



UNIWERSYTET ŚLĄSKI  
W KATOWICACH

Prof. dr hab. inż. Artur Chrobak  
Uniwersytet Śląski  
Wydział Nauk Ścisłych i technicznych

Chorzów 9.01.2026

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej w związku z uchwałą z dnia 28.10.2025 (pismo RDIMa.512.35.2025 z dnia 31.10.2025).

### 1. Ogólna charakterystyka rozprawy.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska zatytułowana „**Wpływ dodatków stopowych na właściwości magnetyczne, katalityczne oraz strukturę krystaliczną wysokoindukcyjnych materiałów magnetycznie miękkich na bazie żelaza**” dotyczy badań rodziny stopów amorficznych i nanokrystalicznych typu Fe-M-B gdzie M oznacza takie pierwiastki jak Cu, Co, Mo, Nb oraz Cr. Zakresem przeprowadzonych badań były właściwości strukturalne, magnetyczne oraz katalityczne. Podjęta tematyka badań ma duże znaczenie w dziedzinie inżynierii materiałowej, a także fizyki fazy skondensowanej, zarówno w obszarze zastosowań jak i poznania zależności pomiędzy technologią, mikrostrukturą a wybranymi właściwościami fizyko-chemicznymi. W szczególności, jako materiał do badań wybrano stopy o ogólnym wzorze  $Fe_{86-x}M_xB_{14}$  wytworzonych metodą szybkiego chłodzenia z fazy ciekłej (*melt-spinning*) w stanie po odlewaniu oraz po izotermicznej obróbce cieplnej. Szeroki zakres składu chemicznego, obróbki cieplnej pozwoliły na uzyskanie bardzo wartościowych wyników prezentowanych w czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym. Ponadto,

Biurowo Dziekana

wpłynęło dnia 19.01.2026  
RDIMa/161/511/2026  
nr ..... zał. ....

przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej badania zaowocowały czterema patentami RP dotyczącymi technologii oraz wykorzystania badanych materiałów.

Rozprawa jest przewodnikiem po publikacjach, jednak w znaczącym stopniu uzupełniona o dość wyczerpujący wstęp teoretyczny oraz dyskusję i wnioski będące próbą opisu przeprowadzonych badań jako pewnej całości. Wskazano osiem publikacji:

- [1] **Warski T.**, Włodarczyk P., Polak M., Zackiewicz P., Radoń A., Wójcik A., Szlezzynger M., Kolano-Burian A., Hawelek Ł.; Influence of Cu Content on Structure and Magnetic Properties in  $\text{Fe}_{85-x}\text{Cu}_x\text{B}_{14}$  Alloys; *Materials* 2020; 13(6):1451; DOI:10.3390/ma13061451,
- [2] Hawelek Ł., **Warski T.**, Włodarczyk P., Polak M., Zackiewicz P., Radoń A., Wójcik A., Kolano-Burian A.; Effect of Co Substitution on Crystallization and Magnetic Behavior of  $\text{Fe}_{85.45x}\text{Co}_x\text{Cu}_{0.55}\text{B}_{14}$  Metallic Glass; *Materials* 2020; 13(4):919; DOI: 10.3390/ma13040919,
- [3] Hawelek Ł., Zackiewicz P., Kądziołka-Gawel M., Wójcik A., Maziarz W., Chulist R., Fábíán M., **Warski T.**; Structure and magnetic properties of vacuum- and air-annealed rapidly quenched Mo- and Co-modified  $\text{Fe}_{85.3}\text{Cu}_{0.7}\text{B}_{14}$  alloy; *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2025, 25: 188. DOI: 10.1007/s43452-025-01238-y,
- [4] Hawelek Ł., **Warski T.**, Zackiewicz P., Hudecki J., Kolano-Burian A.; Magnetic properties evolution and crystallization behaviour of vacuum- and air-long-term-annealed rapidly quenched  $\text{Fe}_{80.3}\text{Co}_5\text{Cu}_{0.7}\text{B}_{14}$  alloy; *Scientific Reports* 2022; 12, 21387; DOI:10.1038/s41598-022-25925-5,
- [5] **Warski T.**, Gutiérrez J., Orue I., Zackiewicz P., Łoński W., Babilas R., Kolano-Burian A., Hawelek Ł.; Effect of minor Cr addition on the crystallisation process, magnetic, electrochemical and catalytical properties of high induction  $\text{Fe}_{86}\text{B}_{14}$  alloy; *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 2025; 202, 112687; DOI: 10.1016/j.jpcs.2025.112687,
- [6] Hawelek Ł., **Warski T.**, Radon A., Pilśniak A., Maziarz W., Szlezzynger M., Kadziolka-Gawel M., Kolano-Burian A.; Structure and Magnetic Properties of Thermodynamically Predicted Rapidly Quenched  $\text{Fe}_{85-x}\text{Cu}_x\text{B}_{15}$  Alloys; *Materials* 2021; 14(24):7807; DOI: 10.3390/ma14247807,
- [7] **Warski T.**, Pilśniak A., Wójcik A., Szlezzynger M., Dadiel J.L., Kolano-Burian A., Hawelek Ł.; Annealing Optimization of High Induction ( $> 1.7$  T)  $\text{Fe}_{85-(x+y)}\text{Co}_x\text{Cu}_y\text{B}_{15}$  Alloys With Enhanced Magnetic Properties; *Metallurgical and Materials Transactions A* 2024; 55, 1174–1182. DOI: 10.1007/s11661-024-07313-y,
- [8] Hawelek Ł., Zackiewicz P., Wójcik A., Hudecki J., **Warski T.**; Influence of Nb and Mo Substitution on the Structure and Magnetic Properties of a Rapidly Quenched  $\text{Fe}_{79.4}\text{Co}_5\text{Cu}_{0.6}\text{B}_{15}$  Alloy; *Materials* 2023; 16(18):6288. DOI: 10.3390/ma16186288.

W rozprawie wskazano cztery patenty RP bazujące na głównej tematyce pracy:

- **Pat.246117** pt. „Sposób wytwarzania materiału kompozytowego warstwowego magnetycznie miękkiego o podstawie izolacyjnej”;
- **Pat.245562** pt. „Kompozyt magnetycznie miękki do zastosowań na dławiki kompensacyjne”;
- **Pat.245484** pt. „Sposób wytwarzania wysokoindukcyjnego metalicznego kompozytu magnetycznie miękkiego o podwyższonej odporności na utlenianie”;
- **Pat.242686** pt. „Sposób wytwarzania kompozytu do druku 3D o wypełnieniu z proszku magnetycznie miękkiego i podstawie mieszaniny polimerów termoplastycznych”.

Przedstawiono również oświadczenia współautorów dotyczące udziałów w powstaniu wykazanych wyżej publikacji. Z oświadczeń wynika znacząca rola Doktoranta w opracowaniu koncepcji badań, przeprowadzeniu pomiarów, analizie wyników oraz redakcji tekstu.

## 2. Ocena merytoryczna rozprawy.

W badaniach nad stopami  $\text{Fe}_{86-x}\text{Cu}_x\text{B}_{14}$  ( $x = 0; 0,4; 0,55; 0,7; 1$ ) [1] przeanalizowano wpływ miedzi na parametry termodynamiczne, kinetykę krystalizacji oraz właściwości magnetyczne. Wykorzystując podejście termodynamiczne, zoptymalizowano skład chemiczny, wyznaczając minimum swobodnej energii Gibbsa tworzenia fazy amorficznej przy zawartości 0,55% at. Cu. Kinetyka krystalizacji, zbadana metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej, wykazała średnią energię aktywacji fazy  $\alpha\text{-Fe}$  w przedziale od 201,8 do 228,74 kJ/mol. Optymalizacja wyżarzania izotermicznego w zakresie 260–400 °C pozwoliła uzyskać materiały o doskonałych parametrach: niskiej stratności rdzenia (0,13–0,25 W/kg), wysokiej indukcji nasycenia (1,47–1,6 T) oraz koercji 9,71–13,1 A/m. Struktura końcowa próbek obejmowała osnowę amorficzną z wydzieleniami nanokrystalitów  $\alpha\text{-Fe}$ . Badania przenikalności zespolonej potwierdziły, że optymalne parametry osiągnięto przy 0,55% at. miedzi, co wskazuje na silną korelację między termodynamiką a właściwościami użytkowymi stopów.

W pracy [2] zbadano wpływ zastąpienia żelaza kobaltem na właściwości magnetyczne, stabilność termiczną i strukturę krystaliczną amorficznych stopów  $\text{Fe}_{85,45-x}\text{Co}_x\text{Cu}_{0,55}\text{B}_{14}$  ( $x=0;2,5;5;7,5;10$ ). Zawartość miedzi zoptymalizowano termodynamicznie, aby zminimalizować energię tworzenia fazy amorficznej. Proces powstawania fazy krystalicznej typu  $\alpha\text{-Fe}$  opisano przy użyciu różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC), dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) oraz transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM). Obróbkę cieplną rdzeni toroidalnych w próżni zoptymalizowano w zakresie 280–430°C, dążąc do uzyskania najlepszych parametrów magnetycznych, takich jak indukcja nasycenia  $B_s$  i koercja  $H_c$ . Dla optymalnie wyżarzonych próbek zmierzono zespoloną przenikalność magnetyczną w zakresie częstotliwości  $10^4\text{--}10^8$  Hz. Wyznaczono również straty mocy w rdzeniu dla wartości 1 T i 1.5 T przy 50 Hz dla próbek wyżarzanych w 310°C. Analiza obrazów TEM i dyfrakcji elektronowej potwierdziła, że wysokie parametry magnetyczne wynikają ze współistnienia faz amorficznej i nanokrystalicznej.

W kolejnej publikacji [3] przedstawiono kompleksowe badania strukturalne i magnetyczne taśm  $\text{Fe}_{85,3}\text{Cu}_{0,7}\text{B}_{14}$  modyfikowanych Co i Mo, wyżarzanych w próżni oraz powietrzu. Trzy stopy ( $\text{Fe}_{80,3}\text{Co}_5\text{Cu}_{0,7}\text{B}_{14}$ ,  $\text{Fe}_{80,3}\text{Mo}_5\text{Cu}_{0,7}\text{B}_{14}$ ,  $\text{Fe}_{75,3}\text{Co}_5\text{Mo}_5\text{Cu}_{0,7}\text{B}_{14}$ ) wytworzono w stanie amorficznym metodą melt-spinningu i scharakteryzowano technikami XRD oraz DSC. Proces wyżarzania zoptymalizowano w zakresie 280–540°C, poprawiając indukcję nasycenia, koercję i stratność rdzenia. Zmierzono przenikalność zespoloną w zakresie  $10^4\text{--}10^8$  Hz oraz straty mocy. Badania dyfrakcyjne i TEM wykazały obecność fazy nanokrystalicznej w osnowie szklistej dla stopu z Co. Wyżarzanie w powietrzu zapewniło lepsze parametry magnetyczne niż w

próżni, co wiąże się z wytworzeniem warstwy bogatej w tlen o grubości 140 nm. Wykazano, że utlenianie pozytywnie wpływa na właściwości magnetyczne. Stopy scharakteryzowano dodatkowo spektrometrią mössbauerowską  $^{57}\text{Fe}$ .

Celem pracy [4] było zbadanie izotermicznej krystalizacji, struktury oraz ewolucji właściwości magnetycznych stopu  $\text{Fe}_{80.3}\text{Co}_5\text{Cu}_{0.7}\text{B}_{14}$  poddanego długotrwałemu (do 300 h) wyżarzaniu niskotemperaturowemu (210 i 260 °C) w próżni i powietrzu. Przed krystalizacją fazy  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$ , w temperaturach do 340 °C, zidentyfikowano proces relaksacji pierwotnej. Wyżarzanie w 210 °C przez 300 h nie zapoczątkowało krystalizacji, lecz przegrupowania krótkozasięgowe znacząco poprawiły właściwości magnetyczne. Wyżarzanie przez 150 h w 260 °C umożliwiło stabilizację stanu szklistego i pełną krystalizację, co odpowiada efektom 20-minutowego wyżarzania w 310 °C. Uzyskano właściwości  $B_s=1,75\text{--}1,79\text{ T}$  oraz  $H_c<20\text{ A/m}$ . Porównanie stratności mocy do 400 kHz wykazało jednak, że długotrwałe wyżarzanie niskotemperaturowe jest energetycznie niewystarczające, by osiągnąć tak wysoką wydajność (niski poziom strat), jak klasyczny proces w 310 °C.

W kolejnej publikacji [5] zbadano wpływ niewielkich dodatków chromu na stabilność termiczną, proces krystalizacji, strukturę oraz właściwości magnetyczne, katalityczne i antykorozyjne taśm  $\text{Fe}_{86-x}\text{Cr}_x\text{B}_{14}$  ( $x=1,3,5$ ). Analiza termiczna pozwoliła wyznaczyć temperatury krystalizacji oraz średnią energię aktywacji fazy  $\alpha\text{-Fe}$ . Optymalizację właściwości magnetycznych (indukcji, koercji i stratności) przeprowadzono poprzez 20-minutowe wyżarzanie izotermiczne rdzeni w zakresie 260–420 °C. Najniższą stratność ( $P_s=0,13\text{--}0,21\text{ W/kg}$ ), przy wysokiej indukcji nasycenia, uzyskano dla próbek wyżarzanych w 320 °C, posiadających strukturę nanokompozytową. Dodatek Cr pogarsza parametry magnetyczne, ale znacząco poprawia odporność korozyjną dzięki tworzeniu warstwy pasywacyjnej. Materiały te wykazują również zdolności katalityczne, redukując błękit metylenowy o 60–80 % w ciągu godziny, co pozwala na ich podwójne zastosowanie jako materiałów magnetyczno-katalitycznych.

W pracy [6] zbadano wpływ postawiania żelaza miedzią na strukturę krystaliczną i właściwości magnetyczne szybkochłodzonych taśm  $\text{Fe}_{85-x}\text{Cu}_x\text{B}_{15}$ . Na podstawie obliczeń termodynamicznych przewidziano paraboliczną zależność energii tworzenia fazy amorficznej z minimum przy 0,6% Cu. Optymalizacja obróbki cieplnej wykazała, że najniższe straty mocy ( $P_{10/50}$ ) zapewnia stan nanokompozytowy uzyskany przez wyżarzanie w temperaturze 300–330 °C. Badania TEM ujawniły, że struktura zależy od zawartości miedzi: dla 0% Cu dominują klastry 2–3 nm, natomiast dla 1,2% Cu powstają nanoziarna o średnicy 26 nm. Wysoka liczba miejsc zarodkowania w stopie z 1,2% Cu wzmacnia oddziaływania wymienne, co skutkuje

wzrostem indukcji nasycenia do 1,7 T. Potwierdzono również możliwość stosowania wyżarzania w powietrzu dla tego typu materiałów.

Wpływ podstawiania żelaza kobaltem i miedzią na stabilność termiczną, proces krystalizacji oraz właściwości magnetyczne taśm  $\text{Fe}_{85-(x+y)}\text{Co}_x\text{Cu}_y\text{B}_{15}$  przedstawiono w publikacji [7]. Analiza termiczna wykazała zróżnicowane zmiany energii aktywacji krystalizacji fazy  $\alpha\text{-Fe}$  w zależności od zawartości miedzi i kobaltu. Optymalne warunki wyżarzania próżniowego, zapewniające minimalne straty mocy, ustalono w zakresie temperatur 300–330 °C. Zoptymalizowane stopy charakteryzują się wysoką indukcją nasycenia (1,67–1,78 T), niską koercją (14,7–26,4 A/m) oraz stratnością na poziomie 0,21–0,39 W/kg. Badania XRD i TEM potwierdziły, że najlepsze parametry magnetyczne odpowiadają strukturze nanokompozytowej, składającej się z nanokryształów  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$  rozproszonych w amorficznej osnowie, powstającej na wczesnym etapie krystalizacji. Dalszy wzrost ziaren prowadzi do pogorszenia koercji i zwiększenia strat mocy.

W pracy [8] przedstawiono badania porównawcze wpływu substytucji żelaza niobem (Nb) i molibdenem (Mo) na stabilność termiczną i właściwości magnetyczne stopu  $\text{Fe}_{79,4}\text{Co}_5\text{Cu}_{0,6}\text{B}_{15}$ . Zwiększenie zawartości Nb znacząco poprawiło stabilność termiczną materiału. Optymalizacja obróbki cieplnej (340–360 °C) pozwoliła uzyskać stan nanokrystaliczny o wysokiej indukcji nasycenia (do 1,7 T) i niskiej koercji (poniżej 10 A/m). Dla stopu z 3% Nb zaobserwowano wzrost ziarna  $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$  bez wydzielenia twardej fazy  $\text{Fe}_3\text{B}$  aż do 460 °C. W innych stopach wczesna krystalizacja  $\text{Fe}_3\text{B}$  powodowała wzrost koercji. Wykazano, że stopy z Mo wykazują niższe straty mocy w zakresie częstotliwości do 400 kHz w porównaniu do stopów z Nb. Potwierdzono również skuteczność wyżarzania w powietrzu dla optymalnych parametrów procesu.

Najważniejszymi osiągnięciami przedstawionej dysertacji są:

#### 1. Optymalizacja składu chemicznego i termodynamika:

- Rola miedzi (Cu): W stopach  $\text{Fe}_{86-x}\text{Cu}_x\text{B}_{14}$  oraz  $\text{Fe}_{85-x}\text{Cu}_x\text{B}_{15}$  wykazano, że dodatek miedzi (optimum przy 0,55–0,6% at.) minimalizuje energię swobodną Gibbsa tworzenia fazy amorficznej i zwiększa liczbę miejsc zarodkowania fazy  $\alpha\text{-Fe}$ .
- Substytucje (Co, Cr, Nb, Mo): Zastępowanie Fe kobaltem podnosi indukcję nasycenia, natomiast dodatek chromu poprawia odporność korozyjną i właściwości katalityczne kosztem parametrów magnetycznych. Niob (Nb) znacząco zwiększa stabilność termiczną, hamując wydzielenie twardej fazy  $\text{Fe}_3\text{B}$ .

## 2. Określenie warunków obróbki cieplnej:

- Wyżarzanie optymalne: Najlepsze właściwości magnetyczne uzyskiwano zazwyczaj w zakresie temperatur 300–360 °C (wyżarzanie krótkotrwałe, 20 min).
- Wyżarzanie długotrwałe: Badania stopu z Co wykazały, że wyżarzanie niskotemperaturowe (np. 150 h w 260 °C) pozwala osiągnąć wysoką indukcję, ale jest mniej efektywne energetycznie w redukcji strat mocy niż klasyczny, krótszy proces w wyższej temperaturze.

## 3. Badania Struktury i właściwości magnetycznych:

- Stan nanokompozytowy: Doskonałe właściwości miękkie magnetycznie (niska koercja, wysoka indukcja) wynikają z wytworzenia nanokryształów  $\alpha$ -Fe(Co) rozproszonych w amorficznej matrycy.
- Kluczowe parametry:
  - Indukcja nasycenia: Osiąga wysokie wartości w przedziale 1,47–1,79 T.
  - Koercja : W optymalnych stanach wynosi od 6,5 A/m do ok. 26 A/m.
  - Stratność ( $P_{10/50}$ ): Utrzymuje się na niskim poziomie 0,13–0,39 W/kg.

## 4. Zastosowania i patenty:

- Stopy z dodatkiem Cr wykazują zdolność do degradacji barwników organicznych (np. błękitu metylenowego) o 60–80%, co pozwala na ich użycie jako materiałów magnetyczno-katalitycznych.
- Wyniki badań stały się podstawą do uzyskania czterech patentów (nr 246117, 245562, 245484, 242686) dotyczących m.in. materiałów warstwowych, kompozytów do dławików oraz proszków do druku 3D.

W podsumowaniu, wysoko oceniam zarówno zakres jak i jakość przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej badań, które zawierają nie tylko aspekty poznawcze ale również aplikacyjne. Całość znacząco przewyższa wymagania ustawowe i z tego powodu zasługuje na wyróżnienie.

Korzystając z okazji proszę o wyjaśnienie następujących kwestii:

- W jaki sposób określono indukcję nasycenia, czy gęstość materiałów (niezbędna do takiej analizy) była wyznaczana doświadczalnie?
- Czy wykonano pomiary przenikalności magnetycznej dla wszystkich stopów, czy można je porównać innymi znanymi stopami miękkimi magnetycznie (np. FINEMET, NANOPERM...)?
- Jaka była motywacja wyboru czasów wygrzewania?

### 3. Uwagi końcowe i wnioski.

Podsumowując stwierdzam, że założone cele pracy doktorskiej mgr Tymona Warskiego zostały zrealizowane. Zakres pracy dobrze wpisuje się w obecny stan wiedzy i prezentuje wysoki poziom naukowy. Recenzowana praca wykazała zdolność Doktoranta do prowadzenia samodzielnej działalności naukowej i jako całość stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Autor wykazał się szeroką wiedzą z zakresu magnetyzmu i materiałów magnetycznych. Otrzymane wyniki zostały poprawnie zinterpretowane i podsumowane. Sylwetkę naukową Doktoranta dopełniają, w pozytywnym sensie, całkowity dorobek naukowy, uczestnictwo w konferencjach tematycznych oraz udział w projektach badawczych.

Wobec powyższego, stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr Tymona Warskiego pt. „Wpływ dodatków stopowych na właściwości magnetyczne, katalityczne oraz strukturę krystaliczną wysokoindukcyjnych materiałów magnetycznie miękkich na bazie żelaza” spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (t.j. Dz. U. z 2020 roku poz. 742. z późn. zm.). W konsekwencji wnioskuję do Rady Naukowej Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Ponadto, biorąc pod uwagę poziom naukowy pracy, wnioskuję o jej wyróżnienie.

Prof. Artur Chrobak

/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 (t.j. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)