

dr hab. Magdalena Laskowska
Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

Kraków, 14 stycznia 2026

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Płoszaja

zatytułowanej „Wytwarzanie, badania struktury, wpływ obróbki cieplnej na właściwości
szybkochłodzonych stopów na bazie żelaza”

wykonanej w Katedrze Fizyki Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów
Politechniki Częstochowskiej pod opieką promotora dr hab. Katarzyny Błoch prof. Politechniki
Częstochowskiej oraz promotora pomocniczego dr Simona Waltersa.

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Bartosza Płoszaja została wykonana na zlecenie Rady
Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej z dnia 01.12.2025 w oparciu o
podstawę prawną art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce
(t.j. Dz. U. z 2020 roku poz. 85 z późn. zm.).

Recenzowaną rozprawę doktorską stanowi monografia przygotowana w języku polskim.
Praca obejmuje ponad 130 stron tekstu wzbogaconego licznymi rysunkami i tabelami. Tekst pracy
prezentuje klasyczny układ z podziałem na dwie części - studia literaturowe i badania własne. W
części pierwszej autor przedstawia ogólny rys historyczny rozwoju stopów amorficznych i
nanokrystalicznych, charakterystykę stopów amorficznych, zagadnienia związane z procesami
kryształizacji, charakterystykę stopów nanokrystalicznych, metody wytwarzania stopów
amorficznych i nanokrystalicznych, wzajemną relację właściwości magnetycznych i struktury,
klasyfikację materiałów magnetycznych oraz wpływ wyselekcjonowanych pierwiastków
stopowych na zachowanie się stopu. W drugiej części pracy poświęconej badaniom własnym autor
formułuje tezy i cele pracy, a następnie omawia metodykę i wyniki badań oraz przedstawia wnioski.

W pracy przedstawiono wyniki badań dla stopów szybkochłodzonych wytworzonych przy
użyciu metody ciągłego odlewania ciekłego materiału na miedzianym wirującym walcu. Autor
pracy postawił sobie za cel wytworzenie próbek stopów o składach chemicznych:
 $Fe_{65}Co_{11}Zr_2Hf_2B_{20}$, $Fe_{65}Co_{10.75}Zr_2Hf_2B_{20}Si_{0.25}$, $Fe_{65}Co_{10.50}Zr_2Hf_2B_{20}Si_{0.50}$, $Fe_{65}Co_{10.25}Zr_2Hf_2B_{20}Si_{0.7}$,
 $Fe_{65}Co_{10}Zr_2Hf_2B_{20}Si_1$, $Fe_{65}Co_{9.75}Zr_2Hf_2B_{20}Si_{1.25}$, $Fe_{65}Co_{9.5}Zr_2Hf_2B_{20}Si_{1.5}$ w kształcie cienkich taśm

o grubości około $35 \mu\text{m}$ oraz przeanalizowanie wpływu wprowadzenia zaburzeń w strukturze magnetycznej badanych stopów na poprawę ich właściwości magnetycznych - na obniżenie wartości pola koercji oraz wzrost magnetyzacji nasycenia. W tym celu próbki poddano izotermicznemu procesowi wygrzewania jak i dokonywano podstawienia Si w miejsce Co. Przedstawione w pracy badania stanowią istotny wkład w rozwój wiedzy na temat nowoczesnych materiałów, zarówno w obszarze badań podstawowych, jak i w zakresie potencjalnych zastosowań praktycznych.

Pierwszą część pracy stanowią studia literaturowe poświęcone tematyce pracy. Ta część zawiera 8 rozdziałów podzielonych na podrozdziały. Pierwszy rozdział pracy, zatytułowany „Ogólny rys historyczny rozwoju stopów amorficznych i nanokrystalicznych”, stanowi wprowadzenie do tematyki badań poprzez omówienie chronologii kluczowych odkryć i przełomów w rozwoju stopów amorficznych i nanokrystalicznych. W drugim rozdziale zatytułowanym „Stopy amorficzne” autor przybliży czytelnikowi pojęcie stopu amorficznego wskazując na cechy charakterystyczne takich stopów jak i metody ich wytwarzania, a także dokonuje klasyfikacji stopów amorficznych ze względu na ich skład chemiczny, oraz omawia ich strukturę, właściwości mechaniczne i magnetyczne oraz stabilność termiczną. Ten rozdział zakończony jest podrozdziałem poświęconym dotychczasowym i potencjalnym zastosowaniom stopów amorficznych. W kolejnym rozdziale przeglądu literaturowego autor skupia się na zagadnieniach związanych z procesami krystalizacji. W tym rozdziale znajdują się dwa podrozdziały opisujące rodzaje krystalizacji szkieł metalicznych oraz model procesu krystalizacji. Kolejny rozdział poświęcony jest stopom nanokrystalicznym, w którym autor omawia różnice pomiędzy stopami amorficznymi i nanokrystalicznymi jak również przedstawia ich strukturę, właściwości magnetyczne oraz dotychczasowe i potencjalne zastosowania.

W rozdziale piątym zatytułowanym „Metody wytwarzania stopów amorficznych i nanokrystalicznych” omówione są kolejno metody otrzymywania stopów amorficznych a następnie nanokrystalicznych. Rozdział szósty „Wzajemna relacja właściwości magnetycznych i struktury” przedstawia metodę badania struktury materiałów amorficznych i nanokrystalicznych, opartą na analizie stanu nasycenia ferromagnetycznego. W tym rozdziale autor wyjaśnia wpływ defektów obecnych w badanym materiale na własności magnetyczne tego materiału oraz możliwość wykorzystania tego zjawiska do analizy struktury materiału. Kolejny rozdział – siódmy zatytułowany „Materiały magnetyczne” poświęcony jest klasyfikacji materiałów magnetycznych na magnetycznie miękkie i twarde. W tym rozdziale autor również przybliży czytelnikowi podstawowe pojęcia i wielkości opisujące własności magnetyczne materiałów. Ostatni rozdział przeglądu literaturowego nosi tytuł „Wpływ wyselekcjonowanych pierwiastków stopowych na zachowanie się stopu” i omawia wpływ dodatku żelaza, krzemu, boru, cyrkonu, kobaltu i hafnu na własności otrzymywanych stopów.

W drugiej części pracy zawierającej badania własne znajdują się trzy sekcje. Pierwsza zawiera tezy i cele pracy. Autor formułuje w niej następujące tezy: (I) Wykorzystując metodę szybkiego chłodzenia możliwe będzie wytworzenie klasycznych stopów amorficznych; (II) Odpowiednio zaprojektowany proces obróbki termicznej nieznacznie poniżej temperatury krystalizacji umożliwi uzyskanie stopów z zachowaniem struktury amorficznej; (III) Stopy odprężone będą charakteryzowały się lepszymi właściwościami magnetycznymi tzn. magnetycznie miękkimi; (IV) W wyniku obróbki

termicznej ewentualnie występujące ziarna nanokrystaliczne nie będą przekraczały 30 nm. Z kolei główny cel pracy autor sformułował jako wytworzenie, z zastosowaniem metody jednokierunkowego chłodzenia na miedzianym wirującym walcu, próbek stopów na bazie żelaza o wytypowanym składzie chemicznym (Fe–Co–Zr–Hf–B–Si) oraz zaprojektowanie procesu obróbki termicznej badanych stopów, prowadzącego do modyfikacji ich właściwości magnetycznych. Druga część to metodyka badań, w której zawarto opis badanych materiałów, zwięzły opis wykorzystanych metod badawczych oraz wyniki wykonanych badań wraz ich dyskusją. Wyniki badań z dyskusją stanowią najobszerniejszą część pracy. Na ponad sześćdziesięciu stronach autor przedstawił badania struktury i własności magnetycznych otrzymanych stopów odnosząc się zarówno do materiałów przed obróbką termiczną jak i po niej. W celu określenia własności strukturalnych doktorant użył kilku komplementarnych metod badawczych w tym skaningową mikroskopię elektronową (SEM), spektroskopię dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS) oraz dyfrakcję rentgenowską (XRD). Techniki te pozwoliły na wstępne potwierdzenie postawionego celu pracy. Autor wyznaczył skład chemiczny dla każdej z próbek potwierdzając tym samym uzyskanie zakładanych składów chemicznych poszczególnych próbek. Za pomocą mapowania EDS potwierdził jednorodność otrzymanych stopów i wykluczył obecność niepożądanych aglomeracji. Obrazy SEM ukazały struktury typowe dla stopów amorficznych. Ostatecznym potwierdzeniem otrzymania struktur amorficznych dla wszystkich próbek były wyniki dyfrakcji rentgenowskiej. Dyfraktogramy zawierające jedno szerokie maksimum typowe dla materiałów amorficznych zostały przez autora bardzo skrupulatnie przeanalizowane dając obraz subtelnych różnic wynikających ze składu chemicznego poszczególnych stopów. Następnie autor przedstawił analizę własności magnetycznych przygotowanych stopów. W tej części znajdują się wyniki pomiarów magnetycznej polaryzacji nasycenia w funkcji temperatury. Dokładnie omówione zostały otrzymane zależności jak i wyznaczone temperatury Curie w kontekście zmian składu chemicznego badanych próbek. Kolejnym opisanym przez doktoranta badaniem własności magnetycznych są pomiary magnetyzacji w funkcji natężenia pola magnetycznego. To badanie pozwoliło na ostateczne potwierdzenie zrealizowania celu pracy ukazując wpływ obróbki termicznej na własności magnetyczne badanych stopów. W tej części autor ukazał jak zaprojektowany izotermiczny proces wygrzewania doprowadził do znacznego zredukowania wartości pola koercji oraz wzrostu wartości magnetyzacji nasycenia dla każdego z badanych stopów w porównaniu do stopów w stanie po zestaleniu. Następnie doktorant przedstawił badania zmian magnetyzacji w pobliżu punktu nasycenia ferromagnetycznego, które wykazały, że w silnych polach magnetycznych przemagnesowanie analizowanych stopów zachodzi głównie poprzez obrót momentów magnetycznych w rejonach zlokalizowanych defektów, będących źródłem naprężeń krótkiego zasięgu. Na podstawie teorii H. Kronmüllera określono ponadto typy defektów strukturalnych mających kluczowy wpływ na proces magnesowania badanych materiałów w silnych polach magnetycznych. Ta dogłębna charakterystyka własności magnetycznych otrzymanych stopów zakończona jest analizą zjawiska anizotropii magnetycznej w badanych stopach w stanie po zestaleniu i po obróbce termicznej. Pracę zamyka rozdział poświęcony wnioskowi, mający charakter syntetycznego podsumowania uzyskanych rezultatów.

Przedstawiona do recenzji praca jest utrzymana w zwięzłym stylu naukowym z licznymi odwołaniami literaturowymi. Łącznie autor powołuje się na 215 publikacji naukowych. Tekst pracy został wzbogacony 66 rysunkami oraz 9 tabelami. Praca została zredagowana starannie, a przedstawione poniżej nieliczne niedociągnięcia edytorskie nie obniżają wartości naukowej pracy:

- na stronie 36 opis wielkości ΔJ_{intr} został oznaczony jako ΔJ_{sw} ;
- w tytule rozdziału 10.3 autor używa skrótu EDS, który mógłby zostać rozwinięty w sposób analogiczny do skrótu SEM. Jest to szczególnie istotne, ponieważ skrót EDS został pominięty w wykazie skrótów;
- na stronach 43, 52, 58, 64, 78, 81, 84, 90, 95, 99, 111 odnotowałam występowanie literówek;
- na stronie 52 punkt "Określenie struktury za pomocą techniki x-ray", zawiera nie do końca precyzyjną nazwę opisywanej techniki, poza tym zalecane byłoby używanie polskiej terminologii naukowej w pracach przygotowanych w języku polskim;
- na stronie 92 w zdaniu „Jak można zauważyć proces izotermicznego nieznacznie wpłyną na zmiany przebiegu magnetyzacji w funkcji natężenia pola magnetycznego w porównaniu do próbek w stanie po zestaleniu.” brakuje najprawdopodobniej słowa „wygrzewania”;
- w zdaniu (str. 92) „Obserwuje się nieznaczny wzrost magnetyzacji dla próbek z zawartością Si = 0; 0,25; 0,5; 0,75% at.” autor nie precyzuje czy chodzi o magnetyzację nasycenia, magnetyzację przy maksymalnym przyłożonym polu magnetycznym, czy inną wielkość. Wskazane byłoby precyzyjne określenie omawianej wielkości. Taka sama uwaga dotyczy kolejnego zdania: „Natomiast dla stopów z zawartością Si na poziomie 1% i 1,25% at. wystąpił spadek magnetyzacji w porównaniu do materiału wyjściowego, po czym dla próbki z największą zawartością Si obserwowano wzrost magnetyzacji.”;
- w tabelach 4, 5, 6, 8 i 9 autor nie podał jednostek prezentowanych wielkości;
- na rysunku 62 przedstawiającym mapę gradientową opisującą pole koercji w funkcji zawartości Si i kąta pomiaru dwukrotnie wpisano 45° , podczas gdy w drugim przypadku powinno być 90° .

Poniżej przedstawiam kilka uwag prosząc doktoranta o ich skomentowanie:

1. W rozdziale 10.1. zatytułowanym „Badania struktury wytworzonych stopów w stanie po zestaleniu przy użyciu dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego (XRD)” zawarta jest dokładna analiza amorficznej struktury próbek z uwzględnieniem obu stron otrzymanej taśmy. W tym rozdziale analiza skupiona jest głównie na różnicach dwóch stron próbek w postaci taśm, natomiast wpływ zawartości krzemu w poszczególnych próbkach został pominięty. Chciałabym prosić doktoranta o doprecyzowanie wpływu dodatku krzemu na strukturę amorficzną otrzymanych stopów oraz przeprowadzenie analizy wpływu ilości krzemu na własności strukturalne badanych próbek.
2. W rozdziale 10.2 zatytułowanym „Analiza struktury stopów w stanie po procesie wygrzewania izotermicznego w temperaturze 720K przez 30 min przy użyciu dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego (XRD)” doktorant krótko opisał proces izotermicznego

wygrzewania podając czas trwania procesu, temperaturę oraz warunki chłodzenia. W tym miejscu zasadne wydaje się pytanie, na jakiej podstawie doktorant wybrał przedstawione parametry. Czy proces ten był przez doktoranta optymalizowany? Czy doktorant prowadził obserwacje dotyczące wpływu szybkości chłodzenia po procesie wygrzewania na właściwości omawianych stopów? Biorąc pod uwagę fakt, że jednym z celów pracy było zaprojektowanie procesu obróbki termicznej badanych stopów, prowadzącego do modyfikacji ich właściwości magnetycznych, zasadne wydaje się poświęcenie większej uwagi projektowanemu procesowi obróbki termicznej.

3. Wnioski kończące pracę w sposób zwięzły i klarowny podsumowują realizację celu pracy. Jednak, z uwagi na duży potencjał aplikacyjny omawianych materiałów, warto rozważyć uzupełnienie wniosków o porównanie otrzymanych stopów z wybranymi, powszechnie stosowanymi stopami amorficznymi lub innymi materiałami referencyjnymi dobrze opisanymi w literaturze. Takie zestawienie pozwoliłoby lepiej ocenić uzyskane rezultaty.

Pomimo wymienionych wyżej uwag, moja opinia o rozprawie jest pozytywna. Przedstawiona do recenzji praca potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną doktoranta i jego zdolność do prowadzenia samodzielnych badań naukowych w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Ponadto recenzowana rozprawa doktorska zawiera wymagane elementy nowości naukowej potwierdzone wynikami naukowymi wchodzącymi w skład tej rozprawy stanowiąc oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2020 roku poz. 85 z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie pana mgr inż. Bartosza Płoszaja do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Magdalena Leskońska