

prof. dr hab. Bogdan Pałosz  
Instytut Wysokich Ciśnień PAN

Warszawa dn. 15.X.2018

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Franciszka Dąbrowskiego pt.**

**“WPLYW DOMIESZEK I DODATKU NANOCZĄSTEK B<sub>4</sub>C NA WŁAŚCIWOŚCI  
TERMOELEKTRYCZNE DWUKRZEMKU KRZEMU”**

wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Krzysztofa Jana Kurzydłowskiego

**Uwagi ogólne**

Przedstawiona rozprawa doktorska napisana w języku polskim wydana została w serii monografii doktorskich Politechniki Warszawskiej przez Wydział Inżynierii Materiałowej PW. Rozprawa doktorska obejmuje 123 strony i składa się z Podziękowań, Streszczenia, oraz 15. rozdziałów, z których 8 pierwszych poświęconych jest uzasadnieniu podjęcia badań i omówieniu technik badawczych wykorzystanych przez doktoranta. Rozdział 9. przedstawia przyjętą metodykę badań. W rozdziale 10. przedstawiony został cel pracy, a w rozdziałach 11 i 12 omówione są wyniki wykonanych badań. W rozdziałach 13. i 14. przedstawione zostało „Podsumowanie i wnioski” oraz wskazania dla kontynuowania zadań podjętych w rozprawie. Lista publikacji, na która powołuje się autor zawiera 124 pozycje.

**Rozdział 1 Wprowadzenie**

Uzasadnienie podjęcia badań jest bardzo klarowne i nie budzi wątpliwości: wykorzystanie traconej energii cieplnej dla wytworzenia energii elektrycznej. Wybór materiału również jest dobrze uzasadniony, w szczególności (w domyśle) ekonomicznie, mając na uwadze perspektywę masowego zastosowania dwutlenku krzemu w urządzeniach termoelektrycznych.

## Rozdziały 2-9

### Opis zjawisk i właściwości fizycznych materiałów termoelektrycznych

Podstawowe informacje o zjawiskach i właściwościach materiałów, które były przedmiotem badań lub były wykorzystywane przez doktoranta w pracy badawczej, przedstawione zostały bardzo przystępnie i przejrzysto, na pograniczu popularno-naukowym, jednakże w pełni wystarczająco dla potrzeb zrozumienia celów podjętych badań i sposobu ich realizacji. Można stwierdzić, że ta wstępna część rozprawy jest „wzorcową”.

Wątpliwości budzi opis faz powstających w układzie Fe-Si przedstawiony w rozdziale 6. oraz brak informacji o znaczeniu wielkości i rozkładu wielkości ziaren syntezowanych materiałów wyjściowych oraz próbek skonsolidowanych .

Układ równowagi faz przedstawiony na rys.11 nie pozostaje w związku z przeprowadzonymi badaniami, nie jest też w żadnym miejscu pracy przywołany ani wykorzystany.

Omawiając przemiany pomiędzy fazami  $\epsilon$ ,  $\alpha$  i  $\beta$  byłoby właściwe i pożądane przedstawienie ich struktury choćby „na poziomie podstawowym”, np. budowy ich komórek elementarnych. Taka informacja pozwala zrozumieć mechanizmy przemian w pożądaną fazę  $\beta$ , kluczowe dla osiągnięcia założonego celu. Podobnie, brak jest danych o właściwościach fizycznych różnych faz, w tym zarówno elektrycznych i mechanicznych, również gęstości fizycznej. Należy zauważyć, że np. gęstość materiałów wyzarzanych jak i ich właściwości mechaniczne są analizowane w rozdziałach 12.2 i 12.8 bez wskazania danych odniesienia.

Doktorant zaznacza, że zarówno stopień rozdrobnienia, zatem wielkość i rozkład wielkości ziaren, ma istotne znaczenie dla właściwości termoelektrycznych  $\beta$ -FeS<sub>2</sub>. Ani w rozdziale 6. ani też w kolejnych 2. rozdziałach 7 i 8 poświęconym syntezie mechanicznej i spiekaniu plazmowo-impulsowemu nie są podane informacje o wielkości ziaren materiałów badanych wcześniej i wymienionych w Tabeli 2. Doktorant słusznie zwraca uwagę na „przewagę” metody syntezy mechanicznej i spiekania plazmowo-impulsowego nad innymi technikami syntezy i konsolidacji, szczególnie z racji możliwości lepszej kontroli procesu rozrostu ziaren. Doktorant nie podaje jednakże żadnych konkretnych danych ilościowych, które są istotne dla prac nad praktycznym wykorzystaniem proponowanej metody uzyskiwania materiału Fe-S dla zastosowań termoelektrycznych, w szczególności „jakości” materiałów związanej z wielkością ziaren.



## **Rozdział 10 Cel pracy i koncepcja badań**

Cel pracy został sformułowany „dość jasno”: „wytworzenie dwukrzemku żelaza o podwyższonych właściwościach termoelektrycznych poprzez domieszkowanie i dodatek nanocząstek B<sub>4</sub>C z zastosowaniem oryginalnej metody wytwarzania mechanicznej syntezy i spiekania PPS”.

Termin „podwyższone właściwości” ma dwojakie znaczenie: podwyższenie właściwości w stosunku do czystej fazy  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> oraz w stosunku do wcześniej otrzymywanych podobnych materiałów domieszkowanych.

Wybór domieszek został dobrze uzasadniony analizą danych literaturowych i nie budzi wątpliwości.

## **Rozdział 11 Preparatyka**

Przedstawiono charakterystykę komercyjnych materiałów proszkowych użytych do wytworzenia materiałów F-S. Przedstawiono zdjęcia wykonane na skaningowym mikroskopie elektronowym oraz odpowiadające im widna EDS. Wskazano na zanieczyszczenia, w szczególności na obecność tlenu w użytych do syntezy materiałach wyjściowych.

Przedstawiono też procedurę przygotowania materiałów do syntezy mechanicznej, parametry mielenia próbek domieszkowanych oraz z dodatkiem B<sub>4</sub>C.

Spiekanie prowadzono w matrycach grafitowych w temperaturze 1100°C pod ciśnieniem 50 MPa dobierając częstotliwość impulsów dla utrzymania tej samej temperatury dla wszystkich próbek.

Próbki wyżarzano w 850°C w czasie 10 godz. dla zapewnienia całkowitej przemiany faz  $\epsilon$  i  $\alpha$  w fazę  $\beta$ -FeS<sub>2</sub>.

*Uwaga 1.: Informacja o tym, że na etapie syntezy dodawano nadmiarowo 5% Si ze względu na niedomiar tego pierwiastka w syntezowanym materiale podano w paragrafie 12.3, zamiast umieścić te informacje w tym rozdziale.*

*Uwaga 2: Opis powyższy winien być połączony z rozdziałem 12.1 i umieszczony w rozdziale 12; zsyntetyzowanie materiału i uzyskanie form skonsolidowanych należy do „wyników”.*

## **Rozdział 12 Wyniki badań i ich omówienie**

## **Rozdział 12.1. Mechaniczna synteza**

Tytuł rozdziału sugeruje, że opisany w nim jest proces syntezy, podczas gdy faktycznie przedstawiono w nim zdjęcia SEM niektórych z otrzymanych proszków przed konsolidacją. Stwierdzono, że w syntezywanym materiale wielkość ziaren mieści się w szerokim przedziale od 0.1 do 10  $\mu\text{m}$ . Wskazano na obecność zanieczyszczeń, nie wykonano jednakże analizy chemicznej otrzymywanych proszków, ani też form skonsolidowanych.

Powołanie się na kryterium czystości wykonane na podstawie dyfraktometrycznej analizy strukturalnej (rozdział 12.3) jest nieporozumieniem: rutynowa dyfraktometryczna analiza fazowa pozwala na „zauważenie” obecności faz krystalograficznych występujących w ilości kilku %. Zanieczyszczenia na poziomie „kontaminacji” oznaczają zawartość zanieczyszczeń na poziomie co najmniej o rząd wielkości mniejszej niż wykrywalna metodami dyfraktometrycznymi.

## **Rozdział 12.2. Pomiary gęstości**

Pomiary gęstości są jednym z podstawowych testów jakości otrzymywanych materiałów. „Wysoka gęstość i mały rozrost ziaren były celem dla autora niniejszej rozprawy i stanowiły podstawę doboru parametrów procesu spiekania PPS”.

Jakkolwiek doktorant wspomina, że pomiary gęstości wykonane były dla badanych materiałów przed i po wyżarzaniu, w tabeli 8 podane są jedynie gęstości finalne otrzymanych próbek. Dodany komentarz, że różnice gęstości przed i po procesie wyżarzania mieszczą się „w granicach błędu” jest niewystarczający. Brak jest komentarza różnic mierzonych gęstości dla próbek z tą samą domieszką oraz pomiędzy próbkami z różnymi domieszkami ; czy również te różnice mieszczą się „w granicach błędu pomiarowego”?

Należy się oczywiście zgodzić, że gęstość otrzymanych próbek jest wysoka, i w tym sensie założony cel został osiągnięty.

Zauważalny jest brak komentarza n.t. rozrostu ziaren w czasie spiekania i wyżarzania, oraz porównanie z innymi technikami otrzymywania podobnych materiałów.

## **Rozdział 12.3. Rentgenowska analiza**



Analiza strukturalna przedstawiona jest w formie dyfraktogramów, jest „słabo czytelna” i jest w gruncie rzeczy jedynie jakościowa. Jest niezrozumiałe dlaczego wyników pomiarów nie podano ilościowo, skoro wykonanie ilościowej analizy fazowej jest procedurą rutynową w praktyce badań dyfraktometrycznych.

Brak podania wyników w formie ilościowej jest tym bardziej niezrozumiały, że w rozdziale 12.7 w tabeli 15. przedstawiono ilościowo zawartość fazy  $\epsilon$  wykonaną metodą komputerowej analizy obrazu. Aż „się prosi” o porównanie wyników analizy dyfraktometrycznej z wynikami komputerowej analizy obrazu.

#### **Rozdział 12.4. Obserwacje na skaningowym mikroskopie elektronowym**

Wyniki obserwacji mikroskopowych pozwalają na jakościową ocenę przemiany faz  $\epsilon$  i  $\alpha$  w fazę  $\beta$  i są potwierdzeniem i uzupełnieniem pomiarów dyfraktometrycznych. Na podstawie przedstawionych rysunków i krótkich komentarzy czytelnik może dokonać własnej oceny jakości próbek. Brak jednakże podsumowania i przedstawienia przez doktoranta oceny jakości zbadanych próbek, szczególnie z punktu widzenia założonych celów.

#### **Rozdział 12.5. Analiza składu chemicznego z wykorzystaniem metody EDS**

Ten rozdział winien poprzedzać rozdział 12.4, w którym doktorant powołuje się na identyfikację faz  $\epsilon$  i  $\alpha$  jako obszarów jasnych i ciemnych, natomiast z porównania rys.42 z tabela 9 wynika jednoznacznie, że jest przeciwnie: faza  $\epsilon$  jest ciemna a  $\alpha$  jasna. Prawdopodobnie kontrast jest odwrócony.

Wyniki pomiarów składu chemicznego EDS podane w tabeli 10, również 11 dla materiałów przed wyżarzaniem są w gruncie mało użyteczne; dowodzą, że nie należy stosować tej techniki dla ilościowej analizy składu chemicznego materiałów polikrystalicznych o wielkości ziaren rzędu ułamka  $\mu\text{m}$ . Ważny jest jednakże wynik przedstawiony w tabeli 12, który wykazuje, że niezależnie od dużych lokalnych różnic składu chemicznego w materiale przed wyżarzaniem, finalny materiał ma skład jednorodny odpowiadający pożądanej fazie  $\beta\text{-FeSi}_2$ .

Odwołanie się doktoranta do tabeli 13 dla wykazania obecności obszarów wzbogaconych w Si należy uznać za nieporozumienie. Jakkolwiek występują niewielkie różnice składu pomiędzy punktami wskazanymi na rys. 44 (pomijając fakt że doktorant nie podaje błędu

pomiaru) to mając na uwadze choćby rozrzut składu mierzony dla innych materiałów, np. tabela 10, i znając ograniczenia metody EDS, należy uznać wszystkie wartości w tabeli 13 za „takie same”.

## **Rozdział 12.6. Obserwacje na transmisyjnym mikroskopie elektronowym**

Obserwacje ograniczone były do materiałów z  $B_4C$  i miały na celu określenie rozmieszczenia nanocząstek  $B_4C$ , obserwacje porów i określenie wielkości ziaren (doktorant odwołuje się do rozdziału 11.7 zamiast 12.7).

Doktorant „widzi” nanocząstki  $B_4C$  na rys.47; zapewne ze względu na słaby wzrok nie jestem w stanie ich zidentyfikować; wskazane by było ich wskazanie na obrazach o większym powiększeniu.

Interesujące jest zaobserwowanie domenowej struktury ziaren  $\beta-FeS_2$ , jednakże dyskusja i polemika z hipotezą ich powstawania z racji krystalizacji na wielu zarodkach jest niezrozumiała bez graficznego przedstawienia atomowej budowy struktury domenowej.

Niezrozumiała jest konkluzja „nie stwierdzono geometrycznej zależności pomiędzy obliczona wielkością (jaką./czego?) a doniesieniami literaturowymi? Fakt ten może świadczyć o tym, że domeny uporządkowane mogą powstawać nie tylko wzdłuż kierunku [200]”. Płaszczyzna najgęstszego upakowania jest płaszczyzną „uprzywilejowaną” w porównaniu z każdą inną płaszczyzną atomową, właśnie z tytułu „najgęściej”, i związanej z tym jest szczególnie wysoką stabilnością. Nie jest jasne co doktorant ma na myśli przez stwierdzenie: „nie tylko wzdłuż kierunku [200]”.

## **Rozdział 12.7. Komputerowa analiza obrazu**

Ta analiza posłużyła do wyznaczenia udziału fazy  $\epsilon$  występującej obok dominującej fazy  $\alpha-Fe-S$  we wszystkich otrzymanych materiałach przed ich wyżarzaniem. Rzeczywiście w materiałach z dodatkiem  $B_4C$  obserwuje się większą zawartość fazy  $\epsilon$ , jednakże trudno nazwać różnicę na poziomie kilku % „wyraźną” bez podania błędu pomiarowego. Jakkolwiek doktorant przywołuje zgodność wyników komputerowej analizy obrazu z wynikami rentgenowskiej analizy strukturalnej, to jest to porównanie konkretnych liczb z informacją jedynie jakościową.



Doktorant pisze, że zbadany został rozkład wielkości ziaren a podaje jedynie ekwiwalentną średnicę ziaren, mniejszą o 50% dla próbki z kobaltem i z dodatkiem B<sub>4</sub>C.

Bez wątplenia pomiary wykazują, że zastosowana metoda spiekania i wygrzewania jest skuteczna i jest być może istotnie lepsza od wcześniej stosowanych metod konsolidacji: hot pressing i spark plasma sintering; należy do tego stwierdzenia dopowiedzieć w jakim aspekcie jest lepsza i co należy przyjąć za miarę „jakości”.

Nie mam przekonania, że interpretacja udziału B<sub>4</sub>C jako czynnika ograniczającego rozrost ziaren jest poprawna. Alternatywną interpretacją jest, że obecność B<sub>4</sub>C nie pozwala na powstawanie większych ziaren FeS<sub>2</sub> w procesie przemiany  $\alpha$  i  $\epsilon$  F-S w  $\beta$ -FeS<sub>2</sub>.

### **Rozdział 12.8. Pomiary twardości**

Twardość otrzymanych materiałów jest bardzo wysoka. Wyjaśnienie twardości „małą długością wiązań” 2.35Å jest wątpliwe. Pojęcie „mała długość” jest względne; w porównaniu do rzeczywiście twardych materiałów, np. diament o wiązaniach długości 1.54Å, 2.35 jest bardzo dużą długością wiązania. Wyjaśnienie obniżenia twardości udziałem fazy  $\epsilon$ -Fe-S jest „niepełne” bez informacji o twardości tej fazy.

### **Rozdział 12.9. Pomiary napięcia Halla**

Pomiar służył jedynie potwierdzeniu, że otrzymany  $\beta$ -FeS<sub>2</sub> jest typu p, ma zatem właściwości oczekiwane dla tego materiału dla zastosowań termoelektrycznych.

### **Rozdział 12.10. Pomiary przewodności cieplnej**

Przewodnictwo cieplne jest jednym z krytycznych parametrów decydujących o właściwościach termoelektrycznych. Przedstawione wyniki pomiarów „mówią same za siebie”. Istotne jest potwierdzenie, że domieszki typu n, Co i P, prowadzą do obniżenia przewodności, podczas gdy w materiałach z domieszkami typu p jednoczesne zwiększenie liczby nośników kompensowane jest przez obniżenie składowej fononowej.

## Rozdział 12.11. Pomiary przewodnictwa elektrycznego

Pomiary rezystancji prowadzono w tych samych temperaturach co przewodność cieplną, od 323 do 773K. Potwierdzono, że zgodnie z przewidywaniami, wyższe przewodnictwo wykazują materiały z przewodnictwem typu p i stwierdzono, że dodatek B<sub>4</sub>C daje efekt niekorzystny ze względu na obniżenie przewodnictwa. Wskazanie, że obecność fazy  $\epsilon$  w próbkach z dodatkiem B<sub>4</sub>C wpływa na przewodnictwo wymaga dodatkowego komentarza i porównania parametrów elektrycznych różnych faz Fe-Si, czego w pracy nie podano.

## Rozdział 12.12. Pomiary współczynnika Seebecka

Pomiary współczynnika Seebecka są bardzo ważne dla oceny właściwości termoelektrycznych i wykazują bardzo znaczącą rolę domieszek w modyfikowaniu właściwości  $\beta$ -FeS<sub>2</sub>. Oddzielnie zbadano ten parametr dla próbek o przewodnictwie typu p i n.

W materiałach typu p domieszkowanych Mn współczynnik Seebecka jest niski i wykazuje stały wzrost ze wzrostem temperatury. Próbki domieszkowane Al wykazują duży współczynnik Seebecka, przy czym zmienia się zmienia się typ przewodnictwa w temperaturze pomiędzy 323 i 450K. Dla próbek o przewodnictwie typu n (domieszki P i Si) obserwowano bardzo zróżnicowany wpływ domieszek w zależności od stężenia domieszek i kompensacji nośników typu p i n.

Porównanie współczynnika Seebecka dwóch otrzymanych próbek z podobnymi materiałami otrzymanymi innymi metodami przedstawiono na rys. 57 i 58.

Dla materiału domieszkowanego Mn współczynnik Seebecka jest niższy od podobnych materiałów. Rys.58 pokazuje również niższy współczynnik S dla materiału domieszkowanego Co, natomiast doktorant podaje, że jest on wyższy - ?

Brak informacji o błędach zmierzonych wielkości współczynnika S, zarówno danych literaturowych jak i wyznaczonych przez doktoranta, nie pozwala na ilościowe porównanie materiałów. Na podstawie przedstawionych danych wniosek o przewadze metody wytwarzania termoelektrycznego FeS<sub>2</sub> zaproponowaną metodą syntezy mechanicznej jest przedwczesny.



### **Rozdział 12.13. Obliczenia współczynnika mocy**

Współczynnik mocy jest kluczowym parametrem dla oceny właściwości termoelektrycznych. Przedstawione na rys.58 i 59 wykresy zmiany współczynnika mocy z temperaturą wykazują bardzo silny wpływ domieszek na przydatność otrzymanych materiałów. Jakkolwiek największy współczynnik mocy wykazują próbki domieszkowane Mn, jednakże wzrost ten jest silnie zależny od temperatury. Ze względu na wartość tego parametru w całym zakresie temperatur, najkorzystniejszym materiałem dla zastosowań termoelektrycznych należy uznać materiał domieszkowany Al o zawartości powyżej 0.5%.

Jednoznacznie wykazano, że dodatek  $B_4C$  w każdym przypadku znacząco obniża współczynnik mocy domieszkowanych materiałów.

### **Rozdział 12.14. Współczynnik dobroci termoelektrycznej**

Miarą wartości materiału, którą jest zastosowanie praktyczne, jest współczynnik dobroci termoelektrycznej.

Porównanie „dobroci” wyrażonej współczynnikiem  $Z$  materiału niedomieszkowanego  $FeS_2$  wykazuje, że w porównaniu do najlepszego materiału otrzymanego metodą spiekania, materiał otrzymany przez doktoranta jest lepszy do zastosowań w temperaturach powyżej 500K.

Dowodzi to niewątpliwie, że zaproponowana metoda otrzymywania  $FeS_2$  jest konkurencyjna w stosunku do wcześniej opisanych i zastosowanych metod. Ten wynik ma jednakże znaczenie drugorzędne ze względu na nieprzydatność w praktyce czystego  $FeS_2$  jako materiału termoelektrycznego.

Najważniejsze wyniki pracy przedstawiono na rys.61, na którym porównano bezwymiarowy parametr  $ZT$  wszystkich otrzymanych materiałów domieszkowanych.

Spośród próbek domieszkowanych fosfor w najmniejszym stopniu podwyższa współczynnik  $Z$  w porównaniu z  $FeS_2$ , spośród próbek domieszkowanych Mn najlepsze parametry wykazuje próbka z 8%, domieszkowanie Al jest skuteczne dla zawartości powyżej 5%, dla Co powyżej 1%. Właściwości materiału domieszkowanego jednocześnie Co i P są zbliżone do właściwości próbki domieszkowanej 3% Co; wpływ fosforu jest pomijalny.

Porównanie na rys. 62 właściwości materiałów domieszkowanych Mn i Al otrzymanych przez doktoranta z właściwościami podobnych materiałów otrzymanych innymi technikami wykazuje zbliżone wartości  $Z$  w całym zakresie temperatur.

*Uwaga: dlaczego przedstawienie wyników na rysunkach 60 i 61 jest podane na skali  $ZT$ , natomiast porównanie z danymi literaturowymi na wykresach  $Z$ ?*

Przedstawione porównanie dowodzi, że właściwości otrzymanych przez doktoranta materiałów nie ustępują właściwościom najlepszych materiałów otrzymanych innymi metodami.

Podobne wnioski wynikają z porównania właściwości materiałów domieszkowanych Co. Nieco wyższe wartości  $Z$  dla materiałów otrzymanych przez doktoranta przy braku wskazania błędów pomiarów nie upoważnia do wnioskowania o lepszych właściwościach materiałów wykonanych metodą zastosowaną przez doktoranta.

### **Rozdział 13. Podsumowanie i wnioski**

W podsumowaniu doktorant stwierdza, że uzyskane materiały wykazują właściwości termoelektryczne lepsze od podobnych materiałów uzyskiwanych innymi metodami. Ta „przewaga” zastosowanej metody syntezy mechanicznej połączonej z metodą PPS i wyżarzaniem nie jest tak wyraźna, ażeby uznać ją za główne czy też najważniejsze osiągnięcie. W gruncie rzeczy wystarczające jest stwierdzenie, że zastosowana metoda uzyskiwania Fe-S o dobrych właściwościach termoelektrycznych jest konkurencyjna w porównaniu do wcześniej stosowanych metod. Prawdopodobnie zastosowana metoda jest konkurencyjna biorąc pod uwagę aspekty ekonomiczne, analiza taka nie została jednakże przeprowadzona.

### **Rozdział 14. Perspektywy**

Doktorant słusznie wskazuje na celowość przeprowadzenia dalszych badań materiałów domieszkowanych większą zawartością Al oraz zastosowanie innych od  $B_4C$  domieszek nanokrystalicznych. Wskazuje też na konieczność zbadania struktury domenowej fazy  $\beta$ - $FeS_2$ .

Jakkolwiek doktorant wielokrotnie zaznaczył, że wyjątkową cechą zastosowanej metody jest możliwość lepszego kontrolowania wielkości (rozrostu) ziaren, zarówno na etapie syntezy jak



i spiekania oraz wyżarzania, to w praktyce ta możliwość nie została wykorzystana. Nie jest bynajmniej jasne z czym związany jest (niewielki) wzrost „jakości” otrzymanych materiałów w porównaniu z podobnymi materiałami otrzymywanymi innymi technikami. Można domniemywać, że dopiero zbadanie zależności właściwości termoelektrycznych w funkcji wielkości i rozkładu wielkości ziaren ujawni w pełni wartość zastosowanej metody dla otrzymywania materiałów dla zastosowań praktycznych.

### **Podsumowanie**

Wartość pracy zawiera się głównie w wykazaniu, że zastosowane metody otrzymywania Fe-S o właściwościach termoelektrycznych jest efektywna. Należy uznać, że założone cele pracy zostały osiągnięte. Otrzymane materiały mają parametry, które już obecnie można uznać za nadające się do praktycznego zastosowania. Nie ulega wątpliwości, że doktorant wykorzystał zaledwie część potencjału jaką ma opracowana przez niego metoda uzyskiwania termoelektrycznego Fe-S. Wskazał też kierunki dalszego rozwoju tej metody. Niedostatki przedstawionej rozprawy doktorskiej, które wskazane są w powyższej recenzji, dotyczą głównie niepełnego wykorzystania lub niedopracowania niektórych z wykonanych badań. Można odnieść wrażenie, że doktorant starał się trochę „na skróty” dojść do finalnego wyniku.

Tym niemniej uznaję, że doktorant wykazał się umiejętnością prowadzeniu prac badawczych, poczynwszy od syntezy poprzez prace eksperymentalne badania ich właściwości i oceny ich użytecznych cech fizycznych. W interpretacji wyników doświadczalnych wykazał się umiejętnością analizy uzyskiwanych informacji z konkretnego doświadczenia i syntezy różnorodnych informacji pochodzących z innych pomiarów, z literatury i z ogólnej wiedzy w dziedzinie inżynierii materiałowej.

**Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Franciszka Dąbrowskiego spełnia warunki określone w obowiązującej Ustawie o Stopniach i Tytule Naukowych i na tej podstawie wnioskuję do Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony w celu uzyskania stopnia naukowego doktora nauk technicznych z dyscypliny inżynieria materiałowa.**

