Prof. dr hab. inż. Jarosław Mizera

Wydział Inżynierii Materiałowej

Politechnika Warszawska

Warszawa, 2 listopada 2026 r.

Recenzja pracy doktorskiej

mgr. inż. Alirezy Kalhora

pod tytułem:

„Cu-Mg Based Alloys with Strength, Ductility, and High Conductivity Achieved by SPD Technique"

(Stopy na osnowie Cu-Mg o wysokiej wytrzymałości, plastyczności i przewodności elektrycznej uzyskanych z zastosowaniem technik intensywnego odkształcenia plastycznego)

przygotowanej pod kierunkiem:

prof. dr hab. inż. Kingi Rodak

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej.

Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (z późn. zm.).

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

1) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Uwagi ogólne

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Alirezy Kalhora powstała pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Kingi Rodak na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Cyfryzacji Przemysłu Politechniki Śląskiej. Praca dotyczy zagadnień związanych z projektowaniem mikrostruktury oraz kształtowaniem właściwości mechanicznych i elektrycznych stopów miedzi z magnezem, z wykorzystaniem różnych metod odkształcenia plastycznego, w tym technik intensywnego odkształcenia plastycznego.

Rozwój współczesnych technologii, w szczególności w obszarze elektrotechniki, elektroniki oraz systemów przesyłania energii elektrycznej, stawia coraz większe wymagania materiałom przewodzącym prąd elektryczny. Oprócz wysokiej przewodności elektrycznej materiały te powinny charakteryzować się odpowiednio dużą wytrzymałością mechaniczną, odpornością na odkształcenia trwałe oraz korzystnymi właściwościami plastycznymi, umożliwiającymi ich przetwarzanie i eksploatację w złożonych warunkach obciążeń.

Podstawowym problemem materiałowym jest występowanie przeciwstawnych zależności pomiędzy mechanizmami umocnienia a przewodnością elektryczną. Opracowanie materiałów łączących wysoką wytrzymałość z dobrą plastycznością i wysoką przewodnością elektryczną wymaga odpowiedniego doboru składu chemicznego oraz precyzyjnego sterowania procesami kształtowania mikrostruktury.

W grupie materiałów o takich właściwościach istotne miejsce zajmują stopy Cu-Mg, w których magnez stanowi pierwiastek umacniający miedź, przede wszystkim poprzez mechanizm umocnienia roztworowego. Dalsza poprawa właściwości tych stopów może być uzyskana poprzez zastosowanie odpowiednio dobranych dodatków stopowych oraz procesów odkształcenia plastycznego. Szczególnie interesujące możliwości stwarzają techniki intensywnego odkształcenia plastycznego, pozwalające na istotne rozdrobnienie mikrostruktury, zwiększenie gęstości dyslokacji oraz wytworzenie struktury ultradrobnoziarnistej.

Jednakże intensywne odkształcenie plastyczne prowadzi również do zmian stanu zdefektowania materiału, które mogą powodować pogorszenie jego przewodności elektrycznej oraz ograniczenie zdolności do dalszego odkształcenia plastycznego. Z tego względu szczególnego znaczenia nabiera poszukiwanie takich kombinacji składu chemicznego, obróbki cieplnej i parametrów odkształcenia, które pozwolą na uzyskanie

korzystnego kompromisu pomiędzy wytrzymałością, plastycznością i przewodnością elektryczną.

W ten nurt badań wpisuje się recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Alirezy Kalhora. Doktorant podjął próbę kompleksowego określenia wpływu składu chemicznego, obróbki cieplnej oraz różnych metod odkształcenia plastycznego na ewolucję mikrostruktury, właściwości mechaniczne i przewodność elektryczną stopów na osnowie Cu-Mg.

Ważnym elementem rozprawy jest również rozszerzenie badań na kompozyt Cu/Mg o obniżonej gęstości, w których wykorzystano odmienną koncepcję projektowania materiału, polegającą na połączeniu przewodzącej osnowy miedzianej z ciągłymi włóknami magnazowymi. Takie rozwiązanie pozwala rozpatrywać możliwość ograniczenia masy materiału przy zachowaniu korzystnych właściwości mechanicznych i elektrycznych.

Przyjęta przez Doktoranta koncepcja badawcza obejmuje trzy wzajemnie uzupełniające się kierunki: modyfikację składu chemicznego stopu na osnowie Cu-Mg i zastosowanie intensywnego odkształcenia plastycznego, łączenie różnych metod odkształcenia oraz opracowanie kompozytu Cu/Mg o obniżonej gęstości.

Tak zaplanowany program badawczy umożliwił powiązanie zmian mikrostruktury i mechanizmów umocnienia z właściwościami mechanicznymi oraz przewodnością elektryczną analizowanych materiałów.

Moim zdaniem recenzowana rozprawa dotyczy aktualnego i ważnego problemu naukowego, dobrze osadzonego w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Szczególnie wartościowe jest podjęcie próby jednoczesnego kształtowania trzech właściwości materiałowych, które często pozostają ze sobą w sprzeczności, tj. wytrzymałości mechanicznej, plastyczności oraz przewodności elektrycznej.

Podjęty przez Doktoranta problem ma zarówno istotne znaczenie poznawcze, związane z wyjaśnieniem mechanizmów kształtowania mikrostruktury i właściwości stopów Cu-Mg, jak również potencjalne znaczenie aplikacyjne w projektowaniu nowoczesnych materiałów przewodzących prąd elektryczny, przeznaczonych do pracy w warunkach podwyższonych obciążeń mechanicznych.

Uważam, że wybór tematyki badawczej jest trafny, a przyjęta koncepcja badań stanowi interesujące podejście do poszukiwania nowych rozwiązań materiałowych, pozwalających na uzyskanie korzystnej kombinacji właściwości mechanicznych i elektrycznych stopów miedzi.

Uwagi redakcyjne

Recenzowana rozprawa doktorska napisana jest poprawnym językiem. Jest kompletna, logicznie ułożone i obejmuje sześć głównych rozdziałów: *Introduction, Literature Review, This Investigation, Discussion and Analysis of Research Findings, Future Outlook and Opportunities* oraz *Summary and Conclusions*. Uzupełnieniem pracy są spis literatury, wykazy rysunków i tabel, streszczenia w języku angielskim i polskim oraz wykaz publikacji Doktoranta.

W pierwszym rozdziale Doktorant przedstawił znaczenie stopów miedzi o wysokiej wytrzymałości i przewodności elektrycznej oraz uzasadnił wybór tematyki badawczej. W obszernym przeglądzie literatury omówił charakterystykę stopów Cu-Mg i Cu-Mg-Ca, mechanizmy ich umocnienia oraz możliwości kształtowania mikrostruktury z wykorzystaniem technik intensywnego odkształcenia plastycznego.

Zasadniczą część rozprawy stanowi rozdział trzeci, w którym Doktorant przedstawił metodykę, wyniki badań oraz ich analizę. Rozdział ten podzielił na trzy części odpowiadające przyjętym kierunkom badawczym. Pierwsza dotyczy wpływu dodatku wapnia, obróbki cieplnej i odkształcenia metodą MaxStrain na mikrostrukturę i właściwości stopów Cu-Mg. W drugiej przeanalizowano efekty łączenia różnych metod odkształcenia plastycznego, w tym wyciskania konwencjonalnego, KoBo i MaxStrain. Natomiast trzecia część została poświęcona wytwarzaniu i charakterystyce kompozytu Cu/Mg o obniżonej gęstości i wysokiej przewodności elektrycznej.

W kolejnych rozdziałach Doktorant przeprowadził zbiorczą dyskusję uzyskanych wyników, wskazał perspektywy dalszych badań oraz sformułował podsumowanie i wnioski końcowe.

Przyjęty układ rozprawy uważam za poprawny i przejrzysty. Praca jest bogato ilustrowana wynikami badań mikrostrukturalnych, wykresami i tabelami.

Podsumowując, rozprawa została przygotowana starannie, a sposób prezentacji wyników jest przejrzysty i odpowiada wymaganiom stawianym opracowaniom naukowym w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Cel i zakres pracy

Doktorant przyjął jako główny cel pracy opracowanie stopów na osnowie Cu-Mg o wysokiej wytrzymałości, korzystnej plastyczności i dobrej przewodności elektrycznej poprzez odpowiedni dobór składu chemicznego, obróbki cieplnej oraz zastosowanie technik intensywnego odkształcenia plastycznego.

W rozprawie nie sformułowano hipotezy badawczej. Doktorant przyjął natomiast trzy kierunki (podejścia) badawcze, określone jako *Approaches*, służące realizacji głównego celu pracy.

Pierwsze podejście (*Approach 1*) dotyczyło określenia wpływu dodatku wapnia, obróbki cieplnej oraz intensywnego odkształcenia plastycznego metodą MaxStrain na mikrostrukturę, właściwości mechaniczne i przewodność elektryczną stopów Cu-Mg i Cu-Mg-Ca.

Drugie podejście (*Approach 2*) obejmowało analizę wpływu łączenia różnych metod odkształcenia plastycznego, w tym wyciskania konwencjonalnego, wyciskania metodą KoBo oraz odkształcenia MaxStrain, na mikrostrukturę i właściwości stopu Cu-0,7%Mg.

Trzecie podejście (*Approach 3*) polegało na opracowaniu kompozytu Cu/Mg o obniżonej gęstości i wysokiej przewodności elektrycznej, wytwarzanego metodą KoBo, oraz określeniu jego mikrostruktury i właściwości mechanicznych oraz elektrycznych.

Moim zdaniem Doktorant prawidłowo zidentyfikował istotny problem badawczy i zaplanował interesujący program badań. Przyjęcie trzech podejść badawczych pozwoliło na rozpatrzenie różnych możliwości kształtowania właściwości materiałów na osnowie miedzi i magnezu. Dwa pierwsze kierunki koncentrują się na modyfikacji mikrostruktury stopów Cu-Mg, natomiast trzeci stanowi rozszerzenie koncepcji badawczej na materiały kompozytowe.

Realizacja przyjętych kierunków badawczych wymagała przeprowadzenia szerokiego zakresu badań obejmujących wytwarzanie materiałów, obróbkę cieplną i plastyczną, charakterystykę mikrostruktury z wykorzystaniem metod SEM, EBSD i TEM, badania właściwości mechanicznych oraz pomiary przewodności elektrycznej. Uzupełnieniem eksperymentów były analizy numeryczne procesów odkształcenia.

Uważam, że zaplanowany program badań jest spójny z głównym celem rozprawy i umożliwił kompleksową analizę zależności pomiędzy składem chemicznym, technologią wytwarzania, mikrostrukturą oraz właściwościami mechanicznymi i elektrycznymi badanych materiałów.

Podsumowując stwierdzam, że cel i zakres opiniowanej pracy są prawidłowo określone i w pełni odpowiadają wymaganiom stawianym badaniom będącym przedmiotem rozpraw doktorskich w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Ocena rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Alirezy Kalhora dotyczy aktualnego i istotnego problemu naukowego związanego z kształtowaniem mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych i elektrycznych stopów miedzi. Podstawowym wyzwaniem w projektowaniu tej grupy materiałów jest uzyskanie wysokiej wytrzymałości mechanicznej przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej plastyczności i wysokiej przewodności elektrycznej. Zagadnienie to ma istotne znaczenie zarówno poznawcze, jak i aplikacyjne, szczególnie w kontekście rosnącego zapotrzebowania na nowoczesne materiały przewodzące prąd elektryczny.

Doktorant prawidłowo zidentyfikował problem badawczy i zaproponował trzy podejścia eksperymentalne, pozwalające na analizę różnych sposobów kształtowania właściwości materiałów na osnowie Cu-Mg.

Pierwszy kierunek badawczy dotyczył wpływu dodatku wapnia, obróbki cieplnej oraz intensywnego odkształcenia plastycznego metodą MaxStrain na mikrostrukturę i właściwości stopów Cu-Mg.

Wartościowym rezultatem tych badań jest wykazanie, że dodatek 0,1% mas. Ca do stopu Cu-0,7%Mg prowadzi do powstawania cząstek fazy międzymetalicznej Cu_5Ca oraz rozdrobnienia struktury odlewniczej. Obecność tej fazy przyczyniła się do znacznego (33%) wzrostu twardości oraz granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie o ponad 10% w porównaniu ze stopem dwuskładnikowym. Jednocześnie zaobserwowano zmniejszenie wydłużenia i przewodności elektrycznej o kilkanaście procent.

Wyniki te potwierdzają istotną rolę wydzieleń faz wtórnych w umacnianiu stopów Cu-Mg, wskazując jednocześnie na ograniczenia wynikające z pogorszenia plastyczności i przewodności elektrycznej.

Na uwagę zasługuje również analiza wpływu obróbki cieplnej na mikrostrukturę i właściwości badanych stopów. Doktorant wykazał, że odpowiednio dobrane parametry wyżarzania i chłodzenia wpływają na rozmieszczenie atomów magnezu w osnowie oraz morfologię cząstek fazy Cu_5Ca, co umożliwia modyfikację właściwości mechanicznych materiału.

Istotnym elementem tej części pracy jest zastosowanie intensywnego odkształcenia plastycznego metodą MaxStrain. Przeprowadzone badania wykazały znaczne rozdrobnienie mikrostruktury oraz zwiększenie udziału granic szerokokątowych, szczególnie w stopie trójskładnikowym Cu-Mg-Ca. Doktorant powiązał te zmiany z procesami ciągłej rekrystalizacji dynamicznej oraz oddziaływaniem cząstek fazy międzymetalicznej z przemieszczającymi się dyslokacjami.

Drugi kierunek badawczy dotyczył wpływu łączenia różnych metod odkształcenia plastycznego na mikrostrukturę oraz właściwości stopu Cu-0,7%Mg.

Za szczególnie wartościowe uważam wykazanie, że zastosowanie wyciskania konwencjonalnego lub metodą KoBo przed odkształceniem MaxStrain pozwala na uzyskanie znacznie większego rozdrobnienia mikrostruktury niż w przypadku zastosowania wyłącznie procesu MaxStrain.

W zależności od przyjętej sekwencji odkształcenia uzyskano znaczne zmniejszenie wielkości ziaren w porównaniu z materiałem poddanym jedynie odkształceniu MaxStrain. Efektem tych zmian był znaczny wzrost właściwości wytrzymałościowych. Granica plastyczności zwiększyła się około trzykrotnie, natomiast wytrzymałość na rozciąganie przeszło dwukrotnie w stosunku do materiału w stanie wyżarzonym.

Wyniki te jednoznacznie wskazują na dużą skuteczność łączenia różnych metod odkształcenia plastycznego w kształtowaniu mikrostruktury i właściwości mechanicznych stopów Cu-Mg.

Szczególnie interesująca jest analiza mechanizmów odpowiedzialnych za uzyskane umocnienie. Doktorant wykazał, że wzrost wytrzymałości wynika z nakładania się efektów umocnienia odkształceniowego, rozdrobnienia ziaren oraz zmian charakteru granic ziaren związanych z procesami rekrystalizacji dynamicznej.

Ważnym rezultatem badań jest również stwierdzenie, że pomimo znacznego wzrostu wytrzymałości mechanicznej, przewodność elektryczna badanych stopów utrzymywała się na stosunkowo wysokim poziomie.

Oznacza to, że zastosowanie intensywnego odkształcenia plastycznego pozwala na znaczną poprawę właściwości mechanicznych przy relatywnie ograniczonym pogorszeniu przewodności elektrycznej.

Moim zdaniem jest to jeden z najważniejszych rezultatów poznawczych rozprawy, wskazujący na możliwość skutecznego kształtowania korzystnej kombinacji właściwości mechanicznych i elektrycznych poprzez odpowiedni dobór sekwencji procesów odkształcenia plastycznego.

Trzeci kierunek badawczy dotyczył opracowania kompozytu Cu/Mg o obniżonej gęstości i wysokiej przewodności elektrycznej.

W tej części pracy Doktorant zastosował odmienną koncepcję materiałową, polegającą na połączeniu osnowy z czystej miedzi z ciągłymi włóknami magnezowymi. Do wytworzenia kompozytu wykorzystał metodę wyciskania KoBo.

Za wartościowy rezultat tej części badań uważam wykazanie możliwości uzyskania materiału kompozytowego o ciągłej strukturze włókien magnezowych, zachowujących swoją ciągłości podczas intensywnego odkształcenia plastycznego. Badania mikrostrukturalne wykazały również znaczne rozdrobnienie ziaren magnezu, których średnia wielkość wynosiła około 0,3 μm. Uzyskany kompozyt charakteryzował się obniżoną gęstości w stosunku do miedzi przy zachowaniu przewodności elektrycznej zbliżonej do przewodności czystej miedzi.

Ten kierunek badań oceniam pozytywnie, szczególnie w aspekcie możliwości opracowania lekkich materiałów przewodzących prąd elektryczny. Należy jednak zauważyć, że uzyskane wyniki stanowią przede wszystkim potwierdzenie możliwości technologicznego wytworzenia takiego kompozytu. Pełna ocena jego przydatności aplikacyjnej wymagałaby, moim zdaniem, dalszych badań - między innymi właściwości mechanicznych w różnych stanach obciążenia, trwałości połączenia międzyfazowego oraz stabilności strukturalnej podczas eksploatacji.

Należy podkreślić kompleksowy charakter przeprowadzonych przez Doktoranta badań, w których wykorzystał zaawansowane techniki charakteryzacji mikrostruktury, takie jak EBSD i TEM, oraz powiązał uzyskane wyniki z mechanizmami umocnienia i przewodnictwa elektrycznego. Świadczy to o Jego dobrej znajomości zagadnień z zakresu metaloznawstwa, przeróbki plastycznej oraz fizycznych podstaw właściwości materiałów metalicznych.

W mojej ocenie najważniejszą wartością poznawczą rozprawy jest wykazanie wpływu różnych schematów intensywnego odkształcenia plastycznego na ewolucję mikrostruktury stopów Cu-Mg oraz określenie zależności pomiędzy rozdrobnieniem ziaren, mechanizmami umocnienia i przewodnością elektryczną.

Wartość aplikacyjna uzyskanych wyników związana jest przede wszystkim z możliwością opracowania stopów miedzi o podwyższonej wytrzymałości mechanicznej i dobrej przewodności elektrycznej, a także materiałów kompozytowych o obniżonej gęstości.

Przedstawione w rozprawie wyniki badań wskazują, że Doktorant potrafi prawidłowo planować i realizować eksperymenty naukowe, dobierać odpowiednie metody badawcze oraz interpretować uzyskane rezultaty w oparciu o aktualną wiedzę z zakresu inżynierii materiałowej.

Podsumowując stwierdzam, że mgr inż. Alireza Kalhor zrealizował szeroki i ambitny program badań, uzyskując wartościowe wyniki o charakterze poznawczym i potencjalnie aplikacyjnym. Przeprowadzone badania wnoszą nową wiedzę w zakresie możliwości kształtowania mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych i elektrycznych stopów Cu-Mg i kompozytów Cu/Mg.

Moim zdaniem recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego projektowania materiałów na osnowie miedzi o korzystnej kombinacji wytrzymałości mechanicznej, plastyczności i przewodności elektrycznej. Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą teoretyczną w dyscyplinie inżynieria materiałowa oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Uwagi

1. Doktorant przeanalizował kilka wariantów technologicznych obejmujących modyfikację składu chemicznego, obróbkę cieplną oraz różne sekwencje odkształcenia plastycznego stopów Cu-Mg.
   Czy na podstawie przeprowadzonych badań i sformułowanych wniosków możliwe jest jednoznaczne wskazanie najbardziej korzystnej technologii wytwarzania stopów Cu-Mg o wysokiej wytrzymałości i przewodności elektrycznej?

   Który z analizowanych wariantów technologicznych Doktorant uznałby za optymalny?

2. Biorąc pod uwagę aspekt technologiczny proponowanych metod wytwarzania stopów Cu-Mg nasuwa się pytanie, czy korzyści wynikające z poprawy właściwości materiałowych uzasadniają zwiększenie liczby operacji technologicznych i kosztów produkcji.
   Czy możliwe jest uzyskanie porównywalnych właściwości przy zastosowaniu prostszych, bardziej dostępnych przemysłowo metod przeróbki plastycznej?

   Które z badanych metod mają, zdaniem Doktoranta, największe szanse na praktyczne wykorzystanie w warunkach przemysłowych?

3. Wyniki badań wykazały, że dodatek 0,1% mas. Ca do stopu Cu-0,7%Mg prowadzi do rozdrobnienia mikrostruktury i powstawania cząstek fazy Cu_5Ca, przyczyniających się do wzrostu wytrzymałości. Jednocześnie obserwuje się pogorszenie plastyczności i przewodności elektrycznej.
   Badania przeprowadzono dla jednej zawartości Ca, dlatego interesujące byłoby, moim zdaniem, wskazanie możliwości dalszej optymalizacji składu chemicznego.
   Czy możliwe jest określenie optymalnej zawartości tego pierwiastka, a także takie sterowanie morfologią i rozmieszczeniem fazy Cu_5Ca, aby uzyskać większy efekt umocnienia przy ograniczeniu niekorzystnego wpływu na przewodność elektryczną?

4. Jak Doktorant ocenia stabilność uzyskanych właściwości mechanicznych i elektrycznych podczas długotrwałej eksploatacji, szczególnie w warunkach podwyższonej temperatury? Czy procesy zdrowienia i rekrystalizacji (mogące zachodzić podczas eksploatacji stopu) nie będą prowadziły do stopniowej utraty efektu umocnienia?
5. Jak Doktorant ocenia perspektywy aplikacyjne opracowanego kompozytu Cu/Mg? Czy uzyskane zmniejszenie gęstości przy zachowaniu wysokiej przewodności elektrycznej jest wystarczającą korzyścią, aby uzasadnić zastosowanie takiego rozwiązania zamiast konwencjonalnych przewodników miedzianych lub stopów Cu-Mg? Jakie zastosowania przemysłowe Doktorant uznałby za najbardziej perspektywiczne?
6. W jakim kierunku, zdaniem Doktoranta, powinny zmierzać dalsze badania materiałowe i technologiczne, aby uzyskać jeszcze korzystniejszą kombinację właściwości HSHC w stopach Cu-Mg?
   Czy większy potencjał rozwojowy wiąże się z dalszą optymalizacją ich składu chemicznego i dodatków stopowych czy też z procesem technologicznym ich wytwarzania?

3. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Alirezy Kalhora pt. *„Cu-Mg Based Alloys with Strength, Ductility, and High Conductivity Achieved by SPD Technique"* stanowi wartościowe i oryginalne opracowanie naukowe dotyczące kształtowania mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych i elektrycznych stopów miedzi i kompozytów Cu/Mg.

Analiza rozprawy potwierdza, że Doktorant posiada rozległą wiedzę w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Świadczy o tym opracowany szeroki i krytyczny przegląd literatury oraz dokonana szczegółowa dyskusja otrzymanych wyników badań w oparciu o aktualny stan wiedzy w obszarze obejmującym doktorat.

Doktorant potwierdził również umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Prawidłowo zidentyfikował problem badawczy, zaplanował i zrealizował szeroki program badań eksperymentalnych, wykorzystując nowoczesne metody charakteryzacji mikrostruktury i właściwości materiałów. Wykazał się umiejętnością dogłębnej analizy uzyskanych wyników, ich interpretacji oraz formułowania wniosków naukowych.

Uzyskane wyniki stanowią wartościowy wkład w rozwój wiedzy z zakresu inżynierii materiałowej, a ich potencjalne zastosowanie w projektowaniu nowoczesnych materiałów przewodzących prąd elektryczny nadaje rozprawie również istotne znaczenie aplikacyjne.

Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska mgr. inż. Alirezy Kalhora spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.). W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Alirezy Kalhora do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę wysoki poziom naukowy rozprawy, oryginalność uzyskanych wyników, szeroki i kompleksowy zakres przeprowadzonych badań oraz ich znaczenie poznawcze i aplikacyjne, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Alirezy Kalhora.

W mojej ocenie szczególnym uzasadnieniem wniosku o wyróżnienie jest wykazanie skuteczności łączenia różnych metod intensywnego odkształcenia plastycznego w uzyskiwaniu korzystnej kombinacji właściwości mechanicznych i elektrycznych stopów Cu-Mg, co stanowi istotne osiągnięcie naukowe w obszarze projektowania nowoczesnych materiałów konstrukcyjno-funkcjonalnych.

Podpisał: prof. dr hab. inż. Jarosław Mizera