

успешно адаптирован и в других учреждениях среднего специального образования Республики Беларусь и региона в целом.

Список использованных источников

1. Удалов, С. Н. Возобновляемая энергетика : учеб. пособие для вузов по направлению подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» / С. Н. Удалов. – 2-е изд., испр. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 624 с. – ISBN 978-5-9729-2068-6.
2. Денисов, В. В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : учеб. пособие для студентов вузов / В. В. Денисов, В. В. Гутенев, И. А. Денисова [и др.] ; под ред. В. В. Денисова. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2015. – 318 с. – ISBN 978-5-222-22949-1.
3. Государственная программа «Энергосбережение» на 2021–2025 годы : постановление Совета Министров Республики Беларусь, 24 февраля 2021 г., № 103 / Совет Министров Республики Беларусь. – Минск : Департамент по энергоэффективности, 2021. – 48 с.

УДК 621.793:539.234:539.534.9

В.В. Поплавский, О.Г. Бобрович, А.В. Дорожко, В.Г. Матыс
Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРОВ И МЕМБРАННО-ЭЛЕКТРОДНЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

***Аннотация.** Разработана лабораторная технология формирования электрокатализаторов и мембранно-электродных блоков для топливных элементов прямого окисления этанола и метанола с полимерным мембранным электролитом.*

V.V. Poplavsky, O.G. Bobrovich, A.V. Dorozhko, V.G. Matys
Belarusian State Technological University
Minsk, Belarus

FORMATION OF ELECTROCATALYSTS AND MEMBRANE-ELECTRODE ASSEMBLIES FOR FUEL CELLS

***Abstract.** A laboratory technology for the formation of electrocatalysts and membrane-electrode assemblies for direct ethanol and methanol fuel cells with a polymer membrane electrolyte has been developed.*

Топливные элементы с полимерным мембранным электролитом перспективны для применения на транспорте и в стационарных установках небольшого размера, предназначенных для обеспечения резервного или автономного электропитания. Преимущественно разрабатываются элементы, в которых в качестве топлива используется водород. Ведутся также исследования по созданию топливных элементов прямого окисления органических спиртов – метанола и этанола. Применение спирта вместо водорода позволяет снять проблему получения, очистки, хранения и распределения водорода, упростить систему подачи топлива.

Основным компонентом ячейки топливного элемента является мембранно-электродный блок, который состоит из полимерного мембранного электролита и контактирующих с ним каталитических, а также диффузионных слоев из пористых металлических или специальных углеродных материалов с развитой поверхностью, через которые осуществляются подвод топлива и окислителя, токосъем, а также отвод продуктов электрохимических реакций. В стоимости топливного элемента мембранно-электродный блок составляет 76,6 %, а электрокатализаторы – 57 % [1].

Разработана лабораторная технология формирования электрокатализаторов, в основе которой осаждение каталитического металла на носитель в вакуумных условиях, а именно ионно-ассистированное осаждение металлов из плазмы вакуумного дугового разряда в режиме, при котором в качестве ассистирующих процессу осаждения используются ионы осаждаемого металла [2]. Осаждение металла и перемешивание осаждаемого слоя с поверхностным слоем подложки ускоренными ионами того же металла осуществляются в экспериментальной установке, соответственно, из нейтральной фракции пара и плазмы разряда импульсного электродугового ионного источника. Метод осаждения отличается экономичностью, экологичностью и универсальностью, позволяет вводить атомы любого металла в неравновесных условиях обработки ускоренными ионами в приповерхностный слой любого материала.

С учетом механизма окисления топлива разработаны составы и режимы формирования электрокатализаторов. Многостадийный процесс окисления спиртов включает электрохимическую адсорбцию молекул спирта, их разложение путем последовательного дегидрирования в адсорбированном состоянии, образование

адсорбированных молекул оксида углерода CO_{ads} и их последующее удаление при взаимодействии с хемосорбированными молекулами воды либо с группами OH_{ads} [1]. Разложение адсорбированных на электрокатализаторе молекул с образованием ионов водорода, электронов и адсорбированного CO_{ads} эффективно катализируется платиной. Но для окисления образующихся на промежуточной стадии и блокирующих поверхность адсорбированных молекул CO_{ads} до CO_2 и их удаления с поверхности электрокатализатор должен наряду с платиной содержать компонент, на котором легче протекает адсорбция молекул воды или радикалов OH . В качестве таких компонентов исследуются добавки различных металлов, в том числе композиции платины с редкоземельными металлами [3].

В качестве носителей электрокатализаторов выбраны специальные углеродные материалы AVCarb[®] Carbon Fiber Paper P50 (AVCarbCFP) и Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T (TorayCFP), предназначенные для изготовления диффузионных слоев мембранно-электродных блоков топливных элементов с полимерным мембранным электролитом. С учетом механизма окисления топлива разработаны составы электрокатализаторов и режимы ионно-ассистированного осаждения. Формирование каталитических слоев проводили путем поочередного осаждения платины и одного из редкоземельных металлов (Ce, Gd, Dy, Ho, Yb) в качестве способствующей повышению активности добавки. Аналогичные каталитические слои формировали также на каждой из поверхностей полимерного мембранного электролита DuPont[™] Nafion[®] N 115 [4]. Ускорение ассистирующих ионов осуществляется напряжением 5 кВ. В рабочей камере поддерживается вакуум $\sim 10^{-2}$ Па. Процесс осаждения проводится при комнатной температуре.

Микроструктура и состав формируемых слоев исследованы с применением следующих аналитических методов: сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионного рентгеновского микроанализа, рентгеновского флуоресцентного анализа и спектрометрии резерфордского рассеяния. В состав слоев входят атомы осаждаемых металлов, материала носителя – углерод, фтор, а также примеси кислорода, поступающего из остаточной атмосферы рабочей камеры. Имеет место ионное перемешивание атомов металлов с атомами материала носителя, всех компонентов формируемого слоя, а также частичное распыление предварительно сформированного слоя. По данным спектрометрии резерфордского рассеяния (рис. 1) содержание атомов каждого из осажденных металлов в формируемых

слоях $\sim(1.2\text{--}2.4)\times 10^{16}\text{ см}^{-2}$. Толщина получаемых легированных металлами слоев $\sim 30\text{ нм}$.

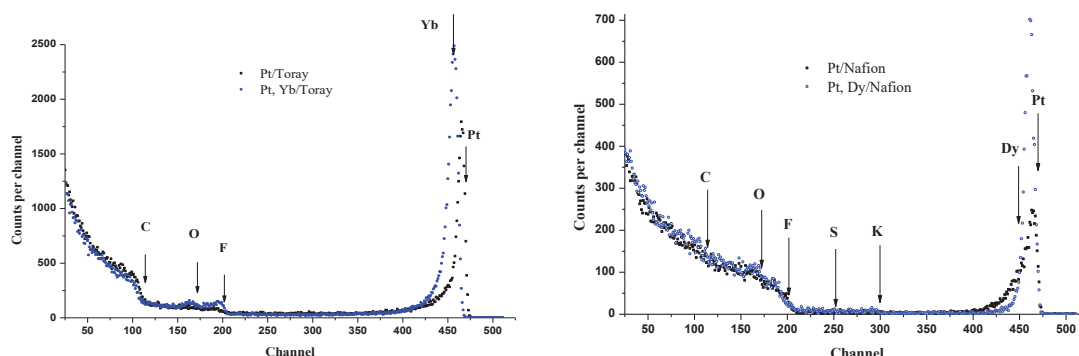


Рис. 1- Спектры резерфордского рассеяния ионов ^4He на ядрах атомов элементов, входящих в состав поверхности электрокатализаторов, сформированных ионно-ассистируемым осаждением металлов на носители Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T и Nafion[®] N 115

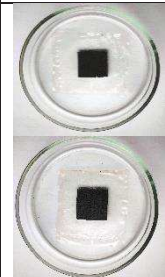
Активность электрокатализаторов с полученными каталитическими слоями исследована в реакциях электрохимического окисления этанола и метанола методом циклической вольтамперометрии соответственно в растворах $1\text{ М C}_2\text{H}_5\text{OH} + 0,5\text{ М H}_2\text{SO}_4$ и $1\text{ М CH}_3\text{OH} + 0,5\text{ М H}_2\text{SO}_4$ при $20\text{ }^\circ\text{C}$. Электрокатализаторы, сформированные на основе углеродных носителей ионно-ассистируемым осаждением платины, платины и одного из редкоземельных металлов в качестве активирующей добавки в предложенном режиме, отличаясь очень низким (менее $0,01\text{ мг/см}^2$) содержанием платины, проявляют активность процессах окисления органических спиртов – метанола и этанола.

Установлена закономерность влияния активирующих редкоземельных металлов (Ce, Gd, Dy, Ho, Yb) в качестве добавок на активность платиносодержащих электрокатализаторов, формируемых посредством ионно-ассистируемого осаждения металлов на углеродные носители AVCarb[®] Carbon Fiber Paper P50 и Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T, в реакциях окисления этанола и метанола, заключающегося в удалении адсорбированных продуктов реакции на промежуточной стадии окисления топлива вследствие активации молекул воды или гидроксильных групп и в увеличении активности электрокатализаторов. Введение в состав каталитического слоя наряду с платиной добавки редкоземельного металла способствует удалению адсорбированного CO_{ads} , который блокирует поверхность и препятствует дальнейшему протеканию реакции. Отличительной особенностью получаемых электрокатализаторов является их более высокая активность в процессе окисления более сложных молекул

этанола, где требуется разрыв связи С–С, по сравнению с метанолом [5], в то время как на традиционноготавливаемых катализаторах имеет место обратная зависимость.

Разработаны режимы формирования мембранно-электродных блоков на основе углеродных диффузионных слоев и мембранного полимерного электролита посредством горячего прессования сборки из электрокатализаторов анодного и катодного процессов. В табл. 1 приведены примеры изготовленных экспериментальных образцов мембранно-электродных блоков для топливных элементов на основе мембранного полимерного электролита DuPont[™] Nafion[®] N 115 и электрокатализаторов на основе диффузионных слоев из углеродных носителей AVCarb[®] Carbon Fiber Paper P50 и Toray Carbon Fiber Paper TGP-H-060 T с площадью рабочей поверхности 5 см² (размерами 22,4×22,4 мм²).

Таблица 1 – Экспериментальные образцы мембранно-электродных блоков

МЭБ	Анод	Электролит	Катод	
1.	Pt, Dy/TorayCFP	Pt, Dy/Nafion	Pt/TorayCFP	
2.	Ce, Pt/TorayCFP	Nafion	Ce, Pt/TorayCFP	
3.	Ho, Pt/TorayCFP	Ho, Pt/Nafion	Pt/TorayCFP	
4.	Pt, Yb/TorayCFP	Nafion	Pt/TorayCFP	
5.	Dy, Pt/TorayCFP	Nafion	Dy, Pt/TorayCFP	
6.	Gd, Pt/AVCarbCFP	Nafion	Pt/AVCarbCFP	
7.	Gd, Pt/TorayCFP	Gd, Pt/Nafion	Pt/TorayCFP	

Прессование каждой сборки проводили при температуре 140 °С и давлении 8 МПа в течение 4 мин. Окончательные размеры мембраны и крепежные отверстия в ней получали затем путем обрезки и прошивки в специальном стальном кондукторе с размерами рабочей ячейки.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об эффективности применения технологии ионно-ассистируемого осаждения металлов из плазмы, вакуумного дугового разряда, генерируемой в парах металла, при формировании электрокатализаторов с последующим изготовлением мембранно-электродных блоков для топливных элементов окисления этанола и метанола. В сравнении с традиционными многостадийными методами приготовления нанесенных катализаторов (пропитка носителя растворами соединений каждого из осаждаемых металлов, их восстановление до металлического состояния, многократная отмывка от примесей, сушка) формирование активной поверхности электрокатализаторов посредством непосредственного введения атомов металла при ионно-лучевой обработке позволяет получать

каталитические слои в один–два приема и значительно сократить расход каталитических благородных и редкоземельных металлов.

Список использованных источников

1. M.F. Sgroi, F. Zedde, O. Barbera, A. Stassi, D. Sebastián, F. Lufrano, V. Baglio, A.S. Aricò, J.L. Bonde, M. Schuster // *Energies*. – 2016. – V 9, No. 12. – 1008. – 19 p. doi.org/10.3390/en9121008
2. V.V. Poplavsky, T.S. Mishchenko, V.G. Matys // *Technical Physics*. – 2010. – V. 55, No. 2. – P. 296–302. doi:10.1134/S1063784210020222
3. D.M.F. Santos, J.R.B. Lourenço, D. Macciò, A. Saccone, C.A.C. Sequeira, J.L. Figueiredo // *Energies*. – 2020. – V. 13, No. 7. – P. 1658–1678. doi:10.3390/en13071658
4. V.V. Poplavsky, O.G. Bobrovich, A.V. Dorozhko, V.G. Matys // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron and Neutron Tech.* – 2022. – V. 16, No. 5 – P 727–733. doi:10.1134/S1027451022050160
5. V.V. Poplavsky, A.V. Dorozhko, V.G. Matys // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron and Neutron Tech.* – 2019. – V. 13. No. 6. – P. 1314–1322. doi:10.1134/S102745101905032X

УДК 628.196

Д. Э. Пропольский

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАНЕСЕНИЯ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Важным этапом удаления железа из подземных вод является фильтрация через слой инертного материала. Для данных целей перспективным является применение в качестве каталитического слоя полифункциональных модифицированных материалов. Кроме того, это снижает затраты станций водоподготовки.

D. E. Prapolski

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus