

Wpłynęło dnia 03.03.2020
L. dz. 18/WFT, HS/5N/2020
Zaś. —

Warszawa, 18-02-2020

Prof. dr hab. Tomasz Story
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
w Warszawie

Opinia o osiągnięciu habilitacyjnym dr inż. Beaty Bochentyn

pt. „Tlenkowe materiały funkcjonalne do ogniw paliwowych i urządzeń termoelektrycznych” oraz pozostałym dorobku i aktywności naukowej

Beata Bochentyn jednolite studia magisterskie na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej ukończyła z wyróżnieniem w roku 2009. **Stopień doktora nauk fizycznych** uzyskała w roku 2013, także na tym Wydziale, na podstawie rozprawy pt. „Właściwości strukturalne i transportowe kompozytów tytanianu strontu z tlenkami przewodzącymi jonowo (promotor: prof. dr hab. B. Kusz). Od roku 2009 Beata Bochentyn jest zatrudniona na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej, obecnie na stanowisku adiunkta. Pozostałe doświadczenie zawodowe dr inż. B. Bochentyn obejmuje jeszcze tylko krótki pobyt naukowy, który odbyła (odbędzie?) w Centrum Badawczym Materiałów CIEMAT w Madrycie. W latach 2010-2014 B. Bochentyn dwukrotnie korzystała z urlopu macierzyńskiego.

Działalność naukowa dr inż. B. Bochentyn związana jest z fizyką i chemią nowoczesnych funkcjonalnych materiałów tlenkowych o właściwościach wymaganych w ogniwach paliwowych lub termoelektrycznych przetwornikach energii. Stosowane metody syntezy, charakteryzacji strukturalnej i chemicznej, a także doświadczalnej weryfikacji parametrów aplikacyjnych dobrze łączą się w spójny projekt badawczy zdefiniowany w tytule osiągnięcia habilitacyjnego. W swojej działalności doświadczalnej dr B. Bochentyn bardzo trafnie podejmuje także problem wykorzystania różnych optycznych i elektrycznych metod pomiarowych do ilościowego monitorowania przebiegu procesów fizyko-chemicznych w funkcjonalnych układach ogniw paliwowych.

Dr inż. Beata Bochentyn **przedłożyła wniosek habilitacyjny związany z osiągnięciem naukowym pt. „Tlenkowe materiały funkcjonalne do ogniw paliwowych i urządzeń termoelektrycznych”** w postaci cyklu 9 powiązanych tematycznie prac H1 – H9 opublikowanych międzynarodowych czasopismach fizyko-chemicznych:

- H1: Solid State Ionics (2015), habilitantka jest 3-m autorem z deklarowanym wkładem 50%;
- H2: Materials Research Bulletin (2018), habilitantka jest 1-m autorem z deklarowanym wkładem 70%;
- H3: Solid State Ionics (2019), habilitantka jest 1-m autorem z deklarowanym wkładem 70%;
- H4: International Journal of Hydrogen Energy (2019), habilitantka jest 5-m (ostatnim) autorem z deklarowanym wkładem 70%;
- H5: Journal of Non-crystalline Solids (2016), habilitantka jest 1-m autorem z deklarowanym wkładem 65%;
- H6: Journal of Alloys and Compounds (2015), habilitantka jest 1-m autorem z deklarowanym wkładem 50%;
- H7 Materials Chemistry and Physics (2016), habilitantka jest 1-m autorem z deklarowanym wkładem 50%;
- H8 Journal of Electronic Materials (2016), habilitantka jest 3-m autorem z deklarowanym wkładem 40%;
- H9 Materials Research Bulletin (2016), habilitantka jest 1-m autorem z deklarowanym wkładem 50%.

W tych publikacjach, w świetle **oświadczeń złożonych przez wszystkich 15 współautorów**, kluczowy udział dr inż. B. Bochentyn w sformułowaniu zadań badawczych oraz ich realizacji i interpretacji nie budzi wątpliwości. Prace te zostały opublikowane w dobrych międzynarodowych czasopismach w latach 2013 – 2019, tj. kilka lat po uzyskaniu przez B. Bochentyn stopnia doktora, a wyniki uzyskane przez habilitantkę stanowią dobrze określony indywidualny wkład do rozwiązywania różnych problemów technologii i fizyki tlenkowych materiałów funkcjonalnych dla ogniw paliwowych i przetworników termoelektrycznych.

Zwraca uwagę, że habilitantka była autorem-korespondentem we wszystkich publikacjach H1 – H9.

Prace oznaczone H1 – H4 dotyczą materiałów dla anodowych warstw katalitycznych w tlenkowych ogniwach paliwowych wykorzystujących biogaz i proces wewnętrznego reformingu. Takie warstwy mają umożliwić skuteczne zastąpienie wodoru jako paliwa przez inne gazy poprzez uniknięcie szeregu niepożądanych efektów wpływających na trwałość i wydajność procesu przemiany energii chemicznej w elektryczność. Jest to niewątpliwie bardzo ważne zadanie badawcze z dziedziny chemii i fizyki materiałów, o dużym znaczeniu aplikacyjnym.

W **pracy H1** wykonano czasowe pomiary gęstości prądu tlenkowych ogniw paliwowych z różnymi warstwami katalitycznymi (spinel $\text{Cu}_{1.3}\text{Mn}_{1.7}\text{O}_4$, perowskit $\text{Y}_{0.08}\text{Sr}_{0.92}\text{Ti}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ i kompozyt CuO-CeO_2) w warunkach zasilania wodorem i biogazem (z wewnętrznym reformingiem). Omówiono szereg, zaobserwowanych metodą dyfrakcji promieni X i skaningowej mikroskopii elektronowej, zmian strukturalnych i chemicznych.

W **publikacji H2** habilitantka weryfikuje inny ważny aspekt technologiczny doświadczalnie porównując pracę tlenkowego ogniwa paliwowego, w którym zastosowano warstwy katalityczne $Y_{0.07}Sr_{0.93}Ti_{0.8}Fe_{0.2}O_{3-\delta}$ wytworzone trzema metodami. Podsumowując badania tych materiałów, autorzy nie rekomendują ich jako katalizatorów wewnętrznego reformingu biogazu w ogniwach paliwowych ze względu na dużą degradację przy zasilaniu biogazem.

Bardzo dobre parametry pracy tlenkowych ogniw paliwowych zasilanych biogazem habilitantka uzyskała natomiast przy wykorzystaniu anodowych warstw katalizujących na bazie nanoziaren tlenku ceru domieszkowanych Cu lub Co. W **pracy H3** przedstawione są oryginalne osiągnięcia habilitantki związane z opracowaniem metod syntezy tlenku ceru z wysoką zawartością Cu i Co oraz monitorowaniem parametrów elektrycznych ogniwa z taką warstwą anodową przy zasilaniu wodorem albo biogazem. Nowym pomysłem, jakościowo zwiększającym możliwości ilościowej analizy pracy ogniwa w czasie rzeczywistym, jest zastosowanie metody spektroskopii Fouriera w podczerwieni (FTIR) do analizy składu chemicznego gazów wylotowych (metanu, tlenku węgla i dwutlenku węgla). Pozwala to na określenie wydajności procesu wewnętrznego reformingu z wykorzystaniem różnych anodowych warstw katalitycznych. Metoda spektroskopii FTIR, z sukcesem zastosowana w pracy H3 do analizy pracy tlenkowych ogniw paliwowych z warstwą katalityczną, jest szczegółowo opisana, kalibrowana i testowana w **publikacji H4** dla standardowego ogniwa paliwowego. Ze względu na możliwość ciągłego, ilościowego monitorowania składu gazów wylotowych o charakterystycznym widmie w podczerwieni (CH_4 , CO_2 , CO) i po uwzględnieniu w bilansie H_2O możliwe jest określanie wydajności procesu wytwarzania wodoru w ogniwach z anodową warstwą katalityczną. Jest to duży sukces habilitantki ponieważ dysponując takimi danymi prowadzi ona bardzo ważną analizę fizyko-chemiczną szybkości (i kierunku przebiegu) szeregu podstawowych reakcji reformingu (pożądane) i wydzielania różnych form węgla (niepożądane), identyfikując najważniejsze procesy chemiczne.

Publikacja H5 poświęcona jest właściwościom fizycznym i chemicznym szkieł tlenkowych $40Bi_2O_3 - 60SiO_2$ i $27Bi_2O_3 - 73SiO_2$ poddanych procesowi wysokotemperaturowej redukcji w wodorze. Ta klasa materiałów stanowi punkt wyjścia dla syntezy chalcogenkowych materiałów termoelektrycznych będących przedmiotem publikacji habilitacyjnych H6-H9. W pracy H5 szczegółowo zbadano wpływ procesu redukcji w wodorze na strukturę krystaliczną i chemiczną szkieł i pokazano ważną możliwość wytwarzania heterogennych układów tlenkowych z warstwą powierzchniową lub nanowytrąceniami metalicznego Bi.

Cztery publikacje oznaczone H6 - H9 poświęcone są materiałom termoelektrycznym wytwarzanym opracowaną na Politechnice Gdańskiej, przy udziale habilitantki, nową metodą wytwarzania półprzewodnikowych stopów termoelektrycznych, takich jak Bi_2Te_3 (praca H6), $(Bi,Sb)_2Te_3$ (praca H7), $(Ge,Ag,Sb)Te$ (praca H8) i $(GeTe)_{1-x}(AgSbTe_2)_x$ (praca H9) przy wykorzystaniu szkieł tlenkowych jako materiałów wyjściowych. Do wytworzenia tellurku bizmutu – podstawowego materiału dla chłodziarek Peltiera - w różnych (jedno- i wielofazowych) formach opracowana procedura wykorzystuje substraty tlenkowe Bi_2O_3 i TeO_2 poddane kilku etapom technologicznym: topieniu, hartowaniu, mieleniu, prasowaniu i kluczowemu procesowi wysokotemperaturowej redukcji w wodorze.

W pracach H6 - H9 habilitantka, poza syntezą chemiczną, wiele uwagi poświęca szczegółowej charakterystyce chemicznej (struktura krystaliczna, stechiometria, skład chemiczny) przy wykorzystaniu takich metod jak dyfrakcja promieni X, fluorescencja rentgenowska, mikroskopia elektronowa i pomiar gęstości spieków. Ważną częścią tych prac jest doświadczalne zbadanie parametrów elektrycznych i termoelektrycznych (przewodnictwo elektryczne, efekt Seebecka, przewodnictwo cieplne) i wyznaczenie podstawowego parametru aplikacyjnego termoelektryków (ZT). Choć termoelektryczna jakość tak wytworzonych materiałów jest często przeciętna ($ZT=0.1-0.4$) to w niektórych przypadkach autorka uzyskała materiały o bardzo dobrych parametrach (ZT bliskie 1), uzyskując także ochronę patentową dla tych rozwiązań. Jak podkreśla habilitantka, kluczowe znaczenie miała tu optymalizacja poszczególnych etapów technologicznych, w szczególności temperatury i czasu prowadzenia procesu redukcji w wodorze.

Bardzo dobrze oceniając inicjatywę wykorzystania doświadczenia habilitantki i jej współpracowników w fizyko-chemicznych metodach modyfikacji szkieł tlenkowych do opracowania taniej i technologicznie skalowalnej metody wytwarzania termoelektryków należy zwrócić uwagę na kluczowe znaczenie pokazania, że stosowana metoda pozwala na skuteczne sterowanie typem przewodnictwa elektrycznego i wytworzenie dopasowanych termoelektrycznie obu elementów pary p-n. Zarówno generatory jak i chłodziarki termoelektryczne wykorzystują parę p-n i zbadanie parametrów termoelektrycznej konwersji energii takiego bazowego modułu p-n w warunkach pracy jest kluczowym testem jakości materiałów termoelektrycznych. W pracach H6-H9 ten obszar badań jestem podjęty w niewielkim zakresie. Zapewne warto zrealizować te testy we współpracy z zespołami już doświadczonymi w cieplnym i elektrycznym montażu modułów p-n.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych dr inż. Beaty Bochentyn zaliczam:

1. Opracowanie technologii, wytworzenie i wykonanie szczegółowej analizy strukturalnej, chemicznej i elektrycznej warstw anodowych katalizujących proces wewnętrznego reformingu w tlenkowych ogniach paliwowych zasilanych biogazem. Praktyczne pokazanie, że zastosowanie wytworzonych przez habilitantkę warstw katalitycznych na bazie tlenku ceru domieszkowanych Cu i Co istotnie poprawia efektywność i długotrwałość tlenkowych ogni paliwowych poprzez zwiększenie odporności na osadzanie się węgla.
2. Opracowanie metodyki i wykonanie pomiarów pracy tlenkowych ogni paliwowych przy ciągłym monitorowaniu składu chemicznego gazów wylotowych metodą spektroskopii Fouriera w podczerwieni (FTIR). Wykorzystanie tych danych do ilościowej analizy wydajności procesu reformingu wewnętrznego i wyznaczenia kierunku i szybkości przebiegu kluczowych dla działania ogniwa reakcji chemicznych.
3. Praktyczne wykazanie, że metoda redukcji stopionych reagentów tlenkowych pozwala na wytwarzanie szeregu wieloskładnikowych półprzewodnikowych materiałów termoelektrycznych (chalkogenków Bi, Sb, Ge i Ag) o kontrolowanej

strukturze krystalicznej i dobrych parametrach aplikacyjnych dla zastosowań w konwerterach ciepła i elektryczności.

4. Wytworzenie i zbadanie właściwości strukturalnych, chemicznych, cieplnych i elektrycznych czteroskładnikowych chalcogenkowych materiałów termoelektrycznych w postaci stopów Te-Ag-Ge-Sb (tzw. TAGS) i doświadczalne pokazanie możliwości uzyskiwania bardzo dobrych parametrów skuteczności termoelektrycznej $ZT \approx 1$.

Dorobek publikacyjny B. Bochentyn jest, na tym etapie kariery, już duży i wg bazy danych Web of Science z 18 lutego 2020 r. obejmuje 29 prac (w tym dwie pod panińskim nazwiskiem Riegel, uwzględniono najnowsza pracę opublikowaną w *Thermochimica Acta* w r. 2020). 18 z tych artykułów powstało po uzyskaniu przez B. Bochentyn stopnia doktora, w tym 9 prac ze zbioru habilitacyjnego. W dorobku habilitantki jest bardzo dobrze cytowana publikacja w *Journal of Electroceramics* (2010) – 41 cytowań. Sumaryczne cytowania prac dr B. Bochentyn: ok. 190 (z tego ok. 30 % to autocytowania), a indeks H habilitantki wynosi 8. Habilitantka jest także współautorem bardzo wielu (35) prac w materiałach konferencyjnych. Ten dobry dorobek publikacyjny uzupełniają także trzy zgłoszenia patentowe dokonane przez habilitantkę i współpracowników w roku 2014.

Lista prezentacji konferencyjnych jest długa i obejmuje 21 referatów ustnych (15 po uzyskaniu stopnia doktora) oraz 48 plakatów konferencyjnych (33 po uzyskaniu stopnia doktora), w tym dwa referaty na zaproszenie organizatorów (w Gdańsku i w Camerino, Włochy).

Imponującą stroną wniosku jest aktywność dydaktyczna i popularyzatorska habilitantki. B. Bochentyn pełniła funkcje promotora w 18 ukończonych pracach inżynierskich i 9 pracach magisterskich, a obecnie pełni także rolę promotora pomocniczego w jednym otwartym przewodzie doktorskim. Realizowała także szereg zadań dydaktycznych na Wydziale (wykłady i laboratoria), opiekowała się szczególnie uzdolnionymi studentami i uczniami, wygłosiła wiele wykładów popularnonaukowych na Festiwalach Nauki, a także na posiedzeniach uczniowskich kół naukowych oraz angażowała się w ogólnopolskie konkursy dla uczniów. B. Bochentyn jest współautorem internetowego podręcznika „Fizyka dla szkół wyższych” a także publikuje w czasopiśmie „Fizyka w szkole – Czasopismo dla nauczycieli”.

Dr inż. B. Bochentyn **kierowała dwoma projektami badawczymi (PRELUDIUM i SONATA)** oraz była wykonawcą w 5 innych projektach badawczych polskich i międzynarodowych (współpraca z Tajwanem). Pośród jej współpracowników są zespoły z AGH Kraków, Tajwanu i Madrytu a także inne jednostki Politechniki Gdańskiej. Zwraca także uwagę realizacja przez B. Bochentyn badań na zlecenie francuskiej firmy Photonics France.

Za swoją działalność naukową Beata Bochentyn została uhonorowana przyznaniem **6 stypendiów** (w tym w r. 2017 stypendium START Fundacji Nauki Polskiej) oraz **kilkoma nagrodami** w konkursach organizowanych przez firmę Energa (2015), Polskie Stowarzyszenie Wodoru i Ogniw Paliwowych (2015), Prezydenta Miasta Gdańska i Gdańskiego Towarzystwa Naukowego (2013, 2014) oraz Rektora Politechniki Gdańskiej (2012, 2013, 2016, 2107).

Wniosek końcowy

Omówione powyżej osiągnięcia naukowe habilitantki stanowią jej ważny, indywidualny wkład do rozwiązywania różnych problemów fizyki i chemii szkieł tlenkowych jako materiałów funkcjonalnych dla ogniw paliwowych, a także materiałów wyjściowych do wytwarzania chalcogenków Bi, Sb i Ge o dobrych właściwościach termoelektrycznych. Na wysoką ocenę zasługuje także pozostała aktywność naukowa, edukacyjna, popularyzatorska i organizacyjna Pani Beaty Bochentyn.

W związku z tym stwierdzam, że osiągnięcie habilitacyjne pt. „Tlenkowe materiały funkcjonalne do ogniw paliwowych i urządzeń termoelektrycznych” a także pozostały dorobek i aktywność naukowa dr hab. Beaty Bochentyn spełnia odnośne wymagania ustawowe i popieram wniosek o nadanie Pani Beacie Bochentyn stopnia naukowego doktora habilitowanego nauk fizycznych.

Tomasz Stary