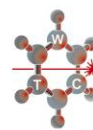




Wojskowa  
Akademia  
Techniczna

Wydział  
Nowych Technologii i Chemii



Warszawa, dn. 24.10.2024r.

**Prof. dr hab. inż. Tomasz CZUJKO,**  
Instytut Inżynierii Materiałowej  
Wydział Nowych Technologii i Chemii  
Wojskowa Akademia Techniczna  
ul. Kaliskiego 2  
00-908 Warszawa  
e-mail: [tomasz.czujsko@wat.edu.pl](mailto:tomasz.czujsko@wat.edu.pl); tel. 261 837 029

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bernarda Kurowskiego  
pt. „Wpływ składu chemicznego i obróbki cieplnej na strukturę  
i wybrane właściwości wieloskładnikowych stopów typu  
FeNiCoAlSi”**

Rosnące zapotrzebowanie na nowe materiały pozwalające na wydajniejszą pracę różnych urządzeń wymaga poszukiwania nowych rozwiązań lub modyfikacji istniejących materiałów. Ważną grupą nowoczesnych tworzyw konstrukcyjnych wymagających udoskonalenia są stopy ferromagnetyczne twarde i miękkie.

Miękkie materiały magnetyczne były badane od wielu lat ze względu na ich łatwość do magnetyzowania i demagnetyzowania oraz szeroko zastosowanie w przemyśle elektronicznym. Obecnie stosowane krystaliczne stopy Fe-Si ze względu na stosunkowo niską rezystywność, prowadzącą do dużej straty prądów wirowych, nie stanowią już atrakcyjnej propozycji materiałowej w tym obszarze. Natomiast, amorficzne i nanokrystaliczne materiały magnetycznie miękkie znalazły zastosowanie w urządzeniach o wysokiej częstotliwości ze względu na ich niską koercję ( $H_c$ ) i wysoką oporność elektryczną. Innowacyjnym rozwiązaniem w obszarze materiałów magnetycznych, jaki pojawił się w 2004 roku, wydają się być wieloskładnikowe stopy wysoko- i średnioentropowe oparte na takich pierwiastkach jak nikiel, żelazo, kobalt, chrom oraz mangan. W grupie stopów wieloskładnikowych zaczęto poszukiwać nie tylko nowych materiałów ferromagnetycznych, ale także materiałów

energooszczędnych, o właściwościach magnetycznych pośrednich między magnetycznie miękkimi i twardymi, o dobrych właściwościach mechanicznych. Stopy FeNiCoAlSi, którym dedykowana jest opiniowana dysertacja stanowią obiecującą grupę materiałów odpowiednich do tego typu zastosowań.

**Stąd też podjęcie się przez Doktoranta problematyki poszukiwania nowych materiałów średnio i wysokoentropowych posiadających zadawalające właściwości magnetyczne uważam za w pełni zasadne.**

Rozprawa doktorska Pana mgr. Bernarda Kurowskiego, pod wyżej wymienionym tytułem, o łącznej objętości 140 stron, składa się ze spisu treści, wprowadzenia (**rozdział 1**) analizy stanu zagadnienia zawartego w **rozdziale 2**, celu pracy (**rozdział 3**), szczegółowego opisu stosowanej metodyki badawczej (**rozdział 4**) oraz omówienia uzyskanych wyników badań (**rozdział 5**), stanowiącego rdzeń merytoryczny pracy. Praca ta kończy się dyskusją wyników i podsumowaniem (**rozdział 6**), wnioskami (**rozdział 7**), stosowaną bibliografią oraz spisem rysunków i tabel.

W ramach przeglądu literatury (**rozdział 2**) Doktorant przedstawia charakterystykę materiałów wieloskładnikowych, magnetyzmu i stopów magnetycznych oraz dokonuje wnikliwej analizy właściwości wieloskładnikowych stopów typu FeNiCoAlSi oraz stopów pokrewnych.

W dalszej części (**rozdział 3**) Doktorant omawia w zwięzłej formie naukowo-poznawczy **cel pracy** ujmujący wytworzenie i charakterystykę pod względem struktury oraz właściwości mechanicznych i magnetycznych wybranych wieloskładnikowych stopów z układu FeNiCoAlSi, zarówno w stanie po wytworzeniu, jak i po obróbce cieplnej.

Jako cel dodatkowy, niosący aspekt aplikacyjny, Doktorant postawił sobie zbadanie możliwości wytworzenia stopów półtwardych magnetycznie, lokujących się pod względem właściwości pomiędzy miękkimi i twardymi magnetykami. Nieco zaskakującym wydaje się być brak tezy postawionej w pracy.

**Rozdział 4** poświęcony jest metodyce prowadzonych badań z uwzględnieniem weryfikacji parametrów termodynamicznych, wytworzenia stopów, badań dyfrakcyjnych promieni rentgenowskich XRD, badań mikrostruktury stopów za pomocą mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej SEM, badań właściwości magnetycznych, badań twardości stopów metodą Vickersa, badań stopów za pomocą transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM) i mikroskopii sił atomowych (AFM) oraz obróbki cieplnej stopów.

W **rozdziale 5** Doktorant przedstawia wyniki badań, obejmujące dyfrakcyjną analizę rentgenowską, obserwacje mikroskopowe, analizę składu chemicznego i rozkładu pierwiastków. Ponadto, Doktorant przedstawia wyniki pomiarów właściwości magnetycznych, twardości oraz wyniki badań stopów za pomocą TEM oraz AFM.

**Rozdział 6** dedykowany jest dyskusji uzyskanych wyników i podsumowaniu. W ocenie recenzenta ta część pracy mogłaby być nieco obszerniejsza i w szerszym aspekcie odnosić się do rezultatów badań publikowanych przez innych badaczy.

**Rozdział 7** zawiera syntetyczną formę wniosków wynikających z przeprowadzonych badań.

Struktura pracy zasadniczo jest typowa dla prac doktorskich, aczkolwiek nieco zaskakującym jest brak postawionej tezy. Sama praca napisana jest prawidłowym językiem technicznym, z wykorzystaniem bogatej literatury o zasięgu międzynarodowym i posiada starannie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na bardzo wysokim poziomie dokumentację z badań własnych.

Recenzowana praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu, z wykorzystaniem zaawansowanych metod badawczych, poparte analizą uzyskanych wyników.

Praca nie zawiera istotnych błędów merytorycznych, mogących wpłynąć na jej merytoryczną ocenę, a uzyskane wyniki badań pozwoliły na opracowanie i weryfikację rozwiązania materiałowo-technologicznego w obszarze inżynierii materiałowej, zapewniającego wytworzenie materiałów wieloskładnikowych o pożądanых właściwościach magnetycznych i mechanicznych.

Na podkreślenie zasługuje mnogość i zaawansowanie zastosowanych metodyk badawczych, świadczący o dojrzałym podejściu Autora rozprawy do prowadzonych badań oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Natomiast, do oryginalnych osiągnięć Doktoranta o charakterze naukowym i poznawczym zaliczam:

1. Zaprojektowanie i wytworzenie wieloskładnikowych stopów należących do grupy stopów średnioentropowych;
2. Potwierdzenie, iż parametr VEC (koncentracja elektronów walencyjnych) nie zawsze może być dobrym wskaźnikiem do charakteryzowania stopów o wysokiej entropii;

3. Określenie wpływu składu chemicznego na skład fazowy badanych stopów wieloskładnikowych;
4. Wykazanie braku istotnego wpływu składu chemicznego na parametr sieci składników fazowych badanych stopów;
5. Wykazanie silnej zależności wielkości i morfologii ziaren w stopie od jego składu chemicznego, głównie zawartości aluminium i krzemu;
6. Określenie wpływu składu chemicznego na właściwości magnetyczne badanych stopów wieloskładnikowych;
7. Określenie wpływu składu chemicznego na twardość badanych stopów wieloskładnikowych;
8. Wykazanie stabilności strukturalnej badanych stopów wieloskładnikowych.

Celem pracy było opracowanie, wytworzenie i charakterystykę pod względem struktury oraz właściwości mechanicznych i magnetycznych wybranych wieloskładnikowych stopów z układu FeNiCoAlSi, zarówno w stanie po wytworzeniu, jak i po obróbce cieplnej i **cel ten został w pełni osiągnięty.**

**Uważam, że przedłożona do recenzji praca świadczy o znaczącej wiedzy ogólnej Doktoranta oraz umiejętności prowadzenia samodzielnego badań naukowych, a także w pełni odpowiada wymaganiom ustawowym stawianym rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

