Prof. dr hab. Tomasz Goryczka
Instytut Inżynierii Materiałowej
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych
Uniwersytet Śląski w Katowicach
Ul. 75 Pułku Piechoty 1A, 41-500 Chorzów

3.11.2026 r., Katowice

.....

Recenzja pracy doktorskiej

pod tytułem: "Cu-Mg based alloys with strength, ductility, and high conductivity achieved by SPD technique" autorstwa Alireza Kalhor, M.Sc. Eng, przygotowanej pod kierunkiem: Prof. dr hab. inż. Kinga Rodak.

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej, na podstawie uchwały Rady z dnia 22 września 2026 r., przekazanej pismem Przewodniczącego Rady – prof. dr. hab. inż. Adama Grajcara z dnia 23.09.2026 r. (RDMIMa.512.5.2026.RM).

Podstawę prawną opracowania recenzji stanowił art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571).

2. Charakterystyka i opis rozprawy

2.1. Ocena aktualności tematyki, stanu zagadnienia oraz zakresu pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy badań nad stopami na bazie Cu-Mg o podwyższonej wytrzymałości, dobrej plastyczności i wysokiej przewodności elektrycznej, otrzymywanymi z wykorzystaniem różnych procesów intensywnego odkształcenia plastycznego. Autor rozprawy zajął się oceną wpływu dodatku Ca, obróbki cieplnej oraz różnych metod przeróbki plastycznej na ewolucję mikrostruktury, właściwości mechaniczne i przewodność elektryczną badanych stopów. Ponadto podjął próbę poszerzenia zakresu badań o wytworzenie kompozytu Cu/Mg o obniżonej gęstości.

Pomimo faktu, że miedz i jej stopy są materiałami znanymi i wykorzystywanymi przez człowieka od tysięcy lat, ich rozwój trwa nadal i postępuje wraz z rozwojem metod badawczych i technologicznych oraz rosnącymi wymaganiami stawianymi materiałom. Początkowo obejmował on głównie zmianę składu chemicznego poprzez wprowadzanie kolejnych pierwiastków stopowych. Z czasem coraz większego znaczenia nabierały również sposoby przetwarzania, pozwalające na kształtowanie struktury i mikrostruktury, a tym

samym na dalszą zmianę właściwości końcowych materiału. Jest to więc proces ciągłego doskonalenia i dostosowywania właściwości materiału do wymagań wynikających z jego zastosowania, co stanowi jeden z podstawowych kierunków rozwoju inżynierii materiałowej. Autor rozprawy wykorzystał obie te drogi: zarówno ingerencję w skład chemiczny, jak i kształtowanie struktury w kolejnych etapach procesu technologicznego. W obszernym przeglądzie literatury, obejmującym 286 pozycji, oprócz omówienia wpływu składu chemicznego stopów na bazie Cu przedstawił również metody pozwalające na kształtowanie mikrostruktury i uruchamianie mechanizmów umocnienia poprzez odkształcenie plastyczne, ze szczególnym uwzględnieniem metod SPD, takich jak ECAP, MaxStrain oraz KoBo. Tak szeroki przegląd literatury pozwolił przedstawić aktualny stan wiedzy i stanowi solidne uzasadnienie podjętego kierunku badań. Pozostałe pozycje z liczącej łącznie 395 pozycji bibliografii zostały wykorzystane w części poświęconej badaniom własnym i dyskusji uzyskanych wyników. ***Moim zdaniem dobór literatury jest właściwy i w pełni odpowiada zakresowi tematycznemu rozprawy.***

W podsumowaniu tej części recenzji stwierdzam, że tematyka rozprawy jest aktualna i wpisuje się w obecny kierunek badań nad opracowaniem stopów miedzi o podwyższonych właściwościach mechanicznych, przy jednoczesnym zachowaniu dobrej przewodności elektrycznej. Ponadto, na podstawie przedstawionego, szczegółowego opracowania stanu zagadnienia stwierdzam, że Autor rozprawy dysponuje odpowiednią ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu dyscypliny inżynieria materiałowa. W szczególności wykazał pogłębioną wiedzę w zakresie zależności pomiędzy składem chemicznym, strukturą i właściwościami stopów miedzi. Dotyczy to także metod kształtowania ich mikrostruktury i właściwości końcowych. ***W mojej ocenie poziom tej wiedzy odpowiada wymaganiom stawianym osobie ubiegającej się o nadanie stopnia doktora.***

2.2. Ocena strony redakcyjnej oraz formalnej rozprawy

Rozprawa została przygotowana w sposób staranny, a jej układ jest przejrzysty i w ogólnym zarysie zbliżony do klasycznej konstrukcji pracy doktorskiej. Po części wprowadzającej i przeglądzie literatury Autor przechodzi do prezentacji badań własnych. Część tę podzielił na trzy odrębne podejścia badawcze. W pierwszym analizuje wpływ dodatku Ca, obróbki cieplnej oraz odkształcenia na właściwości stopów Cu-Mg i Cu-Mg-Ca. W drugim koncentruje się na stopie dwuskładnikowym Cu-Mg poddanym różnym sposobom odkształcenia. Trzecie podejście dotyczy wytworzenia i charakterystyki kompozytu Cu/Mg. Dla każdego z nich przedstawiono metodykę badań, uzyskane wyniki, ich dyskusję oraz odrębne wnioski. Dodatkowo, po zakończeniu tej części Autor zamieścił rozdział zawierający szerszą dyskusję uzyskanych wyników, wskazał dalsze kierunki badań, a całość zakończył podsumowaniem i wnioskami. Zatem przyjęty sposób podziału części badawczej ułatwia śledzenie kolejnych etapów pracy. Jednakże pewne zastrzeżenia można mieć do konstrukcji części literaturowej. Zagadnienia dotyczące stopów Cu-Mg zostały omówione w początkowej części przeglądu, następnie Autor przechodzi do mechanizmów umocnienia i metod odkształcenia, po czym ponownie wraca do stopów Cu-Mg i Cu-Mg-Ca w części poświęconej

wcześniejszym badaniom. Bardziej zwarte przedstawienie zagadnień bezpośrednio związanych z materiałami będącymi przedmiotem rozprawy poprawiłoby czytelność tej części.

Nieco mniej jednoznacznie przedstawiono w rozprawie jej cel główny. Nie został on wydzielony w odrębnym miejscu przed rozpoczęciem prezentacji badań własnych, choć można go odtworzyć na podstawie zakresu pracy oraz celów formułowanych dla poszczególnych podejść badawczych. Najbardziej klarowne sformułowanie nadrzędnego celu całej rozprawy pojawia się dopiero w rozdziale poświęconym dyskusji wyników. Autor nie formułuje również wprost tezy ani hipotezy badawczej. Z punktu widzenia układu rozprawy korzystne byłoby wydzielenie celu głównego i celów szczegółowych oraz sformułowanie tezy, hipotezy lub przynajmniej jednoznaczne wskazanie problemu badawczego, do którego można następnie odnieść uzyskane wyniki i końcowe wnioski.

Pewnego uporządkowania wymagałaby również rozdział dotyczący wniosków. Każde z trzech podejść badawczych kończy się odrębnym zestawem wniosków. Następnie, po rozdziale zawierającym wspólną dyskusję wyników, Autor ponownie przedstawia rozbudowany zestaw 17 wniosków końcowych. Wiele z nich stanowi powtórzenie lub rozwinięcie wniosków sformułowanych wcześniej dla poszczególnych etapów badań. Przyjęte rozwiązanie jest czytelne, jednak prowadzi do niepotrzebnego powtarzania tych samych stwierdzeń. Wnioski końcowe mogłyby zostać ograniczone do najważniejszych rezultatów całej rozprawy, ze szczególnym wskazaniem osiągnięć wynikających z łącznej analizy trzech przeprowadzonych podejść badawczych.

Rozprawa została napisana w języku angielskim. Zastosowany język pracy jest poprawny i komunikatywny, a tekst zrozumiały. Autor właściwie posługuje się terminologią z zakresu inżynierii materiałowej. Na bardzo wysokim poziomie została również przygotowana strona edycyjna i graficzna rozprawy. Rysunki są czytelne, właściwie opisane i ponumerowane. Numeracja 73 rysunków jest ciągła. Podobnie uporządkowano 6 tabel oraz 10 zamieszczonych w rozprawie wzorów. Wszystkie rysunki i tabele zostały przywołane w tekście. Na wysoką ocenę zasługuje również sposób przygotowania map mikrostruktury, wykresów i schematów, które ułatwiają analizę przedstawionych wyników. Pomimo znacznej objętości rozprawy sposób prezentacji materiału pozwala na sprawne śledzenie kolejnych etapów badań.

Przy ogólnie bardzo wysokiej ocenie strony edycyjnej należy wskazać kilka drobnych uchybień formalnych, dotyczących głównie spójności podpisów pod rysunkami oraz odwołań do cytowanej literatury. Mają one jednak charakter redakcyjny i nie wpływają na wartość merytoryczną całej rozprawy.

2.3. Ocena badań własnych i osiągnięć naukowych

Przedstawiony w rozprawie program badań tworzy logiczny ciąg prowadzący od procesu technologicznego, poprzez zmiany mikrostruktury, do oceny końcowych właściwości materiału. Jego podstawę stanowią dwie drogi kształtowania właściwości stopów na bazie Cu-Mg: modyfikacja składu chemicznego oraz zastosowanie różnych sposobów przeróbki

plastycznej. Chociaż Autor nie sformułował formalnej hipotezy badawczej, przyjęty program można było odnieść do założenia, że odpowiednie połączenie obu tych czynników pozwala kształtować mikrostrukturę wytworzonych stopów Cu w kierunku poprawy właściwości mechanicznych przy jednoczesnym zachowaniu dobrej przewodności elektrycznej. Istotnym elementem badań było wykorzystanie modelowania procesów odkształcenia. Wyniki symulacji umożliwiły określenie zróżnicowanie stopnia odkształcenia w badanych materiałach, a następnie zostały zastosowane przy wyborze obszarów przeznaczonych do dalszych eksperymentów. Taki tok postępowania pozwolił bezpośrednio powiązać przewidywany przebieg procesu ze zmianami zachodzącymi w mikrostrukturze i właściwościach materiału. Połączenie modelowania z późniejszą weryfikacją eksperymentalną odpowiada współczesnemu podejściu stosowanemu w inżynierii materiałowej.

Kolejnym etapem była szeroka charakterystyka otrzymanych materiałów z wykorzystaniem wzajemnie uzupełniających się metod badawczych. Mikrostrukturę analizowano metodami mikroskopowymi oraz EBSD, określając między innymi wielkość ziaren, ich orientację i charakter granic. Zmiany strukturalne odnoszono do wyników pomiarów twardości oraz prób rozciągania. Analizowano również powierzchnie przełomów. Ważnym elementem badań była ocena przewodności elektrycznej, która pozwalała określić, w jakim stopniu uzyskany wzrost właściwości mechanicznych wpływa na właściwości funkcjonalne stopów. Autor nie ograniczył analizy do samego efektu umocnienia, lecz rozpatrywał jednocześnie właściwości mechaniczne i przewodność elektryczną.

Zakres badań został dodatkowo poszerzony w trzecim podejściu, dotyczącym kompozytu Cu/Mg otrzymanego metodą KoBo. W tym przypadku charakterystykę mikrostruktury rozszerzono o transmisyjną mikroskopię elektronową TEM/STEM oraz rentgenowską tomografię komputerową XCT. Pozwoliło to scharakteryzować osnowę Cu i włókna Mg w różnych skalach, a także ocenić ich przestrzenne rozmieszczenie i ciągłość. Badania te uzupełniono pomiarami twardości, próbami ściskania oraz pomiarami przewodności elektrycznej.

W mojej ocenie do najważniejszych osiągnięć rozprawy można zaliczyć:

1. Połączenie modyfikacji składu chemicznego poprzez dodatek Ca, obróbki cieplnej oraz intensywnego odkształcenia metodą MaxStrain doprowadziło do rozdrobnienia mikrostruktury i wzrostu udziału granic HAGB, a w konsekwencji do znacznego wzrostu właściwości wytrzymałościowych przy stosunkowo niewielkim dalszym obniżeniu przewodności elektrycznej.

2. Zastosowanie wstępnego wyciskania współbieżnego lub procesu KoBo przed dalszym odkształceniem metodą MaxStrain doprowadziło do zróżnicowania mikrostruktury stopu Cu-0,7Mg, a w konsekwencji do znacznego wzrostu właściwości wytrzymałościowych, przy umiarkowanym obniżeniu przewodności elektrycznej.
3. Uzyskanie metodą KoBo kompozytu Cu/Mg o ciągłej włóknistej mikrostrukturze i obniżonej gęstości, przy zachowaniu korzystnych właściwości mechanicznych i przewodności elektrycznej.

Na podstawie zrealizowanego programu badań oraz prowadzenia analizy uzyskanych wyników potwierdzam, że ***Doktorant posiada umiejętność samodzielnego planowania i prowadzenia pracy naukowej, w tym: właściwego doboru metod badawczych oraz interpretacji wyników eksperymentalnych. Wyniki te mają również charakter oryginalny i wnoszą nowe elementy do wiedzy z zakresu inżynierii materiałowej, w szczególności w obszarze badań nad stopami na bazie miedzi oraz kształtowaniem ich mikrostruktury i właściwości.***

2.4. Uwagi szczegółowe

Przy szczegółowej analizie rozprawy pojawiają się pytania czy też zagadnienia, które warto doprecyzować lub szerzej skomentować.

1. W przypadku stopu Cu-Mg-Ca proszę o wyjaśnienie celu zastosowania obróbki cieplnej w temperaturze 650°C. Temperatura ta znajduje się wyraźnie poniżej efektu endotermicznego obserwowanego na krzywej DSC w około 856°C, wiązanego z rozpuszczaniem fazy wtórnej, a więc nie powinna prowadzić do całkowitego rozpuszczenia istniejących cząstek Cu_5Ca. Jednocześnie w rozprawie ich obecność jest z jednej strony traktowana jako korzystna dla umocnienia i rozdrobnienia mikrostruktury, z drugiej zaś część interpretacji sugeruje dążenie do ograniczenia ich obecności. Jaki zatem stan fazowy stopu zamierzano uzyskać przed procesem MaxStrain i na jakiej podstawie wybrano właśnie temperaturę 650°C?
2. Na rysunku 18 widoczna jest większa liczba cząstek drugiej fazy, natomiast analizę EDS przedstawiono tylko dla jednej z nich. Czy analogiczne analizy wykonano również dla innych cząstek i czy uzyskano w nich porównywalny stosunek Cu/Ca?
3. Autor w wielu miejscach rozprawy odwołuje się do zmian gęstości dyslokacji jako jednego z głównych czynników wpływających na mikrostrukturę i właściwości badanych materiałów. Czy gęstość dyslokacji była w pracy wyznaczana, a jeżeli tak, to jaką metodą? Ponadto Autor przyjął, że różnica współczynników rozszerzalności cieplnej osnowy Cu-Mg i cząstek Cu_5Ca podczas nagrzewania do 650°C prowadzi do zwiększenia gęstości dyslokacji. W tej temperaturze powinny równocześnie zachodzić procesy zdrowienia, wspinania i anihilacji dyslokacji, prowadzące do jej obniżenia. Jak w tej sytuacji uzasadniono przyjęcie wzrostu gęstości dyslokacji?
4. Lokalne maksima twardości HV1 w stopie trójskładnikowym przypisano oddziaływaniu odcisku z cząstkami Cu_5Ca. Średnia średnica tych cząstek wynosi jednak około 7 μm, a więc jest znacznie mniejsza od obszaru materiału objętego odciskiem przy obciążeniu HV1. Na jakiej podstawie można jednoznacznie powiązać lokalne wzrosty twardości z obecnością pojedynczych cząstek Cu_5Ca?
5. Po procesie MaxStrain próbki FM i KM charakteryzują się wielkością ziarna tego samego rzędu, odpowiednio około 1,4 i 2,0 μm, przy czym próbka KM osiąga wyższe wartości YS i UTS. Jednocześnie wartości przewodności elektrycznej wynoszą odpowiednio 35,6 ± 3,0 i 32,0 ± 3,0 MS/m, a zakresy ich rozrzutu częściowo się nakładają. Czy w tej sytuacji nie należałoby uznać, że przewodność obu próbek pozostaje

na porównywalnym poziomie, a różnic w ich właściwościach mechanicznych poszukiwać w innych elementach mikrostruktury niż sama wielkość ziarna?

6. W analizie EBSD osnowy Cu po procesie KoBo przedstawiono mapę obejmującą obszar około 100 × 80 μm, bez jednoznacznego wskazania jego położenia względem osi pręta i włókien Mg. Jak wykazano we wcześniejszej części rozprawy, proces KoBo prowadzi do zróżnicowania stopnia odkształcenia, a tym samym może powodować gradienty mikrostruktury. Na jakiej podstawie uznano analizowany obszar za reprezentatywny dla całej osnowy Cu w kompozycie?

3. Wniosek końcowy

Całość przedstawionych badań oraz uzyskane wyniki pozwalają na pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej. Doktorant wykazał odpowiedni poziom ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie inżynieria materiałowa oraz umiejętność samodzielnego planowania i prowadzenia badań naukowych. Uzyskane wyniki mają charakter oryginalny i wnoszą nowe elementy do wiedzy dotyczącej kształtowania mikrostruktury i właściwości materiałów na bazie miedzi. Przedstawione w recenzji uwagi, komentarze czy też pytania dotyczą głównie sposobu interpretacji części wyników oraz kwestii wymagających doprecyzowania w trakcie dalszego postępowania. Nie mają one wpływu na moją pozytywną ocenę całości rozprawy.

Stwierdzam, 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". W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Prof. dr hab. Tomasz Goryczka
Institute of Materials Engineering
Faculty of Science and Technology
University of Silesia in Katowice
Ul. 75 Pułku Piechoty 1A, 41-500 Chorzów

3.11.2026 r., Katowice

.....

Review of Doctoral Dissertation

entitled: "Cu-Mg based alloys with strength, ductility, and high conductivity achieved by SPD technique", authored by Alireza Kalhor, M.Sc. Eng., prepared under the supervision of prof. dr hab. inż. Kinga Rodak.

1. Formal and legal basis for the review

The review was prepared at the request of the Council of the Scientific Discipline of Materials Engineering of the Silesian University of Technology, based on the Council's resolution of 22 September 2026, communicated in the letter of the Chair of the Council, Prof. Adam Grajcar, DSc, PhD, Eng., dated 23 September 2026 (RDMIMa.512.5.2026.RM).

The formal basis for preparing the review was Art. 187 of the Act of 20 July 2018 – Law on Higher Education and Science (Journal of Laws of 2024, item 1571).

2. Characteristics and description of dissertation

2.1. Assessment of relevance of topic, state of art, and scope of dissertation

The doctoral dissertation submitted for review concerns research on Cu-Mg-based alloys characterised by increased strength, good ductility, and high electrical conductivity, produced using various severe plastic deformation processes. The Author of the dissertation investigated the effects of Ca addition, heat treatment, and different plastic deformation methods on the evolution of the microstructure, mechanical properties, and electrical conductivity. In addition, he extended the scope of the research to include the fabrication of a reduced-density Cu/Mg composite.

Although copper and its alloys have been known and used for thousands of years, their development has continued in response to advances in research and processing technologies and to increasingly demanding service requirements. Initially, progress was achieved mainly through modification of the chemical composition by introducing new alloying elements. Over time, growing attention has also been paid to processing routes that make it possible to control the structure and, through them, the final properties of the material. This continuous

improvement and adaptation of material properties to the requirements of specific applications is one of the characteristic features of materials engineering.

The Author followed both of these approaches, combining modification of the chemical composition with microstructural control at successive stages of processing. In an extensive literature review comprising 286 references, he discussed the influence of chemical composition on Cu-based alloys. Also, he presented processing methods used to modify their microstructure and activate strengthening mechanisms through plastic deformation, with particular emphasis on SPD techniques such as ECAP, MaxStrain and KoBo. This comprehensive review provides a clear overview of the current state of knowledge and gives a sound basis for the adopted research direction. The remaining references from the bibliography, which comprises 395 items in total, were used in the sections devoted to the Author's own research and to the discussion of the results. ***In my opinion, the selection of literature is appropriate and fully reflects the scope of the dissertation.***

To conclude this part of the review, I consider the topic of the dissertation to be timely and well aligned with current research aimed at developing copper alloys with enhanced mechanical properties while maintaining good electrical conductivity. Furthermore, the detailed analysis of the state of the art presented in the dissertation demonstrates that the Author possesses an appropriate level of general theoretical knowledge within the discipline of materials engineering. In particular, he showed in-depth analysis of the relationships between chemical composition, structure and properties of copper alloys, as well as the methods used to control their microstructure and final properties. ***In my opinion, the level of this knowledge meets the requirements expected of a candidate for the doctoral degree.***

2.2. Assessment of editorial and formal aspects

The dissertation has been prepared with care, and its overall structure is clear and generally follows the conventional organisation of a doctoral thesis. After introduction and literature review, Author proceeds to the presentation of his own research, which was divided into three research approaches. The first one focuses on the influence of Ca addition, heat treatment and deformation on the properties of Cu-Mg and Cu-Mg-Ca alloys. The second concerns the binary Cu-Mg alloy subjected to different deformation routes, while the third one is devoted to the fabrication and characterisation of a Cu/Mg composite. For each of these approaches, the methodology, results, discussion and separate conclusions are presented. In addition, after completing these three research sections, the Author provides a broader discussion of the results, identifies directions for further research, and concludes the dissertation with summary and final conclusions. This organisation of the experimental part makes it easier to follow the successive stages of the research. However, some comments may be raised with regard to the structure of the literature review. Cu-Mg alloys are discussed in the initial part of the review, after which Author moves on to strengthening mechanisms and deformation methods. After that he returns to Cu-Mg and Cu-Mg-Ca alloys. For greater clarity and coherence, the material-related issues concerning the alloys investigated in the dissertation should be presented together in an earlier, more compact section.

The main objective of the dissertation is presented somewhat less explicitly. It is not clearly separated and stated in a dedicated section before the presentation of Author's own research. However, it can be reconstructed from the overall scope of the work and from the objectives described for the individual research approaches. The clearest formulation of the overall objective of the dissertation appears only in the chapter devoted to the discussion of the results. The Author also does not formulate an explicit thesis or research hypothesis. From the point of view of the structure of the dissertation, it would be beneficial to distinguish more clearly between the main objective and the specific objectives.

The section devoted to conclusions would also benefit from some reorganisation. Each of the three research approaches ends with a separate set of conclusions. Subsequently, after the chapter containing the overall discussion of the results, Author presents a further set of 17 final conclusions. Many of them repeat or expand upon conclusions already given for the individual stages of the research. Although this arrangement is clear, it results in unnecessary repetition. The final conclusions could be limited to the most important outcomes of the dissertation, with particular emphasis on the achievements arising from the combined analysis of the three research approaches.

The dissertation is written in English. The language is correct and clear, and the text is easy to follow. The Author uses terminology from the field of materials engineering appropriately. The editorial and graphical presentation of the dissertation has also been prepared to a very high standard. Also, the figures are clear, properly described and consistently numbered. The same applies to the tables and equations included in the dissertation. All figures and tables are referred to in the text. The presentation of microstructural maps, plots and schematic diagrams also deserves a high assessment, as these elements facilitate the interpretation of the results.

Despite the overall very high editorial standard, a few minor formal inconsistencies should be noted, mainly concerning the consistency of figure captions and references to the cited literature. However, these are editorial in nature and do not affect the scientific value of the dissertation.

2.3. Assessment of research and scientific achievements

The research programme presented in the dissertation follows a clear and logical sequence, connecting the technological process with the resulting microstructural changes and final properties of the material. Two main strategies were adopted to tailor the Cu-Mg-based alloys properties: modification of the chemical composition and the use of different plastic deformation routes. Although Author did not formulate a formal research hypothesis, the overall research concept can be understood as being based on the assumption that the two strategies can be combined to modify the alloy's microstructure. Such modification was expected to improve the mechanical properties while a good electrical conductivity is maintained.

An important element of the study was the use of deformation process modelling. The simulations made it possible to identify variations in the magnitude and distribution of strain within the investigated materials. Then, the results were used to select areas for further

experimental analysis. This approach made it possible to directly relate the predicted course of deformation to the observed changes in microstructure and properties. It is worthy to notice, that the combination of numerical modelling with subsequent experimental verification is fully consistent with modern approaches used in materials engineering.

The next stage involved a broad characterisation of the processed materials using complementary experimental techniques. The microstructure was examined with use of microscopy and EBSD, with particular attention paid to grain size, crystallographic orientation and grain boundary character. These observations were correlated with hardness measurements and tensile test. Fracture surfaces were also evaluated. Electrical conductivity measurements were another important part of the dissertation. They made it possible to assess whether the increase in mechanical properties was accompanied by deterioration in the functional properties of the alloys.

Further, the scope of the work was extended in the third research approach, which focused on a Cu/Mg composite produced by the KoBo process. In this case, the microstructural characterisation was extended to TEM/STEM and X-ray tomography (XCT). Use of these techniques made possible examination of the Cu matrix and Mg filaments at different length scales as well as assessing their spatial distribution and continuity. The characterisation was completed by hardness measurements, compression tests and electrical conductivity measurements.

In my opinion, the most important scientific achievements of the dissertation include:

1. The combined use of Ca alloying, heat treatment and severe plastic deformation by the MaxStrain process resulted in microstructural refinement and an increased fraction of HAGBs, leading to a substantial improvement in mechanical strength with only a relatively small decrease in electrical conductivity.

2. The use of preliminary forward extrusion or KoBo processing prior to subsequent MaxStrain deformation led to distinct microstructural states in the Cu-0.7Mg alloy and, as a consequence, to a significant improvement in mechanical strength, accompanied by a moderate reduction in electrical conductivity.

3. The successful fabrication by the KoBo process of a reduced-density Cu/Mg composite with a continuous fibrous microstructure, with maintaining of the favourable mechanical properties and electrical conductivity.

On the base of the completed research programme and the analysis of the obtained results, it can be concluded that ***the Doctoral Candidate has demonstrated the ability to plan and to conduct scientific research, including the appropriate selection of experimental methods and the interpretation of results.*** Moreover, ***obtained results are original and contribute a new knowledge to the field of materials engineering, particularly in the area of copper-based alloys with controlled microstructure and properties***.

2.4. Detailed comments

A detailed analysis of the dissertation raises a few questions and points that would be beneficial to clarification and/or further discussion.

1. For the Cu-Mg-Ca alloy, please clarify the rationale for applying heat treatment at 650°C. This temperature is below the endothermic effect associated with dissolution of the second phase was observed on the DSC curve at approximately 856°C. The 650°C does not providing complete dissolution of the existing Cu_5Ca particles (in as-cast alloy). At the same time, their presence is considered beneficial for strengthening and microstructural refinement, while some parts of the discussion seem to suggest that their presence should be reduced. What the phase constitution was intended before MaxStrain processing, and what was the basis for selecting 650°C?
2. Figure 18 shows a number of second-phase particles, whereas the EDS analysis is presented for only one of them. Were similar analyses performed for other particles, and were comparable Cu/Ca ratios obtained?
3. Throughout the dissertation, changes in dislocation density are frequently referred to as one of the main factors affecting the microstructure and properties of the investigated materials. Was the dislocation density determined experimentally and, if so, by what method? The Author also assumes that the difference in thermal expansion coefficients between the Cu-Mg matrix and Cu_5Ca particles leads to an increase in dislocation density during heating to 650°C. However, at this temperature recovery processes, including dislocation climb and annihilation, should also occur and tend to reduce the dislocation density. Considering that - how it was the assumed the increase in dislocation density?
4. In the ternary alloy, local maxima in HV1 hardness were attributed to the interaction of the indentation with Cu_5Ca particles. However, the average diameter of these particles is approximately 7 μm, which is much smaller than the area affected by an HV1 indentation. What was the base for the statement that the local increase in hardness may be directly associated with the presence of individual Cu_5Ca particles?
5. After MaxStrain processing, the FM and KM samples show grain sizes of the same order of magnitude, approximately 1.4 and 2.0 μm, respectively, while the KM sample exhibits higher YS and UTS values. Moreover, their electrical conductivities are 35.6 ± 3.0 and 32.0 ± 3.0 MS/m, respectively, with partially overlapping ranges of variation. In this case, would it be more appropriate to consider the electrical conductivity of both samples as comparable one and to seek the origin of the differences in their mechanical properties in microstructural features than grain size, only?
6. The EBSD analysis of the Cu matrix after KoBo processing is based on a map covering an area of approximately 100 × 80 μm, without clearly indicating its position relative to the rod axis and the Mg filaments. As shown earlier in the dissertation, the KoBo process produces a non-uniform strain distribution and may lead to microstructural gradients. What was the base for considering the analysed area as representative one of the Cu matrix?

3. Final conclusion

The overall scope of the research and the results obtained allow the doctoral dissertation to be assessed positively. The Doctoral Candidate has shown an appropriate level of general theoretical knowledge in the discipline of materials engineering, as well as the ability to independently planning and caring out the scientific research. Obtained results are original and contribute new knowledge to the understanding and controlling of the microstructure as well as properties of copper-based materials. My comments and questions raised in this review concern mainly the interpretation of selected results and issues that require further clarification. They do not affect my positive opinion of the dissertation as a whole.

Finally, it can be concluded that the doctoral dissertation of Alireza Kalhor, M.Sc. Eng., meets the requirements specified in Article 187 of the Act of 20 July 2018 – Law on Higher Education and Science. Therefore, I recommend the Doctoral Candidate to be admitted for the further stages of the doctoral degree procedure.

Podpisał: prof. dr hab. Tomasz Goryczka