



dr hab. Grzegorz Dercz, prof. UŚ
Instytut Inżynierii Materiałowej
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych
Uniwersytet Śląski
ul. 75 Pułku Piechoty 1A
41-500 Chorzów

Chorzów, 29.12.2025r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pt.

„Wpływ parametrów obróbki cieplnej na strukturę i właściwości magnetyczne nanokrystalicznych stopów Fe-Co-B z dodatkiem Nb i P o podwyższonej indukcji nasycenia do zastosowań w wysokoczęstotliwościowym przetwarzaniu dużych mocy”

Autor: mgr inż. Przemysław Zackiewicz

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę opracowania recenzji stanowi uchwała RDIMa.RMT.512.38.2025, Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej z dnia 26 września 2024r., przekazana w piśmie z dn. 30 października 2025r., przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. inż. Adama Grajcara, zgodnie z wymaganiami wg art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571), oraz rozprawy doktorskiej pt. *„Wpływ parametrów obróbki cieplnej na strukturę i właściwości magnetyczne nanokrystalicznych stopów Fe-Co-B z dodatkiem Nb i P o podwyższonej indukcji nasycenia do zastosowań w wysokoczęstotliwościowym przetwarzaniu dużych mocy”*.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr inż. Przemysław Zackiewicz, która została przygotowana na Wydziale Mechanicznym Technologicznym, Politechniki Śląskiej. Promotorem rozprawy doktorskiej jest Pan dr hab. inż. Rafał Babilas, prof. PŚ, natomiast Promotorką pomocniczą jest Pani prof. dr hab. Aleksandra Kolano-Burian.

Należy również zaznaczyć, że badania, których wyniki przedstawiono w recenzowanej rozprawie doktorskiej, były realizowane w ramach projektów badawczo-rozwojowych finansowanych ze środków krajowych, co dodatkowo podkreśla ich aplikacyjny charakter oraz



znaczenie praktyczne. Prace badawcze były częściowo dofinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach doktoratu wdrożeniowego (nr umowy DWD/5/0620/2021), którego przedmiotem był projekt pt. *„Wpływ parametrów obróbki cieplnej na strukturę i właściwości magnetyczne nanokrystalicznych stopów Fe-Co-B z dodatkiem Nb i P o podwyższonej indukcji nasycenia do zastosowań w wysokoczęstotliwościowym przetwarzaniu dużych mocy”*. Ponadto zakres badań prowadzonych przez Autora wpisywał się w tematykę projektów strategicznych realizowanych przy wsparciu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, w szczególności projektów E-MAGMAT (nr umowy TECHMATSTRATEG2/410941/4/NCBR/2019) pt. *„Nowoczesne technologie wytwarzania funkcjonalnych materiałów magnetycznych dla zastosowań elektro-mobilnych i medycznych”* oraz SEEMAG (nr umowy TECHMATSTRATEG1/347200/11/NCBR/2017) pt. *„Opracowanie wysokowydajnej i bezodpadowej technologii wytwarzania nanokompozytów magnetycznie miękkich dla wysokoczęstotliwościowego przetwarzania dużych mocy”*. Udział rozprawy w realizacji wymienionych projektów jednoznacznie wskazuje na jej silne osadzenie w aktualnych potrzebach technologicznych oraz potwierdza praktyczny wymiar uzyskanych wyników badań.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Przemysława Zackiewicza została przygotowana w klasycznej, monograficznej formie i stanowi obszerne opracowanie poświęcone zagadnieniom kształtowania struktury oraz właściwości magnetycznych nanokrystalicznych stopów na osnwie Fe-Co-B z dodatkami niobu i fosforu, przeznaczonych do zastosowań w układach wysokoczęstotliwościowego przetwarzania dużych mocy. Tematyka pracy wpisuje się jednoznacznie w obszar inżynierii materiałowej i dotyczy aktualnych problemów związanych z projektowaniem nowoczesnych materiałów magnetycznie miękkich o podwyższonej indukcji nasycenia, stabilnych parametrach eksploatacyjnych oraz wysokim potencjale aplikacyjnym.

Oceniając układ oraz strukturę rozprawy stwierdzam, iż spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim realizowanym w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Rozprawa liczy 205 stron maszynopisu i obejmuje trzynaście rozdziałów, które zostały zaplanowane w sposób logiczny i konsekwentny. Autor rozpoczyna opracowanie od wykazu akronimów i oznaczeń, co w przypadku pracy obejmującej szerokie spektrum zagadnień materiałowych i magnetycznych należy uznać za zabieg w pełni uzasadniony i ułatwiający lekturę. W pracy doktorskiej zamieszczono również streszczenie pracy oraz zestawienie publikacji własnych Autora związanych z tematyką rozprawy, co pozwala zapoznać się z dorobkiem naukowym Doktoranta i jego aktywnością badawczą.

Kolejne rozdziały zawierają uzasadnienie wyboru tematu pracy w kontekście aktualnych potrzeb naukowych i technologicznych, a także obszerny przegląd literatury przedmiotu. Należy podkreślić, że część literaturowa została opracowana bardzo starannie i w sposób



dojrzały wprowadza czytelnika w zagadnienia związane z materiałami magnetycznie miękkimi, stopami amorficznymi i nanokrystalicznymi, mechanizmami krystalizacji, a także zależnościami pomiędzy składem chemicznym, mikrostrukturą i właściwościami magnetycznymi. Autor wykazuje się dobrą orientacją w aktualnym stanie wiedzy, a sposób prowadzenia narracji świadczy o umiejętności krytycznego porządkowania informacji pochodzących zarówno z klasycznych prac fundamentalnych, jak i z najnowszych doniesień literaturowych.

Istotnym elementem pracy jest jasne i precyzyjne sformułowanie celów oraz tez badawczych, które stanowią punkt odniesienia dla dalszej części rozprawy.

Część metodyczna rozprawy została opracowana szczegółowo i obejmuje opis użytych materiałów, metod wytwarzania próbek oraz aparatury badawczej. Autor omawia zastosowane techniki badawcze w sposób rzeczowy i kompetentny, uwzględniając zarówno metody charakteryzacji strukturalnej, jak i pomiary właściwości magnetycznych statycznych oraz dynamicznych. Zastosowany zestaw metod badawczych należy uznać za adekwatny do postawionych celów pracy i umożliwiający kompleksową ocenę wpływu parametrów obróbki cieplnej i cieplno-magnetycznej na mikrostrukturę oraz właściwości badanych stopów. Na uwagę zasługuje fakt, że Autor nie ogranicza się jedynie do standardowych technik pomiarowych, lecz wykorzystuje również bardziej zaawansowane metody, pozwalające na pogłębioną analizę zależności proces-struktura-właściwości.

Rozdziały poświęcone prezentacji wyników badań oraz ich dyskusji stanowią zasadniczą część rozprawy i zostały opracowane w sposób spójny oraz przejrzysty. Autor w logiczny sposób prowadzi czytelnika od opisu otrzymanej mikrostruktury, poprzez analizę właściwości magnetycznych, aż do wskazania konsekwencji tych wyników dla potencjalnych zastosowań praktycznych. Należy podkreślić, że interpretacja wyników została osadzona w kontekście literatury przedmiotu, a formułowane wnioski mają charakter wyważony i dobrze uzasadniony.

W końcowej części rozprawy Pan mgr inż. Przemysław Zackiewicz zawarł podsumowanie i wnioski, które w sposób logiczny wynikają z przeprowadzonych badań i stanowią syntetyczne ujęcie najważniejszych osiągnięć pracy. Całość uzupełnia obszerny zestaw bibliograficzny obejmujący 174 pozycje literaturowe, w tym publikacje własne Autora. Dobór literatury należy ocenić bardzo wysoko zarówno pod względem merytorycznym, jak i aktualności. W bibliografii znalazły się prace krajowe i zagraniczne, obejmujące zarówno badania podstawowe, jak i prace o charakterze aplikacyjnym, co umożliwia właściwe osadzenie uzyskanych wyników w aktualnym stanie wiedzy.

Istotnym elementem rozprawy jest wyodrębniony rozdział poświęcony aspektowi wdrożeniowemu, w którym Autor przedstawia praktyczne możliwości wykorzystania opracowanych materiałów magnetycznych. Rozdział ten stanowi logiczne dopełnienie części badawczej i jednoznacznie wskazuje na aplikacyjny charakter prowadzonych prac. Pan mgr

inż. Przemysław Zackiewicz nie ogranicza się jedynie do prezentacji wyników laboratoryjnych, lecz podejmuje próbę ich odniesienia do realnych warunków eksploatacyjnych, typowych dla elementów magnetycznych pracujących w układach wysokoczęstotliwościowego przetwarzania dużych mocy. Przedstawione w tym rozdziale rozwiązania dotyczą w szczególności możliwości zastosowania opracowanych nanokrystalicznych stopów Fe-Co-B w rdzeniach magnetycznych, z uwzględnieniem wymagań dotyczących sprawności energetycznej, strat mocy oraz stabilności parametrów w warunkach podwyższonej częstotliwości pracy. Należy podkreślić, że aspekt wdrożeniowy nie ma charakteru deklaracyjnego, lecz opiera się na wynikach przeprowadzonych badań i analiz, co świadczy o świadomym i dojrzałym podejściu Autora do zagadnień związanych z transferem wyników badań do praktyki inżynierskiej.

Całość rozprawy tworzy spójne i uporządkowane opracowanie, w którym część teoretyczna znajduje logiczne dopełnienie w zaplanowanych i konsekwentnie zrealizowanych badaniach eksperymentalnych. Układ pracy jest przejrzysty i czytelny, a forma monograficzna została wykorzystana w sposób właściwy i świadomy.

W mojej ocenie rozprawa spełnia wymagania stawiane współczesnym rozprawom doktorskim w dyscyplinie inżynieria materiałowa, zarówno pod względem formalnym, jak i merytorycznym.

3. Ocena doboru tematyki i zakresu pracy

Dobór tematyki rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Przemysława Zackiewicza należy ocenić bardzo pozytywnie, zarówno z punktu widzenia aktualnych kierunków rozwoju inżynierii materiałowej, jak i potrzeb nowoczesnych technologii energoelektronicznych. Problematyka nanokrystalicznych materiałów magnetycznie miękkich o podwyższonej indukcji nasycenia, przeznaczonych do pracy w warunkach wysokich częstotliwości i dużych gęstości mocy, pozostaje jednym z kluczowych obszarów badań, w którym wciąż występują istotne ograniczenia materiałowe. Autor podejmuje zagadnienie o wyraźnie interdyscyplinarnym charakterze, łącząc aspekty inżynierii materiałowej oraz fizyki ciała stałego, co w pełni odpowiada współczesnym trendom badań nad funkcjonalnymi materiałami magnetycznymi.

Część studialna pracy jest integralnie związana z jej tematyką i została oparta na przeglądzie aktualnych pozycji literaturowych, obejmujących zarówno prace fundamentalne dotyczące mechanizmów krystalizacji i kształtowania mikrostruktury stopów amorficznych i nanokrystalicznych, jak i doniesienia o charakterze aplikacyjnym, odnoszące się do projektowania rdzeni magnetycznych dla układów wysokoczęstotliwościowych. Część literaturowa pracy stanowi bardzo dobry punkt wyjścia do dalszych badań, umożliwiając nie tylko właściwe umiejscowienie rozprawy na tle aktualnego stanu wiedzy, lecz także wskazanie

rzeczywistych luk badawczych, które Autor podejmuje w części doświadczalnej. Na uwagę zasługuje dobra, jasno przedstawiona charakterystyka technik badawczych stosowanych w badaniach materiałów magnetycznych, co świadczy o świadomym i przemyślanym podejściu do planowania dalszych etapów pracy.

Wynikiem krytycznej analizy literatury i jej syntetycznego podsumowania było sformułowanie przez Autora zakresu, celu oraz tezy pracy. Sformułowany cel rozprawy należy uznać za trafny i dobrze osadzony w aktualnych potrzebach badań nad materiałami magnetycznie miękkimi przeznaczonymi do zastosowań wysokoczęstotliwościowych. Autor w sposób właściwy identyfikuje ograniczenia konwencjonalnych materiałów magnetycznych, wynikające z kompromisu pomiędzy indukcją nasycenia a przenikalnością magnetyczną, i wskazuje kierunek badań zmierzających do ich przełamania. Zaproponowana teza badawcza jest poprawna pod względem naukowym, jasno sformułowana i logicznie wynika z analizy stanu wiedzy, przy czym została sformułowana na tyle ogólnie, że umożliwia rozważenie różnych wariantów składu chemicznego oraz parametrów obróbki cieplnej i ciepłno-magnetycznej. Takie otwarte postawienie problemu badawczego należy ocenić jako zasadne, gdyż stwarza szeroką przestrzeń do naukowych dociekań i uzyskania wyników o potencjalnie istotnym znaczeniu aplikacyjnym, przy jednoczesnym zachowaniu jednoznacznego ukierunkowania na rozwiązanie konkretnego problemu materiałowego, związanego z uzyskaniem wysokiej indukcji nasycenia przy zachowaniu korzystnych właściwości magnetycznie miękkich.

Uważam również, że cele rozprawy doktorskiej zostały przedstawione w sposób jasny, precyzyjny, a jednocześnie ambitny, przy czym na szczególne podkreślenie zasługuje ich wyraźnie zaznaczony wymiar użytkowy. Autor konsekwentnie definiuje cel naukowy, polegający na wykazaniu wpływu parametrów technologicznych obróbki cieplnej i ciepłno-magnetycznej na przebieg krystalizacji, mikrostrukturę oraz właściwości magnetyczne nanokrystalicznych stopów Fe-Co-B modyfikowanych dodatkami Nb i P, jednak równie istotny jest cel technologiczny, związany z określeniem warunków wytwarzania materiałów o wysokiej indukcji nasycenia, stabilnych parametrach magnetycznych i korzystnych właściwościach dynamicznych. W sposób jednoznaczny sformułowany został również cel użytkowy, ukierunkowany na otrzymanie materiałów magnetycznie miękkich, które mogą znaleźć praktyczne zastosowanie w rdzeniach transformatorów, dławików oraz innych elementów elektromagnetycznych przeznaczonych do pracy w układach wysokoczęstotliwościowego przetwarzania dużych mocy. Takie ujęcie celów, uwzględniające wymagania miniaturyzacji urządzeń, poprawy sprawności energetycznej oraz ograniczenia strat mocy w rdzeniu, świadczy o bardzo dobrej świadomości Autora w zakresie potrzeb współczesnej energoelektroniki oraz przemysłowych zastosowań materiałów magnetycznych.

Zakres pracy został zaplanowany w sposób spójny i logiczny, obejmując wszystkie

kluczowe etapy niezbędne do realizacji postawionych celów, poczynając od doboru składu chemicznego i warunków wytwarzania materiału, poprzez jego szczegółową charakterystykę strukturalną, aż po ocenę właściwości magnetycznych istotnych z punktu widzenia planowanych zastosowań. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że Autor uwzględnił w zakresie pracy zarówno klasyczną obróbkę cieplną, jak i obróbkę cieplno-magnetyczną, co pozwala na bardziej kompleksowe spojrzenie na możliwości kształtowania anizotropii magnetycznej i właściwości funkcjonalnych badanych stopów.

Tak zaprojektowany dobór tematyki, zakres pracy oraz wynikające z analizy literatury założenia badawcze należy ocenić jako dobrze przemyślane, spójne i w pełni odpowiadające aktualnym trendom rozwoju inżynierii materiałowej oraz badań nad nowoczesnymi materiałami magnetycznymi. W mojej ocenie Autor trafnie zidentyfikował istotny problem badawczy, a przyjęty zakres pracy stwarza realne możliwości uzyskania wyników o znaczeniu zarówno poznawczym, jak i wdrożeniowym.

4. Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej

Część merytoryczna rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Przemysława Zackiewicza stanowi zasadniczy i najbardziej wartościowy element przedstawionej dysertacji. Przeprowadzone badania zostały zaplanowane i zrealizowane w sposób logiczny, a ich układ prowadzi czytelnika od zagadnień związanych z wytwarzaniem materiału, poprzez szczegółową charakterystykę jego struktury, aż do analizy właściwości magnetycznych istotnych z punktu widzenia planowanych zastosowań. Część eksperymentalna pracy jest integralnie związana z jej tematyką i została oparta na wynikach uzyskanych w kolejnych etapach badań własnych, które w sposób spójny ilustrują wpływ parametrów technologicznych na kształtowanie mikrostruktury i właściwości funkcjonalnych nanokrystalicznych stopów Fe-Co-B z dodatkami Nb i P.

Jak wskazuje Autor, główny cel naukowy rozprawy koncentruje się na wykazaniu zależności pomiędzy parametrami obróbki cieplnej i cieplno-magnetycznej a przebiegiem krystalizacji, stabilnością struktury nanokrystalicznej oraz właściwościami magnetycznymi badanych stopów. Należy podkreślić, że zagadnienie to zostało ujęte w sposób kompleksowy, a przedstawione wyniki pozwalają na sformułowanie czytelnych wniosków dotyczących mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowane zmiany właściwości. Autor wykazuje się dobrą znajomością zagadnień związanych z krystalizacją stopów amorficznych i nanokrystalicznych, a sposób interpretacji wyników świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Należy podkreślić starania Autora w zakresie uogólnienia i usystematyzowania współzależności proces-struktura-właściwości. W pracy w sposób konsekwentny pokazano, w jaki sposób zmiana parametrów obróbki cieplnej wpływa na udział i rozmiar ziaren fazy

nanokrystalicznej, a następnie jak zmiany te przekładają się na parametry magnetyczne, takie jak indukcja nasycenia, pole koercji czy przenikalność magnetyczna. Takie ujęcie zagadnienia stanowi istotną wartość poznawczą pracy i pozwala lepiej zrozumieć mechanizmy kształtowania właściwości magnetycznie miękkich w badanych układach materiałowych.

Na szczególne podkreślenie zasługują konkretne rezultaty uzyskane w zakresie właściwości magnetycznych badanych stopów, które mają bezpośrednie znaczenie użytkowe. Autor wykazał możliwość uzyskania materiałów nanokrystalicznych o wysokiej indukcji nasycenia, przekraczającej wartości charakterystyczne dla klasycznych materiałów magnetycznie miękkich stosowanych w energoelektronice, przy jednoczesnym zachowaniu niskiego pola koercji i korzystnych parametrów przenikalności magnetycznej. Istotnym osiągnięciem pracy jest również szczegółowa analiza strat mocy w funkcji częstotliwości i indukcji roboczej, która jednoznacznie wskazuje na przewagę opracowanych materiałów w zakresie pracy w warunkach wysokoczęstotliwościowych. Uzyskane wyniki potwierdzają, że poprzez odpowiedni dobór parametrów obróbki cieplnej i cieplno-magnetycznej możliwe jest ograniczenie strat dynamicznych, co ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia sprawności energetycznej elementów magnetycznych.

Wysoko należy ocenić także wyniki dotyczące stabilności struktury nanokrystalicznej oraz powtarzalności uzyskiwanych parametrów magnetycznych, co jest szczególnie istotne w kontekście potencjalnego zastosowania przemysłowego. Autor wykazał, że zastosowanie dodatków stopowych Nb i P pozwala na skuteczne kontrolowanie procesu krystalizacji oraz stabilizację mikrostruktury w szerokim zakresie parametrów technologicznych. Przedstawione wyniki jednoznacznie wskazują, że badane materiały spełniają wymagania stawiane rdzeniom magnetycznym przeznaczonym do pracy przy podwyższonych częstotliwościach i dużych gęstościach mocy, co potwierdza zasadność przyjętej koncepcji badawczej.

Za jedną z największych zalet rozprawy należy uznać szeroki zakres przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz ich spójną interpretację. Autor wykorzystał odpowiednio dobrany zestaw metod badawczych, umożliwiający kompleksową charakterystykę strukturalną i magnetyczną wytworzonych materiałów. Szczególnie cenne są wyniki dotyczące wpływu dodatków stopowych oraz parametrów obróbki cieplnej na stabilność struktury nanokrystalicznej oraz właściwości dynamiczne materiałów w zakresie wysokich częstotliwości. Przedstawione rezultaty wnoszą nowe informacje do aktualnego stanu wiedzy i mogą stanowić punkt odniesienia dla dalszych badań w tym obszarze.

Z punktu widzenia realizacji celów i tezy pracy jest to najważniejsza część rozprawy doktorskiej. Autor w sposób przekonujący wykazał, że poprzez odpowiedni dobór składu chemicznego oraz parametrów obróbki cieplnej możliwe jest kształtowanie struktury i właściwości magnetycznych nanokrystalicznych stopów Fe-Co-B w kierunku pożądanych zastosowań. Analiza wyników oraz sformułowane wnioski zostały przedstawione w sposób

przejrzysty i logiczny, a ich interpretacja jest osadzona w aktualnym stanie wiedzy.

Istotnym atutem pracy jest także jej wymiar aplikacyjny. Przeprowadzone badania jednoznacznie wskazują na możliwość wykorzystania opracowanych materiałów w praktyce inżynierskiej, w szczególności w elementach magnetycznych przeznaczonych do pracy w układach wysokoczęstotliwościowego przetwarzania dużych mocy. Uzyskane wyniki poszerzają podstawową wiedzę w zakresie technologii wytwarzania i właściwości nanokrystalicznych materiałów magnetycznych, a jednocześnie stanowią istotny krok w kierunku rozpoznania ich potencjału wdrożeniowego.

Oceniając pracę od strony merytorycznej, należy podkreślić, że zaplanowane eksperymenty oraz interpretacja wyników zostały wykonane starannie i w sposób przemyślany. Zastosowany zestaw metod badawczych jest adekwatny do postawionych celów i pozwala na kompleksową ocenę właściwości wytworzonych materiałów. Całość przedstawionych badań potwierdza poprawny warsztat badawczo-naukowy Autora oraz jego swobodne posługiwanie się zastosowanymi metodami w celu realizacji celów pracy.

Lektura rozprawy doktorskiej przynosi następujące uwagi, komentarze oraz pytania:

1. Str. 53. W kontekście przedstawionej analizy składu chemicznego badanych stopów, jedną z kwestii wymagających krótkiego omówienia jest sposób określenia i interpretacji błędu przy wyznaczaniu składu chemicznego badanych stopów. Autor wskazuje, że w każdym przypadku błąd przy określeniu udziału procentowego pierwiastków nie przekracza 1,5%, przy czym jednocześnie prezentuje skład chemiczny zarówno w procentach atomowych, jak i masowych. Warto doprecyzować, czy deklarowany poziom błędu odnosi się bezpośrednio do wyników analizy składu atomowego uzyskanych metodami EDS i WDS, czy również do składu masowego obliczonego w wyniku przeliczeń. Ma to znaczenie interpretacyjne, zwłaszcza w odniesieniu do pierwiastków lekkich, takich jak bor, dla których niepewność oznaczenia może być istotnie różna niż w przypadku pierwiastków o większych liczbach atomowych. Uzupełnienie tej kwestii pozwoliłoby na bardziej jednoznaczne odniesienie zaprezentowanych danych ilościowych do dalszych analiz strukturalnych i magnetycznych.
2. Analizując szerokość refleksów dyfrakcyjnych (Rozdział 4, str. 95-105), Autor wiąże ich poszerzenie głównie z nanokrystalicznym charakterem badanych materiałów. Recenzent zwraca uwagę, że poszerzenie refleksów XRD może być również konsekwencją mikronaprężeń, defektów sieciowych oraz niejednorodności strukturalnych, które są typowe dla stopów poddanych intensywnej obróbce cieplnej i cieplno-magnetycznej. Recenzent prosi o krótkie rozwinięcie interpretacji poprzez wskazanie, że obserwowane poszerzenie refleksów jest wypadkową zarówno małego rozmiaru krystalitów, jak i możliwych odkształceń sieciowych, a przedstawione wnioski

mają charakter jakościowy.

3. W części poświęconej analizie dyfrakcyjnej (Rozdział 4, Analiza strukturalna, str. 90-100), Autor identyfikuje obecność określonych faz krystalicznych na podstawie uzyskanych dyfraktogramów XRD. Recenzent zwraca uwagę, że w przypadku materiałów nanokrystalicznych o złożonym składzie chemicznym oraz szerokich refleksach dyfrakcyjnych identyfikacja faz może mieć charakter niejednoznaczny, zwłaszcza w sytuacji nakładania się refleksów pochodzących od różnych faz. Recenzent prosi o doprecyzowanie, czy identyfikacja faz opiera się na najbardziej prawdopodobnych rozwiązaniach, zgodnych z analizowanym składem chemicznym oraz danymi literaturowymi, czy na jednoznacznym rozdzieleniu wszystkich możliwych składowych dyfraktogramu.
4. Na stronie 81 Autor analizuje niewielkie przesunięcia położenia pierwszego maksimum dyfrakcyjnego (halo amorficznego) oraz zmiany jego kształtu, interpretując je jako efekt wpływu dodatku kobaltu na parametry sieci krystalicznej, w tym na zmianę średnich odległości międzyatomowych oraz stałej sieci. Recenzent zwraca uwagę, że w przypadku materiałów o dominującym charakterze amorficznym, dla których nie występuje porządek dalekiego zasięgu, interpretacja położenia halo amorficznego w kategoriach klasycznie rozumianych parametrów sieci krystalicznej jest metodologicznie problematyczna.
5. Położenie i kształt halo amorficznego odzwierciedlają przede wszystkim uporządkowanie krótkiego zasięgu oraz średnie odległości międzyatomowe w strukturze nieuporządkowanej, a nie parametry sieci krystalicznej w sensie krystalograficznym. W związku z tym wskazane byłoby doprecyzowanie, czy Autor odnosi swoją interpretację do lokalnych obszarów nanokrystalicznych obecnych w materiale, czy też do zmian charakterystycznych dla struktury amorficznej. Recenzent prosi o wyjaśnienie, w jakim sensie obserwowane przesunięcia maksimum dyfrakcyjnego pozwalają na wnioskowanie o zmianach parametrów sieci oraz czy w analizie tej rozróżniono uporządkowanie krótkiego i dalekiego zasięgu.
6. Na stronie 81 Autor stwierdza, że szerokość połówkowa refleksu (FWHM) dostarcza informacji o stopniu nieuporządkowania struktury. Recenzent zwraca uwagę, że parametr FWHM jest w literaturze najczęściej interpretowany w kontekście wielkości kryształitów oraz obecności naprężeń drugiego rodzaju, a nie bezpośrednio jako miara nieuporządkowania. Ponadto na przedstawionym zestawieniu dyfraktogramów trudno jednoznacznie zauważyć wyraźne zwężenie refleksów. Wskazane byłoby doprecyzowanie tej interpretacji oraz zaznaczenie, że rzetelna ocena zmian szerokości połówkowej refleksów powinna opierać się na analizie profilu linii dyfrakcyjnej. Recenzent prosi również o wyjaśnienie, w jakim sensie Autor interpretuje zmiany

wartości FWHM jako miarę nieuporządkowania struktury oraz czy w analizie tej brano pod uwagę jednoczesny wpływ wielkości kryształitów i mikronaprężeń.

7. Na stronie 80 Autor omawia zestawienie dyfraktogramów, wskazując na obecność pojedynczych refleksów dyfrakcyjnych dla wybranych kątów 2θ , w tym refleksu w zakresie około 65° . Jednocześnie na przedstawionych dyfraktogramach wyraźnie widoczny jest również refleks w zakresie około 44° , który częściowo nakłada się z halem amorficznym. Recenzent zwraca uwagę, że w przypadku materiałów amorficzno-nanokrystalicznych taka sytuacja może wskazywać na jednoczesny wkład fazy amorficznej oraz krystalicznej w obserwowany sygnał dyfrakcyjny.
8. W tym kontekście interpretacja obecności jedynie pojedynczych refleksów krystalicznych wymaga większej ostrożności. Wskazane byłoby doprecyzowanie, czy ograniczona liczba obserwowanych refleksów nie wynika z efektu uprzywilejowanej orientacji kryształitów (tekstury), typowej dla taśm szybkochołodzonych, a nie z rzeczywistego braku innych orientacji krystalograficznych. Recenzent prosi o rozwinięcie interpretacji poprzez odniesienie się do możliwości występowania tekstury krystalograficznej oraz o wyjaśnienie, w jakim stopniu obserwowany refleks około 44° może być superpozycją sygnału pochodzącego od fazy krystalicznej i halo amorficznego.
9. W części poświęconej analizie właściwości magnetycznych (Rozdział 5) Recenzent zwraca uwagę, że interpretacja zmian indukcji nasycenia została w dużej mierze powiązana z rosnącą zawartością kobaltu w stopie. Choć takie ujęcie jest zgodne z doniesieniami literaturowymi, w obecnym kształcie może sprawiać wrażenie zbyt bezpośredniego przypisania obserwowanego efektu wyłącznie składowi chemicznemu. Wskazane byłoby doprecyzowanie, w jakim stopniu wzrost indukcji nasycenia jest również konsekwencją zmian mikrostrukturalnych, takich jak stopień nanokrystalizacji, wielkość ziaren czy udział fazy amorficznej, które pozostają w ścisłym związku z parametrami obróbki cieplnej. Wyraźniejsze zaakcentowanie współdziałania składu chemicznego i struktury pozwoliłoby na bardziej precyzyjną interpretację mechanizmu obserwowanych zmian.
10. Na stronie 112 Autor stwierdza, że w temperaturze 455°C struktura osiąga maksymalny poziom nanokrystalizacji, a ziarna są drobne, jednorodne i losowo rozmieszczone, co ma tłumaczyć brak wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na orientację ziaren. Jednocześnie Autor odwołuje się do rysunku 53, przedstawiającego dyfraktogramy taśmy po obróbce cieplnej w 455°C przez 20 minut. Recenzent prosi o doprecyzowanie, w jaki sposób przedstawione dyfraktogramy potwierdzają sformułowane wnioski oraz o jednoznaczne odniesienie obserwowanych cech dyfraktogramów do opisywanego stanu strukturalnego.

11. Analizując straty mocy w funkcji częstotliwości (rozdział 5, str. 135-145), Recenzent zauważa, że Autor słusznie podkreśla ich korzystne wartości w szerokim zakresie częstotliwości, co stanowi istotny argument aplikacyjny pracy. Jednocześnie interpretacja ta ma w kilku miejscach charakter syntetyczny i nie zawsze jednoznacznie rozdziela wkład poszczególnych mechanizmów strat, takich jak straty histerezy, wirowe czy relaksacyjne. Recenzent prosi o krótkie doprecyzowanie, które mechanizmy strat można uznać za dominujące w poszczególnych zakresach częstotliwości, co wzmocniłoby fizyczną interpretację uzyskanych wyników.
12. W końcowych fragmentach analizy właściwości magnetycznych oraz w części wnioskowej (Rozdział 5 oraz Wnioski końcowe, str. 150-155), Autor formułuje wnioski dotyczące stabilności struktury nanokrystalicznej badanych stopów w kontekście potencjalnych zastosowań eksploatacyjnych. Recenzent zwraca uwagę, że niektóre sformułowania mogą sugerować stabilność długoterminową, która nie była bezpośrednio przedmiotem badań przedstawionych w pracy. Wskazane byłoby doprecyzowanie, że wnioski te odnoszą się do stabilności w zakresie badanych warunków obróbki cieplnej oraz zaznaczenie, iż ocena stabilności długookresowej stanowi potencjalny kierunek dalszych badań.
13. Na stronie 96 Autor stwierdza, że obszary do badań zostały dobrane z dużą ostrożnością, eliminując wcześniej istniejące zarodki krystaliczne. Recenzent prosi o doprecyzowanie, w jaki sposób przeprowadzono taką eliminację oraz jakie kryteria zastosowano przy wyborze obszarów badawczych, gdyż informacja ta ma istotne znaczenie dla interpretacji wyników strukturalnych.
14. W odniesieniu do wyników uzyskanych po obróbce cieplno-magnetycznej (Rozdziały 4 i 5, ok. s. 100-115), Recenzent pozytywnie ocenia wykazany korzystny wpływ tej obróbki na właściwości magnetyczne badanych stopów. Jednocześnie wskazane byłoby nieco szersze omówienie możliwego wpływu pola magnetycznego na kształtowanie anizotropii magnetycznej w skali mikro- i mezostrukturalnej, co pozwoliłoby pełniej powiązać obserwowane zmiany parametrów magnetycznych z mechanizmami ich powstawania.
15. Porównując właściwości magnetyczne poszczególnych serii stopów (Rozdział 5, str. 125-135), Recenzent zwraca uwagę, że jednocześnie zmieniane są zarówno skład chemiczny, jak i parametry obróbki cieplnej. Choć takie podejście jest w pełni uzasadnione z punktu widzenia celów aplikacyjnych pracy, w niektórych miejscach utrudnia ono jednoznaczne przypisanie obserwowanych efektów pojedynczemu czynnikowi. Recenzent prosi o krótkie doprecyzowanie tej współzależności, aby uniknąć potencjalnych nadinterpretacji.
16. W części poświęconej aspektowi wdrożeniowemu (Rozdział 7 oraz Wnioski końcowe,

str. 160–170) Autor przedstawia realne możliwości zastosowania opracowanych materiałów, co Recenzent ocenia bardzo pozytywnie. Jednocześnie w pojedynczych fragmentach narracja może sugerować gotowość rozwiązań do bezpośredniego wdrożenia przemysłowego, podczas gdy przedstawione wyniki dotyczą głównie skali laboratoryjnej. Recenzent prosi o wyraźniejsze zaznaczenie etapu gotowości technologicznej proponowanych rozwiązań oraz wskazanie, że dalsze kroki wdrożeniowe wymagałyby badań skalowania i testów długoterminowych.

Podczas czytania rozprawy niestety odczuwalny jest pewien pośpiech w opracowywaniu jej treści, bowiem miejscami pojawiają się tzw. skróty myślowe czy usterki natury terminologicznej i czysto edytorskiej, na przykład:

1. W tekście rozprawy występuje niekonsekwencja w zapisie jednostek temperatury. W części fragmentów zastosowano zapis ze spacją pomiędzy wartością liczbową a symbolem jednostki (np. „460 °C”), natomiast w innych miejscach zapis ten pojawia się bez spacji (np. „460°C”). Z punktu widzenia poprawności edytorskiej oraz zgodności z zasadami zapisu jednostek miar wskazane byłoby ujednolicenie tego zapisu w całej rozprawie. Ponadto w tekście pojawia się oznaczenie „oC”, w którym litera „o” występuje w indeksie górnym. Wskazane jest konsekwentne stosowanie prawidłowego symbolu „°C” w całej rozprawie, zgodnie z zasadami notacji naukowej oraz standardami jednostek SI.
2. W tekście rozprawy zastosowano zapis udziału procentowego w postaci „at.%”, który jest typowy dla literatury anglojęzycznej. W polskojęzycznym tekście naukowym wskazane byłoby ujednolicenie zapisu i konsekwentne stosowanie formy „% at.” (ewentualnie „proc. at.”) w całej rozprawie.
3. Na stronie 81 Autor stosuje zamiennie określenia „parametr sieciowy” oraz „stała sieci krystalicznej”. Recenzent zwraca uwagę, że choć pojęcia te bywają używane zamiennie, z punktu widzenia poprawności terminologicznej wskazane byłoby ujednolicenie nomenklatury w całej pracy i konsekwentne stosowanie jednego określenia.
4. Rozdz. 4 - tekst główny, tabele składu, podpisy rysunków. W pracy stosowane są różne formy zapisu składu chemicznego stopów, m.in. z użyciem indeksów dolnych oraz zapisu ciągłego. Przykładowo w tekście pojawiają się zapisy typu $\text{Fe}_{84,5-x}\text{Co}_x\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$, natomiast w tabelach i podpisach pod rysunkami skład bywa przedstawiany w innej konwencji. Wskazane byłoby ujednolicenie zapisu składu chemicznego w całej rozprawie, co poprawiłoby jej spójność edytorską.
5. W podpisach pod rysunkami (np. rysunki prezentujące wyniki analizy strukturalnej i magnetycznej w rozdz. 4 i 5), występują drobne różnice stylistyczne i redakcyjne,

polegające m.in. na zmiennej szczegółowości opisu oraz różnym sposobie formułowania podpisów. Przykładowo część podpisów zawiera pełne, opisowe zdania, natomiast inne ograniczają się do skrótowego określenia przedstawionego wykresu lub obrazu. Wskazane byłoby ujednolicenie stylu podpisów pod rysunkami w całej rozprawie, tak aby wszystkie zawierały spójny zakres informacji (rodzaj badania, badany materiał, istotne parametry).

6. W pracy spotyka się różne formy zapisu zakresów parametrów (np. rozdz. 4 - opisy procesów wygrzewania i analizy termicznej), np. temperatur, czasów wygrzewania lub częstotliwości, zarówno z użyciem myślników, jak i określeń opisowych („od ... do ...”). Przykłady takich zapisów pojawiają się w opisach warunków obróbki cieplnej oraz w podpisach pod rysunkami prezentującymi wyniki pomiarów. Z punktu widzenia spójności edytorskiej wskazane byłoby ujednolicenie tego sposobu zapisu w całej rozprawie.
7. W opisie wyników analizy strukturalnej spotyka się różne formy zapisu symboli faz krystalicznych oraz oznaczeń strukturalnych, w tym różnice w stosowaniu kursywy i indeksów. Z punktu widzenia spójności notacji materiałowej wskazane byłoby ujednolicenie zapisu tych symboli w całej pracy.
8. W tekście głównym występują różne sposoby odwoływania się do rysunków i tabel, np. „rys. 10”, „Rysunek 10” lub „tabela 6”, „Tabela 6”. Choć są to drobne różnice, z punktu widzenia redakcyjnego wskazane byłoby konsekwentne stosowanie jednej formy zapisu w całej rozprawie.
9. Na części wykresów przedstawiających właściwości magnetyczne lub wyniki analiz termicznych opisy osi oraz oznaczenia jednostek są relatywnie drobne w porównaniu do wielkości samego wykresu. Choć nie wpływa to na możliwość interpretacji wyników, nieznaczne zwiększenie czytelności opisów osi poprawiłoby odbiór graficzny rozprawy.

Zdaniem Recenzenta, treść rozprawy stanowi zamkniętą i spójną całość, w której postawiona teza doktorska została przekonująco uzasadniona, a wszystkie założone cele badawcze zostały w znacznej mierze zrealizowane. Rozprawa napisana jest poprawnym językiem technicznym, z zachowaniem przejrzystości narracji i starannie opracowaną szatą graficzną. Przedstawione wyniki mają istotną wartość naukową i aplikacyjną, a ich znaczenie wykracza poza wąski zakres badanych materiałów, stanowiąc solidną podstawę do dalszych badań w obszarze nowoczesnych materiałów magnetycznych. Zgłoszone w recenzji uwagi mają charakter uzupełniający i mogą być pomocne przy dalszych analizach oraz pogłębianiu badań nad zaprezentowanymi rozwiązaniami.



5. Ocena i wniosek końcowy

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Przemysława Zackiewicza jest właściwie ulokowana w aktualnym stanie wiedzy w obszarze inżynierii materiałowej oraz badań nad nowoczesnymi materiałami magnetycznymi. Praca została wykonana i napisana na wysokim poziomie naukowym, a podjęty problem badawczy ma charakter oryginalny i istotny zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i aplikacyjnego. Autor wykazał się szeroką wiedzą teoretyczną oraz bardzo dobrą znajomością zagadnień związanych z wytwarzaniem i charakterystyką nanokrystalicznych materiałów magnetycznie miękkich, w szczególności stopów Fe-Co-B modyfikowanych dodatkami Nb i P.

Rozprawa zawiera obszerny i wartościowy materiał badawczy, uzyskany w wyniku zaplanowanych i konsekwentnie zrealizowanych badań eksperymentalnych, uzupełnionych o pogłębioną analizę oraz dyskusję wyników osadzoną w literaturze przedmiotu. Uzyskane rezultaty zostały poprawnie zinterpretowane, a sformułowane wnioski są logiczne i spójne z przedstawionymi wynikami, co jednoznacznie potwierdza, że Autor potrafi samodzielnie prowadzić badania naukowe i formułować wnioski o charakterze zarówno naukowym, jak i użytkowym.

Zgłoszone w niniejszej recenzji uwagi mają charakter uzupełniający i dyskusyjny oraz nie wpływają na ogólną, bardzo pozytywną ocenę dysertacji. Dotyczą one wybranych aspektów interpretacji wyników, sformułowań użytych w pracy lub możliwych kierunków dalszych badań, które mogą stanowić inspirację do pogłębienia analiz w przyszłości.

Pozytywnie oceniam rozprawę doktorską Pana mgr inż. Przemysława Zackiewicza. Autor trafnie wybrał tematykę badań, umiejętnie sformułował tezę pracy, zaprojektował plan badawczy oraz przeprowadził rzetelną analizę uzyskanych wyników. Zarówno zakres przeprowadzonych badań, jak i zaprezentowane w pracy wnioski świadczą o dojrzałości naukowej Doktoranta oraz o wyraźnie ukształtowanym obszarze jego zainteresowań badawczych.

Na podstawie analizy przedstawionego wykazu dorobku publikacyjnego Pana mgr inż. Przemysława Zackiewicza należy stwierdzić, należy podkreślić, że dorobek publikacyjny Pana mgr inż. Przemysława Zackiewicza jest obszerny, spójny tematycznie i wyraźnie ukierunkowany na zagadnienia związane z nowoczesnymi materiałami magnetycznie miękkimi, w szczególności stopami amorficznymi i nanokrystalicznymi, ich strukturą, właściwościami magnetycznymi oraz technologią wytwarzania. Publikacje te ukazały się w renomowanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym i wysokim poziomie merytorycznym, co świadczy o dobrej jakości prezentowanych wyników oraz ich aktualności.

Na szczególne podkreślenie zasługuje zespołowy, interdyscyplinarny charakter dorobku, typowy dla badań prowadzonych w obszarze inżynierii materiałowej, zwłaszcza w zakresie materiałów funkcjonalnych o potencjale aplikacyjnym. Udział Autora w licznych projektach



badawczo-rozwojowych oraz współautorstwo zgłoszeń patentowych wskazują na jego istotny wkład merytoryczny i technologiczny w realizowane prace oraz na umiejętność łączenia badań naukowych z potrzebami praktyki inżynierskiej.

Wysoki poziom aktywności naukowej i wdrożeniowej Pana mgr inż. Przemysława Zackiewicza znajduje potwierdzenie w uzyskanych nagrodach i wyróżnieniach, które świadczą o uznaniu środowiska naukowego oraz przemysłowego dla prowadzonych przez Autora badań. Otrzymane wyróżnienia potwierdzają zarówno aktualność podejmowanej problematyki, jak i wysoką wartość poznawczą oraz aplikacyjną uzyskiwanych wyników.

Całokształt przedstawionego dorobku pozwala stwierdzić, że Pan mgr inż. Przemysław Zackiewicz wykazuje się dojrzałością naukową, konsekwencją w realizacji obranej tematyki badawczej oraz wyraźnie ukształtowanym profilem inżyniersko-badawczym, co pozostaje w pełnej zgodności z poziomem ocenianej rozprawy doktorskiej.

Na szczególne podkreślenie zasługuje wyraźnie zaznaczony aspekt wdrożeniowy rozprawy, potwierdzony odrębnym rozdziałem poświęconym praktycznym możliwościom zastosowania opracowanych materiałów magnetycznych. Przedstawione rozwiązania wskazują, że uzyskane wyniki nie mają wyłącznie charakteru poznawczego, lecz mogą być bezpośrednio wykorzystane w projektowaniu elementów magnetycznych do pracy w układach wysokoczęstotliwościowego przetwarzania dużych mocy. W mojej ocenie ten element rozprawy w istotny sposób podnosi jej wartość aplikacyjną i jednoznacznie potwierdza zasadność realizacji pracy w formule doktoratu wdrożeniowego.

W opinii Recenzenta przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Przemysława Zackiewicza spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571). **W związku z powyższym wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pana mgr inż. Przemysława Zackiewicza do publicznej obrony.**

Ponadto, mając na uwadze całokształt przeprowadzonych badań, ich wysoki poziom merytoryczny, konsekwentnie i logicznie zaplanowany zakres prac doświadczalnych, istotną wartość poznawczą uzyskanych wyników oraz ich wyraźny i dobrze udokumentowany wymiar aplikacyjny, z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Przemysława Zackiewicza należy do wyróżniających się wdrożeniowych rozpraw doktorskich realizowanych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że przedstawione wyniki badań nie mają wyłącznie charakteru poznawczego, lecz odnoszą się bezpośrednio do realnych problemów technologicznych i potrzeb nowoczesnych systemów energoelektronicznych. Autor w sposób dojrzały i odpowiedzialny łączy zagadnienia badań podstawowych z aspektami projektowymi i technologicznymi, wykazując praktyczną przydatność opracowanych rozwiązań materiałowych.



Uzyskane wyniki cechują się wysoką jakością naukową, spójnością interpretacyjną oraz realnym potencjałem wdrożeniowym, co znajduje potwierdzenie zarówno w publikacjach naukowych w renomowanych czasopismach posiadających IF, jak i w aktywnym udziale Doktoranta w projektach badawczo-rozwojowych oraz pracach o charakterze patentowym. Na szczególne podkreślenie zasługuje również fakt, że znaczący i wiodący wkład merytoryczny Doktoranta w publikacje powstałe na bazie wyników rozprawy został jednoznacznie potwierdzony w formalnym oświadczeniu promotora pomocniczego, co dodatkowo wzmacnia ocenę samodzielności badawczej Autora.

W mojej ocenie przedstawiona rozprawa w pełni zasługuje na wyróżnienie, a jej wysoki poziom merytoryczny, oryginalność ujęcia problemu badawczego oraz rzeczywisty charakter wdrożeniowy uzyskanych rezultatów stanowią mocną i w pełni uzasadnioną podstawę do podjęcia przez Komisję Doktorską i Radę Dyscypliny decyzji o wyróżnieniu tej pracy, zgodnie z obowiązującymi przepisami i procedurami.

Prof. Grzegorz Dercz

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)