



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ FIZYKI TECHNICZNEJ  
I MATEMATYKI STOSOWANEJ



UCZELNIA  
BADAWCZA  
INICJATYWA DOBROCI

dr hab. inż. Beata Bochentyn, prof. PG  
Instytut Nanotechnologii i Inżynierii Materiałowej  
Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej  
Politechnika Gdańska

Gdańsk, 14.09.2023 r.

## Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pauliny Kruk-Fura

pt. „Nowe metody otrzymywania oraz badanie właściwości strukturalnych i elektrycznych nanomateriałów zawierających stabilną w temperaturze pokojowej fazę  $\delta$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ”

*Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie Uchwały nr 23/06/2023 Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne PW z dnia 29 czerwca 2023 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Pani mgr inż. Paulinie Kruk-Fura.*

### 1. Informacje ogólne

Recenzowana rozprawa doktorska pani mgr. inż. Pauliny Kruk-Fura pt. „Nowe metody otrzymywania oraz badanie właściwości strukturalnych i elektrycznych nanomateriałów zawierających stabilną w temperaturze pokojowej fazę  $\delta$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ”, której promotorem jest prof. dr hab. Jerzy E. Garbarczyk, została opracowana na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Praca ma charakter eksperymentalny. Głównym jej celem było wytworzenie nanomateriałów w formie kompozytów szkło-ceramika, zawierających stabilną w temperaturze pokojowej fazę typu  $\delta$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , uwięzioną w matrycy szklistej oraz opisanie struktury i zbadanie elektrycznych właściwości tych materiałów. Podjęty cel naukowy niniejszej rozprawy oceniam jako ważny i aktualny, ponieważ zagadnienie stabilizacji fazy  $\delta$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$  jest przedmiotem zainteresowania wielu badaczy na świecie i stanowi warunek dla potencjalnego zastosowania tych materiałów m.in. jako elektrolitów w tlenkowych ogniach paliwowych.

W ramach realizowanej pracy doktorskiej pani Paulina Kruk-Fura wytworzyła serię próbek układu  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  dwoma metodami: szybkiego chłodzenia z fazy ciekłej, przy użyciu techniki wirujących walców oraz poprzez swobodne chłodzenie z fazy ciekłej. Domieszki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiO}_2$  były wprowadzane do materiałów zarówno w sposób przypadkowy, przez prowadzenie wytopów w tyglach ceramicznych, jak też kontrolowany wskutek topienia precyzyjne obliczonej mieszaniny tlenków w tyglach platynowo-irydowych. Powstałe produkty Doktorantka podzieliła na dwie grupy o różnej formie strukturalnej: nanomateriały, w których w matrycy szklistej uwięzione są ziarna krystaliczne oraz na materiały polikrystaliczne. Strukturę i właściwości elektryczne wytworzonych materiałów Autorka charakteryzowała na podstawie wyników badań metodami: dyfraktometrii rentgenowskiej w temperaturze pokojowej i w trakcie wygrzewania do  $800^\circ\text{C}$ , spektroskopii Ramana, skaningowej mikroskopii elektronowej oraz spektroskopii impedancyjnej. Analizy te pozwoliły Doktorantce opisać warunki i mechanizm stabilizacji wytworzonych układów oraz zaproponować wyjaśnienie zależności pomiędzy mikrostrukturą, obecnością domieszek i strukturą krystaliczną, właściwościami elektrycznymi i stabilnością termiczną otrzymanych materiałów.

Wobec powyższych uwag można stwierdzić, że przedłożona do recenzji dysertacja stanowi istotny wkład do istniejącego stanu wiedzy z zakresu fizyki ciała stałego i inżynierii materiałowej przy jednoczesnym potencjale aplikacyjnym w dziedzinie tlenkowych ogni paliwowych SOFC.

Boch

## 2. Ocena układu pracy, informacja o jej poszczególnych częściach

Rozprawa doktorska została napisana w języku polskim, jej część właściwa liczy 137 stron i składa się z 8 rozdziałów. W pracy umieszczono 27 tabel, 66 rysunków, z czego 21 znajduje się w części wprowadzającej oraz 126 odnośników literaturowych. Układ dysertacji jest typowy – w pierwszym rozdziale opisana jest motywacja podjęcia problemu badawczego, drugi stanowi wprowadzenie teoretyczne zakończone sformułowaniem celu pracy, następnie opisane zostały wykorzystane techniki badawcze, zaś w czterech kolejnych rozdziałach przedstawiono i przedyskutowano uzyskane wyniki badań. Na końcu znaleźć można podsumowanie i wnioski. Zastosowany podział rozprawy na poszczególne części dobrze odzwierciedla zawartość treściową, systematycznie wprowadzającą do kolejnych zagadnień dyskutowanych w pracy. Co jednak zaskakuje, to pominięcie wykazu skrótów i oznaczeń – znacznie ułatwiłyby czytanie dysertacji, zwłaszcza osobom spoza dziedziny nauk ścisłych. Jest to dość istotny brak w pracy.

W Rozdziale 1 zatytułowanym „Motywacja” Autorka opisała ogólnoświatowy trend zmierzający do pozyskiwania energii z odnawialnych źródeł. Tym sposobem coraz więcej uwagi poświęca się ogniom paliwowym jako urządzeniom, które w sposób ekologiczny konwertują energię chemiczną na energię elektryczną. W wysokotemperaturowej odmianie tych urządzeń – tlenkowych ogniwach paliwowych - standardowym materiałem wykorzystywanym jako elektrolit jest tlenek cyrkonu stabilizowany tlenkiem itru (YSZ). Alternatywę stanowić mógłby tlenek bizmutu, ale tylko w fazie  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wykazuje on przewodność jonową konkurencyjną dla tradycyjnego YSZ, co stanowi bezpośrednią motywację podjęcia przez Autorkę w rozprawie doktorskiej problemu badawczego stabilizacji fazy  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. W Rozdziale 2 zatytułowanym „Wprowadzenie do badań” Pani Paulina Kruk-Fura przedstawiła podział materiałów ze względu na strukturę, opisała mechanizm przewodnictwa jonowego w ciałach stałych, scharakteryzowała metody stabilizacji materiałów, w tym  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a na końcu sprecyzowała cel niniejszej pracy. O ile w ocenie Recenzentki pierwsze dwa podrozdziały wydają się być nieco zbyt proste jak na rozprawę doktorską, to bez wątpienia stanowią one cenne kompendium usystematyzowanej wiedzy, pozwalającej czytelnikowi zrozumieć kontekst prowadzonych przez Autorkę badań. Z kolei przedstawiony problem stabilizacji faz w materiałach jest zagadnieniem niezwykle istotnym i czyni niniejszą rozprawę ważną z punktu widzenia fizyki ciała stałego. Rozdział 3 stanowi rzetelną prezentację fizycznych podstaw działania metod pomiarowych wykorzystywanych przez Autorkę: dyfraktometria rentgenowska (XRD), skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM), spektroskopia Ramana i spektroskopia impedancyjna. W Rozdziale 4 zatytułowanym „Synteza i identyfikacja nanomateriałów z fazą typu  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>” Pani Paulina Kruk-Fura opisała rezultaty badań próbek tlenku bizmutu wytapianych w tyglach ceramicznych, a następnie wytwarzanych metodą szybkiego chłodzenia z fazy ciekłej przy użyciu techniki wirujących walców oraz poprzez swobodne chłodzenie z fazy ciekłej. W rezultacie w wytworzonych materiałach pojawiły się nieintencjonalne domieszki glinu oraz krzemu w ilości kilku % atomowych. W Rozdziale 5 przeprowadzono badania analogiczne jak w Rozdziale 4, ale na próbkach, których dodatek glinu i krzemu był kontrolowany wskutek topienia precyzyjnie obliczonej mieszaniny tlenków w tyglach platynowo-irydowych. Dodatkowo opisano rezultaty badania próbek z obu serii za pomocą spektroskopii Ramana. W Rozdziale 6 Autorka przedstawiła i przedyskutowała wyniki badań materiałów przy użyciu wysokotemperaturowej dyfraktometrii rentgenowskiej w powietrzu w celu oceny stabilności termicznej materiałów. Rozdział 7 poświęcony został prezentacji i opisaniu wyników badań właściwości elektrycznych wytworzonych związków metodą spektroskopii impedancyjnej. Z kolei Rozdział 8 stanowi przejrzyste, systematyczne podsumowanie uzyskanych wyników i wyciągniętych wniosków wraz z cennym przedyskutowaniem tzw. „Zagadnień otwartych”, czyli kwestii wymagających dalszego badania, aby uzyskać jeszcze pełniejszą wiedzę o prezentowanych w dysertacji materiałach.

Układ i styl rozprawy doktorskiej są przystępne, choć Autorce nie udało się ustrzec od kilku błędów składniowych, ortograficznych (np. „ponad to”, „bez emisyjny”), dość licznych „literówek” i kilku wyrażen potocznych. Nie umniejsza to jednak całościowego, pozytywnego odbioru pracy.

### 3. Ocena zawartości merytorycznej pracy

#### 3.1 Ocena zastosowanego piśmiennictwa

W recenzowanej rozprawie doktorskiej zawarto 126 odnośników bibliograficznych, z czego 90 cytowanych jest w części wprowadzającej. Większość z nich stanowią odwołania do artykułów badawczych i tematycznych książek naukowych. Pojawiają się też odnośniki do kilku stron internetowych. Literatura jest dobrze dobrana w kontekście podjętego tematu, choć uważam, że można by było odnieść się do większej ilości bardziej aktualnych prac. We wstępie teoretycznym autorka sięga do tzw. dzieł fundamentalnych (np. autorstwa Zallena czy Kittela), bardzo skrupulatnie zaznajamiając czytelnika z podstawami teoretycznymi podjętego zagadnienia. Stopniowo uszczegóławia jednak swoją dyskusję, powołując się kolejno na specjalistyczne artykuły naukowe z okresu ostatnich 20 lat. W części dotyczącej analizy wyników odnośniki literaturowe są jednak bardziej aktualne – większość cytowanych prac powstała po 2015 roku. Uważam, że wykonany przez Autorkę przegląd literaturowy świadczy o jej dobrym zaznajomieniu się z podjętym tematem.

#### 3.2 Cel pracy

Jej już wspomniano na wstępie niniejszej recenzji, głównym celem rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Kruk-Fura było wytworzenie nanomateriałów w formie kompozytów szkłoceramika, zawierających stabilną w temperaturze pokojowej fazę typu  $\delta$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , uwięzioną w matrycy szklistej oraz opisanie struktury i zbadanie elektrycznych właściwości tych materiałów. Autorka sformułowała również cele szczegółowe pracy: 1) zbadanie wpływu kontrolowanych i niekontrolowanych domieszek na możliwość uzyskania kompozytów szkło-ceramika z uwięzioną stabilną fazą typu  $\delta$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , 2) porównanie właściwości strukturalnych, mikrostrukturalnych, elektrycznych oraz stabilności termicznej otrzymanych materiałów w zależności od stosowanej parametryzacji procesu syntezy i 3) zaproponowanie wyjaśnienia mechanizmu stabilizacji fazy typu  $\delta$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , uwięzionej w otrzymanych kompozytach.

Tak sformułowane cele wyznaczyły kolejne etapy prowadzonych prac badawczych, począwszy od syntezy nowych materiałów, poprzez ich charakteryzację, aż po zaproponowanie wyjaśnienia fizycznych mechanizmów stabilizacji fazy typu  $\delta$ - $\text{Bi}_2\text{O}_3$  w wytworzonych kompozytach. W pracy dostrzegalny jest logiczny ciąg wnioskowania, skutkujący dobrym doбором kolejnych etapów eksperymentu i konsekwentnie zmierzający do uzyskania odpowiedzi na postawione pytania. Wobec powyższych cel pracy należy uznać za zrealizowany z sukcesem, a uzyskane wyniki badań mogą być dalej wykorzystywane i rozwijane.

#### 3.3 Zastosowane metody badawcze

Do wytworzenia nanokompozytów (szkło-ceramika) oraz próbek polikrystalicznych o nanometrycznym rozmiarze ziaren układu  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ , ze stabilną w temperaturze pokojowej fazą typu  $\delta$ , mgr inż. Paulina Kruk – Fura wykorzystwała techniki szybkiego chłodzenia z fazy ciekłej za pomocą wirujących walców (twin-rollers) oraz swobodnego chłodzenia. Domieszki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiO}_2$  były wprowadzane do materiałów zarówno w sposób przypadkowy, przez prowadzenie wytopów w tyglach ceramicznych, jak też kontrolowany skutek topienia precyzyjne obliczonej mieszaniny tlenków w tyglach platynowo-irydowych. Powstałe produkty Doktorantka podzieliła na dwie grupy o różnej formie strukturalnej: nanomateriały, w których w matrycy szklistej uwięzione są ziarna krystaliczne oraz na materiały

*Beata*

polikrystaliczne. Strukturę i właściwości elektryczne wytworzonych materiałów Autorka charakteryzowała na podstawie wyników badań metodami: dyfraktometrii rentgenowskiej w temperaturze pokojowej i w trakcie wygrzewania do 800°C, spektroskopii Ramana, skaningowej mikroskopii elektronowej oraz spektroskopii impedancyjnej. Analizy te pozwoliły Doktorantce opisać warunki i mechanizm stabilizacji wytworzonych układów oraz zaproponować wyjaśnienie zależności pomiędzy mikrostrukturą, obecnością domieszek i strukturą krystaliczną, właściwościami elektrycznymi i stabilnością termiczną otrzymanych materiałów.

Stwierdzam, że przyjęty plan badawczy, zastosowane techniki charakteryzacji materiałów oraz sposób analizy wyników i oceny niepewności pomiarów są prawidłowe z punktu widzenia realizacji celów pracy doktorskiej mgr. inż. Pauliny Kruk-Fura.

### 3.4 Omówienie i ocena wyników badań

Recenzowana rozprawa doktorska zawiera ciekawe wyniki, które zostały osiągnięte w efekcie badań przeprowadzonych przez mgr inż. Paulinę Kruk-Fura. Za najważniejsze rezultaty opisane w niniejszej dysertacji uważam:

1. Przeprowadzenie systematycznej analizy struktury, właściwości elektrycznych i termicznych układów  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  wytwarzanych różnymi metodami w celu wyjaśnienia wpływu warunków procesu syntezy na wybrane parametry fizykochemiczne tych materiałów.
2. Zaproponowanie metody stabilizacji fazy typu  $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$  w nanomateriałach w formie nanokompozytów szkło-ceramika oraz w materiałach polikrystalicznych układu  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ .
3. Zaproponowanie wyjaśnienia zależności pomiędzy mikrostrukturą, obecnością domieszek i strukturą krystaliczną otrzymanych materiałów w procesie stabilizacji fazy typu  $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ .
4. Zaproponowanie interpretacji fizycznej wpływu domieszek  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{SiO}_2$  oraz mikrostruktury badanych materiałów na ich przewodność elektryczną i stabilność termiczną.

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji dysertacja doktorska stanowi oryginalne, wartościowe rozwiązanie podjętego problemu naukowego. Autorka podjęła ważne i trudne zagadnienie naukowe o istotnym potencjale aplikacyjnym, jakim jest stabilizacja fazy  $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ , więc praca ta wnosi ważny wkład do istniejącego stanu wiedzy o materiałach z grupy tlenków bizmutu. Zaciekawienie Recenzentki tematem oraz wyłapanie w dysertacji kilku nieścisłości zrodziły kilka pytań/uwag o charakterze polemicznym, o których wyjaśnienie chciałabym prosić podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

### 3.5 Komentarze i pytania

- 1) W dyskusji wyników XRD Autorka komentuje zmianę szerokości refleksów z zależności od warunków wytwarzania materiałów. Czy prowadzone były obliczenia metodą Debaya-Scherrera z wyników XRD w celu wyznaczenia rozmiaru nanokrystalitów powstałych w matrycy szklistej oraz w próbce polikrystalicznej? Jeśli tak, proszę o prezentację tych wyników. Jeśli nie jest to możliwe, proszę o komentarz.
- 2) Na Rys. 4.7 i 4.8 Autorka pokazuje obrazy SEM powierzchni i przełomów próbek i wskazuje na powstałe „nieregularności” w tych materiałach. Zakładam, że obrazy te uzyskano z wykorzystaniem detektora elektronów wtórnych SE. Ciekawe byłoby również pokazanie obrazów tych materiałów uzyskanych za pomocą detektora elektronów wstecznie rozproszonych

BSE. Mogłoby to uwidocznic separację faz, jeśli takowa zachodzi w materiałach, zwłaszcza w odniesieniu do pierwiastków wprowadzonych nieintencjonalnie. Czy Autorka posiada jakiegokolwiek takie wyniki?

- 3) W Tab. 4.4 przedstawiono wyniki analizy EDX w postaci % at. zawartości poszczególnych pierwiastków wraz „błędem” wyrażonym w „%”. Czy jest to błąd czy niepewność? Wartości te są względne czy bezwzględne? Z czego wynika tak duża dokładność (do 0,01)? Proszę o komentarz.
- 4) Na stronie 72 Autorka stwierdza, że „podjęto próbę zmodyfikowania modelu teoretycznego struktury, umieszczając w nim jony Al oraz Si w pozycji jonów Bi (podstawienie). Wyniki spełniające normy jakościowe uzyskano jedynie dla wariantu, w którym do modelu teoretycznego włączone zostały wyłącznie jony Si.” Proszę o szerszy komentarz, na czym polegał problem i próbę wyjaśnienia, dlaczego zdaniem Doktorantki jony Al włączone do modelu nie dają dobrych wyników.
- 5) Na Rys. 5.4 widać, że dyfraktogram próbki BAS3c wyraźnie odbiega od pozostałych. Trudno jest mi jednak zaakceptować komentarz: „można zaryzykować stwierdzenie, iż jest to raczej efekt związany z błędem operatora urządzenia”. W przypadku podejrzenia błędu operatora pomiar bezwzględnie trzeba powtórzyć, czy to z ciekawości naukowej, czy po prostu dla zachowania porządku w eksperymencie.
- 6) Ciekawych rezultatów dostarczyły badania metodą spektroskopii Ramana i stanowią przyczynek do głębszej dyskusji. W pierwsze, w ocenie Recenzentki, obecność fazy  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nie jest w próbkach jednoznaczna na podstawie tych wyników. Pik (pasmo) spodziewany przy 630 cm<sup>-1</sup> jest bardzo rozmyty i przesunięty. Po drugie, w widmie próbki B02e (na Rys.5.6) widać również niewielkie ślady od fazy  $\gamma$ , co zostało pominięte w dyskusji. Po trzecie, badania próbek z serii BAS (Rys. 5.7/5.8) dają różne wyniki w zależności od analizowanego obszaru. Dlaczego? Proszę o odniesienie się do tych kwestii.
- 7) Jak wskazuje tytuł rozprawy – celem było uzyskanie stabilnej fazy  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Czy stabilność tej fazy była długoterminowa? Czy przeprowadzono jakiegokolwiek badania próbek po jakimś odstępie czasu? Na Rys. 6.2 w dyfraktogramie próbki B02c już w temperaturze pokojowej widać dodatkowy refleks przy  $2\theta=30.5^\circ$ . Nie było go widać na dyfraktogramie przedstawionym na Rys.4.2, mimo, że odnosił się do tego samego materiału. Czy pomiar XRD w zmiennych temperaturach był wykonywany po jakimś czasie i wobec tego można wnioskować, że jednak faza  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> może nie być stabilna w czasie?
- 8) Nie jest zrozumiałe, czy zależności Arrheniusa zostały wyznaczone na podstawie całkowitego oporu z pomiarów impedancyjnych czy tylko ze składowej wysokoczęstotliwościowej zinterpretowanej przez Autorkę jako opór fazy  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $R_\delta$ ). Dyskusja na str. 111 wskazywałaby, że to tylko składowa  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (porównaj Tab. 7.2), ale interpretacja wartości energii aktywacji na str. 114 sugeruje coś innego. Proszę o doprecyzowanie.
- 9) Jakie inne metody badawcze Autorka mogłaby zasugerować, aby jeszcze lepiej rozstrzygnąć, czy w materiałach powstała faza  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i czy faktycznie jest ona stabilna?
- 10) We wnioskach końcowych autorka sugeruje, że biorąc pod uwagę potencjalne zastosowanie wytworzonych materiałów w ogniwach paliwowych potrzebne byłoby również zbadanie wpływu atmosfery redukującej na ich właściwości. Oczywiście jest to bardzo słuszne spostrzeżenie.

Dodatkowo sugeruję, że wskazane byłoby zmierzenie współczynnika rozszerzalności termicznej (TEC) i ocena jego dopasowania do pozostałych elementów ogniwa SOFC, jeśli któryś z wytworzonych materiałów miałby być rozważany jako alternatywny elektrolit do tych urządzeń. Jest to oczywiście życzliwa rada na przyszłość.

Inne drobne uwagi:

- 11) Błąd w podpisie Rys. 4.5 – „... materiałów z serii B02” – powinno być „... materiałów z serii B04”.
- 12) Na str. 64 w dyskusji Rys. 4.7 (d) pojawia się symbol próbki B05c, podczas gdy według podpisu zdjęcia SEM jest to próbka B05e.
- 13) Prezentacja Rys. 4.8 (b) nieco wprowadza w błąd – w gruncie rzeczy jest to zdjęcie wykonane z tym samym powiększeniem co 4.8 (a), mimo, że pasek skali jest przedstawiony inaczej. Wobec tego średnie rozmiary ziaren wyznaczone na podstawie zdjęć SEM powinny być podobne w obu tych przypadkach. Zaobserwowane rozbieżności najprawdopodobniej wynikają z niejednorodności powierzchni obrazowanej na Rys. 4.8 (a).
- 14) Str.85 – „... o rozmiarach od kilku do kilkudziesięciu  $\mu$ ”. Brakuje jednostki miary.

#### 4. Podsumowanie

Należy podkreślić, że praca napisana jest w sposób przystępny, z wyraźnie zaznaczonym ciągiem przyczynowo-skutkowym warunkującym kolejne etapy eksperymentu, a powyższe uwagi mają jedynie charakter wskazówek, których przytoczenie wynika z obowiązków stawianych przed Recenzentki. Uwagi te w żaden sposób nie wpływają na całościowy ogląd pracy, który w oczach Recenzentki jest pozytywny. Jej rezultatem jest wytworzenie i kompleksowe zbadanie serii materiałów w postaci kompozytów szkło-ceramika oraz próbek polikrystalicznych zawierających fazę  $\delta$ -Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Bardzo wysoko oceniam fragment „Podsumowania” zatytułowany „Zagadnienia otwarte”, w którym Autorka opisuje ścieżki wymagające jeszcze dalszych badań i dyskusji, aby zwiększyć stan wiedzy o materiałach, a tym samym prezentuje się jako świadoma i dojrzała badaczka. Bez wątplenia zagadnienia opisywane w recenzowanej dysertacji są ważne i ciekawe, a tym samym zasługują na kontynuację.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Pauliny Kruk-Fura stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego należącego do dyscypliny naukowej nauki fizyczne w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych. Praca przedstawia ciekawe, nowe wyniki, a cel sformułowany przez Autorkę został osiągnięty. Mgr inż. Paulina Kruk-Fura wykazała się samodzielnością w prowadzeniu pracy naukowej oraz wiedzą i systematycznością w rozwiązywaniu problemów naukowych. Praca spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszą do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne PW o dopuszczenie mgr. inż. Pauliny Kruk-Fura do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*Beata Bochentyn*

dr hab. inż. Beata Bochentyn, prof. PG