



Српска академија наука и уметности  
Одељење хемијских и биолошких наука

**Савремена стремљења у електрохемији у процесу  
преласка на обновљиве изворе енергије:**

**Научни скуп посвећен 100-годишњици рођења  
иностраног члана САНУ Џ. О'М. Бокриса**

Београд 2023.



**Савремена стремљења у електрохемији у процесу  
преласка на обновљиве изворе енергије:  
Научни скуп посвећен 100-годишњици рођења  
иностраног члана САНУ Џ. О'М. Бокриса**

**Књига извода**

**5. јун 2023, САНУ, Београд, Србија**



### **Организатори**

Одбор за физичку хемију Одељења хемијских и биолошких наука САНУ,  
Универзитет у Београду – Факултет за физичку хемију,  
Електрохемијска секција Српског хемијског друштва

### **Научни одбор**

Академик проф. др Славко Ментус  
Академик проф. др Иван Гутман  
Академик проф. др Миљенко Перић  
Проф. др Бранимир Гргур  
Проф. др Игор Пашти  
Проф. др Јелена Бајат  
Проф. др Биљана Шљукић Паунковић  
Доц. др Мила Крстајић Пајић

### **Организациони одбор**

Академик проф. др Славко Ментус  
Проф. др Бранимир Гргур  
Проф. др Игор Пашти  
Проф. др Јелена Бајат  
Доц. др Мила Крстајић Пајић



## Предговор

Ове године навршило се сто година од рођења светски познатог електрохемичара, професора Цона Бокриса (5. јануар 1923 – 7. јули 2013), иностраног члана САНУ. Одбранивши докторску тезу у својој 22. години, на Империјал колеџу за науку и технологију у Лондону 1945, започео је изузетно богату универзитетску каријеру. Радио је на Империјал колеџу (1945-1953), на Универзитету Пенсилвеније (1953-1972), Универзитету Флиндерс (Аустралија) (1972-1978) и на Универзитету Тексас А&М (1978-1997). Дао је значајан научни допринос развоју електрохемије друге половине XX века, оличен у преко 650 научних радова и 21 књизи, и уређивању пет зборника радова и две интернационалне монографске серије које су излазиле деценијама. Био је ментор бројних докторских дисертација и постдокторских студија, оснивач научних часописа и интернационалних електрохемијских удружења. У доба најинтензивнијег стваралаштва, 1960-тих, био је међу 10 најцитиранијих физикохемичара на свету. Кроз менторства бројним докторантима и постдокторима из Србије и трајну сарадњу са њима, знатно је допринео развоју електрохемије у Србији. Избор за иностраног члана САНУ, 1989. године, је само једно у многих интернационалних признања које је добио за свој рад.

Професор Бокрис је значајан део свог научног и наставног опуса посветио одржању здраве животне средине. Још током прве нафтне кризе средином 70-тих година прошлог века предвидео је опасности од раста концентрације угљен диоксида у атмосфери због растуће потрошње фосилних горива, и предлагао конкретна решења базирана на електрохемијском магационирању соларне енергије. Тада није озбиљно схваћен, али је преласком у 21 век, ова проблематика постала акутан светски проблем, око чијег решавања је морала да се ангажује Организација уједињених нација, и данас захтева много већа средства од оних које је 70-тих предлагао проф. Бокрис. Опицљив резултат данашњих активности је убрзан раст серијске производње електричних аутомобила, и планови на нивоу ОУН за убрзан глобални прелазак на енергетику базирану на обновљивим изворима.

У знак сећања на богат интернационално признат стваралачки опус, као и допринос развоју српске електрохемије, Одељење хемијских и биолошких наука САНУ је у свој план рада за текућу 2023. годину уврстило одржавање меморијалног научног скупа под називом „Савремена стремљења у електрохемији у процесу преласка на обновљиве изворе енергије”- скуп посвећен 100-годишњици рођења иностраног члана САНУ Цона Бокриса. Сврха скупа је да у светлу визија проф. Бокриса прикажу данашње активности у области електрохемије у Србији и ближој околини.

Овај меморијални скуп наставља се на серију скупова и предавања организованих у САНУ посвећених актуелним проблемима савремене енергетике и са њима везаних

еколошких проблема. У том низу можемо поменути скуп „Енергетика и климатске промене“ (26.11.2018), циклус предавања „Енергија као највећи изазов човечанства у ХХИ веку“ (24. септембар – 24. децембар 2019), скуп „О нуклеарној енергетици“, (2. новембар 2020), скуп „Пројект Јадар - шта је познато“, (6–7. мај 2021), скуп „Енергетски ресурси на Косову и Метохији“ (17–18. јануар 2022), затим скупове “Савремене батерије и суперкондензатори”, (1–2. јун 2022), и “Савремени правци истраживања водоника као горива будућности (10. јун 2022), чиме, САНУ испуњава своју мисију да доприноси решавању савремених проблема друштвеног развоја.

Академик проф. др Славко Ментус



# Садржај

<b>О професору John O'M. Bockris–у: осврт на живот и дело</b> Славко В. Менгус	<b>1</b>
<b>Развој батерија за електричне аутомобиле – од концепта J.O'M. Bockrisa до напредних мултивалентних чланака</b> Зоран Мандић	<b>2</b>
<b>Практична примена електрохемијских метода при тестирању литијум-јонских ћелија високих перформанси у аутомобилској индустрији</b> Никола Новаковић	<b>3</b>
<b>Метал/ваздух батерије и батерије са течним металима: Изазови идеалне реверзибилности и рециклаже</b> Гаврило Шекуларац, Владимир Панић	<b>4</b>
<b>Будућност напајања: Како батерије олакшавају прелазак на обновљиве изворе енергије</b> Ђорђе Стојановић	<b>5</b>
<b>Развој материјала за батеријске системе нове генерације</b> Милица Ј. Вујковић, Александра Р. Гезовић, Јана Ж. Мишуровић, Веселинка В. Грудич, Robert Dominko	<b>6</b>
<b>Транспорт јона у батеријским електролитима и међуфазама</b> Jelena Popovic-Neuber	<b>7</b>
<b>Могућност производње и примене „зеленог водоника“ у Републици Србији</b> Бранимир Н. Гргур	<b>8</b>
<b>Дизајн катализатора за електрокаталитичку производњу водоника – принципи, изазови и пречице</b> Игор А. Пашти	<b>9</b>
<b>Електрокатализа после 2020: Како убрзати кључне реакције за електрохемијско складиштење енергије из обновљивих извора?</b> Александар Р. Жерађанин	<b>10</b>
<b>Pd монослојни катализатор – нова парадигма у електролитичком издвајању водоникових изотопа</b> Станко Р. Бранковић, S. M. Shirazi, K. Ahmadi, O. Miljanić, J. Bao	<b>11</b>

<b>Интеракције између метала и носача - пут ка напредним електрокаталитичким композитима за водоничну енергију</b>	
Милутин Смиљанић, М. Bele, J.F.V. Santa, S. Menart, А. Hrnjić, С. Панић, Р. Jovanović, V. Jovanovski, F. Ruiz-Zepeda, L. Moriau, А. Lončar, G. Dražič, М. Gaberšček, N. Hodnik	<b>12</b>
<b>Развој нових катализатора за нискотемпературне горивне ћелије-изазови и перспективе</b>	
Невенка Р. Елезовић	<b>13</b>
<b>Недавни развој композитних електрокатализатора реакције издвајања водоника на бази TiO<sub>2</sub> нанотубуларних низова као носача</b>	
Урош Лачњевац	<b>14</b>
<b>Бифункционални електрокатализатори на бази прелазних метала за реакције редуције и еволуције кисеоника</b>	
Душан Малденовић, Ана Младеновић, Diogo M.F. Santos, Ayşe B. Yurtcan, Шћепан Миљанић, Славко Ментус, Биљана Шљукић	<b>15</b>
<b>Производња водоника алкалном електролизом на индустријском нивоу – развој катода на бази никла</b>	
Мила Н. Крстајић Пајић, Јелена Д. Гојгић, Александар М. Петричевић, Thomas Rauscher, Christian I. Bernaecker, Владимир Д. Јовић	<b>16</b>
<b>Утицај примене јонских активатора на бази d-метала на енергетску ефикасност процеса добијања водоника алкалном електролизом</b>	
Ивана М. Перовић, Снежана М. Брковић, Гвозден С. Тасић, Никола Н. Здолшек, Мина М. Сеовић, Јелена М. Георгијевић, Стефан Д. Митровић	<b>17</b>
<b>Платински катализатори на угљеничној основи за ефикасну оксидацију метанола</b>	
Сања И. Стевановић, Драгана Милошевић, Душан В. Трипковић, Весна Максимовић, Владан Р. Ћосовић, Небојша Д. Николић, Мила Н. Крстајић Пајић, Јелена Роган	<b>18</b>
<b>Синтеза и модификација напредних наноматеријала – поглед кроз призму обновљивих извора енергије</b>	
Зоран Јовановић, Соња Јовановић, Жељко Мравик, Јелена Рмуш, Марко Јелић, Милица Пејчић, Марија Грујичић, Дарија Петковић	<b>19</b>

**ИЗВОДИ**

---



## О професору John O'M. Bockris– у: осврт на живот и дело

Славко В. Ментус<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Универзитет у Београду, Факултет за физичку хемију, Студентски трг 12, 11000 Београд, Србија

<sup>2</sup> Српска академија наука и уметности, Кнез Михајлова 35, 11000 Београд, Србија

\* адреса за кореспонденцију: [slavko@ffh.bg.ac.rs](mailto:slavko@ffh.bg.ac.rs)

---

Професор Бокрис, докторирао је на теми електрохемија неводених раствора на Империјал колеџу за науку и технологију у Лондону 1945, у својој 22 години. Радио је на Империјал колеџу (1945-1953), на Универзитету Пенсилвеније (САД (1953-1972), Универзитету Флиндерс (Аустралија) 1972-1978) и на Универзитету Тексас А&М (1978-1997). Припада најужем кругу водећих електрохемичара друге половине 20. века. У стваралачком врхунцу 1960-их био је међу 10 најцитиранијих физикохемичара на свету. Дао је велики научни допринос у више електрохемијских области: структуре двојног електричног слоја, електрохемије јонских растопа, електрохемијске кинетике, електрокристализације, електрохемије животне средине. Објавио је преко 650 научних радова, 21 књигу, уредио пет зборника радова и две дугогодишње монографске електрохемијске серије. Био је ментор 77 докторских дисертација и 80 постдокторских усавршавања. Визионарски је указивао на штетност растуће употребе фосилних горива на животну средину и предлагао електрохемијске методе преласка на коришћење енергије обновљивих извора, првенствено сунчане енергије. Примљен је за иностраног члана Српске академије наука и уметности (САНУ) 1988. Кроз сарадњу са својим докторантима, касније академицима САНУ, проф. А. Деспићем и проф. Д. Дражићем, као и низом млађих сарадника из Србије, значајно је допринео развоју и утицајности Београдске школе електрохемије. У овом саопштењу биће са више детаља приказани живот и дело овог значајног научника и педагога.

---

### Захвалница

Аутор се захваљује Министарству науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (бр. уговора 451-03-47/2023-01/200146) као и Научном фонду САНУ (уговор Ф-193) на финансијској подршци.

### Литература

[1] В Е Conway, A tribute and survey of his research over 47 years on the occasion of his 70th anniversary, *J Electroanal chem* **357** (1993) 1-36

[2] John O'M. Bockris, An Electrochemical Life, *J Solid State Electrochem* **15** (2011) 1763–1775, DOI 10.1007/s10008-011-1298-7

## Развој батерија за електричне аутомобиле – од концепта Ј.О'М. Bockris-а до напредних мултивалентних чланака

Зоран Мандић\*

Свеучилиште у Загребу, Факултет хемијског инжењерства и технологије, Марулићев трг 19, ХР-10090 Загреб, Хрватска

\* адреса за кореспонденцију: [zmandic@fkit.unizg.hr](mailto:zmandic@fkit.unizg.hr)

---

Развој електрохемијских претворника и спремника енергије се значајно интензивирао у посљедњих 20 година откако је човјечанство у потпуности постало свјесно свих недостатака, еколошких и осталих, које са собом доноси употреба фосилних горива. Врло важну примјену електрохемијски претворници енергије налазе у транспортном сектору и ту се сусрећемо с два паралелна правца: електрична возила погоњена батеријама и возилима на водик путем електричне енергије добивене у горивним чланцима. Карактеристике електричних возила ће у великој мјери овисити управо о карактеристикама електрохемијског претворника енергије, а која технологија ће доминирати у будућности овисит ће и осталим факторима. Давних 70-тих година прошлог стољећа нитко није придавао посебну важност тој тематици. Штoвише, тадашње батеријске технологије су задовољавале све постојеће примјене у то доба а истраживање горивних чланака се одвијало врло ријетко. То је било вријеме кад су електрична возила те технологије литиј-ионских батерија биле тек само идеје без практичне примјене зачете у главама визионара. Један од таквих визионара је био и Ј.О'М. Bockris који је у семиналном раду [1] описао потребу развоја електричних возила и представио концепте који важе и данас. У овом излагању представит ћу развој електрохемијских претворника и спремника енергија за електрична возила те уједно изнијети нове трендове технологија које излазе изван оквира литиј-ионских технологија.

---

### Литература

[1] J.O'M. Bockris, The case for electric and fuel cell powered vehicles *Ambio* 3(1) (1974) 15-23.

# Практична примена електрохемијских метода при тестирању литијум-јонских ћелија високих перформанси у аутомобилској индустрији

Никола Новаковић \*

*Component testing, Rimac Technology, Љубљанска улица 7, 10431 Света Недеља, Хрватска*

\* адреса за кореспонденцију: [nikola.novakovic@rimac-technology.com](mailto:nikola.novakovic@rimac-technology.com)

---

Константан развој литијум-јонских (Li-јонских) ћелија последњих деценија омогућио је убрзано усвајање електричних возила (ЕВ) у аутомобилској индустрији [1]. Међутим, перформансе, поузданост и пре свега сигурност литијум-јонских ћелија морају бити темељно тестиране пре него што се могу користити у саобраћају. Електрохемијске методе су постале примарно средство у тестирању овог типа система за складиштење електричне енергије, обезбеђујући неопходне податке о параметрима као што су капацитет, снага, животни век и утицај различитих типова отпора на поменуте спецификације [2]. Ови тестови се спроводе у различитим условима од којих је за перформансе најбитнија температура, као и под различитим оптерећењима која симулирају услове вожње у стварном свету. Добијени резултати тестова се користе за процену безбедности, издржљивости и ефикасности литијум-јонских ћелија за ЕВ апликације. Такође, ови подаци се користе за оптимизацију дизајна како ћелија тако и целокупне високонапонске батерије електричног возила. Како је потражња за електричним возилима различитих класа у сталном расту, електрохемијске методе постају све софистицираније у разликовању типова примена ћелија управо због различитих захтева произвођача аутомобила. Коришћењем ових метода за тестирање и оптимизацијом литијум-јонских и ћелија нове генерације, аутомобилска индустрија може убрзати усвајање електричних возила и смањити зависност од фосилних горива.

---

## Захвалница

Овом приликом бих желео да се захвалим професорки Јелени Бајат на позиву да презентујем своју област рада у нади да ће помоћи студентима основних, мастер и докторских студија као и професорима да се приближе индустрији и примени својих знања у унапређењу индустрије електричних возила. Такође, желео бих да се захвалим још једном професорки Бајат као и целој Катедри за физичку хемију и електрохемију са Технолошко-металуршког факултета на менторству и несебичној подршци током студија.

## Литература

- [1] N. Meddings, M. Heinrich, F. Overney, J. Lee, V. Ruiz, E. Napolitano, S. Seitz, G. Hinds, R. Raccichini, M. Gaberšček, J. Park, Application of electrochemical impedance spectroscopy to commercial Li-ion cells: A review, *J. Power Sources* 480 (2020) 228742.  
[2] A. Barai, K. Uddin, W.D. Widanage, A study of the influence of measurement timescale on internal resistance characterisation methodologies for lithium-ion cells. *Sci. Rep.* 8 (2018) 21.

## Метал/ваздух батерије и батерије са течним металима: Изазови идеалне реверзибилности и рециклаже

Гаврило Шекуларац<sup>1,2\*</sup>, Владимир Панић<sup>1-3</sup>

<sup>1</sup> Универзитет у Београду - Институт за хемију, технологију и металургију, Институт од националног значаја за Републику Србију, Београд, Србија

<sup>2</sup> Универзитет у Београду - Институт за хемију, технологију и металургију, Центар изузетних вредности за хемију и инжењеринг животне средине, Београд, Србија

<sup>3</sup> Универзитет у Новом Пазару - Департаман за природно-математичке науке, Нови Пазар, Србија

\* адреса за кореспонденцију: [gavrilo@ihm.bg.ac.rs](mailto:gavrilo@ihm.bg.ac.rs)

---

Li-јон технологија заснована на интеркалационој хемији као основна технологија за примењене алтернативне уређаје за складиштење енергије губи фокус истраживања с обзиром на то је процењено да додатна побољшања могу довести до највише 30% повећања густине енергије [1]. Савремена истраживања су стога усмерена ка поновном оживљавању метал/ваздух концепције (МВБ) у неводеним електролитима и растопима која теоријски могу да обезбеде 500 Wh/kg за мање од \$100/kWh. Батерије од течних метала су готово идеално реверзибилне и могу се рециклирати без губитака [2]. Концепције МВБ у неводеним електролитима заснивају се на спреговима са алкалним (Li, Na и K) или земно-алкалним металима (Mg и Ca). Основни захтеви за рационалну примену МВБ односе се на заступљеност метала у природи и задавољавајућа каталитичка својства катодног полупрега. Калцијум, као најраспрострањенији од поменутих метала дозвољава и највећи термодинамички напон ћелије од преко 3,1 V и преко 2,5 kWh/kg у односу на реверзибилни прелаз оксида [3]. Међутим, катализа катодног материјала се у многоме разликује у односу на водене електролите, с обзиром на то да се захтева активност за оксидацију нерастворних оксида спрегнутог метала. Саопштење ће разматрати изазове које стоје пред катодним материјалима за потенцијалну примену у Ca/ваздух батеријама.

---

### Захвалница

Саопштење садржи резултате истраживања финансиране преко NATO Science for Peace and Security програма (SPS MYP G5910) и Министарства науке, технолошког развоја и иновација (451-03-47/2023-01/200026).

### Литература

- [1] Y. Li, J. Lu, Metal-Air Batteries: Will They Be the Future Electrochemical Energy Storage Device of Choice?, *ACS Energy Lett.* 2 (2017) 1370.
- [2] H. Li, H. Yin, K. Wang, S. Cheng, K. Jiang, and D. R. Sadoway, Liquid Metal Electrodes for Energy Storage Batteries, *Adv. Energy Mater.* 6 (2016) 1600483.
- [3] Y.-T. Lu, A. R. Neale, C.-C. Hu, L. J. Hardwick, Divalent Nonaqueous Metal-Air Batteries, *Front. Energy Res.* 8 (2021) 602918.



## Будућност напајања: Како батерије олакшавају прелазак на обновљиве изворе енергије

Ђорђе Стојановић\*

*ElevenEs, Толминска 35, Суботица, Србија*

\*адреса за кореспонденцију: [stojanovic.djordje@outlook.com](mailto:stojanovic.djordje@outlook.com)

---

Како свет постаје свеснији штетних утицаја употребе фосилних горива, постоји све већи притисак за прелазак на обновљиве изворе енергије, као што су соларна енергија и енергија ветра. Међутим, један од главних изазова у вези са обновљивим изворима енергије је њихова флукуација, што значи да производња енергије варира у зависности од временских услова и других фактора. Захваљујући напретку у технологији Li-јон батерија, постаје могуће складиштити вишак енергије произведене из обновљивих извора током периода када је доступна и користити је када нам је потребна. На тај начин, Li-јон батерије могу помоћи у ублажавању ових флукуација. На овом предавању, истражићемо улогу Li-јон батерија у олакшавању преласка на обновљиве изворе енергије и њихову употребу у аутомобилској индустрији како би се смањила зависност од фосилних горива [1]. Проучаваћемо карактеристике Li-јон батерија које их чине идеалним за складиштење енергије из обновљивих извора, изазове приликом њихове примене и потенцијални утицај ове технологије на будућност производње и дистрибуције енергије [2]. Поред потенцијала да олакшају прелазак на обновљиве изворе енергије, Li-јон батерије такође имају додатну предност јер се могу рециклирати. Међутим, рециклажа Li-јон батерија је још у повоју и постоји неколико изазова које треба решити, попут развоја ефикасних метода рециклаже и успостављања инфраструктуре за сакупљање и рециклажу [3].

---

### Захвалница

Ово приликом хтео бих да се захвалим професорки Јелени Бајат и професору Бранимиру Гргуру, као и професору Славку Ментусу на указаној прилици и поверењу да учествујем на научном скупу под називом Савремена стремљења у електрохемији у процесу преласка на обновљиве изворе енергије. Захвалио бих се и компанији *ElevenEs*, на омогућеним условима за истраживање и развој Li-јон батерија. Такође, желео бих да се захвалим породици и свима који су ме подржали током мог академског пута.

### Литература

- [1] X.-G. Yang, T. Liu, C.-Y. Wang, Thermally modulated lithium iron phosphate batteries for mass-market electric vehicles. *Nature Energy*, 6(2) (2021) 176. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00757-7>
- [2] A.-I. Stan, M. Swierczynski, D.-I. Stroe, R. Teodorescu, S. J. Andreassen, *Lithium ion battery chemistries from renewable energy storage to automotive and back-up power applications – An overview*, in: 2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Bran, Romania, 22-24 May 2014, IEEE, p. 713. <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2014.6850936>
- [3] G. Harper, R. Sommerville, E. Kendrick, L. Driscoll, P. Slater, R. Stolkin, A. Walton, P. Christensen, O. Heidrich, S. Lambert, A. Abbott, K. Ryder, L. Gaines, P. Anderson, Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575 (2019) 75. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>

## Развој материјала за батеријске системе нове генерације

Милица Ј. Вујковић<sup>1\*</sup>, Александра Р. Гезовић<sup>2</sup>, Јана Ж. Мишуровић<sup>2</sup>, Веселинка В. Грудић<sup>2</sup>, Robert Dominko<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Универзитет у Београду – Факултет за физичку хемију, Студентски трг 12-16, Београд, Србија

<sup>2</sup> Металуришко-технолошки факултет, Универзитет Црне Горе, Цетињски пут bb, Подгорица, Црна Гора

<sup>3</sup> Хемиски институт, Hajdrihova 19, SI-1000, Ljubljana, Slovenija

<sup>4</sup> Универзитет у Лjubljani, FKKT, Večna pot 117, 1000 Ljubljana, Slovenija

\* адреса за кореспонденцију: [milica.vujkovic@ffh.bg.ac.rs](mailto:milica.vujkovic@ffh.bg.ac.rs)

---

Батеријски системи се налазе у срцу енергетске транзиције због способности да складиште енергију из обновљивих извора и испоруче је за даљу примену. Енергију Li-јонске батерије је тешко превазићи, док има простора за даље унапређење како би се достигле теоријске вредности веома изазовних система као што су метал-ваздух, метал-сумпор и батерије у чврстом стању. Међутим, чињеница да је литијум ограничен ресурс и да његове резерве не могу да прате електричну револуцију, покренула је истраживања ка алтернативним технологијама. Због ниске цене и природне заступљености натријума, Na-јонске батерије поседују велики економски, одрживи и енергетски потенцијал [1,2]. Предавање ће дати преглед развоја електродних материјала за Na-јонске батерије, укључујући и текућа експериментална истраживања на Факултету за физичку хемију која се спроводе у сарадњи са истраживачима са Универзитета Црне Горе и Хемиског института у Љубљани. Посебан фокус биће на угљенику добијеном из биомасе и полианјонима на бази гвожђа, као атрактивним материјалима са одрживог и економског становишта. Биће представљене предности и слабости развијених материјала, заједно са побољшањима и новитетима, почевши од поступака синтезе до електрохемијских испитивања у електролитима који садрже Na<sup>+</sup> јоне. Прича ће се завршити могућим опцијама за побољшање материјала и њихову даљу имплементацију у батеријској конфигурацији која би била конкурентна савременој Na-јонској технологији.

---

### Захвалница

Истраживање је подржано од стране НАТО-а кроз програм Наука за мир и безбедност, пројекат број G5836 – SuperCar.

### Литература

[1] M. Vujković, Comparison of lithium and sodium intercalation materials, *J. Serb. Chem. Soc.*, 80 (2015) 801.

[2] Aleksandra Gezović, Milica J. Vujković, Miloš Milović, Veselinka Grudić, Robert Dominko, Slavko Mentus, Energy Storage Materials, Recent developments of Na<sub>4</sub>M<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) as the cathode material for alkaline-ion rechargeable batteries: challenges and outlook, *Energy Storage Materials*, 37 (2021) 243.

## Транспорт јона у батеријским електролитима и међуфазама

Jelena Popovic-Neuber\*

Department of Energy and Petroleum Engineering, University of Stavanger, Norway

\*адреса за кореспонденцију: [jelena.popovic-neuber@uis.no](mailto:jelena.popovic-neuber@uis.no)

---

Развој батерија следеће генерације у великој мери зависи од способности електролита да брзо и селективно транспортују катјоне и формирају стабилне електрохемијске граничне фазе. У алкалним и земноалкалним батеријама вискозе густине енергије, проблеми као што су раст дендрита и континуираног раста међуфазе чврстог електролита могу се решити одговарајућом хемијом међуфаза и електролита [1]. У првом делу мог предавања, говорићу о тренутном разумевању механизма транспорта јона и сродних електрохемијских техника мерења (импедансна спектроскопија, галваностатска поларизација) у електролитима меког стања укључујући течности, полимере и хибридне материјале [2-7]. Према овој дискусији, биће дате смернице и примери побољшања релевантних електрохемијских својстава. У другом делу мог предавања биће приказана недавна открића у вези са електрохемијским и хемијским растом и транспортом у граничним фазама на неколико алкалних и земноалкалних метала у контакту са течним електролитима [8-13]. Приступ са неколико експерименталних техника (фокусирана електронска микроскопија снопа јона и импедансна спектроскопија) показао је да су такве међуфазе сложени композитни течност/чврсти материјали, са понекад (нпр. у случају електролита натријумске батерије) доминантним јонским путевима у течној фази. Биће дискутована релевантност природног пасивног слоја и могућност формирања вештачких међуфаза.

---

### Литература

- [1] J. Popovic, *Nat. Comm.*, 12, 6240 (2021)
- [2] J. Popovic, G. Hasegawa, I. Moudrakovski, J. Maier, *J. Mat. Chem. A*, 1, 40, 7135 (2016)
- [3] J. Popovic, D. Höfler, J. Melchior, A. Münchinger, B. List, J. Maier, *J. Phys. Chem. Lett.*, 9, 17, 5116 (2018)
- [4] J. Popovic, *ACS Phys. Chem Au*, 2(6), 490 (2022)
- [5] Y. Guo, M. Terban, I. Moudrakovski, A. Münchinger, R. Dinnebier, J. Popovic, J. Maier, *J. Mat. Chem. A.*, 11, 3427 (2023)
- [6] J. Popovic, *Macromol. Chem. Phys.*, 223, 8, 2100344 (2022)
- [7] J. Popovic, D. Brandell, S. Ohno, K. Hatzell, J. Zheng, Y.-Y. Hu, *J. Mat. Chem. A*, 9, 6050 (2021)
- [8] J. Popovic, *J. Electrochem. Soc.*, 3, 169 030510 (2022)
- [9] M. Nojabae, K. Küster, U. Starke, J. Popovic, J. Maier, *Small*, 16, 23, 2000756 (2020)
- [10] K. Lim, B. Fenk, J. Popovic, J. Maier, *ACS App. Mat. Int.*, 13 (43), 51767 (2021)
- [11] K. Lim, B. Fenk, K. Küster, T. Acartürk, J. Weis, U. Starke, J. Popovic, J. Maier, *ACS App. Mat. Int.*, 14, 14, 16147 (2022)
- [12] J. Popovic, *Energy Technol.*, 9, 4, 2001056 (2021)
- [13] K. Lim, J. Popovic, J. Maier, *J. Mater. Chem. A*, 11, 5725 (2023)

## Могућност производње и примене „зеленог водоника“ у Републици Србији

Бранимир Н. Гргур \*

Универзитет у Београду – Технолошко-металушки факултет, Карнегијева 4, 11020 Београд, Србија

\* адреса за кореспонденцију: [BNGgur@tmf.bg.ac.rs](mailto:BNGgur@tmf.bg.ac.rs)

---

На основу јавно доступних техничких потенцијала обновљивих извора енергије (ОИЕ) у Републици Србији [1], процењена је могућност производње „зеленог водоника“ из соларне, ветро и хидро енергије. Показано је да се коришћењем 5%, 10% и 15% од укупних расположивих техничких потенцијала ОИЕ, маса водоника произведеног алкалном електролизом воде [2] креће од 23,5 kt до 70,5 kt. Одговарајућа запремина водоника разматрана је као замена природног гаса (метана) и креће се у распону од 10% до 30%. Такође, процењено је да на годишњем нивоу број електромобила са водоничним горивним галванским спреговима варира од ~100.000 за 5% до ~300.000 јединица за 15% коришћења ОИЕ потенцијала [3]. Треба напоменути да су приказани резултати само грубе процене, а уз даље студиозно утврђивање реалних техничких расположивих потенцијала обновљивих извора енергије у Републици Србији, ови подаци могу бити знатно већи. Такође, указано је да би се у будућности требало интензивирати добијање водоника из биомасе различитим технолошким процесима и његове примене у когенерацији топлотне и електричне енергије применом високотемпературних горивних галванских спрегова са чврстим оксидним електролитом [4].

---

### Литература

- [1] Привредна комора Србије <http://www.zelenaenergija.pks.rs/ZelenaEnergija.aspx?id=17&p=6&> (Приступљено 10.03.2023)
- [2] M. Chatenet, B.G. Pollet, D.R. Dekel, F. Dionigi, J. Deseure, P. Millet, R. D. Braatz, M.Z. Bazant, M. Eikerling, I. Staffell, P. Balcombe, Y. Shao-Horn, H. Schäfer, Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments, *Chem. Soc. Rev.*, 51 (2022) 4583.
- [3] T. Selmi, A. Khadhraoui, A. Cherif, Fuel cell-based electric vehicles technologies and challenges. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29 (2022) 78121.
- [4] D. Oryshchyn, N.F. Harun, D. Tucker, K.M. Bryden, L. Shadle, Fuel utilization effects on system efficiency in solid oxide fuel cell gas turbine hybrid systems, *App. Energy*, 228 (2018) 1953.

## Дизајн катализатора за електрокаталитичку производњу водоника – принципи, изазови и пречице

Игор А. Пашти \*

Универзитет у Београду - Факултет за физичку хемију, Студентски трг 12-16, 11158 Београд, Србија

\* адреса за кореспонденцију: [igor@ffh.bg.ac.rs](mailto:igor@ffh.bg.ac.rs)

---

Реакција издвајања водоника је увек имала посебно место у електрохемији, представљајући модел за комплексније реакције, али и као потенцијални начин за добијање  $H_2$  као алтернативног горива [1]. Током протеклих деценија, генерисање водоника путем електролизе воде коришћењем обновљивих извора енергије истицано је као потенцијални пут ка остварењу одрживе енергетске будућности. Међутим, тренутна геополитичка ситуација променила је перспективу, чинећи истраживања у овом правцу једном од основних премиса за постизање енергетске независности од фосилних горива [2]. Експериментални приступ у развоју нових катализатора за издвајање водоника, базиран на покушају и грешци, представља сувише дуг пут до проналажења ефикасних катодних материјала за електролизу воде. С друге стране, комбинација рационалног компјутационог дизајна и експерименталне верификације идентификованих кандидата за нове катализаторе значајно скраћује време до проналазак нових катализатора [3]. Међутим, комплексност фазне границе на којој долази до издвајања водоника онемогућава и најнапредније теорије да у потпуности обухвате све процесе који се на њој одигравају. Додатни проблем представља утицај експерименталних параметара на реакцију издвајања водоника, као што су рН и јони присутни у електролиту [4]. У оквиру предавања биће изложени основни принципи компјутационог дизајна нових електрокатализатора за добијање водоника и анализирани општи трендови у зависности од експерименталних услова. Поред тога, биће дат осврт на потенцијалну промену парадигме у развоју нових електрокатализатора, фокусирајући се на коришћење интерактивних каталитичких подлога и функционалних декоратора у циљу повећања брзине издвајања водоника [5].

---

### Захвалница

Аутор се захваљује Министарству науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије за пружену финансијску подршку у току представљених истраживања (бр. уговора 451-03-47/2023-01/200146)

### Литература

- [1] S. J. Gutić, A. S. Dobrota, E. Fako, N. V. Skorodumova, N. López, I. A. Pašti, Hydrogen Evolution Reaction-From Single Crystal to Single Atom Catalysts. *Catalysts* 10 (2020) 290.
- [2] M. Noussan, P. P. Raimondi, R. Scita, M. Hafner, The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability* 13 (2021) 298.
- [3] J. K. Nørskov, T. Bligaard, J. Rossmeisl, C. H. Christensen. Towards the computational design of solid catalysts. *Nature Chem* 1, (2009) 37.
- [4] B. Huang, R. R. Rao, S. You, K. Hpone Myint, Y. Song, Y. Wang, W. Ding, L. Giordano, Y. Zhang, T. Wang, S. Muy, Y. Katayama, J. C. Grossman, A. P. Willard, K. Xu, Y. Jiang, Y. Shao-Horn, Cation- and pH-Dependent Hydrogen Evolution and Oxidation Reaction Kinetics, *JACS Au* 1 (2021) 1674.
- [5] S. J. Gutić, D. Metarapi, A. Z. Jovanović, G. K. Gebremariam, A. S. Dobrota, B. Nedić Vasiljević, I. A. Pašti, Redrawing HER Volcano with Interfacial Processes—The Role of Hydrogen Spillover in Boosting  $H_2$  Evolution in Alkaline Media. *Catalysts* 13 (2023) 89.

## Електрокатализа после 2020: Како убрзати кључне реакције за електрохемијско складиштење енергије из обновљивих извора ?

Александар Р. Жерађанин \*

Max Planck Institute for Chemical Energy Conversion, Stiftstrasse 34-36, Mülheim an der Ruhr, Germany

\* адреса за кореспонденцију: [aleksandar.zeradjanin@cec.mpg.de](mailto:aleksandar.zeradjanin@cec.mpg.de)

---

Један од кључних разлога, зашто је прелаз на обновљиве изворе енергије у застоју, јесу необично сложени феномени конверзије електричне у хемијску енергију, и обрнуто, хемијске у електричну енергију. Важан пример је електролиза воде, где после деценија истраживања није јасно како значајно убрзати процесе генерисања водоника и кисеоника. Од критичне важности за контролу механизма електролизе воде, јесте разумевање порекла електрокаталитичке активности [1]. Ако се постави кључно питање са концептуалне тачке гледишта, а то је: шта је порекло електрокаталитичке активности? - одговор ће бити, у већини случајева, као пре 70 година. Наиме, парадигма електрокатализе је Сабатиеов принцип, који сугерише оптимално („не сувише јако, не сувише слабо“) везивање интермедијара као главни предуслов високе брзине реакције. Конвенционална мудрост сугерише да би потврда овога требало да буде линеарна релација између енергије адсорпције интермедијера и енергије активације, позната као Бронстед-Еванс-Поланин релација. Међутим, недавни резултати показују да смањење енергије активације није нужно корисно за повећање брзине реакције [2]. У овом предавању биће покренута нека темељно важна фундаментална питања о природи електрокаталитичке активности. Идентификовање и анализа ових питања може бити важан покретач ка ефикасној електролизи воде и свеобухватнијем разумевању електрокатализе као научне области од кључног значаја за конверзију, складиштење и искоришћење енергије из обновљивих извора [3, 4].

---

### Захвалница

Предавање је посвећено Проф. Ј.О'М. Бокрис-у, једном од водећих светских електрохемичара, члану САНУ и важном стубу у развоју Београдске школе електрохемије.

### Литература

- [1] A.R. Zeradjanin, I. Spanos, J. Masa, M. Rohwerder, R. Schlögl, Perspective on experimental evaluation of adsorption energies at solid/liquid interfaces, *J. Solid State Electrochem.* 25 (2021) 33
- [2] A.R. Zeradjanin, P. Narangoda, I. Spanos, J. Masa, R. Schlögl, Expanding the frontiers of hydrogen evolution electrocatalysis—searching for the origins of electrocatalytic activity in the anomalies of the conventional model, *Electrochim. Acta* 388 (2021) 138583
- [3] P. Narangoda, I. Spanos, J. Masa, R. Schlögl, A.R. Zeradjanin, Electrocatalysis Beyond 2020: How to Tune the Preexponential Frequency Factor, *ChemElectroChem* 9 (2022) e202101278
- [4] A.R. Zeradjanin, P. Narangoda, J. Masa, R. Schlögl, What Controls Activity Trends of Electrocatalytic Hydrogen Evolution Reaction? — Activation Energy Versus Frequency Factor, *ACS Cat.* 12 (2022) 11597.

## Pd монослојни катализатор – нова парадигма у електролитичком издвајању водоникових изотопа

Станко Р. Бранковић<sup>1\*</sup>, S. M. Shirazi<sup>1</sup>, K. Ahmadi<sup>1</sup>, O. Miljanić<sup>2</sup>, J. Bao<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Cullen College of Engineering, University of Houston, Houston TX 77204, USA

<sup>2</sup> Chemistry Department, College for Natural Science and Mathematics, University of Houston, Houston TX 77204, USA

\* адреса за кореспонденцију: [SRBrankovic@uh.edu](mailto:SRBrankovic@uh.edu)

---

Утицај деформације на Pd монослојни катализатор (ПМК) је истражен за примену у електролитичком издвајању водоникових изотопа. Позитивна или негативна деформација повећава или смањује снагу и учесталост адсорпционе везе између монослојних катализатора и адсорбата [1,2]. Исто вази и за случај ПМК и апсорбованог водоника [3]. При ниским пренапетостима, рекомбинација атома водоника је корак који одређује брзину реакције еволуције водоника и, очекује се да, позитивна или негативна деформација у ПМК повећа или смањи фактор раздвајања изотопа водоника у поређењу са Pd макро-електродом (катализатором)[4]. Да би се проучавали описани ефекти, ПМК су синтетизовани електрохемијски [5] на Au(111) и Ru(0001) супстратима од којих је сваки допринео квалитативно другачијем знаку и нивоу деформације у ПМК. Јачина и учесталост адсорпционе везе изотопа водоника проучавана је инфрацрвеном спектроскопијом. Ови резултати су послужили за теоретско израчунавање фактора раздвајања изотопа водоника [4]. Израчунати односи између њихових вредности су упоређени са њиховим експериментално измереним вредностима и односима. Веома добро слагање између експерименталних мерења и теоретских прорачуна послужило је за разматрање и анализу примене Pd монослојева у индустријским условима електролитичкога издвајања изотопа водоника.

---

### Захвалница

Све активности везане за истраживања и резултате презентоване у овом излагању су финансијски подржане од Националне Фондације за Науку Сједињених Америчких Држава; NSF-СВЕТ #1605331.

### Литература

- [1] T. Bligaard and J.K. Nørskov, Ligand effects in heterogeneous catalysis and electrochemistry, *Electrochimica Acta*, 52 (2007) 5512
- [2] M. Mavrikakis, B. Hammer, and J. K. Nørskov, Effect of Strain on the Reactivity of Metal Surfaces, *Phys. Rev. Lett.* 81, (1998) 2819.
- [3] L. A. Kibler, A. M. El-Aziz, R. Hoyer, D. M. Kolb. Tuning Reaction Rates by Lateral Strain in a Palladium Monolayer, *Angewandte Chemie International Edition* 44 (2005) 2080.
- [4] J. V. E. Conway, The electrolytic hydrogen–deuterium separation factor and reaction mechanism, *Proceedings of The Royal Society of London, A. Mathematical and Physical Sciences*, 247 (1958) 400.
- [5] J. Tang, M. Petri, L.A. Kibler, D.M. Kolb. Pd deposition onto Au(111) electrodes from sulphuric acid solution, *Electrochimica Acta*, 51 (2005) 125.

## Интеракције између метала и носача - пут ка напредним електрокаталитичким композитима за водоничну енергију

Милутин Смиљанић<sup>1\*</sup>, М. Bele<sup>1</sup>, J.F.V. Santa<sup>1</sup>, S. Menart<sup>1</sup>, А. Hrnjić<sup>1</sup>, С. Панић<sup>1</sup>, L. Pavko<sup>1</sup>, P. Jovanović<sup>1</sup>, V. Jovanovski<sup>1</sup>, F. Ruiz-Zepeda<sup>1</sup>, L. Moriau<sup>1</sup>, А. Lončar<sup>1</sup>, G. Dražiči<sup>1</sup>, M. Gaberšček<sup>1</sup>, N. Hodnik<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Materials Chemistry, National Institute of Chemistry, Hajdrihova 19, 1000 Ljubljana, Slovenia

\* адреса за кореспонденцију: [milutin.smiljanic@ki.si](mailto:milutin.smiljanic@ki.si)

---

Један од највећих проблема данашњице је убрзање имплементације зелене енергије уз истовремено обезбеђивање све већих потреба за енергијом, као последица технолошког развоја и глобалног пораста броја становника. Термини економија водоника и водонична енергија су први пут поменути још раних 1970-их и описују сценарио у којем је водоник главни енергетски вектор уместо фосилних горива [1,2]. Џ.О'М Бокрис је био један од водећих визионара који су осмислили овај концепт и подстакли научно-истраживачку заједницу широм света да уложе заједничке напоре у правцу водоничне енергије. Иако је постигнут значајан напредак, од садашње генерације научника се очекује напредак који ће омогућити коначну комерцијализацију водоничне енергије. Уређаји за електрохемијску конверзију енергије, као што су електролизери воде и горивне ћелије, играју кључну улогу у одрживој без-угљеничној производњи водоника и конверзији његове хемијске енергије у електричну. Електрокаталитички композити који се користе у овим уређајима се састоје од металних наночестица распршених на угљеничним носачима. Угљенични материјали обезбеђују високу проводљивост, велику површину и релативно добру (електро)хемијску стабилност, међутим, не могу утицати на интринзику активност металних активних места. У овом прилогу показаћемо како се перформансе електрокаталитичких материјала могу побољшати коришћењем алтернативних материјала као подлоге за наночестице уместо угљеника [3–5].

---

### Захвалница

Овај рад је финансијски подржало словеначко Министарство просвете, науке и спорта & EU—Европски фонд за регионални развој (пројекат Raziskovalci-2.1-KI-952007); Словеначка истраживачка агенција кроз истраживачке програме/пројекте I0-0003 i P2-0393, NC-0007, NC-0016, N2-0248 i N2-0155; Европски истраживачки савет (ERC) Starting grant 123STABLE (ID уговора о гранту: 852208); и НАТО програм Наука за мир и безбедност у оквиру гранта G5729.

### Литература

- [1] J.O.M. Bockris, The origin of ideas on a Hydrogen Economy and its solution to the decay of the environment, *Int. J. Hydrogen Energy*. 27 (2002) 731–740. doi:10.1016/S0360-3199(01)00154-9.
- [2] J.O.M. Bockris, The hydrogen economy: Its history, *Int. J. Hydrogen Energy*. 38 (2013) 2579–2588. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.12.026.
- [3] M. Smiljanić, M. Bele, L.J. Moriau, J.F. Vélez Santa, S. Menart, M. Šala, A. Hrnjić, P. Jovanović, F. Ruiz-Zepeda, M. Gaberšček, N. Hodnik, Suppressing Platinum Electrocatalyst Degradation via a High-Surface-Area Organic Matrix Support, *ACS Omega*. 7 (2022) 3540–3548. doi:10.1021/acsomega.1c06028.
- [4] J.F. Vélez Santa, S. Menart, M. Bele, F. Ruiz-Zepeda, P. Jovanović, V. Jovanovski, M. Šala, M. Smiljanić, N. Hodnik, High-surface-area organic matrix tris(aza)pentacene supported platinum nanostructures as selective electrocatalyst for hydrogen oxidation/evolution reaction and suppressive for oxygen reduction reaction, *Int. J. Hydrogen Energy*. 46 (2021) 25039–25049. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.05.041.
- [5] M. Smiljanić, S. Panić, M. Bele, F. Ruiz-Zepeda, L. Pavko, L. Gašparič, A. Kokalj, M. Gaberšček, N. Hodnik, Improving the HER Activity and Stability of Pt Nanoparticles by Titanium Oxynitride Support, *ACS Catal*. 12 (2022) 13021.



## Развој нових катализатора за нискотемпературне горивне ћелије - изазови и перспективе

Невенка Р. Елезовић\*

Универзитет у Београду - Институт за мултидисциплинарна истраживања, Кнеза Вишеслава 1, 11030 Београд, Србија

\* адреса за кореспонденцију: [nelezovic@tmf.bg.ac.rs](mailto:nelezovic@tmf.bg.ac.rs)

---

Нискотемпературне горивне ћелије припадају групи обновљивих, еколошки прихватљивих извора енергије. Примена зеленог водоника као чистог горива, добијеног електролизом воде, доприноси заштити животне средине, достизању одрживог економског развоја и циркуларне економије, као императива у процесу енергетске транзиције са фосилних горива ка обновљивим изворима енергије. У овом раду ће бити дат преглед развоја нових материјала за катализаторе у реакцијама редукције кисеоника и оксидације водоника, које се одвијају у нискотемпературним водоничним горивним ћелијама. Наиме, данашњи комерцијални катализатори су на бази платине дисперговане на угљеничним носачима развијене површине-комерцијално названим Vulcan XC-72 и Ketjen Black. Недостатак ових катализатора је недовољна стабилност, посебно на анодним потенцијалима 1.4 V према реверзибилној водоничној електроди, велика цена платине и још увек велика маса Pt потребне за исплативу масовну комерцијализацију, посебно за редукцију кисеоника, услед велике пренапетости и споре кинетике [1,2]. Развој нових катализатора и носача на бази металних оксида [3] - титанијума, калаја, волфрама, као и других неорганских керамичких материјала – карбида, нитрида [4] обележио је последњих пар деценија у радовима светских и наших научника из ове области. Дискутоване су предности и недостаци ових нових катализатора у односу на комерцијално заступљене. Такође је приказана упоредна анализа активности и стабилности нових платинских катализатора на неугљеничним носачима у односу на комерцијалне.

---

### Захвалница

Овај рад је финансијски подржало Министарство науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије, у оквиру уговора бр. 451-03-47/2023-01/ 200053.

### Литература

- [1] A. Morozan, B. Jousset and S. Palacin, Low-platinum and platinum-free catalysts for the oxygen reduction reaction at fuel cell cathodes, *Energy Environ.Sci.*, 4(2011) 1238.
- [2] H. A.Gasteiger, J.E.Panels, S.G.Yanet, Dependence of PEM fuel cell performance on catalyst loading, *J. Power Sources* 127 (2004)
- [3] N. R. Elezovic, V. R. Radmilovic and N. V. Krstajic, Platinum nanocatalysts on metal oxide based supports for low temperature fuel cell applications, *RSC Adv.*,6 (2016) 6788.
- [4] Q. Sun, X.H. Li, K.X Wang, T.N. Yea and J.S. Chen, Inorganic Non-carbon Supported Pt Catalysts and Synergetic Effects for Oxygen Reduction Reaction, *Energy Environ.Sci.*, in press (2023).

## Недавни развој композитних електрокатализатора реакције издвајања водоника на бази $\text{TiO}_2$ нанотубуларних низова као носача

Урош Лачњевац\*

Универзитет у Београду – Институт за мултидисциплинарна истраживања, Кнеза Вишеслава 1, 11030 Београд, Србија

\* адреса за кореспонденцију: [uros.lacnjevac@imsi.bg.ac.rs](mailto:uros.lacnjevac@imsi.bg.ac.rs)

---

Електролиза воде у комбинацији са обновљивим изворима енергије, као што су Сунце или ветар, представља најефективнији пут за добијање ултрачистог зеленог водоника као горива са нултом емисијом угљеник-диоксида. Шира комерцијализација електролизера воде умногоме зависи од цене, активности и радног века катализатора за катодну реакцију издвајања водоника. Често коришћена стратегија за смањење садржаја и повећање масене активности скупочених катодних нанокатализатора јесте њихова имобилизација на проводне носаче са високоразвијеном површином и добром механичком и хемијском стабилношћу. Уређене  $\text{TiO}_2$  нанотубуларне структуре припремљене анодном оксидацијом титана су због својих јединствених оптичких, полупроводничких и електронских карактеристика интензивно испитиване за различите примене у фотокатализи и фотоелектрохемији [1]. Међутим, тек онедавно је препознат њихов потенцијал као носача у електрокатализи реакције издвајања водоника [2], пре свега због добре проводности у катодном смеру, тродимензионалне структуре велике површине, корозионе стабилности у киселој и алкалној средини, еколошке нешкодљивости и ниске цене. Ово предавање даће кратки осврт на методе синтезе, структурна и електрохемијска својства и електрокаталитичку активност за издвајање водоника недавно пријављених композитних материјала на бази  $\text{TiO}_2$  нанотубуларних низова.

---

### Захвалница

Аутор се захваљује на подршци Министарству науке, технолошког развоја и иновација Владе Републике Србије (бр. уговора 451-03-47/2023-01/200053) и Фонду за науку Републике Србије (PROMIS пројекат RatioCAT, бр. 606224).

### Литература

- [1] K. Lee, A. Mazare, P. Schmuki, One-dimensional titanium dioxide nanomaterials: Nanotubes, *Chem. Rev.* 114 (2014) 9385.
- [2] U.Č. Lačnjevac, V.V. Radmilović, V.R. Radmilović, N.V. Krstajić,  $\text{RuO}_x$  nanoparticles deposited on  $\text{TiO}_2$  nanotube arrays by ion-exchange method as electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction in acid solution, *Electrochim. Acta* 168 (2015) 178-190.

## Бифункционални електрокатализатори на бази прелазних метала за реакције редукције и еволуције кисеоника

Душан Младеновић<sup>1</sup>, Ана Младеновић<sup>1</sup>, Diogo M.F. Santos<sup>2</sup>, Ауџе В. Yurtcan<sup>3</sup>, Шћепан Миљанић<sup>1</sup>, Славко Ментус<sup>1,4</sup>, Биљана Шљукић<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Универзитет у Београду - Факултет за физичку хемију, Студентски трг 12-16, 11158 Београд, Србија

<sup>2</sup> Center of Physics and Engineering of Advanced Materials, Laboratory for Physics of Materials and Emerging Technologies, Chemical Engineering Department, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisbon, Portugal

<sup>3</sup> Department of Chemical Engineering, Atatürk University, Erzurum, Turkey

<sup>4</sup> Српска академија наука и уметности, Кнез Михаилова 35, Београд, Србија

\* адреса за кореспонденцију: [biljka@ffh.bg.ac.rs](mailto:biljka@ffh.bg.ac.rs); [biljana.paunkovic@tecnico.ulisboa.pt](mailto:biljana.paunkovic@tecnico.ulisboa.pt)

Повећана потражња за енергијом последњих деценија и брзо исцрпљивање резерви фосилних горива довели су до потребе за новим и обновљивим изворима енергије који ће се користити у будућности. Предложене су бројне алтернативе технологијама на бази фосилних горива, али једна од алтернатива која највише обећава су свакако електрохемијски извори енергије. Међутим, дизајн ефикасних електрокатализатора за ове уређаје представља велики изазов за научну заједницу [1]. Наше истраживање је фокусирано на развој бифункционалних катализатора на бази оксида прелазних метала (Mn, Ni и Ti) за реакције редукције кисеоника и еволуције кисеоника у алкалној средини [2,3]. Ове две реакције су ограничавајући фактор при функционисању електрохемијских уређаја због своје споре кинетике на већини електроодних материјала. Дизајн бифункционалних електрокатализатора неопходних за функционисање метал-ваздух батерија и регенеративних горивних ћелија (уређаји који комбинују горивну ћелију и електролитичку ћелију) представља посебан изазов - један исти материјал би требало да поседује високу активност и стабилност у условима и катодне и анодне поларизације. До сада добијени резултати показују обећавајуће перформансе катализатора на бази оксида прелазних метала декорисаних платином где је постигнута активност слична активности комерцијалног Pt/C катализатора са дуго мањим количинама платине у синтетизованим електрокатализаторима. Осим високе активности, ови материјали су показали и већу стабилност у односу на електрокатализаторе са угљеничним основама.

### Захвалница

Аутори се захваљују Министарству науке, технолошки развој и иновације Републике Србије (уговор бр. 451-03-47/2023-01/200146), као и Фондацији за науку и технологију (Fundacao para a Ciencia e a Tecnologia), Португал, за финансирање у оквиру пројекта EXPL/EQU-EQU/0517/2021, уговора о истраживању у оквиру програмског финансирања UIDP/04540/2020 (D.M.F. Santos) и уговора бр. IST-ID/156-2018 (Б. Шљукић). С.М се захваљује Српској академији наука и уметности на финансирању истраживања кроз пројекат Ф-190.

### Литература

- [1] A. Vazhayil, L. Vazhayal, J. Thomas, S. Ashok C, N. Thomas, A comprehensive review on the recent developments in transition metal-based electrocatalysts for oxygen evolution reaction, *App. Surface Sci. Adv.* 6 (2021) 100184.
- [2] D. Mladenović, E. Daş, D.M.F. Santos, A. B. Yurtcan, Š. Miljanić, B. Šljukić, Boosting oxygen electrode kinetics by addition of transition metals (Ni, Fe, Cu) to platinum on graphene nanoplatelets, *J. Alloys Comp.* 905 (2022) 164156.
- [3] D. Mladenović, D.M.F. Santos, G. Bozkurt, G.S.P. Soylu, A. B. Yurtcan, Š. Miljanić, B. Šljukić, Tailoring metal-oxide-supported PtNi as bifunctional catalysts of superior activity and stability for unitised regenerative fuel cell applications, *Electrochem. Commun.* 124 (2021) 106963.

## Производња водоника алкалном електролизом на индустријском нивоу – развој катода на бази никла

Мила Н. Крстајић Пајић<sup>1\*</sup>, Јелена Д. Гојгић<sup>1</sup>, Александар М. Петричевић<sup>1</sup>, Thomas Rauscher<sup>2</sup>, Christian I. Bernaecker<sup>2</sup>, Владимир Д. Јовић<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Универзитет у Београду - Технолошко-металушки факултет, Карнегијева 4, 11000 Београд, Србија

<sup>2</sup> Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials IFAM, Branch Lab Dresden, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Germany

<sup>3</sup> Универзитет у Београду - Институт за Мултидисциплинарна истраживања, Кнеза Вишеслава 1, 11030 Београд

\* адреса за кореспонденцију: [mpajic@tmf.bg.ac.rs](mailto:mpajic@tmf.bg.ac.rs)

---

Узимајући у обзир растуће потребе за електричном енергијом, и као последицу тога смањење резерви фосилних горива и повећано загађење животне средине, јасно је да је проблем чисте и обновљиве енергије најважније питање данашњице. Електрохемијски системи за производњу и складиштење енергије играју незаменљиву улогу у одрживој будућности, а услед очитих недостатака примене батерија у возилима (стварање отпада, еколошки неповољно рударење литијума, ограниченост домета возила и сл.), водонична енергија је тренутно у средишту фокуса светске научне и стручне јавности. Такозвани „зелени“ водоник се индустријски најчешће производи алкалном електролизом, уз употребу обновљивих извора енергије, због могућности примене неплеменитих метала као катализатора за реакције издвајања водоника и кисеоника у базној средини. Пројекат NOVATRODES има за циљ развој катода за алкалну електролизу у проточним „zero-gap“ системима, где је неопходна примена порозних, тродимензионих електрода, ради олакшаног протока електролита и формираног гаса. Циљеви индустрије у Европи у наредном периоду подразумевају развој катода одговарајуће геометрије за рад у „zero-gap“ системима које ће бити стабилне на густини струје од 10 кА м<sup>-2</sup>, и смањење напона оваквих електролизера испод 2.0 V на густини струје од 5 кА м<sup>-2</sup>. У оквиру пројекта NOVATRODES развијене су електроде на бази пене од никла са електрохемијски исталоженим Ni-Sn превлакама [1,2] које у потпуности задовољавају наведене циљеве.

---

### Захвалница

Ово истраживање финансирано је од стране Министарства образовања и истраживања Федералне Републике Немачке, кроз пројекат NOVATRODES, број пројекта 01DS21010, позив WBC2019, и од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије под уговором број 451-03-47/2023-01/200135.

### Литература

- [1] V.D. Jović, U. Lačnjevac, B.M. Jović, Lj. Karanović, N.V. Krstajić, Ni-Sn coatings as cathodes for hydrogen evolution in alkaline solution. Chemical composition, phase composition and morphology effects, *Int. J. Hydrog. Energy* 37 (2012) 17882-17891
- [2] V.D. Jović, B.M. Jović, U.Č. Lačnjevac, N.V. Krstajić, P. Zabinski, N.R. Elezović, "Accelerated service life test of electrodeposited Ni-Sn alloys as bifunctional catalysts for alkaline water electrolysis under industrial operating conditions", *J. Electroanal. Chem.* 819 (2018) 16-25

## Утицај примене јонских активатора на бази *d*-метала на енергетску ефикасност процеса добијања водоника алкалном електролизом

Ивана М. Перовић\*, Снежана М. Брковић, Гвозден С. Тасић, Никола Н. Здолшек, Мина М. Сеовић, Јелена М. Георгијевић, Стефан Д. Митровић

Универзитет у Београду - Институт за нуклеарне науке Винча, Институт од националног значаја за Републику Србију, Мике Петровића Аласа 12-14, Винча, Београд

\* адреса за кореспонденцију: [ivanaperovic@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanaperovic@vin.bg.ac.rs)

---

Стварање одрживог енергетског система тренутно је један од највећих задатака модерног индустријског друштва. Да би зелени водоник имао важну улогу у овој енергетској транзицији, неопходно је да постане јефтин и лако доступан енергетски медијум на глобалном нивоу кроз ефикасну и безбедну производњу, транспорт и складиштење [1]. Алкална електролиза воде у комбинацији са обновљивим изворима енергије је проверени пут за добијање зеленог водоника те стога не чуди чињеница да је развој целокупних конструкционих решења, сепараторских мембрана, а посебно нових електрокаталитичких материјала у фокусу истраживача у овој области [2]. Бројерова теорија интерметалних веза указује на повећану каталитичку активност електрода на бази *d*-метала у односу на друге електродне материјале [3]. Овај синергетски ефекат се може експлоатисати у пракси на три начина: металуршком израдом легура циљаног састава и структуре, електрохемијском депозицијом превлака на супстрату од базичних метала или методом *in-situ* активације, која због своје једноставне примене представља посебно интересантно подручје истраживања у овој области. У овом раду приказан је ефекат употребе јонских активатора на бази одговарајуће комбинације соли и комплексних једињења *d*-метала на смањење потрошње енергије алкалних електролизера и побољшање каталитичке активности електрода за реакцију издвајања водоника. Јонски активатори се додају директно у стандардни раствор електролита, а забележена су смањења потрошње енергије за производњу исте количине водоника у опсегу од 5% до чак ~20%.

---

### Захвалница

Овај рад је подржало Министарство науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије; број гранта 451-03-47/2023-01/200017.

### Литература

- [1] D. Hauglustaine, F. Paulot, W. Collins, R. Derwent, M. Sand, and O. Boucher, Climate benefit of a future hydrogen economy, *Commun. Earth Environ.* 3 (2022) 295.
- [2] S. Wang, A. Lu, and C.-J. Zhong, Hydrogen production from water electrolysis: role of catalysts, *Nano Converg.* 8 (2021) 4.
- [3] L. Brewer, *Chemical bonding theory applied to metals*, ASM International, New York, 1988.

## Платински катализатори на угљеничној основи за ефикасну оксидацију метанола

Сања И. Стевановић<sup>1\*</sup>, Драгана Милошевић<sup>1</sup>, Душан В. Трипковић<sup>1</sup>, Весна Максимовић<sup>2</sup>, Владан Р. Ђосовић<sup>1</sup>, Небојша Д. Николић<sup>1</sup>, Мила Н. Крстајић Пајић<sup>3</sup>, Јелена Роган<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Универзитет у Београду - Институт за хемију, технологију и металургију, Његошева 12, Београд, Србија

<sup>2</sup> Универзитет у Београду - Институт за нуклеарне науке Винча, Мике Петровића Аласа 12-14, Београд, Србија

<sup>3</sup> Универзитет у Београду - Технолошко-металуршки факултет, Карнргијева 4, 11000 Београд, Србија

\* адреса за кореспонденцију: [sanjas@ihm.bg.ac.rs](mailto:sanjas@ihm.bg.ac.rs)

Горивне ћелије са метанолом (DMFC) као горивом су веома перспективни извори енергије за стационарне и преносиве електричне уређаје пре свега због своје високе ефикасности и ниске емисије загађујућих материја, ниске радне температуре, велике густине енергије, нетоксичних и еколошки прихватљивих карактеристика. Међутим, њихова шира комерцијална употреба ограничена је факторима као што су: високи трошкови племенитог метала у електрокатализатору (на пример, Pt) и лоша радна издржљивост, односно брза деградација катализатора. Да би се смањила цена катализатора и унапредиле њихове перформансе, покренуте су многе стратегије при чему је већина од њих заснивана на синтези платинастих катализатора у којима је платина легирана са јефтинијим металима као што су Ru[1], Sn[2], Ni[3], Zn[4] итд. У овом раду је представљена активност електрооксидације метанола код PtSn, PtSnO<sub>2</sub>, PtZn и PtSnZn катализатора у киселој средини. Стабилне наночестице Pt, PtSn, PtZn и PtSnZn су успешно синтетизоване модификованим полиол поступком уз помоћ микроталасне пећнице. Ефекти састава, степена легирања, величине и морфологије синтетизованих честица на електрокаталитичку активност су испитивани СО стрипинг волтаметријом и реакцијом електрооксидације метанола. Добијени резултати указују на појачане каталитичке активности за реакцију оксидације метанола и побољшану отпорност на инхибицију СО, након додавања Sn или Zn у Pt катализатор.

### Захвалница

Овај рад је финансијски подржало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије (уговор бр. 451-03-68/2022-14/200026) и Fond za nauku Republike Srbije u okviru granta br. 7739802.

### Литература

1. Y. Hu, A. Zhu, Q. Zhang, Q. Liu, Preparation of PtRu/C core-shell catalyst with polyol method for alcohol oxidation, *Int. J. Hydrogen Energy* 41 (26) (2016) 11359–11368.
2. H. Su, Tie-Hong Chen, Preparation of PtSn<sub>2</sub>-SnO<sub>2</sub>/C nanocatalyst and its high performance for methanol electro-oxidation, *Chin Chem. Lett.* 27(7) (2016) 1083–1086.
3. N.R. Mathe, M.R. Scriba, N.J. Coville, Methanol oxidation reaction activity of microwave-irradiated and heat-treated Pt/Co and Pt/Ni nano-electrocatalysts, *Int. J. Hydrogen Energy* 39 (2014) 18871–18881.
4. Chien-Te Hsieh, Wei-Min Hung, Wei-Yu Chen, Jia-Yi Lin, Microwave-assisted polyol synthesis of PteZn electrocatalysts on carbon nanotube electrodes for methanol oxidation, *Int. J. Hydrogen Energy* 36(4) (2011) 2765-2772.

## Синтеза и модификација напредних наноматеријала – поглед кроз призму обновљивих извора енергије

Зоран Јовановић\*, Соња Јовановић, Жељко Мравик, Јелена Рмуш, Марко Јелић, Милица Пејчић,  
Марија Грујичић, Дарија Петковић

<sup>1</sup> Универзитет у Београду, - Институт за нуклеарне науке Винча - Институт од националног значаја за Републику Србију,  
Лабораторија за физику, Београд, Србија

\*адреса за кореспонденцију: [zjovanovic@vinca.rs](mailto:zjovanovic@vinca.rs)

---

Електрохемијска истраживања су претходних година дала кључни подстрек глобалним стремљењима ка обновљивим изворима енергије. Вишегенерацијски напори, у почетку мотивисани жељом за фундаменталним разумевањем процеса, актуелизовани су очекиваним недостатком фосилних горива и пратећим неповољним утицајем на животну средину. Наноматеријали су омогућили спектакуларан скок у технолошким иновацијама и неоспоран је њихов допринос обновљивим изворима енергије. Захваљујући новим својствима наноматеријала и њиховој синергији, омогућено је даље унапређење и интеграција различитих функционалности. При томе, постало је јасно да атомски прецизан дизајн материјала постаје критичан за развој направа следеће генерације. Ово је посебно важно у случају нанокомпозита где интеракција компоненти појачава могуће синергијске доприносе. У излагању ће бити дат осврт на напредне методе синтезе и модификације материјала – од традиционалних, до танких филмова, 0D и 2D наноматеријала и њихових композита – посматраних кроз призму обновљивих извора енергије и одрживости (електрохемијски суперкондензатори, разградња воде, сензори, и др.). Развој нових материјала и унапређење електрохемијских система има потенцијал да суштински учини обновљиву енергију одрживијом и доступнијом, тиме отварајући пут ка одрживој будућности.

---

