

Wrocław, 12 stycznia 2026 r.

Dr hab. Mariusz Hasiak, prof. uczelni
Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej
Politechnika Wrocławska
ul. Smoluchowskiego 25
50-370 Wrocław

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. **Przemysław Zackiewicz** pod tytułem
„*Wpływ parametrów obróbki cieplnej na strukturę stopów Fe-Co-B z dodatkiem Nb i P
o podwyższonej indukcji nasycenia do zastosowań w wysokoczęstotliwościowym
przetwarzaniu dużych mocy*”

wykonanej pod kierunkiem promotora **dr. hab. inż. Rafała Babilasa**, profesora uczelni
z Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej i opiekuna
pomocniczego **prof. dr hab. Aleksandry Kolano-Burian** z Sieci Badawczej Łukasiewicz -
Instytut Metali Nieżelaznych.

Podstawa opracowania recenzji

Recenzję sporządzono na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej z dnia 28 października 2025 r.

Podstawa prawna:

Art. 187 Ustawy z dnia 20.07.2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce.

Wybór tematu pracy

Temat rozprawy doktorskiej pt. „Wpływ parametrów obróbki cieplnej na strukturę stopów Fe-Co-B z dodatkiem Nb i P o podwyższonej indukcji nasycenia do zastosowań w wysokoczęstotliwościowym przetwarzaniu dużych mocy” został wybrany w sposób przemyślany i celowy, odpowiadając na istotne wyzwania współczesnej inżynierii materiałowej oraz energoelektroniki. Tematyka pracy wpisuje się w światowe trendy rozwoju zaawansowanych materiałów funkcjonalnych dedykowanych dla urządzeń przetwarzających energię elektryczną w wysokich częstotliwościach, takich jak transformatory, nagrzewnice indukcyjne, silniki elektryczne oraz przetwornice mocy w pojazdach elektrycznych.

Wybór układu stopowego Fe-Co-B z dodatkami Nb i P jest w pełni uzasadniony z punktu widzenia naukowego i aplikacyjnego. Nanokrystaliczne stopy na bazie żelaza, takie jak FINEMET, NANOPERM czy HITPERM, stanowią od kilku dekad przedmiot intensywnych badań ze względu na unikatowe połączenie niskiego pola koercji, wysokiej przenikalności magnetycznej i niskich strat mocy. Jednak materiały te charakteryzują się ograniczoną indukcją nasycenia ($B_s \approx 1,2-1,7$ T), co niejednokrotnie stanowi istotne ograniczenie w aplikacjach wymagających wysokich wartości indukcji magnetycznych. Wprowadzenie kobaltu do składu stopu pozwala na podwyższenie indukcji nasycenia oraz temperatury Curie, podczas gdy dodatki Nb i P pełnią rolę stabilizatorów mikrostruktury poprzez kontrolę kinetyki krystalizacji i hamowanie nadmiernego wzrostu ziarna.

Szczególnie nowatorskim aspektem pracy jest zastosowanie ultraszybkiej obróbki cieplnej (URA-Ultra Rapid Annealing) jako alternatywy dla konwencjonalnej obróbki termicznej, co umożliwia kontrolę procesu krystalizacji bez konieczności stosowania niemagnetycznych dodatków stopowych takich jak krzem czy miedź. Metoda ta, rozwijana przez grupę profesora Suzuki z Uniwersytetu w Tohoku, pozwala na uzyskanie materiałów o wysokiej indukcji nasycenia zbliżonej do wartości charakterystycznych dla stali krzemowych (powyżej 1,8 T) przy zachowaniu właściwości magnetycznie miękkich typowych dla stopów nanokrystalicznych.

Wdrożeniowy charakter rozprawy, realizowanej w ramach programu doktoratu wdrożeniowego, dodatkowo podkreśla praktyczne znaczenie podjętej tematyki. Doktorant nie ograniczył się wyłącznie do badań podstawowych, lecz aktywnie uczestniczył we wdrażaniu opracowanych materiałów do prototypowej produkcji rdzeni magnetycznych stosowanych w nagrzewnicach indukcyjnych firmy ENRX oraz prowadził analizy aplikacyjne dla zastosowań silnikowych.

Wybór tematu świadczy o głębokim zrozumieniu przez Doktoranta aktualnych potrzeb przemysłu oraz kierunków rozwoju materiałów magnetycznie miękkich. Praca wypełnia istotną lukę poznawczą w zakresie systematycznej analizy wpływu parametrów obróbki cieplnej, cieplno-magnetycznej i ultraszybkiej obróbki cieplnej na strukturę oraz właściwości stopów Fe-Co-B z dodatkami Nb i P, a zaproponowana metodologia badawcza, obejmująca kompleksową charakterystykę kinetyki krystalizacji, badania strukturalne in-situ oraz pomiary właściwości magnetycznych w szerokim zakresie częstotliwości stanowi solidną podstawę do optymalizacji tych materiałów dla konkretnych zastosowań.

Podsumowując, temat rozprawy został wybrany trafnie, jest aktualny, ambitny i ma duże znaczenie zarówno poznawcze, jak i aplikacyjne. Łączy w sobie aspekty naukowe związane z fizyką materiałów i inżynierią procesów termicznych z praktycznymi wyzwaniami technologicznymi, co czyni go w pełni adekwatnym dla doktoratu wdrożeniowego w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Ocena strony formalnej pracy

Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Przemysława Zackiewicza już na jednej z pierwszych nienumerowanych stron zawiera informacje, że praca realizowana była jako doktorat wdrożeniowy finansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego zgodnie z umową nr DWD/5/0620/2021 pod tytułem „*Wpływ parametrów obróbki cieplnej na strukturę stopów Fe-Co-B z dodatkiem Nb i P o podwyższonej indukcji nasycenia do zastosowań w wysokoczęstotliwościowym przetwarzaniu dużych mocy*”. Doktorant realizował eksperymenty, których wyniki zostały uzyskane m.in. w ramach następujących projektów badawczych:

- E-MAGMAT (nr umowy TECHAMTSTRATEG2/410941/4/NCBR/2019) „Nowoczesne technologie wytwarzania funkcjonalnych materiałów magnetycznych dla zastosowań elektro-mobilnych i medycznych”,
- SEEMAG (nr umowy: TECHMATSTRATEG1/347200/11/NCBR/2017) „Opracowanie wysokowydajnej i bezodpadowej technologii wytwarzania nanokompozytów magnetycznie miękkich dla wysokoczęstotliwościowego przetwarzania dużych mocy”.

Recenzowana rozprawa doktorska została podzielona na siedem rozdziałów, które tworzą logicznie uporządkowaną całość. Dodatkowe, nienumerowane części pracy obejmują: wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń, zestawienie literatury, streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz dorobku naukowego, spis patentów i wzorów użytkowych, wykaz wystąpień naukowych i konferencyjnych, zestawienie udziału w realizacji projektów badawczych oraz listę otrzymanych nagród i wyróżnień. Praca nie zawiera spisu rysunków i tabel. Na początku rozprawy Autor zamieścił trzystronicowe

wprowadzenie, natomiast w zakończeniu umieścił streszczenie pracy w języku polskim oraz angielskim. Zgodnie z wdrożeniowym charakterem pracy, Doktorant ostatni numerowany rozdział poświęcił „Części wdrożeniowej”, dokumentującej praktyczne wykorzystanie opracowanych materiałów. Monografia liczy 199 stron i została zilustrowana 78 rysunkami (w tym rysunkami zawierającymi tabele) oraz 14 tabelami. Zestawienie cytowanej literatury obejmuje 174 pozycje, świadcząc o szerokim zapoznaniu się Autora ze stanem wiedzy w dziedzinie.

Imponujący dorobek naukowy Doktoranta obejmuje 41 wieloautorskich publikacji naukowych, każdorazowo scharakteryzowanych poprzez wskazanie wartości współczynnika impact factor. Pan P. Zackiewicz jest również współautorem 7 patentów i 1 wzoru użytkowego, co świadczy o aplikacyjnym charakterze prowadzonych badań. Ponadto Doktorant 15 razy występował jako prelegent na naukowych konferencjach krajowych, międzynarodowych i targach, prezentując wyniki własnych badań. Autor rozprawy 19 razy uczestniczył w realizacji projektów badawczych jako współautor, w tym w jednym przypadku pełnił funkcję kierownika zadania, co potwierdza jego umiejętności organizacyjne i zdolność do samodzielnego prowadzenia złożonych zagadnień badawczych. Jest również współautorem 10 nagród i wyróżnień w okresie 2013-2025 r., w tym sześciu pierwszych nagród Łukasiewicz-IMN za publikacje i prace badawczo-rozwojowe, co podkreśla wysoką jakość jego dokonań naukowych.

Pierwszy rozdział rozprawy, zatytułowany „Wprowadzenie”, poświęcony jest umiejscowieniu tematyki pracy w kontekście rozwoju współczesnych materiałów magnetycznie miękkich oraz uzasadnieniu wyboru badanego układu stopowego i zakresu podjętych badań. Autor w sposób kompetentny omawia ewolucję materiałów magnetycznie miękkich od klasycznych stali elektrotechnicznych, przez stopy amorficzne, aż po nanokrystaliczne materiały na bazie żelaza, takie jak FINEMET, NANOPERM czy HITPERM, wskazując na ich zalety i ograniczenia z punktu widzenia uzyskania wysokiej indukcji nasycenia przy zachowaniu niskich strat mocy. Doktorant zwraca uwagę na ultraszybką obróbkę cieplną, która pozwala na kontrolę procesu krystalizacji bez konieczności stosowania niemagnetycznych dodatków stopowych, co stanowi oryginalny wkład w rozwój tej technologii. W tym kontekście Autor wprowadza koncepcję opracowania stopów magnetycznie miękkich na bazie Fe-Co-B, wykazując głębokie zrozumienie problematyki badawczej.

Drugi rozdział rozprawy poświęcony jest obszernemu przeglądowi literatury dotyczącej materiałów magnetycznie miękkich, ze szczególnym uwzględnieniem amorficznych i nanokrystalicznych stopów oraz ich zastosowań w nowoczesnej energoelektronice. Doktorant w pierwszej kolejności przedstawia definicję i podstawowe parametry materiałów magnetycznie miękkich w oparciu o wykres pętli histerezy magnetycznej, odwołując się przy tym do kryteriów klasyfikacyjnych przyjętych w normie IEC 60404-8. W kolejnych podrozdziałach szczegółowo omawia rozwój tej grupy materiałów, wskazując na zalety i ograniczenia poszczególnych rodzajów w kontekście pracy w wysokich częstotliwościach. Istotną część rozdziału stanowi kompetentne omówienie zasad projektowania nanokrystalicznych materiałów magnetycznie miękkich, w szczególności roli poszczególnych pierwiastków stopowych w kształtowaniu zdolności do zeszklenia, kinetyki krystalizacji i kontroli wielkości ziarna. Autor prezentuje również szczegółową charakterystykę właściwości funkcjonalnych i dynamicznych tej klasy materiałów wraz z ich stabilnością temperaturową i częstotliwościową, opisując mechanizmy strat mocy oraz charakterystyki częstotliwościowe przenikalności magnetycznej. Rozdział kończy się prezentacją modelu anizotropii, który stanowi teoretyczną podstawę interpretacji wyników eksperymentalnych przedstawionych w dalszej części rozprawy, świadcząc o solidnym przygotowaniu teoretycznym Doktoranta.

Trzeci rozdział rozprawy, zatytułowany „Cel i teza pracy”, poświęcony jest precyzyjnemu zdefiniowaniu głównego celu badawczego oraz sformułowaniu tezy. Zgodnie z zapisami zamierzeniem Autora jest zbadanie procesu krystalizacji stopów z rodziny Fe-Co-B z dodatkiem Nb i P oraz samodzielne ustalenie zależności pomiędzy parametrami ultraszybkiej obróbki cieplnej i obróbki cieplno-magnetycznej a właściwościami magnetycznymi tych stopów. Teza badawcza pracy zakłada, że odpowiednio zaprojektowane stopy w układzie Fe-Co-B z dodatkiem Nb i P, poddane kontrolowanej obróbce cieplno-magnetycznej, umożliwiają uzyskanie nanokrystalicznej mikrostruktury zapewniającej jednocześnie podwyższoną indukcję nasycenia oraz korzystne właściwości magnetycznie miękkie. Rozdział ten porządkuje założenia badawcze i stanowi wyraźny pomost między przeglądem literatury a szczegółową metodyką oraz prezentacją wyników.

Czwarty rozdział rozprawy, zatytułowany „Metodyka badań”, w sposób szczegółowy i spójny opisuje zastosowane procedury technologiczne oraz zestaw metod badawczych, które Doktorant zastosował do realizacji celu pracy. Autor przedstawia kolejno etapy przygotowania stopów wyjściowych, obejmujące dobór składu chemicznego oraz proces wytwarzania wlewków przy użyciu indukcyjnego pieca próżniowego. Omawia proces wytwarzania taśm o szerokości 10 mm i grubości około 23 μm metodą szybkiego chłodzenia (melt-spinning), podając parametry układu i procesu umożliwiające odtworzenie procedury. W kolejnych podrozdziałach Doktorant szczegółowo opisuje zastosowane warianty ultraszybkiej obróbki cieplnej oraz konwencjonalnej obróbki cieplnej w obecności poprzecznego pola magnetycznego, wykazując głęboką znajomość metodyki eksperymentalnej. Istotną część rozdziału stanowi przedstawienie metody analizy termicznej wraz z zastosowanymi modelami kinetyki krystalizacji, obejmującymi wyznaczanie energii aktywacji procesu krystalizacji metodą Kissingera oraz analizę z wykorzystaniem modelu Johnsona-Mehla-Avramiego-Kolmogorova (JMAK) i Flynn-Walla-Ozawy (FWO), co świadczy o wysokich kompetencjach Autora w zakresie analizy kinetyki przemian fazowych.

Doktorant szczegółowo charakteryzuje zastosowane techniki badań strukturalnych, w realizacji których brał bezpośredni udział: dyfrakcję rentgenowską (XRD), transmisyjną mikroskopię elektronową (TEM, w tym badania in-situ), spektroskopię Mössbauera oraz pomiary temperatury Curie z użyciem systemu PPMS z opcją VSM. Obserwacje struktury domenowej przeprowadził z wykorzystaniem mikroskopu optycznego z szerokokątną polaryzacją, wykorzystując magnetoptyczny efekt Kerra. W końcowej części rozdziału Autor prezentuje metody badań właściwości magnetycznych w oparciu o analizę zarejestrowanych pętli histerezy magnetycznej, obejmujące pomiary w zakresie częstotliwości do 400 kHz oraz zespolonej przenikalności magnetycznej do 110 MHz. Zaproponowana metodologia, którą Doktorant samodzielnie opracował i zrealizował, należy ocenić jako w pełni adekwatną do zdefiniowanego celu oraz tezy rozprawy, obejmując kompletny ciąg działań od wytworzenia stopów, przez analizę procesu krystalizacji, aż po szczegółową charakterystykę strukturalną i magnetyczną badanych materiałów.

Rozdział piąty „Wyniki badań i dyskusja” stanowi najbardziej rozbudowaną część rozprawy, w której Doktorant prezentuje rezultaty własnych, samodzielnie zaprojektowanych badań strukturalnych i magnetycznych stopów Fe-Co-B z dodatkami Nb i P oraz stopu $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{20}\text{B}_{13}$. Wyniki badań dyfrakcyjnych XRD taśm w stanie po odlaniu należy ocenić jako przekonująco udokumentowane i prawidłowo zinterpretowane przez Autora. Doktorant wykazuje w pełni amorficzną strukturę stopu $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{20}\text{B}_{13}$ oraz identyfikuje powierzchniową krystalizację w serii stopów $\text{Fe}_{84,5-x}\text{Co}_x\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$ ($x = 0-20$ at.%), trafnie wiążąc zróżnicowany stopień krystalizacji z lokalnymi różnicami efektywności chłodzenia. Wyniki badań SEM/EDS, które Autor samodzielnie przeprowadził, potwierdzają bardzo dobrą zgodność składu chemicznego taśm z założeniami nominalnymi oraz wysoką jednorodność rozkładu pierwiastków, co świadczy o skutecznej kontroli procesu wytwarzania.

Wyniki badań kalorymetrycznych (DSC), które Doktorant wykonał i zinterpretował, pozwoliły jednoznacznie określić zakresy temperatur przemian fazowych badanych stopów oraz wykazały istotny wpływ zawartości Co, Nb i P na stabilność amorficznej fazy. Analiza kinetyki krystalizacji z zastosowaniem modeli Avramiego oraz Flynna-Walla-Ozawy dowodzi świadomej próby rozdzielenia wpływu temperatury i czasu na przebieg krystalizacji oraz dążenia Autora do precyzyjnego sterowania rozmiarem i udziałem fazy nanokrystalicznej. Doktorant w końcowej części podrozdziału zaprezentował charakterystyki magnetyzacji w funkcji temperatury, wykazując systematyczny wzrost temperatury Curie wraz ze wzrostem zawartości kobaltu od 96 °C dla stopu bez Co do 418 °C dla stopu $\text{Fe}_{44,5}\text{Co}_{20}\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$ i 516 °C dla stopu $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{20}\text{B}_{13}$, co znacząco rozszerza zakres stabilnej pracy tego materiału.

W podrozdziale poświęconym transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM) w trybie in-situ, Doktorant prezentuje wyniki obserwacji procesu krystalizacji podczas kontrolowanego nagrzewania. Autor wykazuje, że mechanizm krystalizacji przebiega poprzez formowanie fazy $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$, a dodatek Co wywiera ograniczony wpływ na średnią wielkość krystalitów. Dla stopu $\text{Fe}_{44,5}\text{Co}_{20}\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$ przeprowadził dodatkową analizę zmian wielkości ziaren w funkcji temperatury, wykazując intensywny wzrost do około 500 °C oraz stabilizację ich rozmiaru w zakresie 500-600 °C. Zidentyfikowane wydzielanie borków typu (Fe,Co)-B Autor trafnie interpretuje jako przesłankę do dalszej optymalizacji warunków nagrzewania.

W dalszej części pracy Doktorant prezentuje wyniki pomiarów właściwości magnetycznych rdzeni toroidalnych wykonanych ze stopów $\text{Fe}_{84,5-x}\text{Co}_x\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$ ($x = 0-20$ at.%), które poddał zoptymalizowanej obróbce cieplnej. Wykazuje, że w szerokim zakresie temperatur możliwe jest utrzymanie niskiego pola koercji przy zachowaniu nanokrystalicznej mikrostruktury (ziarna rzędu 72-74 nm), podczas gdy zbyt wysoka temperatura prowadzi do wzrostu pola koercji i strat mocy. Dla serii stopów określił samodzielnie kluczowe parametry magnetyczne (B_s , B_r , H_c , P_s), pokazując, że dodatki Co rzędu 5-10 at.% pozwalają podnieść indukcję nasycenia do ok. 1,66-1,70 T przy zachowaniu niskiego pola koercji i niewielkich strat mocy. Zastosowanie obróbki termicznej w obecności pola magnetycznego umożliwia efektywne indukowanie anizotropii magnetycznej, co potwierdza wyznaczone wartości pola anizotropii H_k i indukowanej anizotropii magnetycznej K_u .

Kolejna część pracy poświęcona jest badaniu mikrostruktury z wykorzystaniem spektroskopii Mössbauera dla próbek wygrzewanych w różnych warunkach. W tym miejscu wskazuję, że warto byłoby przeprowadzić nie tylko pobieżną, lecz kompleksową analizę otrzymanych widm z określeniem udziału fazy krystalicznej i amorficznej oraz wyznaczeniem stosunku intensywności linii w sekstecie zemanowskim ($A_3:A_2:A_1$), co pozwoliłoby na pełniejsze określenie położenia wektora magnetyzacji w badanych taśmach.

W podrozdziale poświęconym strukturze domenowej Autor prezentuje wyniki badań z wykorzystaniem magnetoptycznego efektu Kerra. Wykazał wyraźne zróżnicowanie lokalnych struktur domenowych od drobnych, nieregularnych domen w próbkach wygrzewanych bez pola, po uporządkowane, wydłużone domeny w próbkach po obróbce termomagnetycznej, co jednoznacznie świadczy o skutecznym indukowaniu anizotropii poprzecznej. Ta część pracy dokumentuje umiejętność Doktoranta do zaawansowanej charakterystyki magnetycznej, choć warto zauważyć, że prezentacja mogłaby być bardziej kompletna poprzez dołączenie wyników dla wszystkich badanych stopów, w tym $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{20}\text{B}_{13}$.

W następnym podrozdziale Autor przedstawia wyniki badań wpływu ultraszybkiej obróbki cieplnej (URA) na właściwości magnetyczne stopu $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{20}\text{B}_{13}$, które samodzielnie wykonał w szerokim zakresie temperatur (400-515 °C) i czasów wygrzewania (od 1 s do 60 s). Wykazał, że właściwy dobór parametrów pozwala na uzyskanie materiału o bardzo wysokiej indukcji nasycenia $B_s = 1,81$ T przy jednoczesnym utrzymaniu pola koercji na poziomie 35 A/m. Dla zastosowanej ciągłej ultraszybkiej obróbki cieplnej (cURA) możliwe jest uzyskanie rdzeni o indukcji nasycenia z przedziału (1,78-1,91 T) i relatywnie niskim

polu koercji, co stanowi istotny argument na rzecz przemysłowej skalowalności proponowanej technologii i potwierdza wysokie kompetencje technologiczne Doktoranta.

Kończąc ten rozdział, Autor przeprowadził dodatkowo szczegółową analizę dynamicznej przenikalności magnetycznej rdzeni metodą impedancyjną w szerokim zakresie częstotliwości. Dla serii stopów $\text{Fe}_{84,5-x}\text{Co}_x\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$ ($x = 0-20$ at.%) wygrzewanych w polu magnetycznym wykazał wyraźny spadek rzeczywistej składowej przenikalności wraz ze wzrostem zawartości Co oraz obecność wyraźnych maksimów składowej urojonej. Rdzeń stopu $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{20}\text{B}_{13}$ po zastosowaniu ciągłej ultraszybkiej obróbki cieplnej odznacza się bardzo wysoką początkową rzeczywistą przenikalnością magnetyczną (ok. 4700), choć przy nieco większych stratach. Całość tej części pracy, którą Doktorant zrealizował, dowodzi, że badane stopy stanowią przewidywalny materiał do zastosowań wysokoczęstotliwościowych, a stop $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{20}\text{B}_{13}$ oferuje unikatowe połączenie bardzo wysokiej indukcji nasycenia z akceptowalnym poziomem strat.

Rozdział 6 zatytułowany „Podsumowanie i wnioski” zawiera syntetyczne zestawienie 33 zrealizowanych zagadnień i podsumowanie najważniejszych wyników badań, ze szczególnym uwzględnieniem zależności między składem chemicznym, warunkami obróbki cieplnej a mikrostrukturą i właściwościami magnetycznymi. Doktorant jasno wykazuje, że dzięki odpowiednio dobranym parametrom krystalizacji możliwe jest uzyskanie nanokrystalicznej mikrostruktury o wysokiej indukcji nasycenia, niskim polu koercji oraz korzystnych charakterystykach strat i przenikalności w szerokim zakresie częstotliwości, co potwierdza spełnienie sformułowanej tezy pracy i jej znaczący potencjał aplikacyjny.

Ostatnia numerowana część pracy „Część wdrożeniowa” zawiera aspekt wdrożeniowy zgodnie z charakterem realizowanej pracy. Rozdział ten stanowi wartościowe dopełnienie części naukowej, prezentując wdrożeniowy wymiar opracowanych przez Doktoranta stopów i technologii oraz ich weryfikację w warunkach zbliżonych do przemysłowych. Autor opisuje działania obejmujące przeniesienie wyników badań laboratoryjnych do praktyki oraz wykonanie prototypowych rdzeni przeznaczonych do aplikacji energoelektronicznych. Przedstawia wykonanie dwóch serii rdzeni ze stopu $\text{Fe}_{64,5}\text{Co}_{20}\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$ oraz ich praktyczne zastosowanie w prototypowych nagrzewnicach indukcyjnych firmy ENRX (seria Miniac), co stanowi bezpośrednie potwierdzenie aplikacyjnej przydatności opracowanego materiału i umiejętności Doktoranta do translacji wyników badań podstawowych na zastosowania przemysłowe.

W dalszej części tego rozdziału Doktorant prezentuje obliczenia i dokonuje analizy porównawczej dla zastosowań silnikowych, w których stop $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{20}\text{B}_{13}$ zestawiał z komercyjną stalą krzemową N10 na podstawie parametrów strat wyznaczonych metodami Steinmetza i Bertottiego. Wnioski wskazują na korzystniejszy profil strat i stabilności zapewniany przez opracowany stop $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{20}\text{B}_{13}$, co uzasadnia jego zastosowanie do nowoczesnych układów. Rozdział ten zamyka opis wykonanych prac wdrożeniowych, podkreślając ich potencjał dla dalszej industrializacji opracowanych przez Doktoranta materiałów i technologii w obszarze rdzeni magnetycznych, co świadczy o dużym zakresie wiedzy i kompetencji Pana Przemysława Zackiewicza obejmującym zarówno aspekty podstawowe, jak i aplikacyjne inżynierii materiałowej.

Strona formalna pracy jest poprawna i spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

UWAGI KRYTYCZNE I SUGESTIE

- a) Prezentacja rozkładów pierwiastków w analizie EDS z zastosowaniem skali na zdjęciach 0,05 mm w kontekście struktury amorficznej z ewentualnymi nanometrycznymi wydzieleniami fazy krystalicznej wydaje się nieadekwatna. Jaki był powód zastosowania takiej rozdzielczości?

- b) Badania z wykorzystaniem różnicowej kalorymetrii skaningowej dla wytworzonych próbek są jak najbardziej zasadne i wręcz wskazane. Jaka jest zatem temperatura zeszklenia dla badanych stopów?
- c) Charakterystyki magnetyczne DC pozwalają w sposób łatwy wyznaczać temperaturę Curie badanych stopów. W jaki sposób na Rysunku 38 wyznaczona została indukcja magnetyczna B z pomiarów magnetyzacji w funkcji temperatury zarejestrowanych przy pomocy PPMS z modułem VSM?
- d) Pomimo faktu, że badania są spójne i kompleksowe, Autor wybrał szerokie i różnorodne spektrum metod do charakteryzacji wybranych materiałów, lecz nie zaproponował tych samych warunków obróbki cieplnej i warunków pomiarów dla charakteryzacji wszystkich wytworzonych materiałów. Proszę o wyjaśnienie powodu takiego wyboru.
- e) Dla potencjalnego czytelnika zewnętrznego zaprezentowane w rozprawie badania mogą wydawać się niespójne i nieskorelowane. Różne temperatury wygrzewania w różnych warunkach z niepełnym opisem rysunków i tabel są dla potencjalnego czytelnika niezwykle trudne do zrozumienia. Dlatego wnioskuję o uzupełnienie podpisów pod rysunkami i dokonanie korekty opisu tabel, aby łatwo można było porównać badane materiały.
- f) Rozkłady pól nadsubtelnych na jądrach ^{57}Fe (Rysunek 57) odpowiadające zamieszczonym widmom mössbauerowskim (Rysunek 56) są identyczne. Dlaczego tak właśnie jest? Proszę o zaprezentowanie parametrów rozkładów widm wraz z oszacowaniem zawartości fazy krystalicznej i amorficznej w badanych materiałach. Celowe byłoby tutaj zamieszczenie takiej samej analizy dla stopów w stanie po wytworzeniu i po wygrzaniu.
- g) Autor w podrozdziale 5.2.2 pisze „Wpływ zmiennego udziału kobaltu oraz obecności zewnętrznego pola magnetycznego, na skład fazowy i orientację spinów atomów żelaza był badany dla serii stopów nanokrystalicznych o składzie $\text{Fe}_{84,5-x}\text{Co}_x\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$, gdzie $x = 0, 5, 10, 15$ oraz $20 \text{ at.}\%$. ($T_a = 525 \text{ }^\circ\text{C}/20 \text{ min}$), z wykorzystaniem spektroskopii Mössbauera.” Proszę wskazać jakie wnioski, a w szczególności wnioski z analizy orientacji spinów, wynikają z tych badań, ponieważ nie zostały one zawarte w rozprawie doktorskiej.
- h) W Tabeli 14 Autor wskazuje na ultraszybką obróbkę cieplną, tymczasem w podpisie Rysunku 64 pisze o taśmach wygrzewanych w różnych temperaturach. Czy obróbki te są identyczne?
- i) W jaki sposób Autor oszacował wartość zewnętrznego pola magnetycznego zastosowanego w trakcie obróbki termicznej? Jaka rzeczywista wartość tego pola magnetycznego była zastosowana w trakcie procesu wygrzewania z uwzględnieniem współczynnika rozmagnesowania próbki?
- j) Proszę o wskazanie, które wykresy pętli histerezy magnetycznej były wykonywane w trybie DC, a które w trybie AC, ze wskazaniem częstotliwości pomiaru.
- k) Proszę o wskazanie, które badania były wykonywane dla próbek w postaci taśm, a które dla próbek w postaci rdzeni (toroidów). Czy w trakcie pomiarów próbek toroidalnych obserwowany był efekt wprowadzania naprężeń na zmianę właściwości magnetycznych próbek o różnym promieniu rdzenia?
- l) Co jest przyczyną tak drastycznego spadku indukcji nasycenia dla próbki poddanej ultraszybkiej obróbce cieplnej w temperaturze powyżej $480 \text{ }^\circ\text{C}$ przedstawionej na Rysunku 70?
- m) Co zdaniem Autora oznacza pojęcie „mniejszej stabilności magnetycznej” zastosowane na stronie 137 w odniesieniu do stopu $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{20}\text{B}_{13}$?
- n) Przedstawianie zmierzonych wielkości fizycznych z oszacowanym błędem pomiarowym jest obecnie powszechne i zalecane zarówno w artykułach naukowych, jak i rozprawach doktorskich.
- o) Wskazane byłoby naskicowanie w części końcowej rozprawy koncepcji dalszych badań, co obecnie staje się już standardem.

Dalej wybrane uwagi szczegółowe:

- Brak oznaczenia cURA (ciągła ultraszybka obróbka cieplna) występującego w rozprawie w wykazie ważniejszych skrótów i oznaczeń.
- W wykazie skrótów pojawia się oznaczenie „SDAP” opisane jako „dyfrakcja elektronowa z wybranego obszaru” (strona 7), podczas gdy w tekście i w standardowej terminologii funkcjonuje skrót SADP (Selected Area Diffraction Pattern). Rekomendowana jest ujednolicona forma „SADP”.
- W wykazie skrótów występuje literówka „Electric Vechicle” zamiast „Electric Vehicle” (strona 4).
- W części opisującej model przypadkowej anizotropii pojawia się błąd językowy „Random Anisotropy Moldel” zamiast „Random Anisotropy Model” (strona 42).
- W wykazie skrótów pojawia się „Non-orientet Electrical Steel” zamiast „Non-oriented Electrical Steel” (strona 6).
- Nie wydaje się wskazane wypisywanie tak dużej ilości liczb po przecinku w Tabeli 14 definiującej parametry strat.
- W tekście na stronie 139 pojawia się literówka w zdaniu „Badania struktury stopów w stanie po oddaniu...”. Poprawnie powinno być „Badania struktury stopów w stanie po odlaniu...”.
- W tekście na stronie 139 jest napisane „... amorficzno-krystalicznej dla stopów $\text{Fe}_{64,5-x}\text{Co}_x\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$.” zamiast „...amorficzno-krystalicznej dla stopów $\text{Fe}_{64,5-x}\text{Co}_x\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$ ($x = 0-20$ at.%)”.
- W pracy występuje bardzo duża liczba rysunków o bardzo niskiej jakości i czytelności (rysunki szczególnie zawarte od rozdziału 5 do końca rozprawy).
- Na Rysunku 33 występuje brak oznaczenia rodzaju przemiany (exo i/lub endo). Dodatkowo rysunki częściowe wchodzące w skład tego Rysunku są całkowicie nieczytelne.
- Tekst na stronie 86 (8 linijka od dołu) niepoprawnie został przeniesiony do nowej linii.
- Grubość taśmy t_i i t_{sr} (Tabela 7) w celu porównawczym powinna być podana z taką samą dokładnością, tj. z taką samą liczbą miejsc po przecinku.
- Na Rysunku 36 podana została wartość liczbowa jednak brak jest jednostki i poprawnego opisu osi y. Skrót DSC nie odnosi się do wielkości mierzalnej lecz metody pomiarowej. To samo dotyczy Rysunku 52.
- Część rysunków jest bardzo mała i nieczytelna (np. Rysunki 37, 54, 59, 60, 61, 67), a zawarte na nich opisy bardzo trudno odczytać.
- Podpisy pod rysunkami są bardzo lakoniczne (nie zawierają informacji o parametrach, przy jakich wykonano pomiar, czy też o zastosowanej obróbce termicznej) i niejednokrotnie wprowadzają w błąd, co dla czytelnika może być irytujące.
- Opis osi y na rysunku 38 jest niepoprawny. W pomiarach z wykorzystaniem PPMS z opcją VSM wyznaczana jest magnetyzacja w jednostkach emu. Sposób przeliczenia nie został zaprezentowany w pracy.
- Części dziesiętne od całkowitych w języku polskim oddziela się przeciwnikiem, a nie kropką. Taki zapis stosuje się w języku angielskim.
- Zdjęcia obrazów TEM są bardzo interesujące, jednak ich wielkość i jakość jest zbyt niska. Autor powinien zawrzeć oryginalne zdjęcia, a nie skany z publikacji i innych materiałów. Dodatkowo wskazane jest ich powiększenie aby były czytelne.
- Wyznaczając różnicę pomiędzy odległościami międzypłaszczyznowymi (eksperymentalnymi i teoretycznymi) należy posłużyć się taką samą dokładnością wyznaczenia tych wielkości (2 lub 3 miejsca po przecinku w obydwu przypadkach a nie w jednym przypadku 2 miejsca po przecinku a w drugim przypadku 3 miejsca po przecinku).
- W tabeli przypisanej do Rysunku 52 i Tabeli 11 wartość indukcji nasycenia oszacowana została z dokładnością 2 miejsc po przecinku, podczas gdy remanencja z dokładnością

do 3 miejsc po przecinku. Ta sama wielkość fizyczna powinna być wyznaczana z taką samą dokładnością.

- Na stronie 114 Autor pisze, że „W tabeli 12 zestawiono wartości indukowanej anizotropii magnetycznej wraz z wartością indukcji nasycenia...” tymczasem tabela ta nie zawiera żadnych wartości indukcji nasycenia.
- Brak oszacowania błędu pomiarowego dla wielkości zaprezentowanych na Rysunku 70.
- Autor nie ustrzegł się także kilkunastu innych, niewymienionych powyżej tzw. literówek, a także dodatkowych spacji/braku spacji oraz znaków interpunkcyjnych.

PODSUMOWANIE

Przedstawioną mi do recenzji rozprawę doktorską mgr. inż. Przemysława Zackiewicza pt. *„Wpływ parametrów obróbki cieplnej na strukturę stopów Fe-Co-B z dodatkiem Nb i P o podwyższonej indukcji nasycenia do zastosowań w wysokoczęstotliwościowym przetwarzaniu dużych mocy”*, niezależnie od zgłoszonych uwag, oceniam bardzo pozytywnie. Badania nowych, wieloskładnikowych materiałów magnetycznie miękkich, wytwarzanych z wykorzystaniem zaawansowanych technik oraz poddawanych starannie dobranym warunkom obróbki cieplnej, stanowią zagadnienie ambitne i niezwykle istotne zarówno z punktu widzenia badań podstawowych, jak i zastosowań praktycznych. Podjęta tematyka jest przy tym w pełni aktualna.

Praca ma wyraźnie eksperymentalny charakter i obejmuje zarówno aspekt technologiczny, związany z wytwarzaniem materiałów o zróżnicowanym składzie chemicznym, jak i szeroki zakres badań właściwości istotnych z perspektywy wdrożeniowej. Doktorant bardzo dobrze poradził sobie z realizacją postawionych zadań, a na szczególne podkreślenie zasługuje ambitny cel polegający na wytworzeniu oraz wieloaspektowym zbadaniu obiecujących stopów o różnych składach z wykorzystaniem wielu technik badawczych. Dodatkowym atutem pracy jest praktyczne wykorzystanie opracowanych stopów oraz wdrożenie zaproponowanych materiałów do produkcji seryjnej, co w sposób istotny podnosi wartość przedstawionych wyników. Na uznanie zasługuje również szerokie spektrum badań zaproponowanych przez Autora, umożliwiających kompleksową charakterystykę wytworzonych stopów.

Mając na uwadze wszystkie wymienione powyżej aspekty stwierdzam, że **przedstawiona do oceny rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez Ustawę Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20.07.2018 r. (Dz. U. z 2024 r., poz. 1571, z późn. zm.) Art. 187 i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Prof. Mariusz Hasiak

/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)