

Łódź, dn. 27.09.2022 r.

Dr hab. inż. Dorota Bociąga, prof. uczelni  
Zakład Inżynierii Biomedycznej i Materiałów Funkcjonalnych  
Instytut Inżynierii Materiałowej  
Wydział Mechaniczny Politechniki Łódzkiej  
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-537 Łódź, Polska

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgr inż. Viktorii Hoppe**

pt. „Opracowanie selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków dla stopu  
Ti-13Nb-13Zr na potrzeby medycyny weterynaryjnej”

Promotor: dr hab. inż. Bogdan Dybała, prof. uczelni

Drugi promotor: prof. dr hab. Maciej Janeczek

Promotor pomocniczy: dr inż. Patrycja Szymczyk-Ziółkowska

Niniejsza recenzja została wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady  
Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna w Politechnice Wrocławskiej Prof. dr hab. inż.  
Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 15 lipca 2022 roku (pismo nr W10/D/55/2022).

## 1. UWAGI OGÓLNE O TEMATYCE ROZPRAWY

---

### 1.1. Znaczenie problematyki podjętej w recenzowanej rozprawie

Przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska przygotowana przez Panią mgr inż. Viktorię Hoppe jest opracowaniem, które oceniam bardzo pozytywnie. Jest to praca stanowiąca dowód biegłego poruszania się Autorki po etapach planowania i przeprowadzania badań, analizy danych i formułowania wniosków. Praca stanowi kompleksowe opracowanie ścieżki badawczej, począwszy od materiału w stanie dostarczenia, przez wytwarzanie z niego proszku, opracowanie parametrów procesu selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków (L-PBF, z ang. Laser - Powder Bed Fusion) po analizę porównawczą zmian występujących po procesie przetwarzania przyrostowego w odniesieniu do materiału wytwarzanego w sposób konwencjonalny. Mając na uwadze fakt, że badania dotyczą stopu Ti-13Nb-13Zr, którego właściwości pretendują go do bycia silną konkurencją w zastosowaniach biomedycznych dla powszechnie wykorzystywanych stopów tytanu Ti-6Al-4V oraz Ti-6Al-7Nb, temat niniejszej rozprawy jest tym bardziej aktualny i istotny. W związku z powyższym, podjęcie przez Doktorantkę badań nad możliwościami przetwarzania stopu Ti-13Nb-13Zr z wykorzystaniem technologii L-PBF pod kątem zastosowań na spersonalizowane implanty weterynaryjne, uważam za uzasadnione i przyczyniające się do rozwoju zarówno nauk inżyniersko-technicznych, jak i nauk rolniczych w zakresie medycyny weterynaryjnej. Niniejsza rozprawa dotyczy bowiem zakresu prac nad uzyskaniem jak najlepszego materiału do wykorzystania w technologiach addytywnych, które dają bardzo duże możliwości rozwoju medycyny spersonalizowanej zarówno dla ludzi, jak i zwierząt.

Realny rozwój prowadzący do otrzymywania rynkowych wyrobów wspomagających medycynę i weterynarię leży w zakresie jednoczesnego rozwoju materiałów oraz technik wytwarzania. W większości przypadków opracowania literaturowe traktują te zakresy odrębnie. To sprawia, że nie ma rzeczywistego przeniesienia wyników badań na możliwość uzyskania produktów rynkowych. Praca mgr inż. Viktorii Hoppe w holistyczny sposób traktuje o badaniach nad możliwościami przetwarzania stopu Ti-13Nb-13Zr z wykorzystaniem technologii selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków, wskazując jednocześnie na istotę szczegółowej walidacji właściwości chemicznych, fizycznych, mechanicznych oraz odpowiedzi biologicznej pod kątem zastosowań na implanty spersonalizowane.

### 1.2. Cel i teza rozprawy

W oparciu o analizę literatury Doktorantka postawiła tezę pracy: *„Materiał oparty na stopie w układzie Ti-Nb-Zr przetwarzany z zastosowaniem technologii L-PBF umożliwia otrzymanie składu stechiometrycznego odpowiadającego materiałowi Ti-13Nb-13Zr zgodnie z normą ASTM F-1713 i charakteryzuje się zespołem własności mechanicznych, bioelektrycznych i fizykochemicznych powierzchni umożliwiających zastosowanie do wytwarzania implantów kostnych dla medycyny weterynaryjnej.”*

W odniesieniu do powyższej tezy celem naukowym rozprawy doktorskiej mgr inż. Viktorii Hoppe było „*opracowanie kompleksowej metody wytwarzania i badania własności funkcjonalnych oraz biofizykochemicznych materiału Ti-13Nb-13Zr przetworzonego z zastosowaniem technologii L-PBF do wytwarzania materiałów na potrzeby medycyny weterynaryjnej*”.

Aby osiągnąć cel pracy, a tym samym udowodnić jej tezę, mgr inż. Viktoria Hoppe zaproponowała i zrealizowała bardzo obszerny i trafnie dobrany 7-etapowy plan badawczy. Obejmował on analizy materiału Ti-13Nb-13Zr w postaci litej (stan dostarczenia), w postaci proszku uzyskanego po procesie atomizacji gazowej (EIGA) oraz próbek otrzymanych w procesie selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków (L-PBF). Doktorantka zaproponowała metody modyfikacji powierzchni stopu i analizowała ich wpływ, w tym również oceniała cytotoksyczność na modelu *in vitro*, weryfikowała właściwości mechaniczne, fizykochemiczne i bioelektryczne stopu po procesie L-PBF.

Podsumowując, tematyka rozprawy dotyczy współczesnych wyzwań materiałowych, technicznych i technologicznych. Jest zatem aktualna i atrakcyjna zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Doktorantka jasno przedstawiła problem badawczy i cel pracy, zaproponowała koncepcję jego rozwiązania i szeroki zakres analiz, które pozwoliły jej potwierdzić postawioną tezę i wypełnić lukę poznawczą w ścieżce badawczej obejmującej zmiany w materiale występujące na każdym etapie przetwarzania stopu Ti-13Nb-13Zr.

## **2. FORMALNA STRONA ROZPRAWY**

---

### **2.1. Struktura rozprawy i wykorzystana literatura**

Recenzowana rozprawa liczy 175 stron i jest podzielona na 14 rozdziałów. Zawiera wykaz akronimów, streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści, tabel i rysunków oraz wykaz literatury, na który składa się 214 pozycji.

Układ pracy jest przejrzysty, a zawarte w niej treści są poprawnie rozdzielone i stanowią o jej czytelności. Treści kolejnych rozdziałów i podrozdziałów w sposób przejrzysty prowadzą przez etapy poznawania tematu oraz realizacji pracy, tworząc logiczny ciąg myślowy. Rozdział VI pracy, zatytułowany „Aktualny stan wiedzy”, jest dobrym wprowadzeniem w tematykę rozprawy oraz uzasadnieniem istotności podjętego zagadnienia badawczego. Dodatkowo, zakończenie go krótkim podrozdziałem VI.5 pt. „Podsumowanie analizy literatury” esencjonalnie podkreśla, co stanowi luki poznawcze i wskazuje, jakie działania zostały podjęte w pracy w kierunku ich wypełnienia.

Analiza aktualnego stanu wiedzy, zawarta w pracy w rozdziale VI, dotyczy głównie trzech obszarów: stopów tytanu, technologii przyrostowych oraz implantów weterynaryjnych, które stanowiły istotę niniejszej rozprawy. Rozdział VII stanowi opis celu pracy. Rozdział VIII pt. „Metodyka badań” rozpoczyna się od zaprezentowania i wyjaśnienia planu badań technologicznych i materiałowych oraz opisanie technik badawczych wykorzystanych w pracy wraz z podziałem względem analizowanych właściwości. W rozdziale IX Doktorantka opisuje

badania eksperymentalne dla stopu Ti-13Nb-13Zr, które podsumowuje w rozdziale XI. Osobny rozdział (X) Doktorantka poświęciła analizie możliwości zastosowania materiału Ti-13Nb-13Zr po procesie L-PBF w medycynie weterynaryjnej. Wnioski końcowe (rozdział XII) zostały przez Autorkę podzielone na podsumowanie dotyczące wniosków o charakterze poznawczym oraz użytecznym (praktycznym), co stanowi wartościowy aspekt pracy.

Pracę uzupełnia spis literatury. Zdecydowana większość cytowanej literatury pochodzi z ostatniego dziesięciolecia i są to głównie publikacje pochodzące ze znaczących czasopism naukowych. Liczba przeanalizowanych publikacji, bardzo dobry ich dobór, jak i wartość merytoryczna wykorzystanego materiału świadczy zarówno o dużych umiejętnościach, jak i swobodzie poruszania się w fachowej literaturze naukowej przez Doktorantkę. Warty podkreślenia jest fakt, że wśród przytoczonych artykułów są również takie, w których Doktorantka jest pierwszym autorem (poz. 80, 81, 82) i są to pozycje w periodykach naukowych o wysokim wskaźniku wpływu (tzw. *Impact Factor (IF)*).

W zakresie literatury wątpliwość Recenzenta budzi kilka kwestii. W tradycyjnym układzie pracy pozycje literaturowe przytaczane są, a tym samym numerowane, kolejno, poczynając od przeglądu literatury uzasadniającej podjęcie danego zagadnienia badawczego, przez odniesienia mające na celu porównanie uzyskiwanych wyników z wynikami innych zespołów badawczych, aż po wnioski i podsumowanie. W pracy mgr inż. Viktorii Hoppe numeracja literatury przedstawiona jest w sposób, który tej zależności nie odzwierciedla – pierwszy odnośnik w rozprawie, który występuje w rozdziale „Wstęp” wskazuje na pozycje literatury nr 46, 97 oraz 147. Natomiast w rozdziale VI pt. „Aktualny stan wiedzy” Doktorantka wprowadza pierwszy odnośnik do pozycji numer 149. Pewien niedosyt budzi również fakt, że prezentując w pracy opracowania tabelaryczne, czy rysunki, Doktorantka nie podaje przy nich odnośnika literaturowego do artykułów własnego autorstwa, pomimo, że przytaczane zestawienia i zdjęcia są identyczne z tymi zamieszczonymi w publikacjach. Źródła te należałoby zatem każdorazowo wskazać.

## **2.2. Język i formalna strona rozprawy**

Praca stosuje się do podstawowych zasad typografii i charakteryzuje się bardzo dobrym poziomem edytorskim. Zawiera 29 tabel, które w większości przypadków stanowią zestawienie otrzymanych wyników oraz 54 rysunki, które nie tylko wzbogacają pracę, ale w dużej mierze dają dobry pogląd na wykonane i analizowane próbki, prowadzone eksperymenty oraz uzyskane wyniki. W niektórych przypadkach opisy zastosowane dla tabel i rysunków są zbyt ogólnikowe, co nieco utrudnia sprawną analizę wyników. W tym elemencie występują też rozbieżności między objaśnieniem rysunku, a jego opisem w treści pracy (np. Rysunek 31, gdzie opis podaje, że jest to „*Analiza zależności średnicy cząstek od sferyczności...*”, natomiast w treści wskazano: „*Analiza zależności średnicy porów of ich sferyczności...*”). Ponadto, oznaczenia i/lub legendy na niektórych wykresach są nieczytelne (np. Rys. 26 b (s. 94), Rys. 29 a (s. 95), Rys. 42 (s. 117)), bądź wyniki podawane z różną

dokładnością (Rys. 41 (s. 116)). W pracy zabrakło również wyjaśnienia niektórych skrótów (typu: XCT (s. 60), Mo-Eq (s. 90), SLA (s. 113, ECM (s. 120)).

Język pracy jest właściwy dla opracowań naukowych. Jak w każdym tego typu opracowaniu, również i w pracy przedstawionej przez mgr inż. Viktorię Hoppe można wskazać pewne usterki, jak chociażby wyrażenia będące specjalistycznym żargonem oraz lapsusy w zakresie interpunkcji, odmiany, powtórzeń, czy też szyku zdań zmieniającego znaczenie przekazu (np. „*wielkość proszku*” (s. 51), „*przeprowadzono szereg badań mechanicznych i funkcjonalnych pod kątem cytotoxycywności stopu*” (s. 58), „*test kalometryczny*” (s. 58), „*Analiza zawartości pierwiastków lekkich została wyznaczona z wykorzystaniem analizatorów*” (s. 58), „*Test został przeprowadzony prędkości trawersy*” (s. 61), „*test zginania statycznego na podstawie na normie*” (s. 62), „*Komórki pozostawiono..., aby przykleiły się*” (s. 64), „*Eksperyment opisany został opisany*” (s. 76), „*wysokich czasów naświetlania*” (s. 82), „*w procesie L-PBF mogą powstawać porowatości*” (s. 96), „*pomiary twardości, mają na celu określenie twardości*” (s. 99), „*cytotoksycywność jako test*” (s. 119), „*w badaniach in vivo wykorzystujących linie komórkowe osteoblastów i fibroblastów*” (s. 140), „*uzyskanych wyników wynikających*” (s. 146), „*szerokie badania in vitro*” (s. 146), „*Za zadowalający rezultat uważa się uzyskanie średniej gęstość względną materiału*” (s. 148)). Ponieważ kontekst przekazywanej treści jest możliwy do zrozumienia, nie są więc one dużymi uchybieniami, niemniej jednak warto w przyszłości zadbać w szczególności o poprawność sformułowań, jako że mogą budzić wątpliwości interpretacyjne. Powyższe nie niweczy jednak bardzo dobrego odbioru całościowego rozprawy od strony językowej i edytorskiej. Wiadomo bowiem, że usterki, takie jak te wskazane przeze mnie powyżej, zdarzają się nawet w prestiżowych wydawnictwach po dwukrotnej profesjonalnej korekcie wydawniczej oraz korekcie autorskiej, stąd w mojej opinii nie należy przywiązywać do nich dużej wagi, aczkolwiek na potrzeby sporządzenia niniejszej recenzji należało również o tym aspekcie wspomnieć.

### **3. OCENA MERYTORYCZNA**

---

Pod względem merytorycznym praca zasługuje na pozytywną ocenę, niemniej jednak warto poczynić pewne szczegółowe zastrzeżenia i uwagi, które pomogą Doktorantce odpowiednio ukierunkować swoje przyszłe badania i dopracować warsztat badawczy.

Część dotycząca przeglądu literatury w recenzowanej rozprawie doktorskiej zawiera wszystkie istotne elementy, w tym uzasadnienie wyboru tematyki pracy, z której wynika teza i cel rozprawy. Wprowadzenie wykazu akronimów zapewnia przejrzystość terminologiczną. Doktorantka bardzo starannie wyselekcjonowała zakres przytoczonej literatury. Analiza aktualnego stanu wiedzy została dokonana z dużym rozmysłem i zaprezentowana w sposób syntetyczny, co postrzegam jako dużą zaletę niniejszej pracy.

Część doświadczalna stanowi przeważający zakres pracy (ok. 2/3 jej części), a Autorka rozprawy rozpoczyna ją od podania informacji o wybranych metodach badawczych użytych

w trakcie realizacji rozprawy. Przy czym to wyniki analizy, a nie technika, determinują możliwość oceny, z jakiego rodzaju zjawiskami mamy do czynienia i czy materiał można zakwalifikować do dalszych badań, dlatego bardziej zasadnym byłoby nadanie rozdziałom tytułów, które mówią o tym, jaka właściwość jest analizowana, zamiast wskazywania, jaka technika była użyta. Tymczasem tytuły niektórych rozdziałów bardzo dobrze to określają (np. „VIII.3. Ocena morfologii i własności reologicznych materiałów proszkowych”), podczas gdy inne wskazują tylko technikę (np. „VIII.6. Badania z zastosowaniem tomografii komputerowej (CT)”, „VII.10. Spektroskopia Ramana”).

Na uznanie i podkreślenie zasługuje fakt, że badania dla stopu Ti-13Nb-13Zr zostały przeprowadzone przez mgr inż. Viktorię Hoppe w sposób kompleksowy, tj. analizowany był materiał wyjściowy (lity w postaci ciągnionego pręta), z którego uzyskano proszek wytworzony w procesie atomizacji gazowej połączonej z procesem topienia beztygłowego (EIGA) i który badano pod kątem morfologii, wielkości cząstek, ich dystrybucji, refleksyjności, sypkości w warunkach dynamicznych oraz porowatości. Finalnie testom podlegały próbki wytworzone w procesie L-PBF (z użyciem wcześniej scharakteryzowanego i odpowiednio przygotowanego proszku), który optymalizowano w zakresie takich parametrów, jak: moc lasera, czas ekspozycji, odległość między punktami skanowania oraz kolejnymi liniami skanowania, prędkość skanowania oraz liniowa gęstość energii, aby uzyskać próbki, których gęstość względna będzie jak najbliższa 100%. Taki cykl badań daje pełen pogląd na to, na jakim etapie, w efekcie jakiego procesu i jakie zmiany zachodzą w materiale. Dzięki temu można wprowadzać celowane modyfikacje optymalizacyjne, aby końcowy produkt spełniał stawiane mu wymagania. Zgadzam się z Doktorantką, że w literaturze istnieje tendencja do podawania składu chemicznego materiału bazowego, z którego wytwarzany jest proszek, z pominięciem analizy zmian tego składu spowodowanych procesem termicznym takim jak atomizacja, czy też natryskiwanie strumieniem plazmy. Trudno też wyciągnąć jednoznaczne wnioski z analizy literatury, nawet w zakresie konkretnego stopu, chociażby ze względu na fakt, że do analizy brane są materiały o różnej wielkości ziaren proszku, a dywersyfikacji podlegają nie tylko metody wytwarzania proszków, ale i parametry w zakresie wskazanej metody. Skoncentrowanie się Doktorantki na jednym stopie Ti-13Nb-13Zr i przeanalizowanie dla niego całej ścieżki przetwórczej i wytwórczej z wykorzystaniem procesu L-PBF, wraz z analizą możliwości zastosowania tego materiału w medycynie weterynaryjnej (co zostało szeroko przeanalizowane i opisane w rozdziale X), daje efekt w postaci poznawczej procesów obróbki tego materiału, jego właściwości i możliwości aplikacyjnych na każdym etapie przetwarzania i stanowi dużą wartość zarówno pod kątem naukowym, jak i wdrożeniowym.

Do tej części rozprawy mam następujące pytania i drobne uwagi natury merytorycznej i edycyjnej:

1) Pewien niedosyt budzi fakt, że do porównania dostępnych w literaturze badań traktujących o przetwarzaniu stopu Ti-13Nb-13Zr metodą L-PBF Doktorantka nie wzięła pod uwagę prac po

2019 roku – wszystkie przywołane pozycje datowane są do tego rocznika. Ponadto, zestawienie w tabeli nr 3 (s. 52) przywołuje pozycję [52] jako zgłoszenie patentowe, ale nie są dla tej pozycji podane żadne dane. Pozycja [52] jest artykułem, a zatem można z niej wyczytać parametry, a nawet gdyby powoływać się na patent (do którego nie ma bezpośredniego odnośnika), to musiał on mieć zgłoszenie przed ukazaniem się publikacji, co oznacza, że jego treść jest już dostępna i z tego źródła również można skorzystać do wyczytania danych. Podanie w tabeli pozycji i nie wskazanie danych prowadzi do sytuacji, w której to czytający jest zmuszony sam te dane odszukać, co nie powinno mieć miejsca w tego typu pracy.

2) Z czego wynikał fakt, że do różnych badań właściwości mechanicznych przyjmowano różną liczbę próbek? W opisie wskazano, że do statycznej próby rozciągania oraz statycznej próby ściskania wykorzystano 10 próbek litych (choć wykres 32 i 34 wskazują na wykonanie pomiarów dla pięciu próbek), a do próby zginania było ich już tylko 5. Z kolei dla próbek wytwarzanych metodą L-PBF użyto tylko po 5. Z dużym brakiem poznawczym wiąże się fakt, że nie przeprowadzono statycznej próby rozciągania dla próbek wytworzonych metodą L-PBF w orientacji 90°, tym bardziej, że (jak konkluduje sama Doktorantka) kierunek budowy determinuje anizotropię materiału.

3) Przy opisie warunków prowadzenia hodowli komórkowej (dla badań w modelu *in vitro*) wskazane byłoby podać, z którego pasażu wykorzystywano komórki do eksperymentów prowadzonych w ramach oceny cytotoksyczności (test MTT) oraz napisać konkretną wartość wilgotności, jaka była stosowana przy prowadzeniu hodowli komórkowej – zapis „stała wilgotność” (s. 64) jest w tym względzie mało precyzyjny.

4) Doktorantka podaje w pracy (s. 79), że optymalne wartości w zakresie stabilności przetopu uzyskuje się dla wysokiej prędkości skanowania (powyżej 600 mm/s). Tymczasem wyniki zebrane w tabeli 8 wskazują, że na 9 pomiarów oznaczonych jako „stabilne”, 7 dotyczy prędkości skanowania poniżej 600 mm/s. Proszę o odniesienie się do powyżej przytoczonego zapisu w kontekście prezentowanych wyników.

5) Jaki wpływ na różnice w uzyskanych wynikach pomiarów mógł mieć fakt, że badania odporności korozyjnej z wykorzystaniem metody polaryzacji potencjodynamicznej prowadzono dla materiału w postaci litej po szlifowaniu, a dla materiału po procesie L-PBF w postaci surowej bez modyfikacji?

6) W jakiej postaci występowały próbki, które poddano badaniom zwilżalności powierzchni – czy ich powierzchnia była w jakikolwiek sposób przygotowywana do tego badania? Jaki był czas pomiędzy wytworzeniem próbek a momentem prowadzenia badania? Czy wg Doktorantki aspekt ten mógł mieć znaczenie w uzyskanych wynikach i czy może wpływać na wyniki oceny biologicznej?

7) Zastanawia fakt, że przytaczając uzasadnienie co do wyboru dwóch metod obróbki, mających na celu modyfikację powierzchni stopu Ti-13Nb-13Zr po procesie L-PBF, Doktorantka

wskazuje jedynie, że badania przez nią zrealizowane na próbkach litych i opisane w przytoczonej publikacji własnej (poz. [82]) zdeterminowały wybór zastosowania trawienia chemicznego w odczynniku Krolla oraz piaskowania połączonego z trawieniem 4% roztworem HF w H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Zabrakło w pracy choć krótkiego opisu, jakie inne metody analizowano i jakie wyniki potwierdziły, że wybór metod zastosowanych w niniejszej pracy był optymalny. Uzasadnienie w postaci zdania „stwierdzono, że najkorzystniejsze wyniki, pod kątem potencjalnego zastosowania materiału na implanty” jest bardzo ogólne.

8) Doktorantka pisze (s. 119), że „Cytotoksyczność jako test prowadzony w warunkach *in vitro* ma na celu określenie, czy dany materiał powoduje apoptozę”. W odniesieniu do tego sformułowania warto zwrócić uwagę na dwa aspekty. Otóż, cytotoksyczność nie jest testem, można natomiast wykonywać testy (np. XTT, MTT), aby ocenić, czy dany materiał uwalnia jony substancji toksycznych. Druga kwestia – apoptoza jest naturalnym procesem obumierania komórki, a zatem w pewnym sensie kontakt z każdym materiałem/każdą powierzchnią będzie związany z wystąpieniem zjawiska apoptozy. Materiał cytotoksyczny będzie natomiast wywoływał stan nekrozy, czyli wymuszonej śmierci komórki.

9) Czy procesy tworzenia tkanki kostnej u zwierząt przebiegają w taki sam sposób, jak u ludzi?

10) Proszę o wyjaśnienie, z czego wynika ustalenie, że w badaniach oceny cytotoksyczności dla próbek w postaci litej po modyfikacjach otrzymano mniejszy wzrost komórek dla niższych koncentracji ekstraktu (12,5%) w porównaniu z ekstraktem 100% (Rys. 45)? Tabela 23 prezentuje odwrotne wyniki wzrostu komórek w stosunku do tych zaprezentowanych na wykresie 45. Który wynik jest zatem poprawny? Podobna nieścisłość pojawia się w przypadku wyników oceny cytotoksyczności próbek litych po modyfikacjach z wykorzystaniem linii fibroblastów NHDF (Rys. 47 vs. odwrotne wyniki w tabeli 24).

Co do samych badań oceny cytotoksyczności bardzo pomocny w sprawnej analizie porównawczej byłby wykres, na którym umieszczone zostałyby wyniki dla obu rodzajów próbek (lite i po procesie L-PBF) oraz wykres ujmujący jednocześnie wyniki dla obu linii komórkowych.

11) Mam również pytanie co do obrazowania zmian morfologicznych komórek. Jeśli jest to możliwe, proszę o chociaż przykładowe zdjęcie, na podstawie którego dokonywana była ocena zmian morfologicznych (tj. ziarnistości wewnątrzplazmatyczne, liza komórek, zaokrąglenie, gęstość) opisanych w tabelach 23, 24, 25, 26.

12) Przedmiotem zainteresowania badawczego mogłaby być próba szerszego ujęcia powiązania wyników oceny cytotoksyczności z innymi wynikami oceny fizykochemicznej powierzchni badanych materiałów. Doktorantka wskazuje, że prowadzi ocenę własności bioelektrycznych, ale niestety nie wiąże ze sobą wyników, które składają się na taką ocenę. Próba powiązania badań cytotoksyczności prowadzona jest dla składu chemicznego i fazowego badanych próbek głównie poprzez powołania na pozycje literaturowe, bez



odniesienia się do konkretnych danych z badań własnych. W przypadku zaprezentowanych testów mamy do czynienia z wynikami analiz po kontakcie z ekstraktem. Aby móc jeszcze lepiej powiązać zależności oddziaływań na komórki weryfikowane w teście MTT, pomocnym byłoby zbadanie składu ekstraktu pod kątem jonów uwolnionych do niego z badanego materiału. Zasadnym byłoby również prowadzenie hodowli komórkowej w kontakcie bezpośrednim, czyli wysiewanie ich na powierzchnię badanych materiałów. Takie badanie pozwoliłoby na zweryfikowanie zależności adhezji i proliferacji komórek nie tylko od składu chemicznego i fazowego materiału, ale również od topografii, chropowatości i stopnia rozwinięcia powierzchni. W przypadku badań Doktorantki byłoby to tym bardziej słuszne, że analizuje ona w swojej pracy wszystkie wyżej wymienione parametry i wskazuje na doniesienia literaturowe, które potwierdzają, że te parametry w zróżnicowany sposób wpływają na odpowiedź komórek – mikrochropowatość zwiększa ich adhezję, wzrost i proliferację, podczas gdy nanometryczne wartości chropowatości odpowiadają w większym stopniu za adhezję białek, których adsorpcja zależy również od zwilżalności powierzchni.

13) Proszę również Doktorantkę o wyjaśnienie, co rozumie pod pojęciem bioelektronicznych właściwości stopu?

14) Przy określaniu zasadności wdrożenia nowego materiału czy też technologii nieodzownym kryterium, które musi zostać spełnione, jest kryterium zasadności ekonomicznej. Mając na uwadze wyniki uzyskane przez Doktorantkę, po procesie formowania implantu technologią L - PBF, należałoby wykonać dodatkowo proces oczyszczania wyrobu, a następnie jego modyfikacji powierzchniowej oraz (ze względu na występowanie nieciągłości w materiale) zastosowanie obróbki izostatycznego prasowania na gorąco (tzw. HIP). To wskazuje na kilkuetapowy proces wytwórczy. Jak ma się zatem ergonomia procesu wyprodukowania implantu z zastosowaniem techniki L-PBF w stosunku do konwencjonalnych metod wytwarzania i jakie są inne aspekty, które uzasadniałyby wybór selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków?

15) Cenną część niniejszej rozprawy stanowi rozdział X, który zawiera analizę gotowości technologicznej dla procesu przetwarzania stopu Ti-13Nb-13Zr z wykorzystaniem metody L - PBF do zastosowań weterynaryjnych oraz analizę standardów R&D rekomendowanych przez Europejską Agencję Leków (EMA). Doktorantka bardzo trafnie określa tutaj główne kierunki rozwoju, które konkludują się do wytwarzania struktur przestrzennych i produkcji demonstratorów. Ich realizacja przyczyni się do pozyskania doświadczenia na przypadkach weterynaryjnych, co da szansę na dalszy rozwój implantologii u ludzi. Wśród zapisów z tej części pracy ciekawość recenzenta (wynikającą zapewne z braku odpowiedniej wiedzy w zakresie weterynarii) rodzi sformułowanie „implantami dopasowanymi do cech osobniczych pacjenta”, gdzie pacjentem jest zwierzę. Jakiego rodzaju są to cechy i jakie determinują one cechy/parametry (poza samym kształtem implantu)?

Podsumowując powyższą część recenzji, stwierdzam, że uwagi w niej zawarte mają charakter edycyjny, polemiczny, bądź wynikają z ciekawości natury naukowej i ostatecznie nie wpływają na bardzo wysoką ocenę rozprawy jako całości. Co do pytania 4, 6, 10, 14 proszę, aby Doktorantka udzieliła odpowiedzi podczas publicznej obrony.

#### 4. OCENA ROZPRAWY I WNIOSKI KOŃCOWE

---

Doktorantka w sposób jednoznaczny określiła problem badawczy, poprawnie sformułowała zadania naukowe, które następnie rozwiązała. Analizowany problem jest zagadnieniem złożonym, a kompleksowe podejście, jakie przedstawiła Doktorantka, świadczy o jej dojrzałości badawczej. Przedstawiona rozprawa wykazuje, że **Doktorantka dysponuje wiedzą i dorobkiem** o charakterze podstawowym w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych **w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn**.

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska pt. *„Opracowanie selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków dla stopu Ti-13Nb-13Zr na potrzeby medycyny weterynaryjnej”* mgr inż. Viktorii Hoppe spełnia wymagania wynikające z Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.) Dział V Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki* oraz mieści się w dyscyplinie naukowej budowa i eksploatacja maszyn. Biorąc powyższe pod uwagę **stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Viktorii Hoppe do publicznej obrony**.

Całość wywodu naukowego, jak i jakość oraz zakres badań przeprowadzonych przez Doktorantkę są unikatowe i niosą za sobą wartość aplikacyjną. Ponadto, biorąc pod uwagę istotność podjętego tematu, jego interdyscyplinarność, zastosowane metody badawcze, oryginalny i nowatorski charakter, wkład w rozwój dziedziny nauk inżynierijno-technicznych, jak i nauk rolniczych w zakresie medycyny weterynaryjnej oraz bardzo staranną formę edycyjną recenzowanej rozprawy **wnoszę o jej wyróżnienie**.

*Viktorie Hoppe*