



**AGH**

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA**

**IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

**Katedra Inżynierii Powierzchni i Analiz Materiałów**

**prof. dr hab. inż. Jan KUSIŃSKI, Emerytowany profesor AGH**

Kraków, 2022-03-11

## RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Donaty Kuczyńskiej-Zemła

pt. *"Zastosowanie obróbki laserowej do modyfikacji tytanowych implantów słuchowych"*

opracowana na zlecenie

Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa

Politechniki Warszawskiej

### 1. Ogólna charakterystyka pracy

Przedmiotem niniejszej recenzji jest praca doktorska mgr inż. Donaty Kuczyńskiej-Zemła pt.: *"Zastosowanie obróbki laserowej do modyfikacji tytanowych implantów słuchowych"*, która została wykonana pod opieką Prof. dr hab. inż. Haliny Garbacz z Politechniki Warszawskiej.

Badania w ramach opiniowanej pracy doktorskiej zostały zrealizowane głównie na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. W zakresie niektórych badań Doktorantka współpracowała również z pracownikami Instytutu Optoelektroniki WAT w Warszawie (w zakresie Interferencyjnej obróbki laserowej powierzchni implantów) oraz w Instytucie Chemii Fizycznej PAN w Warszawie (w zakresie spektroskopii Augera i XPS), jak również Uniwersytetu Technicznego Chalmersa w Geteborgu w zakresie pomiarów przy użyciu tomografii sondy atomowej ATP). W zakresie pomiarów stężenia jonów tytanu Doktorantka współpracowała z Centrum Nauk Biologiczno-Chemicznych Uniwersytetu Warszawskiego, gdzie dokonano tych pomiarów.

Objętość recenzowanej pracy obejmuje 169 stron (w tym: 61 rysunków: obrazów mikrostruktury i rozmieszczenia pierwiastków w mikroobszarze, wykresów i schematów, oraz 16 tablic, 242 pozycje literaturowe, jak również streszczenia w j. polskim i angielskim). Praca została opracowana w sposób charakterystyczny dla



**Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej**  
**Katedra Inżynierii Powierzchni i Analiz Materiałów**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,  
tel. +48 12 617 3344, fax: +48 12 617 2639  
e-mail: [kusinski@agh.edu.pl](mailto:kusinski@agh.edu.pl), [www.agh.edu.pl](http://www.agh.edu.pl)

rozpraw doktorskich, tzn. można w niej wyróżnić dwie wydzielone części. Praca rozpoczyna się streszczeniami w j. polskim i angielskim (4 str.), po czym przedstawiono spis treści i wstęp (2 str.).

We wstępie Doktorantka wskazuje na problemy z ubytkiem słuchu, które związane są z wiekiem, stylem życia czy z rozprzestrzenianiem się przewlekłych chorób. Podkreśla osiągnięcia krajowe i wkład zespołu Prof. H. Skażyńskiego w leczeniu głuchoty, jako pierwszego krajowego zespołu, który w roku 1992 udanie wszczepił implant ślimakowy. W tej części rozprawy mgr inż. D. Kuczyńska-Zemła wskazuje również na osiągnięcia inżynierii materiałowej w implantologii.

W pierwszej części - teoretycznej - (która stanowi ok. 27% objętości pracy), Doktorantka, w oparciu o bogaty przegląd literatury, na początku rozdziału: „*Pasywne implanty ucha środkowego*”, skupiła się na przedstawieniu istoty funkcjonowania słuchu. Omówiła budowę ucha. Podrozdziały obejmują zagadnienia związane z pasywnymi implantami ucha środkowego. Szczególną uwagę Doktorantka zwróciła na kosteczki słuchowe, ich niewielkie wymiary i masę oraz na funkcje jakie powinny spełniać. W kolejnych podrozdziałach przedstawiła:

- kształty protez (komercyjnie stosowane pasywne protezy ucha środkowego, oraz wybrane protezy niemieckiej firmy Kurz, które były wykorzystywane również w badaniach realizowanych przez Doktorantkę),
- materiały stosowane na pasywne implanty słuchowe (w tym podrozdziale, w oparciu o analizę literatury, Doktorantka wskazała jakie właściwości powinien posiadać materiał do zastosowań na implanty, jak również omówiła zalety i wady materiałów dotychczas wykorzystywanych, w tym: polimerów, kompozytów, materiałów ceramicznych, metali i stopów metali),
- rodzaje pasywnych implantów słuchowych wykonywanych z tytanu (w tym podrozdziale wskazano, jakie implanty są stosowane w zależności od rodzaju uszkodzenia w obrębie ucha środkowego, są to m. innymi: proteza częściowa, proteza całkowita, proteza zastępcza kowadełka, proteza zastępcza kowadełka przy braku strzemiączka oraz proteza kątowa),
- modyfikacje kształtu/konstrukcji implantów słuchowych (w podrozdziale wskazano na poszukiwanie rozwiązań poprawiających trwałość i niezawodność protez oraz jakość ich funkcjonowania, jak również na niedostępność pewnych danych związaną z ochroną patentową firm),
- metody modyfikacji powierzchni tytanu do zastosowań biomedycznych (omówiono metody modyfikacji powierzchni implantu decydujące o jego oddziaływaniu z otaczającym środowiskiem biologicznym, metody pozwalające na tworzenie rozbudowanych tzw. wielomodalnych struktur powierzchniowych: takich jak: śrutownie/kulowanie, obróbka laserowa) ,
- laserową obróbkę powierzchniową – ze szczególnym omówieniem bezpośredniej laserowej litografii interferencyjnej (omówiono oddziaływanie promieniowania laserowego z materiałem oraz budowę stanowiska i istotę kształtowania powierzchniowej warstwy materiału z wykorzystaniem bezpośredniej laserowej litografii interferencyjnej).

Ta część, teoretyczna, rozprawy kończy się rozdziałem, pt.: *Podsumowanie przeglądu literaturowego i geneza pracy*, w którym Doktorantka, wskazuje na zainteresowanie otologów sposobami funkcjonalizacji powierzchni pasywnych implantów słuchowych ucha środkowego, jak również na brak opracowanych rozwiązań, które pozwalałyby na lokalną poprawę biogodności tytanowych implantów słuchowych w obszarze połączenia z kością.

Na podstawie przeglądu literaturowego oraz wyników wstępnych badań własnych Doktorantka sformułowała tezę oraz określiła cel i zakres badań. W pracy doktorskiej mgr inż. D. Kuczyńska-Zemła stara się udowodnić następującą tezę:

*Zastosowanie bezpośredniej laserowej litografii interferencyjnej pozwoli w sposób kontrolowany na miejscową modyfikację właściwości fizykochemicznych oraz poprawę adhezji komórek kostnych na powierzchni tytanowych implantów słuchowych.*

Celem naukowym opiniowanej pracy doktorskiej było opracowanie metody miejscowej obróbki powierzchni tytanu Grade 2, w kontekście zastosowań na elementy implantów słuchowych, pozwalającej na uzyskanie falistej, periodycznej tekstury powierzchni w jednym procesie, co polegało na:

- określeniu wpływu obróbki laserowej na topografię powierzchni, skład chemiczny i fazowy oraz mikrostrukturę tytanu Grade 2,
- opisie wpływu obróbki laserowej na właściwości mechaniczne, odporność na korozję i biogodność tytanu Grade 2.

Na zakończenie rozdziału *Cele i teza* pracy Doktorantka przedstawiła schematycznie zakres prowadzonych badań, który podzieliła na trzy etapy.

W I etapie, badania prowadzono na próbkach laboratoryjnych przygotowanych z tytanu Grade 2. Dla osiągnięcia założonych celów badawczych oraz udowodnienia postawionej tezy Doktorantka zaplanowała i zrealizowała szeroki zakres badań dotyczących analizy oddziaływania wiązki lasera z podłożem tytanowym.. Uzyskane wyniki wykorzystano następnie do opracowania założeń i wykonania w etapie II laserowej obróbki powierzchniowej pasywnego implantu słuchowego firmy Kurz. W III etapie Doktorantka przeprowadziła badania komórkowe na próbkach obrabianych powierzchniowo techniką laserową z zastosowaniem parametrów zweryfikowanych dla rzeczywistego implantu.

Stwierdzam, że zarówno teza, jak i cele badawcze opiniowanej pracy doktorskiej, ukierunkowane na poprawę właściwości funkcjonalnych powierzchni tytanowych implantów słuchowych zostały sformułowane poprawnie i jednoznacznie. Nie znajdują one podobieństwa do znanych mi rozwiązań przedstawianych w literaturze specjalistycznej. Dla zrealizowania celów badawczych wykonano szereg prac- i czasochłonnych eksperymentów i analiz.

Stwierdzam, że wybór laserowej interferencyjnej obróbki powierzchniowej do modyfikacji powierzchni tytanu jest jak najbardziej uzasadniony. Lasery już od szeregu lat wykorzystywane są w świecie i Polsce w chirurgii (oka, czy tkanki miękkiej, jako tzw. „noże laserowe”) z uwagi na sterylność i precyzję operacji. Chociaż znane mi są polskie prace dotyczące jednak innych materiałów, m. innymi dr hab. inż. Romana Majora z IMiM PAN w Krakowie, który wykorzystuje technikę laserową do kształtowania powierzchni materiałów wykorzystywanych w konstrukcji polskiego sztucznego serca, to jednak wykorzystanie przez Doktorantkę lasera do modyfikacji

powierzchni tytanowych implantów słuchowych uważam za kolejny ważny krok wskazujący na możliwości aplikacyjne techniki laserowej!

W części drugiej - eksperymentalnej, stanowiącej ok. 73% objętości pracy, Doktorantka w kolejnych rozdziałach: *Materiał i metodyka badań*, *Wyniki badań*, oraz *Podsumowanie i wnioski* przedstawiła sposób przygotowania materiału badań i szczegółowo omówiła metodykę i realizację badań oraz otrzymane wyniki, ich analizę i wnioski. Pracę kończy wykaz 242 pozycji literatury.

Zakres prac mających na celu udowodnienie tezy oraz realizację zaplanowanych celów badawczych pracy obejmował:

- przygotowanie próbek z Ti Grade 2 o zróżnicowanej topografii powierzchni (poprzez kulowanie i trawienie w 3% kwasie fluorowodorowym);
- bezpośrednią laserową litografię interferencyjną uprzednio przygotowanych poprzez kulowanie i trawienie próbek
- charakterystykę struktury powierzchni oraz warstwy wierzchniej próbek po przeprowadzonej modyfikacji (kulowaniu i trawieniu, jak również kulowaniu oraz trawieniu i po laserowej litografii interferencyjnej), która obejmowała: badania z wykorzystaniem SEM, profilometru optycznego, AFM, XPS, AES, APT, GI-XRD, pomiary kąta zwilżania i energii powierzchniowej, STEM oraz dodatkowo modelowanie procesu nagrzewania próbek podczas laserowej obróbki interferencyjnej;
- charakterystykę właściwości funkcjonalnych i mechanicznych zmodyfikowanej powierzchni próbek poprzez testy zanurzeniowe w SBF, adsorpcję białek, badania komórkowe (hFOB) z zastosowaniem testów adhezji komórek (hFOB) i morfologii komórek (hFOB), hodowlę komórkową i testy adhezji komórek (MG63), analizę statystyczną wyników badań komórkowych, badania uwalniania jonów (metodą ICP-MS), badania korozyjne połączone z charakterystyka powierzchni po testach, oraz pomiary twardości (nanoindentacji).

Na uwagę zasługuje bardzo wiele nowoczesnych technik i metod badawczych zastosowanych w celu kompleksowej analizy struktury, składu chemicznego i fazowego próbek Ti Grade 2 przed i po procesie ich przygotowania poprzez kulowanie i trawienie oraz kulowanie i trawienie z następną laserową litografią interferencyjną.

## 2. Szczegółowa analiza rozprawy

Mgr inż. Donata Kuczyńska-Zemła, w części pierwszej - teoretycznej, szczegółowo omówiła zagadnienia dotyczące możliwości funkcjonalizacji dostępnych na rynku tytanowych implantów słuchowych poprzez wykorzystanie obróbki laserowej do modyfikacji wybranych powierzchni.

Opracowanie to świadczy o bogatej i usystematyzowanej wiedzy Doktorantki w zakresie bioinżynierii, techniki laserowej oraz nowoczesnych metod badawczych. W opinii recenzenta jest to bardzo poprawna i wnikliwie przeprowadzona analiza stanu dotychczasowej wiedzy dotyczącej opracowywanego zagadnienia - pasywnych implantów ucha środkowego. Doktorantka przeprowadziła krytyczną analizę istotnych dla pracy pozycji literatury (autorów krajowych i zagranicznych oraz publikowanych z udziałem własnym i naukowców z Pol. Warszawskiej). Cytowana – bogata w tej części pracy literatura w liczbie 122 pozycji, (aktualna z lat 2000-ych) dowodzi o

dogłębnym poznaniu przez mgr inż. Donatę Kuczyńską-Zemła problematyki związanej z budową implantów ucha środkowego, impulsową interferencyjną obróbką laserową wybranych powierzchni pasywnych implantów ucha środkowego. Należy podkreślić aktualność tematyki rozprawy i jej interdyscyplinarny, bardzo ważny ze społecznego punktu widzenia charakter. Doktorantka jednoznacznie wskazuje na możliwość wykorzystania wiedzy z inżynierii materiałowej dotyczącej zastosowania biozgodnych materiałów, w tym przypadku tytanu Grade 2, na różnego rodzaju protezy, m. innymi jako implanty ucha środkowego.

Ta część rozprawy została dobrze opracowana. Jest ona bogato ilustrowana obrazami różnych rodzajów implantów słuchowych, schematami i rysunkami poglądowymi. Moja bardzo pozytywna ocena odnosi się zarówno do organizacji tekstu, jak również języka. Pomocne w tym są dobrze dobrane i pod względem technicznym bardzo dobrze wykonane ilustracje. Na zakończenie tej części pracy Doktorantka przedstawiła podsumowanie. Analiza ta stanowiła podstawę dla określenia problematyki badawczej, celu pracy i sformułowania tezy, którą stara się udowodnić poprzez przeprowadzenie serii dobrze dobranych eksperymentów i badań.

Podczas analizy tej części rozprawy dostrzeżono nieliczne usterki redakcyjne. Są to głównie tzw. „literówki”, które zaznaczono w dostarczonym do recenzji oryginale.

Jedyna merytoryczna uwaga, dotyczy fragmentu opracowania na **stronie 37<sup>1-18</sup>** związana jest zdaniem recenzenta z pewną nieścisłością powiązania procesu ablacji z gęstością mocy lasera. Efekt ablacji zależy od energii fotonów a nie intensywności lasera (o intensywności oddziaływanie lasera na materiał decyduje czas trwania impulsu: nano- piko-, femto-sekunda, natomiast efekt zależy od gęstości energii, czyli fluencji, czy też gęstości mocy, jak również energii fotonów). Efekt ablacji jest związany z energią fotonów, która pozwala na rozrywanie wiązań międzyatomowych. Na tym opiera się m. innymi tzw. ablacyjne osadzanie cienkich warstw z odpowiednio przygotowanych tarcz. Skoro energia fotonu  $E = h \times \nu = h \times c/\lambda$  to stosuje się wówczas wyższe harmoniczne (3, 4 lub 5-tą) lasera Nd:YAG lub lasery excimerowe o krótkiej długości fali. Tym samym również na **stronie 39<sup>14</sup>** powinno być topienia i parowania, ponieważ duża moc nie decyduje o zjawisku ablacji a wspomniana już energia pojedynczych fotonów. Z kolei liczba fotonów emitowanych z lasera w jednostce czasu na jednostkę powierzchni decyduje o gęstości energii wiązki promieniowania laserowego.

Po analizie pierwszej części rozprawy doktorskiej, recenzent nie ma wątpliwości, że Doktorantka dysponuje bogatą wiedzą w zakresie pasywnych implantów ucha środkowego co świadczy o Jej dużej dojrzałości naukowej i o dobrym rozeznaniu przez Nią stanu zagadnienia będącego przedmiotem opiniowanej rozprawy doktorskiej.

W wyniku analizy stanu literatury dotyczącej materiałów o właściwościach biozgodnych oraz materiałów z których wykonane są pasywne implanty ucha środkowego Doktorantka podjęła decyzję, by w pierwszej kolejności przeprowadzić badania na próbkach przygotowanych z tytanu Grade2 a następnie (po dobraniu optymalnych parametrów procesu impulsowej interferencyjnej obróbki laserowej) przeprowadzić obróbkę wybranych powierzchni elementów chwytanych tytanowego implantu słuchowego firmy Kurz. . Tym samym stwierdzam, że

cel pracy doktorskiej mgr inż. Donaty Kuczyńskiej-Zemła wpisuje się w nurt poszukiwań nowych rozwiązań materiałowych, które w tym przypadku dotyczą poprawy biogodności elementów chwytnych tytanowego implantu słuchowego.

Jak to już wspomniano przy analizie zakresu przeprowadzonych badań modyfikacja powierzchni techniką interferencji laserowej przeprowadzona była w pierwszej kolejności na próbkach tytanowych (Ti Grade 2) po kulowaniu i trawieniu. Miało to na celu odtworzyć topografię powierzchni rzeczywistych implantów słuchowych. Dzięki zastosowaniu obróbki metodą DLIL na powierzchni uzyskano falistą teksturę periodycznie powtarzających się kanalików i wzniesień. Ich otrzymaniu towarzyszyło topienie tytanu w miejscach maksimów interferencyjnych. Modyfikacja rzeczywistego implantu słuchowego została poprzedzona licznymi badaniami, które dotyczyły analizy interakcji wiązki lasera z podłożem tytanowym oraz opisu zmian topografii powierzchni, mikrostruktury i właściwości materiału wywołanych poprzez oddziaływanie wiązki lasera.

Odpowiedni dobór parametrów lasera pozwolił Doktorantce, na wytworzenie, w kontrolowany sposób, periodycznej, dobrze zdefiniowanej i falistej tekstury Powierzchni charakteryzującej się chropowatością w skali: mikro- (po kulowaniu i trawieniu), submikro- i nanometrycznej (po obróbce DLIL).

W wyniku przeprowadzonych badań składu chemicznego wykazano także, że przeprowadzona modyfikacja laserowa DLIL powoduje zmiany w składzie chemicznym powierzchni oraz grubości warstwy pasywnej. Obróbka DLIL na tytanie po kulowaniu i trawieniu, prowadzi do zwiększenia zawartości azotu w warstwie wierzchniej, a także znaczną redukcją grubości tzw. warstwy pasywnej. W wyniku przeprowadzonych badań korozyjnych wykazano, że tak wytworzona warstwa pasywna charakteryzuje się bardzo dużą stabilnością.

Przeprowadzona we współpracy międzynarodowej szczegółowa analiza składu chemicznego przy użyciu niedostępnej w Polsce techniki, jaką jest tomografia sondy atomowej wykazała, że dla obu położań, maksimum jak i minimum interferencyjnego, tworzą się dwie podwarstwy: 1) bogata w tlen (na górze) i 2) warstwa bogata w azot (pod spodem). Oznacza to, że w kontekście zastosowań biomedycznych obróbka powierzchniowa DLIL pozwala na zamierzone tworzenie specyficznej topografii powierzchni na pre-modyfikowanym tytanie, a także modyfikację składu chemicznego powierzchni w jednym procesie. Przeprowadzone w pracy badania mikrostrukturalne pozwoliły także na określenie zakresu oddziaływania wiązki lasera z tytanowym podłożem. Jest ono lokalne, obróbka DLIL skutkuje formowaniem cienkiej i ciągłej podwarstwy o grubości 1,0-2,0  $\mu\text{m}$ , składającej się z lamelarnych/iglastych nanoziaren. Stanowi to zaledwie 5,0-10,0% warstwy powstającej w wyniku wstępnej modyfikacji (kulowania i trawienia). Wyniki badań przeprowadzonych w I etapie na próbkach przygotowanych z tytanu Grade 2, miały istotną wartość poznawczą i technologiczną, gdyż umożliwiły Doktorantce na modyfikację rzeczywistego implantu słuchowego firmy Kurz w sposób zaplanowany i ściśle kontrolowany.

.Uważam, że przeprowadzona przez Doktorantkę laserowa modyfikacja rzeczywistego tytanowego implantu słuchowego firmy Kurz, w opinii recenzenta jest największym dokonaniem badawczym niniejszej pracy. W pracy

wykazano, że poprzez zaprojektowaną specyficzną topografię powierzchni na istniejącym komercyjnym implancie, można wywoływać pożądane reakcje biologiczne i tym samym przyspieszyć proces rekonwalescencji pacjenta. W opinii recenzenta wiedza zdobyta na podstawie przedłożonej rozprawy doktorskiej może przyczynić się do bardziej świadomego wykorzystania modyfikacji laserowej do dalszych zastosowań biomedycznych.

Podsumowując, uzyskane wyniki przeprowadzonych badań, pozwoliły Doktorantce na sformułowanie wniosków o charakterze podstawowym i aplikacyjnym, dotyczącym obróbki laserowej DLIL do zastosowań w implantologii słuchowej. Uzyskane przez Doktorantkę wyniki wskazują, że obróbka laserowa DLIL może być wykorzystana do miejscowej funkcjonalizacji powierzchni tytanowych pasywnych implantów słuchowych w obszarach, gdzie wskazana jest lepsza integracja powierzchni z kością. W ramach rozprawy doktorskiej wykazano, że poprzez obróbkę DLIL można w sposób kontrolowany, miejscowo, modyfikować właściwości fizykochemiczne podłoża, a przez co spowodować poprawę adhezji komórkowej. Z otrzymanych rezultatów badań w rozprawie doktorskiej oraz przedstawionych wniosków wynika, że cel pracy został osiągnięty i została wykazana słuszność stawianej tezy badawczej.

Wyniki badań przedstawione i dyskutowane w przedłożonej rozprawie doktorskiej poszerzają zakres wiedzy na temat kształtowania biokompatybilności tytanowych implantów, w szczególności w protetyce ucha środkowego.

Recenzowana praca doktorska kończy się omówieniem wyników przeprowadzonych badań i ich dyskusją, oraz wnioskami. Również w tej części rozprawy dostrzeżono usterki redakcyjne, które zaznaczono w dostarczonym do recenzji oryginale. Nie zmieniają jednak one mojej pozytywnej opinii o poziomie naukowym opracowania.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską stwierdzam, że zagadnienie opracowane przez Doktorantkę odpowiada aktualnym kierunkom badawczym w zakresie inżynierii materiałowej, a zmierzającym do wykorzystania materiałów biozgodnych w implantologii.

Tym samym stwierdzam, że realizacja zadań badawczych, jakie złożyły się na ocenianą pracę doktorską dostarczyła szereg istotnych informacji, o charakterze poznawczym i metodycznym. Uzyskane rezultaty są użyteczne i powinny znaleźć zastosowanie w procesie wytwarzania implantów słuchowych z uwagi na małe ich wymiary oraz precyzję w lokalizacji zmian struktury ich powierzchni. Pragnę podkreślić, że praca doktorska mgr inż. Donaty Kuczyńskiej-Zemła zawiera szereg istotnych i interesujących wyników wnoszących zauważalny wkład inżynierii materiałowej w rozwój bioinżynierii.

Pomimo uwag zawartych w recenzji, uważam, że sposób przeprowadzenia doświadczeń, analizy produktów korozji, opracowania i dyskusji wyników jest na bardzo dobrym poziomie! Z postawionego zadania Doktorantka wywiązała się bardzo dobrze. Uważam, że sposób przeprowadzenia doświadczeń i opracowania ich wyników zasługują na uznanie. Stwierdzam, że cel badawczy został osiągnięty a teza udowodniona.

Doktorantka, wyniki badań przedstawiła również w publikacjach i prezentacjach na konferencjach i seminariach.

### **3. Podsumowanie**

Praca została napisana w sposób zrozumiały i przejrzysty. Bardzo dobry jest, zamieszczony w pracy, materiał ilustracyjny, który ułatwia zrozumienie omawianych w tekście problemów. Liczba rysunków, schematów, tablic oraz wykresów jest odpowiednia dla wyjaśnienia omawianych zagadnień. Układ rozprawy, typowy dla tego typu prac, jest logiczny i przejrzysty. Wyniki badań są na bieżąco dyskutowane. Wnioski podane w pracy są odzwierciedleniem wykonanych prac badawczych. Dostrzeżone usterki, które przedstawiono w poprzednich rozdziałach recenzji, w niczym nie podważają wartości merytorycznej pracy, prawidłowości i celowości przeprowadzonych badań oraz uzyskanych wyników i ich ogólnej interpretacji i nie mają wpływu na moją, bardzo pozytywną, opinię o poziomie naukowym ocenianej rozprawy. Powinny one stanowić dla Doktorantki istotne wskazówki w dalszej pracy naukowej. Wnioski podane w pracy są odzwierciedleniem wykonanych prac badawczych i uzyskanych wyników oraz logicznie wynikają z ich dyskusji.

Uwzględniając poziom naukowy recenzowanej pracy doktorskiej, jej zauważalne zalety uważam iż spełnia ona, w stopniu wyróżniającym, wymagania stawiane pracom doktorskim. Uwzględniając wyniki uzyskane przez mgr inż. Donatę Kuczyńską-Zemła w pracy doktorskiej, bardzo szeroki zakres badań oraz jakość opracowania uważam, że po pomyślnej obronie i spełnieniu innych warunków wyznaczonych przez Radę Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej zasługuje ona na wyróżnienie!

### **4. Wniosek końcowy**

Mgr inż. Donata Kuczyńska-Zemła w swojej pracy doktorskiej pt. *"Zastosowanie obróbki laserowej do modyfikacji tytanowych implantów słuchowych"* przedstawiła wyniki wszechstronnej analizy stanu powierzchni i warstwy wierzchniej próbek Ti Grade 2 przed i po procesie ich przygotowania poprzez kulowanie i trawienie oraz kulowanie i trawienie z następną laserową litografią interferencyjną.

Cel i teza opiniowanej pracy doktorskiej zostały sformułowane poprawnie i jednoznacznie. Dla wykazania słuszności postawionej tezy wykonano szereg praco- i czasochłonnych eksperymentów i analiz z zastosowaniem nowoczesnych technik badawczych. Zamieszczona w pracy teza jest oryginalna i nie znajduje podobieństwa do znanych mi rozwiązań przedstawianych w literaturze specjalistycznej. Uzyskane rezultaty są użyteczne i powinny znaleźć zastosowanie w procesie przygotowania implantów ucha środkowego.

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że zmiany topografii, składu chemicznego i budowy warstw tlenkowych oraz mikrostruktury warstwy wierzchniej, wywołane obróbką DLIL, powodują poprawę



właściwości funkcjonalnych i mechanicznych powierzchni, w porównaniu do próbek tytanu poddanych jedynie kulowaniu i trawieniu.

Kluczowym wynikiem uzyskanym w ramach przeprowadzonych badań było wykazanie, że komórki hFOB kierunkują się wzdłuż kanalików uzyskanych na powierzchni po modyfikacji DLIL, a ich wzrost jest bardziej jednorodny. Dodatkowo, przy odpowiednio zoptymalizowanych parametrach dla komercyjnego implantu warunkach obróbki DLIL otrzymano wynik potwierdzający poprawę adhezji komórek MG63. Korzystny wpływ na biogodność periodycznej falistej tekstury powierzchni był widoczny również podczas badań adsorpcji białek, która jest preferowana w kanalikach wytworzonych na powierzchni. Analiza kinetyki narastania warstw fosforanów wapnia pozwoliła stwierdzić, że w przypadku próbek po obróbce DLIL uzyskano bardziej jednorodny i nieznacznie szybszy wzrost kościotwórczego apatytu. Przeprowadzone w ramach niniejszej pracy badania korozyjne potwierdziły również poprawę odporności korozyjnej tytanu po obróbce DLIL.

Rozwiązanie problemu badawczego wymagało od Doktorantki wiedzy podstawowej dotyczącej implantologii narządów słuchu, umiejętności eksperymentalnych w zakresie przygotowania materiału do badań, przeprowadzenia testów oraz technik badawczych (SEM, AFM, XPS, AES, APT, GI-XRD, STEM) pozwalających określić ich strukturę, skład chemiczny i fazowy tworzącej się warstwy wierzchniej. Biorąc pod uwagę wszystkie elementy mojej oceny stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska stanowi istotny wkład do wyjaśnienia czy istnieje możliwość zastosowania technik laserowej do modyfikacji powierzchni tytanowych implantów słuchowych. Recenzowaną rozprawę doktorską oceniam jako wyróżniającą się, ze względu na staranność, jak i jakość opracowania. Tematykę rozprawy uważam za bardzo istotną m. innymi ze względów społecznych oraz inżynierii materiałowej - inżynierii powierzchni. W opinii recenzenta, zamierzony cel pracy został osiągnięty a teza udowodniona!

Tym samym uważam, że rozprawa doktorska spełnia ustawowe wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora, określone ustawą o stopniach i tytułach naukowych - Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce - Dz. U. 2018 r., poz. 1668. Na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej o nadanie mgr inż. Donacie Kuczyńskiej-Zemła stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria materiałowa, a po spełnieniu wymaganych warunków o wyróżnienie rozprawy..