



Prof. dr hab. inż. Jolanta Baranowska

Szczecin, 16.08.2023

Katedra Technologii Materiałowych

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr. inż. Łukasza Szczepańskiego  
pod tytułem:

*„Laser powder bed fusion technology as an alternative method of metallic glasses manufacturing”*

#### Podstawa wykonania recenzji

1. Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna, prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego nr W10/RDND07/56/2023 z dnia 5 czerwca 2023 r. informujące o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora, w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, pana mgr. inż. Łukasza Szczepańskiego.
2. Zawiadomienie nr 14/06/D07/2023 o wyznaczeniu mnie na Recenzenta w sprawie nadania stopnia doktora j/w, z dnia 2 czerwca 2023 r. podpisane przez Prorektora ds. Nauki Politechniki Wrocławskiej, pana prof. Andrzeja Ożyhara, które otrzymałam w dn. 30.06.2023 r.
3. Wymagania zawarte w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U.2003 nr 65 poz. 595).

#### Ogólna charakterystyka tematyki badawczej

Techniki przyrostowe to jeden z obszarów technologicznych rozwijających się najbardziej dynamicznie ostatnimi czasy. Mimo istnienia wielu zaawansowanych technologii druku wdrożonych do praktyki przemysłowej obszar do usprawnień i postępu w tym zakresie jest ciągle ogromny. Szczególnym wyzwaniem jest poszukiwanie technologicznych dróg dla wytwarzania nowych materiałów. Praca doktorska mgr. inż. Łukasza Szczepańskiego stawia czoła tego typu wyzwaniom. Jako materiał wybrane zostały stopy z grupy szkieł metalicznych stanowiące również ważny i perspektywiczny rodzaj nowoczesnych materiałów, o wciąż rosnącym znaczeniu w wielu obszarach techniki. Badania podjęte przez pana mgr. inż. Łukasza Szczepańskiego adresują więc bardzo istotne i nowoczesne zagadnienie



technologiczne. Tematyka jest jak najbardziej aktualna, a biorąc pod uwagę ograniczony stan wiedzy z tego zakresu, także bardzo ambitna, dlatego należy ocenić ją jako zasadną i bardzo ważną zarówno z naukowego jak i z aplikacyjnego punktu widzenia.

### **Charakterystyka rozprawy i zawartości naukowej**

Praca podzielona jest na osiem rozdziałów, które uzupełnione są o streszczenia w języku polskim i angielskim oraz o bibliografię. Praca napisana jest w języku angielskim i liczy łącznie 94 strony.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do zagadnienia, w którym autor w sposób zwięzły przedstawił znaczenie poruszanej w pracy tematyki badawczej. Naświetlił zalety szkieł metalicznych, ogólne bariery technologiczne dla ich szerszego wykorzystania w technice, oraz możliwości zastosowania zaproponowanej technologii do otrzymywania z tych materiałów wyrobów o złożonych kształtach. Znaczenie i aktualność podejmowanego tematu wsparł ilustracją trendów w światowych publikacjach.

Rozdział drugi zawiera opis stanu wiedzy. Jest on podzielony na cztery podrozdziały, które stopniowo i w sposób logiczny wprowadzają czytelnika w poszczególne aspekty związane z tematyką pracy doktorskiej. Pierwsze dwa podrozdziały dotyczą materiałów będących przedmiotem badań. W podrozdziale 2.1. scharakteryzowano ogólnie strukturę i właściwości szkieł metalicznych oraz metody ich otrzymywania. Natomiast podrozdział 2.2. został poświęcony bardziej szczegółowemu opisaniu stopów na bazie żelaza wybranych przez autora jako podmiot badań. Opisano w nim stan wiedzy z tego zakresu wskazując na istotne zalety tej grupy materiałów, zarówno mechaniczne jak i magnetyczne, oraz możliwe obszary zastosowań. Określono również podstawowe ograniczenia technologiczne z punktu widzenia możliwości otrzymywania wyrobów/półwyrobów o użytecznych rozmiarach. Podrozdziały 2.3. i 2.4. poświęcone zostały zagadnieniom związanym z technologią przyrostową wybraną przez Autora do otrzymywania wyrobów ze szkieł metalicznych. Rozdział 2.3. charakteryzuje w sposób ogólny technologię selektywnego topienia laserowego. Wskazano na istotne parametry wpływające na efekty cieplne procesu stapiania proszku oraz podstawowe zasady ich doboru z punktu widzenia zmniejszenia liczby defektów takich jak porowatość czy pęknięcia. Natomiast w rozdziale 2.4. Autor przedstawił stan wiedzy z zakresu otrzymywania metodami przyrostowymi szkieł metalicznych ze stopów na bazie żelaza, skupiając się na stosowanych parametrach i wybranych, dodatkowych aspektach technologicznych oraz ich wpływie na strukturę i właściwości otrzymanych szkieł.

Analiza stanu wiedzy została przeprowadzona w sposób poprawny i z niezbędną szczegółowością dla ilustracji zarówno znaczenia podjętych prac badawczych jak i uzasadnienia planowanych badań. Zagadnienia zostały przedstawione w logiczny sposób i pozwoliły na uzasadnienie poprawności zidentyfikowanych braków wiedzy, z którymi autor pracy planował zmierzyć się w swoich badaniach, i które zostały przedstawione w rozdziale trzecim. Pozwoliło to na sformułowanie celu pracy jako: *oceny możliwości wytworzenia metodą laserowej mikrometalurgii proszków szkieł metalicznych na bazie stopów żelaza o niskiej i wysokiej zdolności do zeszklenia oraz określenie wpływu wybranych parametrów procesu na mikrostrukturę, skłonność do powstawania defektów oraz twardość.* W rozdziale trzecim zawarto również ogólny opis zaproponowanego podejścia do osiągnięcia postawionego celu oraz ramowy plan badań. Cel pracy dobrze odzwierciedla zidentyfikowane braki w aktualnym stanie wiedzy. Jego znaczenie byłoby jednak większe gdyby pojawiły się w nim jakieś wartości skwantyfikowane. Jest to o tyle istotne, że w pracy nie zawarto tezy.

Rozdział czwarty to krótka charakterystyka dwóch wybranych stopów, jednego o niskiej i drugiego o wysokiej zdolności do zeszklenia. Jednakże uzasadnienie dla tego rozdziału nie jest w pełni jasne. Zawarte w nim charakterystyki są dość ogólnikowe i nie przedstawiają informacji istotnych dla toku

prowadzonych badań, a cały rozdział to trochę więcej niż strona opisu. Ta część pracy mogła z powodzeniem zostać włączona do ogólnej metodyki badawczej jako część uzasadnienia dla wybranych rodzajów stopów.

Kolejne dwa rozdziały, czwarty i piąty, opisują metodykę i wyniki badań osobno dla każdego z badanych stopów. W każdym z tych rozdziałów znajduje się podrozdział (odpowiednio 5.1. i 6.1.) dotyczący metodyki, który jest identyczny w obu podrozdziałach co do opisu stosowanych metod badawczych. Jedyne różnice związane są ze stosowaniem różnych marek urządzeń pomiarowych i badawczych. Uzasadnienie dla tego typu podejścia nie jest przekonujące. Znacznie bardziej przejrzyste byłoby zebranie tych danych całościowo w jednym rozdziale (podrozdziale) opisującym metodykę z podkreśleniem różnic w stosowanej aparaturze pomiarowej. Drugą kwestią związaną z prezentacją metodyki badawczej opisaną w obu podrozdziałach jest jej bardzo ogólny charakter i brak wielu informacji dotyczących szczegółów prowadzonych badań, takich jak:

- a) W badaniach metalograficznych brak jest podstawowych danych na temat stosowanych gradacji papierów oraz past diamentowych. W opisie do badań metalograficznych dla podrozdziału 6.1. nie podano informacji na temat odczynnika trawiącego. Nawet jeżeli nie byłby stosowany, taka informacja również powinna się znaleźć w postaci np. stwierdzenia, że obserwacje prowadzono na zgładach nietrawionych. Jednakże, zgodnie z opisem w podrozdziale 6.5., stosowano także zgłady trawione.
- b) W opisie mikroskopii optycznej (lub gdzie indziej w tekście) brakuje podstawowych informacji w jaki sposób badano porowatość. Lakoniczna uwaga na ten temat pojawia się w dalszej części (w podrozdziałach odpowiednio 5.4 i 6.4.), że badania prowadzono na przekrojach poprzecznych próbek. Natomiast jest to niewystarczające do zobrazowania rzeczywiście przeprowadzonych badań. Podane jest tylko, że dla każdej próbki wykonano zdjęcia w trzech przypadkowych obszarach, które następnie poddano obróbce cyfrowej w celu oceny udziału porów. Brak jest informacji przy jakim powiększeniu wykonano te zdjęcia oraz jakie narzędzia stosowano do cyfrowej ich obróbki. Również z przedstawionego opisu nie wynika czy porowatość określono na całym obszarze wykonanego zdjęcia czy w podobszarach. Jeżeli na całym obszarze, oznaczałoby to, że dla każdej próbki analizie statystycznej poddano 3 pomiary. Nie jest w takim razie jasne jak został zbudowany wykres skrzynkowy przedstawiony na rysunku 6.9.
- c) W opisie skaningowej mikroskopii elektronowej brak jest informacji o stosowanych parametrach wiązki elektronowej.
- d) W opisie badań twardości brak jest informacji o liczbie wykonanych odcisków dla każdej z próbek.

W kolejnych podrozdziałach obu rozdziałów, odpowiednio 5.2. i 6.2., przedstawiono charakterystykę użytych proszków ze stopów wybranych do badań. Są to badania istotne z punktu widzenia całego procesu technologicznego. Ponownie pierwszy akapit to powtórzenie w obu podrozdziałach identycznej metodyki przygotowania i badania dla obu typów proszków. Znacznie bardziej przejrzyste byłoby przypisanie tego do metodyki badań jednej dla obu rozdziałów. W tych samych podrozdziałach zawarto również wyniki badań stosowanych proszków obejmujące: ocenę kształtu i jednorodności, ich skład chemiczny, mikrostrukturę oraz skład fazowy. Metodyka badań jest dobrze dobrana, a ich wyniki opisane w przejrzysty sposób. Pewne wątpliwości mogą jednak budzić następujące kwestie:

- a) Dla obu stosowanych stopów wykonano badania odbijalności proszków na dyfraktometrze laserowym. Niestety nie podano danych stosowanego urządzenia. Ponadto wyniki otrzymane dla obu proszków, dość niekonsekwentnie, przedstawiono na jednym wykresie, który został zdublowany na rysunkach 5.5. i 6.5. Dodatkowo nie zostały one w żaden sposób

skomentowane w pracy (co z nich wynika, czy jest to zgodne z oczekiwaniami, jak to się ma do zastosowania wybranego lasera do przetapiania, jak wpływa na interpretację uzyskanych wyników, etc.). Ogólnie znaczenie tego badania dla całości prowadzonej pracy badawczej nie jest wyjaśnione.

- b) Dla drugiego stopu przedstawiono analizę składu chemicznego bez uwzględnienia boru, co oczywiście wpłynęło na obliczone zawartości pozostałych składników. Przedstawiony skład dość znacznie odbiega od zakładanego – znacznie bardziej niż dla pierwszego stopu. Autor nie skomentował tego w tekście, natomiast w podsumowaniu wskazał jako istotne odchyłki w składzie chemicznym, ale tylko dla żelaza i węgla. Jest to spostrzeżenie jak najbardziej prawidłowe, ale dopiero po uwzględnieniu obecności boru w analizowanym materiale. Powinno to jednak znaleźć odbicie w omówieniu otrzymanych wyników.

W kolejnych podrozdziałach 5.3. i 6.3. przedstawiono opis procesów technologicznych stosowanych do wytworzenia próbek z obu badanych materiałów. Przedstawiono ogólną charakterystykę urządzeń stosowanych do przetapiania, strategię druku próbek oraz stosowane stałe i zmienne parametry procesów. Informacje te zostały opisane dość szczegółowo, a sposoby druku wsparto poglądowymi ilustracjami. Drobną uwagę krytyczną dotyczy braku informacji o wielkości plamki lasera w podrozdziale 6.3. Ponadto w tym podrozdziale zawarto informacje o uzyskanych średnich grubościach ściegów w zależności od stosowanych parametrów procesu oraz informacje o jakości powierzchni próbek. Ponieważ w tej części badań Autor zastosował bardzo różnorodne parametry procesu i sposoby skanowania, można się domyślać, że przedstawione wyniki miały posłużyć do wyboru ostatecznego zestawu parametrów procesu do dalszych badań. Jednakże Autor nie pokusił się o bardziej szczegółowy opis otrzymanych wyników jak i o uzasadnienie dokonanego finalnie wyboru. Z przedstawionego opisu nie jest również jasne:

- a) Co to znaczy lepsza jakość powierzchni i na czym polegało cyfrowe obliczenie defektów? O jakich defektach tutaj mowa? Autor jako ilustrację pokazuje zdjęcia powierzchni dla dwóch próbek (rys. 6.8.) zakładając, że czytelnik, po pierwsze, zobaczy różnicę, a po drugie, że będzie wiedział o jakich defektach mowa. Jeżeli w sposób cyfrowy dokonano obliczeń liczby defektów, dlaczego nie pokazano skwantyfikowanych wyników, znacznie lepiej ilustrujących i potwierdzających przedstawioną konkluzję co do jakości powierzchni otrzymanych próbek, niż mało czytelne i trudne w interpretacji zdjęcia?
- b) Jakie obserwacje skłoniły Autora do wyboru takich, a nie innych parametrów obróbki wskazanych na str. 61?
- c) Na czym polegał proces przetapiania? Nigdzie w metodyce pracy nie został on opisany.

Kolejne podrozdziały (w obu rozdziałach piątym i szóstym) przedstawiają wyniki badań próbek uzyskanych przy różnych parametrach technologicznych. Kolejno omówiono: wyniki badań porowatości (podrozdziały 5.4. i 6.4.), badania mikrostrukturalne (podrozdziały 5.5. i 6.5.) oraz pomiar twardości (podrozdziały 5.6. i 6.6.). Każdy z rozdziałów kończy dyskusja wyników przedstawionych w danym rozdziale (podrozdziały 5.7. i 6.7.). Ogólnie kolejność i sposób przedstawiania oraz omawiania wyników jest poprawny. Główne zastrzeżenia budzi fakt, że dla części badań pokazano tylko wybrane wyniki, a podstawy ich wyboru nie zostały wyjaśnione. Ponadto czasami prezentacja wyników jest niewystarczająco precyzyjna, i tak:

- a) Na rys. 5.8. i 5.9. brakuje wyników badań porowatości dla mocy lasera 140 W i szybkości skanowania 700 mm/s, dla mocy lasera 160 W i szybkości skanowania 700 oraz 900 mm/s oraz dla mocy lasera 100 W i prędkości skanowania 1000 mm/s. W tekście brak jest informacji o przyczynach pominięcia wyników dla tych próbek.



- b) Na rys. 5.12. dobrze byłoby dopisać, jaka to jest próbka (parametry) lub wskazać, że jest to ta sama próbka co na rys. 5.11.
- c) Na rys. 5.13. zamiast określić niską i wysoką gęstość energii, dobrze byłoby podać wartości tych gęstości. Zwłaszcza, że pojęcia niska i wysoka gęstość energii zdają się być dość subiektywne. Zgodnie z opisem w tekście, próbki zilustrowane na dyfraktogramach (rys. 5.13.) to te same próbki, których mikrostruktury pokazano na rys. 5.10. O ile próbka druga to rzeczywiście próbka o najwyższej gęstości energii spośród badanych ( $85,7 \text{ J/mm}^3$ ), o tyle próbka pierwsza jest z zakresu średniego ( $50 \text{ J/mm}^3$ ). Czy w takim razie dla próbek o mniejszej gęstości energii udało się uzyskać strukturę amorficzną lub czy przynajmniej obserwowano mniej wydzieleni faz krystalicznych?
- d) Czy na mikroskopie skaningowym badano tylko jedną próbkę, przedstawioną na rys. 5.11.? Zgodnie z informacją w tekście na str. 48, Autor pisze, że wykryto obecność 3 stref w całej grupie stopów Fe-Zr-Si-Cu (*for the Fe-Zr-Si-Cu group alloy*). Jeżeli było to charakterystyczne dla wszystkich otrzymanych próbek niezależnie od stosowanych parametrów to jest to informacja warta podkreślenia. Natomiast nie jest to konieczne takie oczywiste patrząc na przykładowe dyfraktogramy pokazane na rys. 5.13. Widać wyraźnie, że gęstość energii wpływa na ilość wydzieleni faz krystalicznych, więc pewnie byłoby to daleko idące uproszczenie.
- e) Co się stało z wynikami twardości dla próbek otrzymanych przy parametrach: 140 W i 700 mm/s oraz 160 W i 700 oraz 900 mm/s (rys. 5.14)? Jeżeli z jakiegoś powodu nie zostały wykonane to informacja o tym powinna się znaleźć w opisie.

W dyskusji wyników dla rozdziału piątego (str. 53), Autor odnosi się do kształtu por, które nie były w żaden sposób omawiane w podrozdziale dotyczącym porowatości. Tego typu obserwacje powinny znaleźć odbicie w przedstawionych w pracy wynikach. Podobnie w dyskusji wyników w rozdziale szóstym jest szereg spostrzeżeń, których podstawy również nie zostały właściwie udokumentowane:

- a) Z jakich badań wynika, że kształt proszku użytego do druku ma wpływ na jednorodność rozkładu proszku?
- b) Autor sugeruje, że obserwowana porowatość gazowa proszku o wysokiej zdolności do zeszklenia może stanowić dodatkowy czynnik zwiększający porowatość otrzymanego materiału. Jednakże porównując porowatości uzyskane dla tego materiału są one wyraźnie niższe lub porównywalne do porowatości mierzonej dla proszków o niższej zdolności do zeszklenia, a tam nie wskazywano na obecność porów w proszku.
- c) Na str.70 Autor stwierdził, że niska odbijalność proszku pozwala na zastosowanie mniejszego prądu lasera (lower laser current), jednakże taki parametr nigdzie w tekście się nie pojawił. Jeżeli niska odbijalność (większa absorpcja) sprzyja lepszemu przetopieniu, powinno to również wpłynąć na niższą porowatość.
- d) Na tej samej stronie, Autor również stwierdza, że na podstawie przeprowadzonych badań można wnioskować, że proporcja szybkości skanowania do mocy lasera ma największy wpływ na porowatość. Niestety taki parametr nie został zaprezentowany na żadnym wykresie.

Rozdział siódmy stanowi podsumowanie wszystkich przeprowadzonych badań. Autor podejmuje w nim próbę porównania obu stosowanych materiałów pod względem badanych charakterystyk, wykazując jednocześnie na osiągnięcie postawionego celu. Jednakże Autor ponownie nie ustrzegł się kilku sformułowań, które nie były odzwierciedlone w prezentowanych wynikach badań:

- a) We wstępie Autor m.in. stwierdza, że przeprowadzone badania pozwoliły na osiągnięciu 4. poziomu gotowości technologicznej – walidację w skali laboratoryjnej. Byłoby to bardziej wiarygodne gdyby w celach pracy określono jaki jest mierzalny cel badań. Doradzałabym

ostrożność w formułowaniu tego typu wniosków, gdyż definicja poziomu gotowości powinna przekładać się na weryfikację jakościowo-ilościową technologii.

- b) W części dotyczącej jakości proszku, Autor mówi o rzeczach, które nie były omówione w tekście np. że proszek był przesiewany kilkakrotnie co zmniejszyło udział wydłużonych cząstek w przypadku proszku stopu  $\text{Fe}_{45}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2\text{Ni}_3$ . W pracy nie zaprezentowano wyników badań nad efektami przesiewania w odniesieniu do kształtu proszku.
- c) Ponownie omawiana jest sprawa odbijalności badanych materiałów dla stosowanego światła laserowego. Oba proszki różnią się tą wartością, ale Autor nie wspomina jakie to ma znaczenie z technologicznego punktu widzenia lub z punktu widzenia otrzymanych wyników.
- d) W analizie rodzaju porowatości, Autor przedstawia obserwacje, takie jak np. dominujący kształt por w próbce, tworzenie klastrów, etc. Nigdzie w tekście nie było to wcześniej ani omawiane ani ilustrowane dowodami badawczymi. Również przy omówieniu porowatości, wspomniane jest, że szczególnie należy unikać por o średnicach powyżej 30  $\mu\text{m}$ . Czy Autor analizował mikrostrukturę próbek pod tym kątem?
- e) Skąd wzięta została wartość 0,57% dla porowatości gazowej? W jaki sposób zostało to określone? Nigdzie wcześniej w prezentowanych wynikach badań nie było mowy o rozróżnieniu porowatości. Wykresy dotyczące porowatości jak i stosowana metodyka jej wyznaczania mają charakter globalny. W jaki sposób rozróżniono te typy porowatości?
- f) Czy przy pomiarach twardości obserwowano odciski czy też zdano się całkowicie na system automatyczny twardościomierza? Obecność porów może w istotny sposób wpływać na odczyty twardości i należałoby to wyjaśnić obserwując uzyskane odciski. Autor wprowadzie twierdzi, że badania przeprowadzono w obszarach wolnych od por i pęknięć, ale nie wspomina jak to sprawdzono. Pory i pęknięcia mogą być podpowierzchniowe i wpływać na zafałszowanie odczytów twardości w całym obszarze naprężeń wywołanych pomiarem.
- g) Na str. 77 pojawia się niejasne sformułowanie. Co to znaczy, że na twardość wpłynął wzrost "*in the medium-range order of clusters as result of the supplied energy*"? O jakie klastry tu chodzi?
- h) Mam również wątpliwości co do sformułowania, że dla mocy lasera 160 i 180 W (rys. 6.18.) twardość maleje wraz z obniżaniem prędkości skanowania. Patrząc na rozrzuty otrzymanych wartości twardości, trudno jest szukać tego typu trendu, gdyż moim zdaniem wszystkie te twardości są w takim samym zakresie. Jedyną znacząco wyższą twardość jest dla parametrów 180 W i 1000 mm/s.

Wartościowym efektem pracy jest zestawienie charakterystyk obu stopów zawarte w Tabeli 7.1. Stanowi przejrzyste podsumowanie przeprowadzonych badań i może służyć jako szybka ocena badanych stopów. Drobna uwaga dotyczy wstawionych wartości. Dlaczego wyodrębniono zakresy mocy lasera poniżej 120 W i powyżej 160 W? A co z wartościami od 120 do 160 W?

Autor przeprowadził bardzo szerokie badania technologiczne poparte badaniami materiałowymi. Myślę, że pozwoliłyby one na sformułowanie szeregu zaleceń co do wytycznych dla przeprowadzania proponowanych procesów technologicznych, np. pod kątem wytworzenia kształtek ze stopu o oczekiwanych właściwościach. Czy zadaniem Autora jest to możliwe?

W rozdziale ósmym zawarto czternaście wniosków. Dobrze odzwierciedlają one zakres przeprowadzonych badań. Jednakże, czasami sformułowania przyjęte we wnioskach są zbyt ogólne, co może powodować, że stają się kontrowersyjne. Mam następujące uwagi szczegółowe do niektórych wniosków:

- a) Wniosek drugi nie do końca był poparty prezentowanymi wynikami badań. Jak wspomniałam wcześniej wartości porowatości uzyskiwane dla materiału o niższej zdolności do zeszklenia były

- w zdecydowanej większości procesów wyższe od tych uzyskanych dla materiału o większej zdolności do zeszklenia. A to w tym ostatnim stwierdzono porowatość w stosowanym proszku.
- b) Wniosek czwarty dotyczący wpływu wielkości wysp na liczbę pęknięć jest sformułowany zbyt ogólnie. Należałoby doprecyzować jak wielkość wysp wpływa na liczbę pęknięć (rosnąco czy malejąco). Ponadto, dla próbek o rozmiarach wysp 3x3 mm nie pokazano liczby pęknięć i gdzie zostały zainicjowane. Jeżeli liczba pęknięć jest uwarunkowana wielkością wysp, gdyż inicjacją pęknięć są miejsca styku wysp, czy to oznacza, że im większe wyspy tym lepiej? W takim razie po co stosować strategię wyspową? Jednolite skanowanie bez wysp powinno być więc rozwiązaniem zmniejszającym liczbę pęknięć.
  - c) Jakiej grupy stopów dotyczy wniosek ósmy? Czy także dla stopu o dużej zdolności do zeszklenia? Zgodnie z danymi przedstawionymi w pracy dla tego badanego stopu otrzymano materiał amorficzny dla wszystkich stosowanych mocy do 140 W łącznie. Dla 160 W pojawiły się pierwsze fazy krystaliczne, ale dopiero przy niższych szybkościach skanowania. Dla 180 W wyników nie pokazano. Czyli ta zależność nie jest tak prosta jak to przedstawiono we wniosku i nie tylko moc wpływa na mikrostrukturę. Może należałoby dokładniej przeanalizować zależność od gęstości objętościowej energii, tak jak to miało miejsce dla stopu o niskiej zdolności do zeszklenia, do czego częściowo odwołuje się Autor we wniosku dziewiątym?
  - d) Wniosek dziewiąty jest zbyt ogólnym komentarzem, który nie został oparty na wynikach pokazanych w pracy. Może należałoby to lepiej udokumentować. Brak zależności jest również wartościowym wynikiem, ale należy go pokazać.
  - e) Wnioski dwanaście i trzynaście są ponownie bardzo ogólnikowe. Nie wiadomo, czy dotyczą obu badanych stopów czy tylko któregoś z nich. Specyficzne wnioski dotyczące pęknięcia badanych stopów w stosowanym procesie byłyby bardziej wartościowe. Ponadto zalecenia co do sposobów uniknięcia pęknięć mają tylko charakter spekulacyjny, gdyż nie zostały potwierdzone w pracy.
  - f) Wniosek czternasty jest bardzo lakoniczny i nie przedstawia jaki rodzaj zależności ma autor na myśli. Należałoby doprecyzować jaka zależność twardości od mocy lasera jest obserwowana dla jednego i drugiego badanego stopu.

Ostatni rozdział dotyczy bibliografii wykorzystanej w pracy. Liczy ona 161 pozycji. Jedna z pozycji to praca Autora. Literatura jest bieżąca i poprawnie dobrana.

#### **Charakterystyka strony redakcyjnej rozprawy**

Praca napisana jest w języku angielskim. Język jest prosty, w większości dobrze zrozumiały. Stosowana terminologia techniczna jest poprawna. Drobna uwaga dotyczy terminu *spectrum* użytego w odniesieniu do widm dyfrakcyjnych, gdzie bardziej poprawnym jest *pattern* (rys. 5.4., 5.13., 6.4., 6.13.). Ogólnie praca od strony edycyjnej jest dobrze przygotowana. Drobne uwagi/sugestie mogą dotyczyć następujących aspektów:

- a) Bardziej właściwym tytułem dla akapitów podrozdziałów 5.1. i 6.1. byłaby np. preparatyka próbek do badań metalograficznych. Nawiązywałoby to lepiej do tytułów pozostałych akapitów, które bazowały na określonych technikach badań. Określenie metalografia jest dość ogólne i przecież do badań metalograficznych wykorzystywano zarówno mikroskopię optyczną jak i elektronową, opisane w innych akapitach.
- b) Dobrym zwyczajem jest dodawanie w podpisie rysunku przedstawiającego mikrostrukturę jaką techniką zdjęcie zostało uzyskane (rys. 5.2., 5.3., 5.10., 5.11., 6.2., 6.3., 6.8., 6.11., 6.12.).
- c) Ponadto wskazane jest podawanie informacji identyfikujących próbkę/próbki, których charakterystyki podawane są na rysunkach, niezależnie od informacji w tekście, gdyż poprawia to odbiór tekstu przez czytelnika – rys. 6.8.

- d) W przypadku wzoru, jego czytelność poprawiłoby zawarcie opisów do użytych symboli bezpośrednio pod wzorem i zastosowanie takiej samej czcionki do ich oznaczenia – w opisie i we wzorze.
- e) Również dobrym zwyczajem jest stosowanie podobnych sposobów prezentacji wyników na rysunkach, zwłaszcza w przypadku wyników, które mogą podlegać porównaniu. Ułatwia to ich analizę i wyciąganie wniosków. Przykładem takich rozbieżności mogą być rysunki 5.9. oraz 6.9. i 6.10. przedstawiające wyniki pomiaru porowatości w zależności od mocy lasera i szybkości skanowania. Na rys. 5.9. na osi x jest moc lasera, a na dwóch pozostałych szybkość skanowania. Analogiczna sytuacja jest dla przedstawionych wyników twardości na rysunkach 5.14 oraz 6.17 i 6.18.
- f) Na zdjęciach pokazanych na rysunku 6.12. pojawiają się czerwone ramki, których znaczenie nie zostało wyjaśnione.
- g) Przy pomiarach twardości, których wyniki pokazano na rys. 6.18. zastosowano inne oznaczenia dla próbek przetopionych niż na rysunku prezentującym badania porowatości – rys. 6.10.
- h) Przedstawione opisy bibliograficzne nie są do końca ujednoczone. Część pozycji nie ma wstawionych stron (poz. 9, 20, 22, 55, 59, 60, 75, 82, 83, 86, 87, 88, 96, 98, 101, 103, 104, 105, 109, 110, 112, 113, 114, 116, 117, 119, 127, 129, 130, 131, 132, 133, 150, 154, 157), w innych jest tylko pierwsza strona (poz. 3, 18, 21, 23, 31, 40, 69, 71, 72, 91, 106, 115, 128, 134, 145, 146,, 147, 151, 152, 153), natomiast w poz. 32 i 132 brak jest rocznika. Ponadto dobrym zwyczajem jest podawanie odwołania do stron w cytowanych książkach.

#### Podsumowanie

Tematyka poruszana w doktoracie dotyczy problemu technologicznego ważnego zarówno z naukowego jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Doktorant zaproponował oryginalne podejście technologiczne do otrzymywania materiałów takich jak szkła metaliczne o różnej zdolności do zeszklenia i wykazał jego skuteczność dla wybranych dwóch materiałów – stopów żelaza, które jeszcze nie były otrzymywane tą metodą. Przebadął proces technologiczny wytwarzania obu materiałów dla szerokiego zakresu mocy lasera oraz szybkości skanowania. Określił podstawowe charakterystyki obu badanych materiałów z punktu widzenia ich otrzymywania na drodze selektywnego topienia laserowego oraz z punktu widzenia potencjalnych zastosowań. Uzyskane wyniki stanowią oryginalne osiągnięcia technologiczne i naukowe w obszarze dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Autor wykazał się wiedzą i umiejętnościami niezbędnymi dla dobrania i analizy źródeł literaturowych, ich oceny oraz sformułowania celu naukowego. Zaproponował i zrealizował plan działań technologicznych i badawczych pozwalający na osiągnięcie postawionego celu naukowego. W swoich badaniach Doktorant wykazał się umiejętnością włączenia strukturalnych badań materiałowych do planu badań i szukania nie tylko zależności technologicznych, ale również głębszego uzasadnienia dla obserwowanych zjawisk od strony materiałowej.

Wprawdzie otrzymane materiały nie były wolne od pęknięć, co rzutuje na bezpośrednie wykorzystanie zaproponowanej technologii w praktycznych zastosowaniach, niemniej jednak Doktorant przeprowadził krytyczną analizę otrzymanych wyników i zaproponował drogi wdrożenia z sukcesem zaproponowanej technologii, wytyczając tym samym dalsze kierunki badań. Otrzymane na tym etapie wyniki stanowią istotny wkład w rozwój tej technologii i dalsze wykorzystanie szkieł metalicznych w budowie maszyn.

Do słabszych stron pracy należą niedociągnięcia w zakresie dokumentowania prowadzonych badań, głównie w zakresie niewystarczająco szczegółowego przedstawiania metodyki pracy i niepełnej



dokumentacji prowadzonych badań oraz ograniczonych uzasadnień dla przyjętych parametrów i dokonywanych wyborów.

Pomimo szeregu uwag krytycznych, uważam, że oceniana praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z obszaru wykorzystania selektywnego topienia laserowego do otrzymywania nowych materiałów, a tym samym przedstawia istotny wkład w dyscyplinę inżynieria mechaniczna. Ponadto doktorant wykazał się ogólną i specyficzną wiedzą teoretyczną z tej dyscypliny oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Przedstawione przeze mnie w recenzji uwagi krytyczne w głównej mierze dotyczą sposobu prezentacji wyników oraz stosowanej argumentacji w dyskusji naukowej i często mają charakter dyskusyjny. Mam nadzieję, że Doktorant wykorzysta je w dalszej pracy naukowej.

#### **Wniosek końcowy**

***Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim zawartym w ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. 2022 poz. 574 z późniejszymi zmianami) i na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Łukasza Szczepańskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej na Politechnice Wrocławskiej.***

Jolanta Baranowska

