Левину Э.Е. (Московский государственный университет) за данные рентгенографических исследований.

#### Acknowledgments

The authors are grateful to I.I. Levin. (IONTEK-service LLC) for consultations on the processes of sputtering on a magnetron and Levin E.E. (Moscow State University) for X-ray data.

#### Список литературы

- [1] Thompson, S.T. Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high volume manufacturing description, validation, and outlook / S.T. Thompson et al. // Journal of Power Sources. – 2018. – Vol. 399 – P. 304–313.
- [2] Lapeña-Reya, N. A fuel cell powered unmanned aerial vehicle for low altitude surveillance missions/ N. Lapeña-Reya [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42 – P. 6926–6940.
- [3] Atkinson, R.W. An Open-Cathode Fuel Cell for Atmospheric Flight / R.W. Atkinson [et al.] // Journal of the Electrochemical Society. – 2017. – Vol. 164. – P. 46–54.
- [4] Pan, Z.F. Recent advances in fuel cells based propulsion systems for unmanned aerial vehicles / Z.F. Pan [et al.] // Applied Energy. – 2019. – Vol. 240. – P. 473–485.
- [5] Schmitz, A. Influence of cathode opening size and wetting properties of diffusion layers on the performance of air-breathing PEMFCs / A. Schmitz [et al.] // J. Power Sources. – 2006. – Vol. 154. – P. 437–447.
- [6] Fernández-Moreno, J. A portable system powered with hydrogen and one single air-breathing PEM fuel cell / J. Fernández-Moreno [et al.] // Appl. Energy. – 2013. – Vol. 109. – P. 60–66.
- [7] Gadalla, M. Analysis of a hydrogen fuel cell-PV power system for small UAV / M. Gadalla, S. Zafar // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 41. – P. 6422–6432.
- [8] Баранов, И.Е. Самоувлажняющийся портативный топливный элемент для авиации и робототехники / И.Е. Баранов [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2015. – № 21. – С. 137–144.
- [9] Sasmito, A.P. Optimization of an open-cathode polymer electrolyte fuel cells stack utilizing Taguchi method / A.P. Sasmito [et al.] // Appl. Energy – 2017. – Vol. 185. – P. 1225–1232.
- [10] Taherian, R. A review of composite and metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cell: Materials, fabrication, and material selection / R. Taherian // Journal of Power Sources. – 2014. – Vol. 265. – P. 370–390.
- [11] Marcinkoski, J. Progress in the US DOE fuel cell subprogram efforts in polymer electrolyte fuel cells / J. Marcinkoski, J.P. Kopasz, T.G. Benjamin // International Journal of Hydrogen Energy. – 2008. – Vol. 33. – No. 14. – P. 3894–3902.
- [12] Fukutsuka, T. Carbon-coated stainless steel as PEFC bipolar plate material / T. Fukutsuka [et al.] // J. Power Sources. – 2007. – Vol. 174. – No. 1. – P. 199–205.
- [13] Feng, K. Ni–Cr Co-implanted 316L stainless steel as bipolar plate in polymer electrolyte membrane fuel cells / K. Feng [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – Vol. 35. – No. 2. – P. 690–700.
- [14] Григорьев, С.А. Электрохимические системы с твердым полимерным электролитом / С.А. Григорьев // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2014. – № 10. – С. 8–26
- [15] Григорьев, И.С. Справочник «Физические величины» / И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов. – Энергоатомиздат, 1991. – С. 1232.
- [16] Matsuura, T. Study on metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell / T. Matsuura, M. Kato, M. Hori // J. Power Sources. – 2006. – Vol. 161. No. 1. – С. 161.
- [17] Hermann, A. Bipolar plates for PEM fuel cells: A review / A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol // International Journal of Hydrogen Energy. – 2005. – Vol. 30. – P. 1297.
- [18] Tsuchiya, H. Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve / H. Tsuchiya, O. Kobayashi // International Journal of Hydrogen Energy. – 2004. – Vol. 29. – No. 10. – P. 985–990.
- [19] Алексеева, О.К. Применение метода ионного магнетронного распыления для синтеза наноструктурных катализаторов / О.К. Алексеева, В.Н. Фатеев // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2015. – №7. – С. 14–36.
- [20] DOE Technical Targets for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Components [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-polymer-electrolyte-membrane-fuel-cell-components> – (Дата обращения: 14.01.20).
- [21] Hentall, P.L. New materials for polymer electrolyte membrane fuel cell current collectors / P.L. Hentall [et al.] // J. Power Sources. – 1999. – Vol. 80. – P. 235–241.



[22] Scholta, J. Investigations on novel low-cost graphite composite bipolar plates / J. Scholta [et al.] // *J. Power Sources*. – 1999. – Vol. 84. – P. 231–234.

[23] Husby, H., Carbon-polymer composite coatings for PEM fuel cell bipolar plates / H. Husby [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – Vol. 39. – No. 2. – P. 951–957.

[24] Wang, W.-L. Protective graphite coating on metallic bipolar plates for PEMFC applications / Wang W.-L., He S.-M., Lan Ch.-H. // *Electrochimica Acta*. – 2012. – Vol. 62. – P. 30–35.

[25] Tsuchiyaa, H. Mass production cost of PEM fuel cell by learning / H. Tsuchiyaa, Q. Kobayashi // *J. Hydrogen Energy*. – 2004. – Vol. 29. – P. 985–990.

[26] Zhang, D. TiN-coated titanium as the bipolar plate for PEMFC by multi-arc ion plating / D. Zhang [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2011. – Vol. 36. – No. 15. – P. 9155–9161.

[27] Duan, L. Corrosion behavior of TiN-coated titanium as bipolar plates for PEMFC by multi-arc ion plating China / L. Duan [et al.] // *J. Nonferrous Metals*. – 2011. – Vol. 21. – No. 1. – P. 159–164.

[28] Nefedkin, S.I. Investigation of catalytic vacuum black in the electrodes low-temperature electrochemical devices / S.I. Nefedkin [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2011. – Vol. 291. – No. 1. – P. 012003.

[29] Nefedkin, S.I. Electrochemical properties of thin-film Ti/Ir electrodes / S.I. Nefedkin [et al.] // *Soviet Electrochemistry*. – 1988. – Vol. 24. – No. 3. – P. 371–374.

[30] Nefedkin, S.I., Catalytically Active Platinum Blacks Prepared by Magnetron Sputtering in Vacuum and Their Using in Fuel Cells with Solid Polymer Electrolyte / S.I. Nefedkin [et al.] // *Russian Journal of Electrochemistry*. – 2014. – Vol. 50. – No. 7. – P. 617–624.

[31] Nefedkin, S.I. Pt- and Ir- based disperse catalysts synthesizes in a magnetron for water electrolyzes with solid polymer electrolyte Russian / S.I. Nefedkin [et al.] // *Russian Journal of Electrochemistry*. – 2017. – Vol. 53. – No. 3. – C. 284–291.

## References

[1] Thompson S.T. Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: System and high-volume manufacturing description, validation, and outlook. *Journal of Power Sources*, 2018;399:304–313.

[2] Lapeña-Reya N., Blanco J.A., Ferreyra E., Lemusa J.L., Pereira S., Serrota E. A fuel cell powered unmanned aerial vehicle for low altitude surveillance missions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017;42:6926–6940.

[3] Atkinson R.W., Hazard M.W., Rodgers J.A., Stroman R. O., Gould B. D. An Open-Cathode Fuel Cell for Atmospheric Flight. *Journal of the Electrochemical Society*, 2017;164:46–54.

[4] Pan Z. F., An L., Wen C.Y. Recent advances in fuel cells based propulsion systems for unmanned aerial vehicles. *Applied Energy*, 2019;240:473–485.

[5] Schmitz A., Tranitz M., Eccarius S., Weil A., Hebling C. Influence of cathode opening size and wetting properties of diffusion layers on the performance of air-breathing PEMFCs. *J. Power Sources*, 2006;154:437–447.

[6] Fernández-Moreno J., Guelbenzu G., Martín A., Folgado M., Ferreira-Aparicio P., Chaparro A. A portable system powered with hydrogen and one single air-breathing PEM fuel cell. *Appl. Energy*, 2013;109:60–66.

[7] Gadalla M., Zafar S. Analysis of a hydrogen fuel cell-PV power system for small UAV. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016;41:6422–6432.

[8] Baranov I.E., Fateev V.N., Porebsky V.I., Akselkina S.V., Lyutikova E.K. Themselves saturated a portable hydrogen-air fuel cell for aviation and robotics (Samouvlazhnyayushchiysya portativnyi toplivnyi element dlya aviatsii i robototekhniki). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2015;21(185):137–144 (in Russ.).

[9] Sasmito A.P., Kurnia J.C., Shamim T., Mujumdar A.S. Optimization of an open-cathode polymer electrolyte fuel cells stack utilizing Taguchi method. *Appl. Energy*, 2017;185:1225–1232.

[10] Taherian R. A review of composite and metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cell: Materials, fabrication, and material selection. *Journal of Power Sources*, 2014;265:370–390.

[11] Marcinkoski J., Kopasz J.P., Benjamin T.G. Progress in the US DOE fuel cell subprogram efforts in polymer electrolyte fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008;33:3894–3902.

[12] Fukutsuka T., Yamaguchi T., Miyano SI, Matsuo Y, Sugie Y, Ogumi Z. Carbon-coated stainless steel as PEFC bipolar plate material. *J. Power Sources*, 2007;174(1):199–205.

[13] Feng K., Shen Y., Liu D., Chu P.K., Cai X. Ni-Cr Co-implanted 316L stainless steel as bipolar plate in polymer electrolyte membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010;35(2):690–700.

[14] Grigoryev S.A. Hydrogen electrochemical systems with solid polymer electrolyte (Elektrokhimicheskie sistemy s tverdyim polimernym elektrolitom). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2014;10(150):8–26 (in Russ.).

[15] Grigoriev I.S., Meilikhov E.Z. Handbook Physical quantities (Spravochnik "Fizicheskie velichiny"). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1991; 1232 p. (in Russ.).

[16] Matsuura T., Kato M., Hori M. Study on metallic bipolar plate for proton exchange membrane fuel cell. *J. Power Sources*, 2006;161(1):74–78.

[17] Hermann A., Chaudhuri T., Spagnol P. Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004;30:1297.

[18] Tsuchiya H., Kobayashi O. Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004;29:985–990.

[19] Alexeeva O.K., Fateev V.N. Application of the magnetron sputtering for nanostructured electrocatalysts synthesis (Review) (Primenenie metoda ionnogo magnetronnogo raspyleniya dlya sinteza nanostrukturnykh ka-



talizatorov). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2015;7(171):14–36 (in Russ.).

[20] DOE Technical Targets for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Components [E-resource]. Available on: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-polymer-electrolyte-membrane-fuel-cell-components> (01/14/20).

[21] Hentall P.L., Lakeman J.B., Mepsted G.O., Adcock P.L., Moore J.M. New materials for polymer electrolyte membrane fuel cell current collectors. *J. Power Sources*, 1999;80:235–41.

[22] Scholta J., Rohland B., Trapp V., Focken U. Investigations on novel low-cost graphite composite bipolar plates. *J. Power Sources*, 1999;84:231–234.

[23] Husby H., Kongstein O.E., Oedegaard A., Seland F. Carbon-polymer composite coatings for PEM fuel cell bipolar plates. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014;39(2):951–957.

[24] Wang W.-L., He Sh.-M., Lan Ch.-H. Protective graphite coating on metallic bipolar plates for PEMFC applications. *Electrochimica Acta*, 2012;62:30–35.

[25] Tsuchiyaa H., Kobayashi O. Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004;29:985–990.

[26] Zhang D., Du L., Guoa L., Wang Z., Zhao J., Tuan Wei-Hsing, Niiharac K. TiN coated titanium as the

bipolar plate for PEMFC by multi-arc ion plating. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011;36(15):9155–9161.

[27] Duan L., Zhang D., Guo L., Wang Z. Corrosion behavior of TiN-coated titanium as bipolar plates for PEMFC by multi-arc ion plating. *J. Nonferrous Metals*, 2011;21(1):159–164.

[28] Nefedkin S.I., Holichev O.V., Bogomolova A.S., Kiselev I.V., Sedelnikov N.G., Fatyushin A.M., Investigation of catalytic vacuum black in the electrodes low-temperature electrochemical devices. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011;291(1):012003.

[29] Nefedkin S.I., Korovin N.V., Gladkikh I.P., Mansurov G.N., Petrii O.A. Electrochemical properties of thinfilm Ti/Ir electrodes. *Soviet Electrochemistry*, 1988;24(3):371–374.

[30] Nefedkin S.I., Kholichev O.V., Pavlov V.I., Bogomolova A.S., Sedel'nikov N.G., Gerasimova E.V., Dobrovol'skii Ya.A. Catalytically active platinum blacks prepared by magnetron sputtering in vacuum and their using in fuel cells with solid polymer electrolyte. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2014;50(7):617–624.

[31] Nefedkin S.I., Klimova M.A., Kolomeitseva E.A., Klochnev M.K., Levin E.E., Petrii O.A., Pt- and Ir-based disperse catalysts synthesizes in a magnetron for water electrolyzes with solid polymer electrolyte, *Russian Journal of Electrochemistry*, 2017;53(3):284–291.

Транслитерация по BSI



### ECOpole'20 Conference Chemical substances in the environment

We have the honour to invite you to take part in the 29th annual Central European Conference ECOpole'20, which will be held in 7-10. X. (Wednesday-Saturday) 2020 in Hotel Wolski in Kraków (PL).

The Conference Programme includes oral presentations and posters and will be divided into four sections:

- SI Chemical Pollution of Natural Environment and its Monitoring
- SI SII Environment Friendly Production and Use of Energy
- SI SIII Forum of Young Scientists and Environmental Education in Science
- SI SIV Impact of Environment Pollution on Food and Human Health

Contributions to the Conference will be published as:

- abstracts on the CD-ROM (0.5 page of A4 paper sheet format)
- papers in the semi-annual journal Proceedings of ECOpole – the deadline for sending them is 1st October 2020.
- papers will be also published in successive issues of the Ecological Chemistry and Engineering/Chemia i Inżynieria Ekologiczna (Ecol. Chem. Eng.) ser. A or S.

We propose to publish the best presentations in the journal Ecological Chemistry and Engineering S (its IF2019 = 1.467).

The deadline for sending the Abstracts is 15th July 2020. The actualized list (and the Abstracts) of the Conference contributions accepted for presentation by the Scientific Board, one can find (starting from 31 July 2020) on this site.

We would like to tell you that the registration is opened and till the 15th of July Conference fee is reduced not only for young scientists, but for all the participants – please visit page:

<https://ecesociety.com/deadlines-and-fees/>

After the ECOpole'20 Conference it will be possible to publish electronic version of presented contributions (oral presentations as well as posters) on this website.

<https://ecesociety.com/>

