



dr hab. Grzegorz Dercz, prof. UŚ

Chorzów, 03.11.2024r.

Instytut Inżynierii Materiałowej

Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych

Uniwersytet Śląski

ul. 75 Pułku Piechoty 1A

41-500 Chorzów

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pt.

*„Wpływ składu chemicznego i obróbki cieplnej na strukturę
i wybrane właściwości wieloskładnikowych stopów typu FeNiCoAlSi”*

Autor: mgr inż. Bernard Kurowski

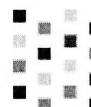
Podstawa opracowania recenzji

Podstawę opracowania recenzji stanowi uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa na Politechnice Warszawskiej z dnia 20 września 2024r., przekazana w piśmie z dn. 24 września 2024r., przez z-cę Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa na Politechnice Warszawskiej prof. dr hab. inż. Annę Boczkowską.

Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr inż. Bernarda Kurowskiego przygotowana na Politechnice Warszawskiej. Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Dariusz Oleszak, natomiast Promotorem pomocniczym jest dr inż. Maciej Kowalczyk.

Rozprawa doktorska, przedstawiona w tradycyjnej formie i liczy 140 stron wydruku komputerowego oraz zawiera 91 rysunków i 24 tabel, a spis literatury zawiera 107 publikacji.



Charakterystyka rozprawy

Przedłożona do recenzji praca doktorska Pana mgr inż. Bernarda Kurowskiego stanowi szerokie opracowanie dotyczące zagadnień związanych z wytwarzaniem oraz charakterystyką relatywnie nowej grupy materiałów inżynierskich, a więc wieloskładnikowych stopów średnio- (MEA) i wysokoentropowych (HEA) typu FeNiCoAlSi przeznaczonych do potencjalnych zastosowań w elektroenergetyce. Tematyka wieloskładnikowych stopów MEA oraz HEA jest natenczas w dużym zainteresowaniu naukowców i inżynierów zarówno w światowych jak i krajowych ośrodków naukowych.

Praca doktorska posiada typową budowę dla tego typu opracowań z podziałem na dwie części. Pierwszą część stanowi przegląd literaturowy, natomiast druga część zawiera wyniki badań własnych wraz z ich analizą, podsumowaniem i wnioskami.

Część literaturowa obejmuje 40-stronicowy, dobrze przygotowany przegląd doniesień literaturowych w aspekcie zarówno zasad projektowania jak i opisu efektów wieloskładnikowych stopów o średniej i wysokiej entropii. Nadto, w tej części Autor porusza aspekt magnetyzmu i stopów magnetycznych z następnym opisem wieloskładnikowych stopów typu FeNiCoAlSi oraz stopów pokrewnych. Następnie Autor formułuje cel główny oraz dodatkowy rozprawy doktorskiej, a w kolejnym rozdziale opisuje metodykę badań i zastosowane techniki badawcze, a także przedstawia weryfikację parametrów termodynamicznych oraz procesy wytwarzania w piecu łukowym materiałów badań.

Kolejny, V rozdział rozprawy zatytułowany „Wyniki” jest zasadniczą częścią pracy doktorskiej, w którym Autor analizuje i dyskutuje na kilkudziesięciu stronach wyniki uzyskane dla poszczególnych grup stopów $(\text{FeNiCo})_{100-x}(\text{AlSi})_x$, przedstawiając rezultaty w podrozdziałach zatytułowanych odpowiednio do użytej metody badawczej. Taki sposób przedstawienia wyników daje przejrzystość oraz umożliwia analizę większości wyników. Dodatkowo Doktorant zaznacza, co uważa za najważniejsze osiągnięcie badawcze zaprezentowane w danym podrozdziale.

Pracę doktorską wieńczą dwa rozdziały „Dyskusja wyników i podsumowanie” „Wnioski” oraz „Bibliografia” w której Autor odnosi się do 107 pozycji literaturowych.



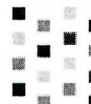
Odwołania obejmują raczej aktualne angielskojęzyczne czasopisma naukowe. Spis cytowanej literatury jest sporządzony starannie. Przegląd literatury świadczy o bardzo dobrej orientacji Doktoranta w tematyce badań.

Przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej badania nad nowymi materiałami i rozwiązaniami technologicznymi dotyczącymi wieloskładnikowych średnio- i wysokoentropowych stopów typu FeNiCoAlSi, mają na celu poszerzenie zdolności aplikacyjnych takich materiałów. Zdaniem Recenzenta, praca dotyczy zagadnień o istotnej wartości poznawczej, a przede wszystkim o wysokim potencjale aplikacyjnym.

Ocena doboru tematyki, celu i zakresu rozprawy

Stopy średnio- i wysokoentropowych to bez wątpienia nowa grupa materiałów inżynierskich o krótkiej, bo zaledwie dwudziestoletniej historii intensywnych badań naukowych. Badania te skutkowały zdefiniowaniem obszarów zastosowań średnio- i wysokoentropowych, takich jak np. przemysł lotniczy (np. zastąpienie stopów typu Inconel), nuklearny (elementy reaktorów) czy elektronika i elektroenergetyka (materiały magnetyczne). Jednak pomimo stosunkowo dużej liczby wytworzonych i przebadanych stopów opisanych w literaturze, wciąż otwierają się nowe możliwości badań w tym zakresie. Z tego też powodu wybór tematyki rozprawy uznać należy za niezwykle trafny i istotny w kontekście aplikacyjnym.

Rozwój materiałów energooszczędnych, o właściwościach magnetycznych pomiędzy magnetycznie miękkimi i twardymi oraz dobrych właściwościach mechanicznych, stymulowany jest głównie przez przemysł elektroenergetyczny, co powoduje że stopy FeNiCoAlSi będące przedmiotem badań w pracy doktorskiej są niezwykle interesujące, bowiem mogą być dobrymi miękkimi lub półtwardymi magnetykami o koercji od kilku A/m do kilku kA/m. Dotychczasowe badania wskazują, że dobór zarówno odpowiedniego składu chemicznego i odpowiedniej obróbki cieplnej, jak również techniki wytwarzania czy nawet szybkości chłodzenia pozwala uzyskać pożądane właściwości materiału, a obszar badań nad tymi stopami daje jeszcze szerokie możliwości do rozwoju.



Cel i zakres rozprawy doktorskiej określone zostały na podstawie starannej analizy literaturowej, a Doktorant w swoich rozważaniach wykorzystał nie tylko tradycyjne stosowane parametry termodynamiczne istotne z punktu widzenia projektowania stopów o wysokiej entropii, takie jak: entropia konfiguracyjna ΔS , entalpia mieszania ΔH , parametr Ω łączący w sobie entropię, entalpię i temperaturę topnienia, parametr VEC związany z koncentracją elektronów walencyjnych czy też parametr δ związany z różnicami w promieniach atomowych pierwiastków, ale sięgnął również po wprowadzony przez Yeh parametr odnoszący się do optymalnej liczby pierwiastków który powiązany jest z niedopasowaniem upakowania atomów.

Przeprowadzona wnikliwa analiza literaturowa oraz badania wstępnie pozwoliły Autorowi na postawienie następującego celu głównego:

„Celem naukowo-poznawczym badań jest zatem wytworzenie i charakterystyka pod względem struktury oraz właściwości mechanicznych i magnetycznych wybranych wieloskładnikowych stopów z układu FeNiCoAlSi, zarówno w stanie po wytworzeniu, jak i po obróbce cieplnej.”

Nadto, Doktorant postawił także cel dodatkowy, niosący aspekt aplikacyjny:

„Zbadanie możliwości wytworzenia stopów półtwardych magnetycznie, lokujących się pod względem właściwości pomiędzy miękkimi i twardymi magnetykami.”

Aby udowodnić wyżej wymienioną tezę Autor podjął następujące zadania badawcze:

- 1) Wytworzenie stopów o zmiennych stężeniach $(\text{FeNiCo})_{100-x}(\text{AlSi})_x$, $(\text{FeNiCo})_{100-x}(\text{Al}_{1/3}\text{Si}_{2/3})_x$, $(\text{Fe}_{0,3}\text{Ni}_{0,2}\text{Co}_{0,5})_{100-x}(\text{Al}_{1/3}\text{Si}_{2/3})_x$ oraz $(\text{Fe}_{0,3}\text{Ni}_{0,2}\text{Co}_{0,5})_{100-x}(\text{AlSi})_x$, gdzie $x = 0; 5; 10; 15; 20; 25; 30$.
- 2) Określenie struktury badanych materiałów przy pomocy metod rentgenowskich i mikroskopowych (SEM; TEM),
- 3) Analiza składu chemicznego oraz rozkładu pierwiastków metodą SEM EDXS
- 4) Badanie właściwości magnetycznych,
- 5) Pomiary twardości,



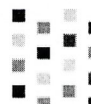
W świetle powyższego, przyjętą przez Doktoranta koncepcję badań uznać należy za dobrze przemyślaną i jak najbardziej uzasadnioną, wpisującą się w tematykę współczesnej inżynierii materiałowej.

Ocena merytoryczna pracy

Oceniając pracę od strony merytorycznej warto podkreślić, że zaplanowane eksperymenty oraz interpretacja wyników wykonane są w większości przypadków starannie i jako całość stanowią dobre opracowanie badań nad strukturą i właściwościami średnio- i wysokoentropowych wieloskładnikowych stopów typu FeNiCoAlSi. Badania wykonano w sposób przemyślaný i wykorzystano odpowiedni ich zestaw w celu charakterystyki wytworzonych materiałów. Powyższe wyraźnie wskazuje na dobry warsztat badawczo - naukowy oraz potwierdza, że Doktorant w sposób swobodny posługuje się zastosowanymi metodami aby zrealizować cel pracy.

Badaniom poddano otrzymane metodą topienia łukowego cztery serie stopów o zmiennej zawartości pierwiastków magnetycznych (Fe, Ni, Co) oraz o różnych proporcjach pierwiastków niemagnetycznych (Al, Si). Składy stopów zostały dobrane przez Doktoranta pod kątem określenia wpływu zawartości aluminium i krzemu na skład fazowy, mikrostrukturę i wybrane właściwości badanych stopów. Jednocześnie, w analogicznym kontekście Autor zbadał wpływ zmiennej zawartości pierwiastków magnetycznych (Fe, Ni, Co). Ponadto, dla jednej serii stopów $(\text{FeNiCo})_{100-x}(\text{AlSi})_x$ dla $x = 5; 15; 25$, Doktorant poddał analizie wpływ obróbki cieplnej na stabilność struktury oraz właściwości magnetyczne i mechaniczne wskazanych stopów.

Do realizacji przewidzianych badań Doktorant zastosował obszerny zestaw technik badawczych w celu scharakteryzowania wytworzonych łącznie 26 stopów oraz zbadania ich właściwości, z zastosowaniem technik min.: dyfrakcji rentgenowskiej, mikroskopii świetlnej, skaningowej mikroskopii elektronowej SEM z analizą składu chemicznego EDXS, transmisyjnej mikroskopii elektronowej TEM, mikroskopii sił atomowych AFM, pomiarów twardości oraz pomiarów właściwości magnetycznych VSM. Wymieniony zestaw metod i technik badawczych



uznać należy za prawidłowo dobrany, pozwalający na wszechstronną charakteryzację struktury i właściwości badanych stopów.

W pierwszej kolejności, Doktorant na podstawie przeprowadzonych obliczeń parametrów termodynamicznych stwierdził, że badane w pracy doktorskiej stopy należą do grupy stopów średnioentropowych. Jednocześnie Autor stwierdził, że wartość parametru δ (opisującego różnicę w wielkości promieni atomowych), dla części stopów przekracza przyjętą graniczną wartość 6,6%, ale jak słusznie zauważył Autor, to kryterium obowiązuje dla stopów wysokoentropowych.

W celu określenia składu fazowego wykonano pomiary rentgenowskie. Badania wykazały, że odlewane stopy posiadają jednofazową strukturę roztworu stałego o sieci regularnej ściennie centrowanej dla zawartości Al oraz Si $x \leq 10$. Wzrost sumarycznej zawartości Al i Si do 15%, powoduje według Autora powstawanie struktury dwufazowej złożonej z mieszaniny roztworów stałych o sieciach regularnej ściennie i przestrzennie centrowanej. Dla sumarycznej zawartości Al i Si $x \geq 20$ zidentyfikowano jednofazową strukturę roztworu stałego o sieci RPC. Celem strukturalnej charakterystyki otrzymanych roztworów stałych RSC i RPC, Doktorant metodą Nelsona – Rileya wyznaczył parametry sieci. Według Autora otrzymane wyniki obliczeń parametru sieci dla roztworów stałych RSC występujących w badanych stopach nie wykazują znaczących różnic wraz ze zmieniającym się składem chemicznym stopów. W tym zakresie, Doktorant wykazuje, że w stopach, w których występuje roztwór stały RPC, jego parametr sieci maleje wraz ze wzrostem zawartości Al i Si. W zakresie analizy wyników XRD próbek po obróbce cieplnej, Autor wskazał, że nie spowodowała istotnych zmian w składzie fazowym stopów a jedynie dla $x = 15$ spowodowało zmianę proporcji występujących faz poprzez zwiększenie udziału fazy RPC z 16% do 34%. Niestety, Autor w sposób konsekwentny przytacza w całej pracy wspomniany wzrost udziału fazy RPC a jednocześnie, podkreśla wątpliwość otrzymanych wyników (podobnie jak uważa Recenzent), bowiem na stronie 118 stwierdza, „Pamiętać jednak należy, że zastosowana metoda szacowania procentowej zawartości faz w stopach obarczona jest znacznym błędem.” Ta część, budzi niedosyt Recenzenta, bowiem do obliczeń zarówno strukturalnych i przede wszystkim ilościowych są

dedykowane odpowiednie metody udokładniania struktury np. metoda Rietvela.

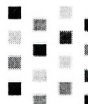
W dalszej kolejności, Autor podejmuje się obserwacji z wykorzystaniem metod mikroskopii świetlnej, które umożliwiły wykazanie zmian w morfologii i wielkości ziaren w stopach po krystalizacji. Badania te dowiodły, że skład chemiczny stopów istotnie wpływa na morfologię i wielkość ziaren. W tej części, Doktorant wykazał, że wzrost zawartości kobaltu w stopach skutkuje rozrostem ziarna i zmianą morfologii na dendrytyczną w stopach zawierających aluminium i krzem. Nadto, Autor wskazuje, iż zwiększenie sumarycznej zawartości Al+Si powoduje istotne rozdrobnienie mikrostruktury wraz ze zmianą kształtu dendrytów z wydłużonych na „płatki kwiatów”.

W przypadku badań materiału po obróbce cieplnej, Doktorant wykazał, że przeprowadzona obróbka cieplna nie przyniosła istotnych zmian w mikrostrukturze stopów $(\text{FeNiCo})_{100-x}(\text{AlSi})_x$ przy $x = 5$ i 15 . Natomiast w przypadku stopu o większej zawartości Al + Si, Autor zaobserwował pojawienie się wielobocznych ziaren o rozmiarach przekraczających $50 \mu\text{m}$ oraz zanik drobnych dendrytów.

Dalsza analiza materiału badań techniką EDXS wykazała, że wraz ze wzrostem zawartości aluminium i krzemu występuje większa segregacja tych pierwiastków, które lokują się głównie w przestrzeniach międzidendrytycznych.

Następny etap badań polegał na określeniu wpływu składu chemicznego na podstawowe właściwości mechaniczne stopów po odlaniu. Po przeprowadzonych pomiarach twardości, Autor wykazał, że wraz ze zwiększeniem zawartości aluminium i krzemu ponad pięciokrotnie zwiększa się twardość a wzrost ten, jak wskazuje Doktorant, wynika zarówno ze zmiany składu fazowego jak i z rozdrobnienia mikrostruktury. Niestety, ta część pozostawia pewien niedosyt, bowiem brak jest szczegółowej dyskusji o mechanizmach umocnienia.

Mając na uwadze postawiony cel dodatkowy odnoszący się do zbadania możliwości wytworzenia stopów półtwardych magnetycznie, a więc lokujących się pod względem właściwości pomiędzy miękkimi i twardymi magnetykami, Autor podjął się badań właściwości magnetycznych poprzez zarejestrowanie pętli histerezy magnetycznej. W oparciu o te dane, Doktorant wyznaczył wartości magnetyzacji nasycenia i pola koercji dla wszystkich czterech



serii próbek. Otrzymane wyniki wykazały, że badane stopy charakteryzują się wysoką indukcją magnetyczną w zakresie od 120 emu/g do 180 emu/g, a ich wartość koercji dochodzi nawet do 2,5 kA/m dla $x=15$ i jest silnie zależna jest od składu chemicznego. Uzyskane w pracy doktorskiej wartości koercji na poziomie 3000 A/m, pozwalają na zaliczenie badanych stopów do materiałów magnetycznie półtwardych. Zastosowanie przez Doktoranta mikroskopu sił atomowych i porównanie obrazu zarejestrowanego w trybie topograficznym i magnetycznym pozwoliło na potwierdzenie, iż skokowy wzrost koercji w stopie zawierającym $x = 15$ może być zakłóceniami pola magnetycznego wywołanymi wydłużonymi dendrytami, stanowiącymi tzw. barierę magnetyczną. Ponadto, Autor wykazał, że dla $x = 5$ widoczne są duże równoosiowe ziarna, których granice powodują jedynie nieznaczne zakłócenia struktury domenowej. Nadto, Autor wykazał istnienie barier dla pola magnetycznego w stopie $(\text{FeNiCo})_{100-x}(\text{AlSi})_x$ dla $x = 15$, wywołane ukierunkowaniem struktury dendrytycznej oraz jej znaczącym zróżnicowaniem. Jednocześnie, w przypadku stopów o najwyższej zawartości Al oraz Si, Doktorant wykazał zróżnicowanie pola magnetycznego w każdym z trzech widocznych ziaren.

Dla wybranych próbek, których dobór podyktowany był odmiennością mikrostruktury, Doktorant przeprowadził badania TEM. Niestety, ta część badań i przedstawione wnioski nie wykorzystały potencjału transmisyjnej mikroskopii elektronowej i nie poruszyły wszystkich aspektów badawczo materiałowych, np. struktury defektowej. Otrzymane wyniki, zostały przez Doktoranta opisane dość powierzchownie, a Autor brak pełnej charakterystyki struktury RPC podsumował, cyt. *„Badanie dyfrakcyjne obejmuje zdecydowanie mniejszy obszar próbki niż informacja zebrana z pomiarów dyfrakcyjnych, dlatego istnieje prawdopodobieństwo otrzymania jednofazowej struktury RSC zamiast dwufazowej RSC+RPC.”* W ocenie Recenzenta, nie jest to usprawiedliwienie braku oczekiwanych wyników, bowiem udział fazy RPC był relatywnie wysoki.

Podsumowując, w ocenie Recenzenta przeprowadzone badania pozwoliły z powodzeniem zrealizować cele postawione w niniejszej pracy doktorskiej, zarówno główny jak i dodatkowy. Ponadto, otrzymane wyniki otrzymanych w ramach rozprawy wieloskładnikowych stopów typu FeNiCoAlSi, o zmiennej zawartości pierwiastków magnetycznych (Fe, Ni, Co)

i niemagnetycznych (Al, Si), pozwalają sadzić, że mogą one być z powodzeniem zastosowane jako alternatywa dotychczas stosowanych materiałów a w przyszłości zaowocować ich zastosowaniem w wybranych obszarach, szczególnie tam, gdzie oczekiwane są półtwarde właściwości magnetyczne, przy jednoczesnych dobrych właściwościach mechanicznych.

W toku realizacji założonych celów naukowo-badawczych, Doktorant uzyskał szereg interesujących wyników, a za najważniejsze i najciekawsze osiągnięcia rozprawy doktorskiej Recenzent uważa:

1. Potwierdzenie wysokiej skuteczności obliczeń według powszechnie przyjmowanych kryteriów w procesie wyboru składników stopowych, celem otrzymania stopów średnioentropowych, bowiem pozwalają one na bardziej precyzyjne projektowanie składu chemicznego stopów, co jest szczególnie istotne w kontekście uzyskiwania pożądanych właściwości strukturalnych i mechanicznych badanych stopów.
2. Wykazanie, że parametr δ , odzwierciedlający różnice w wielkości promieni atomowych, spełnia kryteria stopów wysokoentropowych tylko dla składów o sumarycznej zawartości Al i Si nie przekraczającej 10 %at.
3. Wykazanie poprzez analizę składu chemicznego SEM-EDS segregację składników stopowych w dendrytach i przestrzeniach międzidendrytycznych, co przekłada się na właściwości stopów, szczególnie mechaniczne.
4. Przeprowadzenie obszernej charakterystyki magnetycznej badanych stopów i zaliczenie tych stopów do materiałów magnetycznie półtwardych.

Uwagi szczegółowe

Lektura rozprawy doktorskiej przynosi następujące uwagi, komentarze oraz pytania:

1. Na str. 54 Autor pisze, cyt.: „Oprócz zbadania składu fazowego badanych stopów, na podstawie dyfrakcyjnych badań rentgenowskich oszacowano udział faz w strukturze stopów.”, po pierwsze co to znaczy „struktura stopów”. Po drugie, w jaki sposób oszacowano udział faz w próbkach? W jaki sposób uwzględniono zmiany w natężeniach linii dyfrakcyjnych dla refleksu.
2. Rys. 30 oraz Rys. 33. O czym może świadczyć zmiana natężeń refleksów

- dyfrakcyjnych (200) i obniżeniu np. (111) dla stopu $(\text{Fe}_{0,3}\text{Ni}_{0,2}\text{Co}_{0,5})_{100-x}(\text{Al}_{1/3}\text{Si}_{2/3})_x$ przy $x = 0; 10; 15$. Czy tego typu zmiana natężeń linii dyfrakcyjnych może wpłynąć na ilościową analizę fazową?
3. Rys. 30 oraz Rys. 33., dla $x = 20$ oraz $x = 25$ widoczne są nieopisane refleksy ($44^\circ 2\theta$ czy $54^\circ 2\theta$) przez co analiza jest niepełna. W ocenie Recenzenta, są to refleksy od fazy RSC, więc dla tego składu należałoby rozszerzyć zakres występowania materiału dwufazowego i tym kontekście odnieść się do danych z tabeli 1.
 4. Rys. 30., dyfraktogram dla stopu $(\text{Fe}_{0,3}\text{Ni}_{0,2}\text{Co}_{0,5})_{100-x}(\text{Al}_{1/3}\text{Si}_{2/3})_x$ dla $x = 25$. O czym może świadczyć widoczne rozszczepienie refleksu (110)?
 5. Na str. 56 Autor pisze, cyt.: „Dla wybranych stopów przeprowadzono procesy obróbki cieplnej. Stopy zaampułkowano w atmosferze argonu w ampułkach kwarcowych i wygrzewano w temperaturze 1000°C przez 1h, a następnie chłodzono wraz z piecem”. Czy na pewno mowa o atmosferze argonu w ampule, a nie wysokiej próżni?
 6. Na str. 58 Autor pisze, cyt.: „... a udział fazy RPC oszacowano na podstawie obrazu XRD na około 16%.”. W jakich jednostkach jest podana wartość udziału faz, „%at.” czy „%wag.”?
 7. Rys. 31 oraz 32. O czym świadczy nieindeksowany refleks przy $31^\circ 2\theta$, którego natężenie rośnie wraz ze wzrostem $x = 20; 25; 30$. Ponadto, także dla Rys. 31 oraz 32, widoczne są nieindeksowane refleksy ($31^\circ 2\theta$ i $51,5^\circ 2\theta$ oraz $60,0^\circ 2\theta$). Czy doktorant analizował dyfraktogramy pod tym kątem?
 8. Czym był podyktowany dobór ilości odcisków (7), a nie np. 10 odcisków na próbkę przy pomiarach mikrotwardości?
 9. Czy rzeczywiście pomiary składu chemicznego metodą EDXS obarczone są tak małym błędem, rzędu 0,01 (Tabele 6-23)? Proszę w oparciu o literaturę o sprawdzenie dokładności ilościowej analizy składu chemicznego metodą EDXS.
 10. Na str. 106 Autor pisze, cyt.: „Zatem obserwowany skokowy, prawie trzykrotny wzrost wartości pola koercji, spowodowany może być utrudnionym ruchem ścian

domenowych hamowanych na wydłużonych w uprzywilejowanym kierunku dendrytach". Proszę w zakresie powyższego o dyskusję w oparciu o literaturę"

11. Tabela 24, Str. 109. Korzystniej do analizy ciekawych wyników byłoby te dane zwizualizować w formie wykresu kolumnowego z naniesionymi błędami pomiarowymi.
12. Tabela 24, Str. 24. Dla próbki $(\text{FeNiCo})_{100-x}(\text{AlSi})_x$ i $x = 15$ po wygrzewaniu obserwuje się wzrost twardości z 207 ± 18 na 250 ± 18 . Czym podyktowana może być taka zmiana, zazwyczaj obróbka cieplna, szczególnie w wysokiej temperaturze rzędu 1000°C , powinna prowadzić do relaksacji umocnienia a tu obserwowany efekt odwrotny. Recenzent prosi o dyskusję w tym zakresie w oparciu o dane literaturowe.
13. Na str. 110 Autor pisze, cyt.: „*Wiadomo, że twardość stopów RPC jest wyższa niż stopów RSC ze względu na ich strukturę krystalograficzną.*” Proszę omówić, z czego ta zmiana może wynikać.

Podczas czytania pracy rozprawy odczuwalne jest niewielkie niedopracowanie, bowiem miejscami pojawiają się usterki natury terminologicznej, jak i czysto edytorskiej, na przykład:

- w pracy Autor wielokrotnie używa kropki zamiast przecinka do rozdziału liczb, dotyczy to zarówno tekstu (str. 45; 46; 47), jak i tabel (Tabele 6-11)
- zastrzeżenia budzi również sposób zapisywania udziału Al+Si, bowiem Doktorant do zapisu używa przecinka, zamiast „;” względnie „:” co jeden z nich wskazałoby na rozdzielenie liczb.

Zdaniem Recenzenta, treść rozprawy stanowi zamkniętą całość, a postawione cele zostały w pełni zrealizowane. Rozprawa jest napisana poprawnym technicznie językiem i posiada bardzo starannie opracowaną szatę graficzną. Według Recenzenta przedstawiona rozprawa doktorska jest bardzo wartościowa i na pewno stanowi podstawę do dalszych badań naukowych. Praca posiada także istotny walor aplikacyjny.



Ocena i wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że praca jako całość wnosi istotne elementy nowości w zakresie wytwarzania i badań nad nowymi materiałami i rozwiązaniami technologicznymi dotyczącymi wieloskładnikowych średnio- i wysokoentropowych stopów typu FeNiCoAlSi, które mogą znaleźć zastosowanie w elektroenergetyce jako materiały magnetycznie półtwarde. Dysertacja zawiera obszerny materiał badawczy uzyskany przez Autora, w wyniku przeprowadzonych kompleksowych i uzupełniających się badań oraz dyskusję mającą swoje umocowanie w cytowanej literaturze. Fakt ten świadczy o bardzo dobrej znajomości stanu wiedzy w zakresie badanych materiałów oraz problemów związanych z ich przeznaczeniem do aplikacji.

Przedstawione przez Recenzenta uwagi nie wpływają na wysoką jakość pracy, a odnoszą się jedynie do niektórych sformułowań Autora, interpretacji wyników badawczych, warunków prowadzenia eksperymentów, czy też nieświadomych pominięć niektórych faktów dla Autora oczywistych, a nie ujętych w pracy. Uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę dysertacji. Autor pracy trafnie wybrał nie tylko tematykę badań, ale również umiejętnie sformułował cele pracy oraz wnikliwie przeprowadził analizę otrzymanych wyników badań. Zarówno wykonane badania eksperymentalne, jak i przemyślenia oraz wnioski przedstawione w pracy wskazują na dojrzałość naukową Doktoranta.

W opinii Recenzenta, przedstawiona do recenzji praca Pana mgr inż. Bernarda Kurowskiego pt.: *"Wpływ składu chemicznego i obróbki cieplnej na strukturę i wybrane właściwości wieloskładnikowych stopów typu FeNiCoAlSi"*, spełnia wymagania zawarte w odpowiednich przepisach prawa, stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora, wnioskuje zatem do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa na Politechnice Warszawskiej **o przyjęcie rozprawy Pana mgr inż. Bernarda Kurowskiego i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.**