

Warszawa dn. 14.01.2026

Dr hab. inż. Jacek Salach

Wydział Mechatroniki

Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej

Wydział Mechatroniki

Politechnika Warszawska

ul. Świętego Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

email: jacek.salach@pw.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana mgra inż. Przemysława Zackiewicza 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”**

Promotor: dr hab. inż. Rafał Babilas, prof. PŚ

Opiekun pomocniczy: prof. dr hab. Aleksandra Kolano Burian

Dziedzina: Nauki Inżynieryjno-Techniczne

Dyscyplina: Inżynieria Materiałowa

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgra inż. Przemysława Zackiewicza, podstawę do sporządzenia recenzji stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechnika Śląska prof. dr hab. inż. Adama Grajcara sygn. RDIMa 512.38.2025 z dnia 30.10.2025 r., w którym znalazła się informacja o podjętej w dniu 28.10.2025 r. przez Radę Dyscypliny Inżynieria Materiałowa PŚ uchwały o powołaniu mnie na recenzenta w./wym. rozprawy.

1. Charakterystyka pracy

1.1 Ogólna charakterystyka rozprawy

Tematyka pracy związana jest z rozwojem materiałów funkcjonalnych, w szczególności układami przetwarzania energii elektrycznej z minimalizacją strat, co jest niezwykle ważne nie tylko ze względu na ochronę środowiska, lecz także na redukcję kosztów. Z tego względu temat pracy należy uznać za niezwykle aktualny i ważny, przede wszystkim w zastosowaniach aplikacyjnych.

Biurowo Dziekana

wpłynęło dnia 15.01.2026
RD IMa/12/51/2026
nr zał.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została przygotowana w formie książki o formacie A4. Praca zawiera 199 stron. Jej struktura obejmuje podziękowania, spis treści, wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń, siedem rozdziałów (Wprowadzenie, Przegląd literatury, Cel i teza pracy, Metodyka badań, Wyniki badań i dyskusja, Podsumowanie i wnioski, Część wdrożeniowa), Bibliografię (obejmującą 174 pozycje), Streszczenie, Abstrakt, oraz Dorobek naukowy.

1.2 Tematyka rozprawy

Tematyka rozprawy została w jasny i przejrzysty sposób określona zarówno w tytule, jak też w samym tekście rozprawy. Praca dotyczy możliwości opracowania magnetycznych materiałów nanokrystalicznych na bazie stopów żelazo-kobalt-bor o podwyższonej indukcji nasycenia stosowanych w wysokoczęstotliwościowych przetwarzaniu mocy. Zagadnienie to niewątpliwie wpisuje się w dyscyplinę naukową inżynieria materiałowa, konkretnie w jej dział związany z projektowaniem materiałów magnetycznych. W pracy można doszukać się fragmentów z innych dziedzin takich jak metrologia czy elektrotechnika.

Autor rozprawy przeprowadził badania dotyczące takich zagadnień jak:

- modyfikacja składu chemicznego wytwarzanych materiałów w celu uzyskania nanokrystalicznych stopów na bazie żelazo-kobalt-bor o podwyższonej indukcji nasycenia stosowanych w wysokoczęstotliwościowych przetwarzaniu mocy;
- opracowanie technologii obróbki termomagnetycznej tych stopów w celu poprawy ich właściwości magnetycznych w planowanych zastosowaniach;
- weryfikacja praktyczna opracowanych materiałów do zastosowania w urządzeniach komercyjnych,
- optymalizacja obróbki termicznej opracowanych materiałów do zastosowań komercyjnych.

Autor przedstawił wszystkie te zagadnienia jako spójne dzieło z dogłębną analizą popartą wynikami badań.

1.3 Charakterystyka poszczególnych rozdziałów rozprawy

Rozdział pierwszy pt. „Wprowadzenie” zawiera szereg informacji i ciekawostek związanych z historią rozwoju i zastosowań materiałów magnetycznie miękkich oraz badaniami tych materiałów. Zaznaczono ich znaczenie dla globalnego rozwoju techniki i postępu cywilizacji. Opisane zostały klasyczne materiały magnetyczne jak i najnowszej klasy materiały miękkie jakimi są materiały nanokrystaliczne.

Rozdział drugi zatytułowany „Przegląd literatury” zawiera wprowadzenie do materiałów magnetycznie miękkich, systematykę podziału na materiały magnetycznie miękkie i twarde oraz opis istotnych parametrów charakteryzujących te materiały. Następnie przedstawia historię i rozwój materiałów magnetycznie miękkich, wymieniając

najważniejszych naukowców zajmujących się badaniami nad rozwojem magnetyzmu oraz zastosowaniami aplikacyjnymi tych materiałów. Wspomniany został Nikola Tesla jednak pewien niedobór stanowi brak wspomnienia o Michale Doliwe-Dobrowolskim, który jak pierwszy w 1891 opracował trójfazową linię energetyczną i współpracujący z nią silnik. Następnie przedstawiono kolejne modyfikacje i udoskonalenia klasycznych materiałów magnetycznych poprzez dodatki krzemu, opracowanie „ceramiki ferrytowej”, aż do pojawienia się materiałów amorficznych i nanokrystalicznych. W kolejnych podrozdziałach opisano projektowanie nanokrystalicznych materiałów magnetycznie miękkich, właściwości funkcjonalne i dynamiczne, wybrane zastosowania techniczne oraz jako ostatni podrozdział model anizotropii.

Rozdział trzeci pt. „Cel i teza pracy” jasno precyzuje czego będą dotyczyły badania oraz co zostanie w niej udowodnione. W rozdziale tym autor krótko i syntetycznie opisał tematykę pracy.

W rozdziale czwartym zatytułowanym „Metodyka badań” autor opisał technologię wytwarzania materiałów nanokrystalicznych w postaci taśm. Początkowo taśma jest w postaci amorficznej następnie poprzez obróbkę termiczną i termomagnetyczną uzyskujemy strukturę nanokrystaliczną. Z zakresu badawczego przedstawiono prace badawcze związane z analizą termiczną badanych materiałów, pomiary gęstości właściwej, badania rentgenowskie, transmisyjną mikroskopie elektronową, spektrometrię Mossbauerowską, pomiary temperatury Curie, magnetoptyczną mikroskopie Kerra oraz badania dynamicznych właściwości magnetycznych. Rozdział ten przybliży niuanse poszczególnych badań oraz ich znaczenie dla końcowego rezultatu.

Rozdział piąty pt. „Wyniki badań i dyskusja” przedstawia rezultaty badań sześciu stopów o następujących składach: $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{20}\text{B}_{13}$, $\text{Fe}_{84,5}\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$, $\text{Fe}_{79,5}\text{Co}_5\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$, $\text{Fe}_{74,5}\text{Co}_{10}\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$, $\text{Fe}_{69,5}\text{Co}_{15}\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$, $\text{Fe}_{64,5}\text{Co}_{20}\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$.

Badania wykazały że taśma zaraz po „odlaniu” w całości charakteryzuje się stanem amorficznym. Następnie przeprowadzono badania wpływu warunków obróbki cieplnej oraz udziału kobaltu na strukturę oraz właściwości magnetyczne materiału. Kobalt (Co) był dozowany do stopu $\text{Fe}_{84,5-x}\text{Co}_x\text{Nb}_5\text{B}_{8,5}\text{P}_2$ w następujących proporcjach $x = 0, 5, 10, 15, 20$ at.%. Natomiast obróbkę termiczną prowadzono dla temperatur z zakresu 425-725°C w czasie 20 minut w „próżni”. W dalszych badaniach skoncentrowano się na stopach poddanych obróbce termicznej w temperaturze 455°C i 525°C.

Badania termomagnetyczne były prowadzone w temperaturze 525°C bez pola oraz w polu magnetycznym poprzecznym o wartości 94,5 kA/m i 125 kA/m. kolejnym etapem były badania wpływu ultraszybkiej obróbki termicznej w temperaturach 350, 370, 400, 420, 470, 485 i 510 °C dla czasu obróbki od 0 do 60s.

Na końcu przedstawiono jakie właściwości materiał wykazuje w zakresie pracy do częstotliwości 100 MHz.

Ostatnim rozdziałem z zakresu badań „laboratoryjnych” był rozdział „Podsumowanie i wnioski”. Autor w 33 punktach zawarł najważniejsze aspekty pracy oraz wypisał wnioski.

Kolejny rozdział stanowiła „Część wdrożeniowa”, w której autor przedstawił praktyczne zastosowania opracowanych materiałów w komercyjnych rozwiązaniach, takich jak nagrzewnica indukcyjna. Wskazano również potencjalne możliwości zastosowania tych materiałów w silnikach. Stanowi to najlepszy dowód znaczenia i praktycznej wartości prowadzonych badań.

1.3 Główne osiągnięcia rozprawy i ocena wartości naukowej

Do głównych osiągnięć autora należy zaliczyć:

- projekt składu stopu do produkcji materiałów nanokrystalicznych,
- dobór i optymalizacja parametrów technologii wytwarzania stopów,
- opracowanie technologii obróbki termicznej i termomagnetycznej,
- praktyczne zastosowanie opracowanego materiału.

Uważam, że cel pracy: „...zbadanie procesu krystalizacji rodziny stopów amorficznych Fe-Co-B modyfikowanych Nb i P oraz ustalenie warunków obróbki cieplnej i cieplno-magnetycznej, która kształtuje ich właściwości magnetyczne pod kątem wysokoczęstotliwościowego przetwarzania dużych mocy” został pozytywnie zweryfikowany, a tym samym mgr inż. Przemysław Zackiewicz udowodnił słuszność stawianej w pracy tezy.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska wnosi znaczący wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Materiałowa, w szczególności w obszarze zastosowań materiałów nanokrystalicznych magnetycznie miękkich.

2. Uwagi krytyczne i merytoryczne oraz inne

1. Strona 14 – w zdaniu „...zmniejszyć przekrój elementu indukcyjnego (bezpośrednio zmniejszyć wymiary) **lub** pozostawić rozmiar elementu bez zmian **lub** zwiększyć ilość energii przetwarzanej w jednostce czasu...” precyzyjniej byłoby: „...zmniejszyć przekrój elementu indukcyjnego (bezpośrednio zmniejszyć wymiary) **albo** pozostawić rozmiar elementu bez zmian i zwiększyć ilość energii przetwarzanej w jednostce czasu...”
2. Strona 17 Tabela 1 - podano wybrane właściwości materiałów bez podania parametrów obróbki oraz, w przypadku stopów amorficznych, bez wskazania, czy był to stan „As-Quenched”, czy po relaksacji.
3. Strona 115 pierwszy wiersz - jest „ istotny” powinno być „istotne”.

4. Strona 122 Rysunek 60 i 61 są dość małych rozmiarów przez co trudne do analizy.
5. Strona 130 Rysunek 66 – nie zostało podpisane jakie to jarzmo. Prawdopodobnie chodzi o jarzmo z aparatu Epsteina.
6. Strona 139 pod koniec punktu 1 - powinno być „wypływu”, podczas gdy w tekście widnieje „wpływu”.

Uwagi dyskusyjne

7. Strona 50 zdanie „...Częściowe zastąpienie żelaza kobaltom w stopach typu Fe-Co-B...”. Jeśli mamy do czynienia ze stopem typu Fe-Co-B, to w rzeczywistości modyfikujemy wzajemne udziały żelaza i kobaltu, a nie „zastępujemy” jednego drugim. Sformułowanie to wydaje się zatem nieprecyzyjne w takim kontekście. Można częściowo zastępować żelazo kobaltom w stopach Fe-B. Być może jest to żargon utarty w środowisku. Proszę o ustosunkowanie się do tej uwagi.
8. Strona 57 „Proces obróbki termomagnetycznej prowadzono w atmosferze ochronnej argonu, w wcześniej ustalonych temperaturach optymalnych dla danego stopu, przy zastosowaniu pola magnetycznego o natężeniu od 94,5 do 140,3 kA/m. Po godzinie wygrzewania próbki były chłodzone z szybkością 20 °C/min. Kiedy temperatura osiągnęła temperaturę 200 °C, pole magnetyczne było wyłączane.” Pytanie do autora jakie były przesłanki doboru takich parametrów?
9. Strona 68 „Dokładność wyznaczenia temperatury T_c została zwiększona przez obliczenie pierwszej pochodnej funkcji $M(T)$, a wartość temperatury Curie określano jako położenie minimum w pochodnej dM/dT ...” Jaki był to rząd zwiększenia dokładności wyznaczenia temperatury? I jaka była szybkość utraty właściwości magnetycznych przy zbliżaniu się do tej temperatury?
10. Strona 110 Rysunek 52 - oś opisana jako „DCS(mW/mg)” nie zawiera wartości, co utrudnia jednoznaczną interpretację wykresu. Proszę o uzupełnienie lub komentarz do sposobu prezentacji danych. W tekście pojawia się stwierdzenie „...Właściwości magnetyczne dla każdego ze stopów o różnym udziale Co zostały zebrane w tabeli 11.” Proszę doprecyzować, czy wartości te dotyczą temperatury 455°C czy innej?
11. W pracy wyniki pomiarów są w niektórych przypadkach prezentowane wraz z niepewnościami, w innych zaś bez ich podania. Dla przykładu, w podrozdziale 5.2.4 nie znalazły się informacje dotyczące niepewności, z jaką wykonano przedstawione tam pomiary. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii i uzupełnienie brakujących danych lub uzasadnienie przyjętego sposobu prezentacji wyników.

3. Ocena końcowa

Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska Pana mgr inż. Przemysława Zackiewicza „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” **spełnia wymagania** stosownej ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym, określonym w art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.). Wysokie kompetencje doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych zostały jednoznacznie potwierdzone w tekście rozprawy, która wskazuje na znaczącą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne predestynujące do ubiegania się o stopień naukowy doktora nauk technicznych. Wnioskuje o **dopuszczenie** rozprawy do publicznej obrony.

5. Wniosek o wyróżnienie pracy

Biorąc pod uwagę wysoką wartość merytoryczną rozprawy, dorobek naukowy autora, wdrożenie wyników pracy do przemysłu oraz duży potencjał aplikacyjny omawianej tematyki, składam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Przemysława Zackiewicza.

Dr hab. inż. Jacek Salach

/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)