

dr hab. inż. Jarosław Seńko
Instytut Pojazdów i Maszyn Roboczych
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych
Politechniki Warszawskiej

Warszawa, 6.10.2023r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Łukasza Szczepańskiego, pt. „Laser powder bed fusion technology as an alternative method of metallic glasses manufacturing”**

1. Formalna podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem opracowania jest recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Łukasza Szczepańskiego, pt. „Laser powder bed fusion technology as an alternative method of metallic glasses manufacturing”. Rozprawa powstała jako efekt projektu „InterDok – Interdisciplinary Doctoral Studies Projects at Wrocław University of Science and Technology”, promotorem rozprawy ze strony Politechniki Wrocławskiej jest dr hab. inż. Tomasz Kurzynowski, promotorem ze strony Swiss Federal Institute of Technology Zurich jest Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Bambach. Recenzja stanowi element **postępowania o nadanie Panu mgr inż. Łukaszowi Szczepańskiemu stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.**

Formalną podstawę opracowania recenzji stanowi uchwała nr 553/30/RDND07/2021÷2024 Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej z dnia 2 czerwca 2023r.

2. Ogólna charakterystyka i struktura rozprawy.

Recenzowana rozprawa przedstawia interdyscyplinarne zagadnienia z pogranicza inżynierii mechanicznej oraz inżynierii materiałowej, dotyczące zagadnień wytwarzania szkieł metalicznych z wykorzystaniem technologii laserowej mikrometalurgii proszków.

Rozprawa obejmuje 94 strony, podzielona jest na osiem rozdziałów poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim. Na końcu rozprawy zamieszczono bibliografię złożoną ze 161 pozycji w języku angielskim.

**Wydział Samochodów
i Maszyn Roboczych**

W pierwszym rozdziale, pt. „Introduction”, Autor przedstawił tło i genezę poruszanych zagadnień, w szczególności skupił się na przyczynach wytwarzania szkieł metalicznych oraz możliwościach ich wytwarzania z wykorzystaniem laserowego stapiania proszków w procesie addytywnego wytwarzania części. Autor scharakteryzował również naukowe zainteresowanie zagadnieniem wytwarzania szkieł metalicznych przedstawiając wzrost publikacji w tym zakresie na przestrzeni ostatnich dziesięciu lat.

W rozdziale drugim, pt. „State of the art”, dokonano przeglądu literatury w zakresie zagadnień związanych z możliwością wytwarzania, parametrami procesu wytwarzania oraz defektów związanych ze strukturami amorficznymi właściwymi dla szkieł metalicznych. Autor przedstawił porównanie wytrzymałości na rozciąganie oraz twardości Vickersa dla wybranych szkieł metalicznych oraz stopów wytwarzanych konwencjonalnie. W tabeli zbiorczej przedstawiono również właściwości mechaniczne wybranych szkieł metalicznych formowanych na bazie żelaza. Istotne uzupełnienie dotyczące cech szkieł metalicznych, stanowił fragment rozdziału przedstawiający możliwości przyrostowego wytwarzania części maszyn z proszków metali przez laserowe spajanie.

W rozdziale trzecim, pt. „Research gap and approach” wskazano zagadnienia badawcze polegające na określeniu możliwości wytwarzania szkieł metalicznych w technologii laserowego stapiania proszków metali opracowanych na bazie żelaza. Zaproponowano by ocena zdolności do tworzenia szkła metalicznego była prowadzona pod kątem uzyskanej mikrostruktury, przede wszystkim jej wad i wartości twardości. Uzasadniono wybór, do wytwarzania szkieł metalicznych, dwóch stopów na bazie żelaza cechujące się odmienną, niską i wysoką zdolnością do tworzenia szkła w procesie laserowego stapiania proszków metali. Właściwie opisano planowane w działaniach naukowych podejście metodyczne i plan badań.

W rozdziale czwartym, pt. „Materials” przedstawiono charakterystyki dwóch stopów na bazie żelaza, odpowiednio $Fe_{79}Zr_6Si_{14}Cu_1$ oraz $Fe_{45}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Ni_3$. Parametry technologiczne stopów wykorzystanych w procesie wytwarzania przyrostowego w formie laserowego spajania proszków odniesiono do właściwych referencji literaturowych wyszczególnionych w bibliografii.

W rozdziale piątym, pt. „Laser powder bed fused Fe-Zr-Si-Cu alloy” wyszczególniono i opisano metody oceny jakości wytwarzanych struktur, t.j. metalografia, mikroskopia świetlna, elektronowa mikroskopia skaningowa, transmisyjna mikroskopia elektronowa, dyfrakcja rentgenowska oraz badania twardości. Szczegółowo przedstawiono charakterystykę proszku wykorzystanego do wytwarzania szkieł amorficznych

**Wydział Samochodów
i Maszyn Roboczych**

oraz przebieg procesu przygotowywania próbek odpowiednio w programach Autodesk NetFabb Premium 2019 i Aconity STUDIO. Opisano parametry i warunki procesu wytwarzania próbek ze stopu Fe-Zr-Si-Cu w procesie Laser Powder Bed Fusion na urządzeniu Aconity MIDI. Wytworzone w procesie laserowego spiekania proszków, próbki szkieł metalicznych zostały poddane ocenie twardości oraz porowatości i kształtu mikrostruktury. Podsumowanie rozdziału stanowi dyskusja wyników badań przeprowadzonych na wytworzonych próbkach. Do każdego z rozważanych parametrów przyporządkowane zostały publikacje stanowiące referencję.

W rozdziale szóstym, pt. „Laser powder bed fused Fe-Cr-Mo-C-B-Y-Ni alloy” w analogiczny sposób jak w rozdziale piątym przedstawiono charakterystykę stopu oraz wyniki uzyskane z badań próbek wytworzonych ze stopu Fe-Cr-Mo-C-B-Y-Ni, podczas laserowego spajania proszków metalu. W podsumowaniu rozdziału, Autor zwrócił uwagę, na konieczność świadomego i właściwego doboru parametrów wytwarzania szkieł metalicznych w kontekście redukcji wad wytwarzanych struktur.

W rozdziale siódmym, pt. „ Summary” przedstawione zostało podsumowanie realizowanych działań naukowych oraz efektów badań laboratoryjnych. Autor wskazał wytworzenie próbek w postaci szkła metalicznego, dwóch stopów na bazie żelaza, jako właściwy efekt wykorzystania technologii spajania laserowego do wytwarzania szkieł metalicznych. Szczegółowo opisany został wpływ parametrów procesu wytwarzania na jakość struktury próbek, ich parametry mechaniczne oraz wady dostrzeżone w trakcie badań. Zestawienie wyników badań istotnych do oceny osiągniętych efektów zostało umieszczone w tabeli 7.1. w formie porównania właściwości wynikających ze sposobu wytwarzania obydwu stopów $Fe_{79}Zr_6Si_{14}Cu_1$ oraz $Fe_{45}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Ni_3$.

W rozdziale ósmym, pt. „Conclusions”, Autor przedstawił własne obserwacje dotyczące wpływu mikrostruktury proszku, kształtu ziaren proszku, mocy lasera urządzenia oraz parametrów procesu spajania na jakość uzyskiwanych struktur szkieł metalicznych i wady powstające podczas procesu wytwarzania.

3. Ocena rozprawy pod względem merytorycznym i techniczno-redakcyjnym

Problem badawczy i cel badawczy

Problemem badawczym w rozprawie doktorskiej jest poszukiwanie możliwości wytwarzania szkieł metalicznych z wykorzystaniem technologii laserowej mikrometalurgii proszków. Jako uzasadnienie podjętej tematyki badawczej (lukę badawczą) autor wskazał brak dedykowanego podejścia do wytwarzania struktur szkieł

**Wydział Samochodów
i Maszyn Roboczych**

metalicznych o określonych wielkościach (wymiarach wytwarzanych elementów) w technologiach przyrostowych opartych o laserowe spajanie proszków metali.

Poruszana tematyka jest istotna ze względu na rozwój wiedzy w zakresie przyrostowego wytwarzania metali, a w szczególności możliwości wytwarzania szkieł metalicznych w kontekście ich wykorzystania w przemyśle maszynowym. Wytworzone w technologii addytywnej próbki ze stopów na bazie żelaza, umożliwiły przeprowadzenie badań w zakresie struktury jakości wydruków. Przeprowadzona analiza piśmiennictwa w zakresie wytwarzania przyrostowego oraz wytwarzania szkieł metalicznych umożliwiła właściwe określenie luki badawczej i przeprowadzenie przez Autora procesu badawczego z wykorzystaniem procesu wytwarzania addytywnego w technologii laserowego spajania proszków metali.

Cel rozprawy Autor określił jako „Determination of the processability of Fe-based metallic glasses in the laser powder bed fusion technology based on two alloys with low and high glass-forming ability concerning the obtained microstructure, defects, and hardness”, czyli określenie możliwości wytwarzania szkieł metalicznych na bazie żelaza, w technologii laserowego stapiania proszków, z wykorzystaniem dwóch stopów o niskiej i wysokiej zdolności tworzenia szkła metalicznego, w kontekście mikrostruktury wydruku oraz jego wad i twardości.”

Pozytywnie oceniam zarówno sformułowany cel główny rozprawy, zdefiniowanie zadania badawczego oraz sposób realizacji badań i zestawienie wniosków z nich wynikających. Motywacja i uzasadnienie merytoryczne podjętej tematyki badawczej zostało poprawnie udokumentowane wnioskami z przeprowadzonej analizy literaturowej. Zakres rozprawy obejmuje oryginalny, interdyscyplinarny problem badawczy. Zdaniem oceniającego, zakres tematyczny rozprawy i rozważany problem badawczy wpisują się w dyscyplinę naukową Inżynieria Mechaniczna.

Ocena merytoryczna pracy

W części teoretycznej rozprawy (rozdziały 1 i 2) Autor poprawnie dokonał przeglądu piśmiennictwa dotyczącego sposobów i materiałów wykorzystywanych przy produkcji szkieł metalicznych. Przedstawił potencjał wykorzystywania oraz problemy technologiczne uzyskania amorficznych struktur materiałów wytwarzanych ze stopów na bazie żelaza. Pozytywnie oceniam ujęcie kluczowych zagadnień w obszarze tematyki badawczej, a w szczególności możliwości addytywnego wytwarzania struktur metalowych oraz określenie parametrów procesu laserowego spajania proszków. Zagadnienie badawcze, jego znaczenie oraz plan badawczy zostały opisane w sposób przejrzysty i jednoznaczny w rozdziale 3. W dalszej kolejności Autor scharakteryzował

**Wydział Samochodów
i Maszyn Roboczych**

stopy na bazie żelaza, wytypowane w oparciu o studia literaturowe do procesu laserowego spajania struktur. Wybrane stopy metali cechują się odmiennymi parametrami determinującymi możliwość uzyskania struktury szkła metalicznego. Szczegółowe efekty realizacji działań badawczych, zestawione zostały w rozdziałach 5 i 6, w których dla każdego z wytypowanych stopów opisano metody badań doświadczalnych, charakterystykę proszku użytego w procesie laserowego spajania, parametry procesu spajania wpływające na jego przebieg oraz jakość uzyskiwanych próbek rozumianą jako ich porowatość, deformacje wytworzonej struktury oraz twardość. Ważnym merytorycznie uzupełnieniem wykonanych struktur i przeprowadzonych badań, była oddzielna dla każdego ze stopów, dyskusja uzyskanych wyników. Szczegółowe parametry wytwarzania próbek, oraz wynikające z nich efekty wpływające na jakość wytworzonych próbek, zostały przywoływane by możliwa była ocena realizacji procesu badawczego, oceniona przeze mnie jednoznacznie pozytywnie. Opisowe podsumowanie efektów pracy, skompresowane w postaci tabeli 7.1. oraz przedstawione wnioski końcowe, potwierdzają wiedzę i umiejętności naukowe Autora pracy w zakresie definiowania, realizacji i oceny zagadnienia badawczego.

Pozytywnie oceniam zrealizowany interdyscyplinarny proces badawczy oraz oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego.

Ocena techniczno-redakcyjna

Praca została przygotowana od strony redakcyjnej w sposób rzetelny. Pomijając streszczenie w języku polskim, całość pracy przygotowana została w języku angielskim. W przypadku tak współczesnych zagadnień technicznych, którymi zajmował się Autor, wykorzystanie języka angielskiego umożliwiło zastosowanie właściwej terminologii i unikanie nieścisłości związanych z tłumaczeniem na język polski. Wykorzystanie angielskiej formy językowej na potrzeby redakcji pracy nie powinno być traktowane neutralnie pod względem uciążliwości opracowania edytorskiego.

Pod względem redakcji graficznej, zaproponowana liczba rysunków, zdjęć i wykresów jest właściwa by zilustrować opisywane zagadnienia i wyniki, a forma i jakość wykorzystanych elementów są na dobrym poziomie, nie odstającym od innych elementów opracowania.

Sformułowania od strony językowej są właściwe i jednoznaczne. Autor przygotował pracę w sposób staranny, w lakonicznej formie przedstawił wszystkie elementy procesu badawczego niezbędne do wydania pozytywnej opinii o wykonanej przez niego pracy.

Wydział Samochodów
i Maszyn Roboczych

Najistotniejsze osiągnięcia – oryginalność zaproponowanego podejścia

Autor wykazał się dużą wiedzą w zakresie realizowanej tematyki badawczej. Uwzględniając interdyscyplinarny charakter rozprawy, jej dużą zaletą jest potencjał aplikacyjny pozwalający na dalszy rozwój w zakresie wytwarzania szkieł metalicznych. Do wyjątkowych rezultatów prac badawczych przeprowadzonych w ramach rozprawy zaliczyć należy:

- dobór parametrów procesu wytwarzania szkieł metalicznych ze stopów, $Fe_{79}Zr_6Si_{14}Cu_1$ oraz $Fe_{45}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Ni_3$;
- wykonanie badań struktur i parametrów mechanicznych szkieł metalicznych ze stopów, $Fe_{79}Zr_6Si_{14}Cu_1$ oraz $Fe_{45}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Ni_3$;
- opracowanie wpływu parametrów procesu spajania proszków $Fe_{79}Zr_6Si_{14}Cu_1$ oraz $Fe_{45}Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Y_2Ni_3$, na jakość uzyskiwanej struktury.

4. Konkluzja końcowa

Podsumowując, rozprawa doktorska Pana mgr inż. Łukasza Szczepańskiego, pt. „Laser powder bed fusion technology as an alternative method of metallic glasses manufacturing” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Autor rozprawy wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna, w której mieszczą się interdyscyplinarne zagadnienia objęte rozprawą doktorską. Przedstawione badania studia literaturowe badania doświadczalne potwierdzają umiejętność samodzielnego i odpowiedniego doboru, a następnie wykorzystania metod oraz narzędzi badawczych. **Przedłożoną mi do recenzji rozprawę doktorską oceniam pozytywnie. Na podstawie dokonanej oceny stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Łukasza Szczepańskiego, pt. „Laser powder bed fusion technology as an alternative method of metallic glasses manufacturing” (napisana pod kierunkiem promotora ze strony Politechniki Wrocławskiej dr hab. inż. Tomasza Kurzynowskiego oraz promotora ze strony Swiss Federal Institute of Technology Zurich Prof. Dr.-Ing. habil. Markusa Bambacha), spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, w rozumieniu ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2022, poz. 574 z póź. zm.). Wniosuję o dopuszczenie Autora do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**

Janusz Senko