RDYMa.RMT.512.1.2023

Wydział Inżynierii Materiałowej

Politechnika Warszawska

Prof. dr hab. inż. Halina Garbacz
Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Materiałowej

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Oktawiana Bialasa
pt. *„The influence of hybrid processes of surface microalloying on the structure and properties of surface layers of Ti and Ti alloy-based biomedical materials".*

Podstawę formalną recenzji stanowiła decyzja Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej z dnia 24.01.2023 roku.

Ocena problematyki badawczej

Dane statystyczne dotyczące długości czasu życia oraz starzenia się społeczeństwa jednoznacznie wskazują na konieczność kontynuowania prac nad materiałami do zastosowań biomedycznych w celu poszerzenia zakresu ich stosowania i poprawy komfortu pacjentów. Właściwości użytkowe metalicznych implantów można kształtować poprzez projektowanie składu chemicznego stopów, mikrostruktury oraz zastosowanie obróbek powierzchniowych. Do najszerzej stosowanych biomateriałów metalicznych należy tytan o czystości technicznej oraz stopy tytanu. W odniesieniu do tych materiałów widoczny jest trend, dotyczący unikania toksycznych pierwiastków stopowych oraz poszukiwanie rozwiązań, pozwalających na obniżenie sztywności implantów metalicznych. Przykładem może być badany w pracy stop Ti13Zr13Nb. Duży potencjał w zakresie kształtowania mikrostruktury i poprawy właściwości tych materiałów mają obróbki powierzchniowe, które pozwalają na uzyskaniu poprawy biozgodności, a także odporności na zużycie i korozję w środowisku symulującym organizm człowieka. Właśnie tę koncepcję Pan mgr inż. Oktawian Bialas wykorzystuje i rozwija w swojej rozprawie doktorskiej. Uwzględnia przy tym zarówno aspekty materiałowe, jaki i technologiczne.

Ograniczenie podatności na degradację biomateriałów metalicznych, zmniejszenie liczby odrzutów poimplantacyjnych, poszukiwanie materiałów o większej biozgodności, skrócenie czasu osteointegracji czy ograniczenie stopnia ingerencji w organizm ludzki poprzez brak konieczności reoperacji lub usunięcia implantu, to tylko kilka wyzwań, przed którymi stoją naukowcy, w tym specjaliści z dyscypliny inżynieria materiałowa. Temat i treść rozprawy dotyczy zatem ciągle aktualnego problemu badawczego. Stanowi on przedmiot badań w bardzo wielu ośrodkach naukowych, w tym polskich, a także rodzimej Uczelni Doktoranta.

Biuro Dziekana
wpłynęło dnia 06.04.2023
RDYMa RMT/44/51/2023
nr ..... zał. .....

Portal Nauka Polska w grudniu 2022 roku donosił, że zespół naukowców z Wydziału Chemicznego Politechniki Śląskiej opracował technologię otrzymywania bioaktywnych powłok powierzchni kostnych implantów dla zwierząt. Technologia wytwarzania powłok ceramicznych na stopach tytanu bazuje na wysokonapięciowym utlenianiu elektrochemicznym, które umożliwia wytwarzanie powłok porowatych, które pod względem struktury (niezależnie od uzyskiwanego składu chemicznego) przypominają budowę kości.

Rozprawa doktorska wpisuje się także w tematykę kilkuletnich badań prowadzonych pod kierunkiem Promotora Prof. Marcina Adamiaka, dotyczących zastosowania metod inżynierii powierzchni do poprawy właściwości użytkowych metali. Oryginalność pracy polega na opracowaniu hybrydowej obróbki powierzchniowej, składającej się z elektrochemicznego osadzania oraz obróbki laserowej, w celu otrzymania warstw zawierających, charakteryzującą się dużą twardością fazę międzymetaliczną Ti3Au. Celem modyfikacji powierzchni była poprawy właściwości użytkowych dwóch materiałów do zastosowań biomedycznych: szeroko stosowanego tytanu o czystości technicznej Ti Grade2 oraz stopu Ti13Zr13Nb. Wybór materiału do badań uważam za uzasadniony. Pierwsze próby wykorzystania stopów Ti3Au dotyczyły implantów stomatologicznych, w których był stosowane jako materiał „przejściowy" między tytanową częścią implantu i ceramiką stomatologiczną. Badania wykazały, że stop β-Ti3Au charakteryzuje się większą biozgodnością, twardością, a także większą odpornością na ścieranie od Ti Grade2. Potencjał wynikający z użycia złota do poprawy właściwości tytanu i jego stopów jest ciągle przedmiotem analiz. W 2023 roku w bazie Scopus pojawiły się kolejne publikacje z tego obszaru. Dotyczą one między innymi wytwarzania warstw TiO2 z cząsteczkami Au. Wyniki badań wskazują, że takie kompozytowe rozwiązania materiałowe charakteryzują się większą odpornością na zużycie od tytanowych podłoży i dodatkowo wykazują właściwości bakteriobójcze.

W literaturze brak jest jednak szczegółowych badań, dotyczących zastosowania obróbki laserowej jako jednego z etapów otrzymywania warstw międzymetalicznych z układu Ti-Au na podłożach z Ti i stopów Ti. Uwzględniając przedstawione uwarunkowania problematyki naukowej oraz zakres przeprowadzonych badań, należy uznać podjęcie tematu rozprawy za celowe i uzasadnione merytorycznie, jak również aktualne zarówno pod względem poznawczym, jak i w odniesieniu do potencjalnych zastosowań w biomedycynie. Uważam, że analizowane w rozprawie Pana mgr. inż. Oktawiana Bialasa zagadnienia, dotyczące relacji między topografią, budową fazową, mikrostrukturą warstw oraz ich właściwościami są również interesujące i wartościowe z punktu widzenia inżynierii materiałowej, a w szczególności inżynierii powierzchni biomateriałów.

Ocena formalna rozprawy

Praca doktorska została napisana w języku angielskim, który nie jest perfekcyjny, ale zrozumiały. Jest przygotowana w tradycyjnej formie, obowiązującej dla monografii naukowej,

choć oprócz krótkich streszczeń w języku polskim i angielskim zawiera jeszcze poszerzone streszczenie w języku polskim. Liczy 141 stron i składa się z 6 głównych rozdziałów, tworzących dwie wyodrębnione część. Pierwsza zawiera wykonany w oparciu o przegląd piśmiennictwa opis stanu wiedzy z zakresu tematyki rozprawy, wyjaśniający jej genezę. W drugiej, eksperymentalnej części przedstawiona została przyjęta metodyka badawcza oraz wyniki uzyskane przez Autora. Kolejność rozdziałów jest właściwa, a układ treści w poszczególnych podrozdziałach logiczny i powiązany ze sobą. Wnioski z przeglądu literaturowego były podstawą do sformułowania tezy badawczej. Rozprawa zawiera także spis stosowanych skrótów oraz obszerną bibliografię, składającą się z 127 pozycji, w tym 7 współautorstwa Doktoranta, z czego w dwóch mgr O. Bialas jest pierwszym autorem. Publikacje Doktoranta są Jego istotnym osiągnięciem naukowym, tym bardziej szkoda, że w przypadku dwóch nie zostały podane nazwy czasopism [15; 30]. Cytowana literatura jest poprawna, właściwie dobrana do tematyki rozprawy i aktualna, bowiem ok 40% stanowią pozycje z okresu ostatnich pięciu lat. Autor powołuje się na istotne prace, w większości anglojęzyczne, dotyczące głównie tytanu o czystości technicznej i stopów tytanu oraz ich obróbek powierzchniowych w kontekście zastosowań biomedycznych. Praca doktorska została wzbogacona materiałem ilustracyjnym, zawierającym w części głównej 82 rysunki, adekwatne do przedstawionych treści merytorycznych. Zawiera także wzory i tabele (19), niezbędne dla zrozumienia i interpretacji uzyskanych wyników, a poszczególne rozdziały wprowadzają odpowiednio czytelnika w prezentowaną tematykę.

Podczas Redagowania pracy Doktorant nie ustrzegł się jednak pewnych niedociągnięć, w szczególności w części napisanej w języku polskim (streszczenia krótkie i rozszerzone). Jest to częsta sytuacja w przypadku rozpraw pisanych w języku angielskim, bowiem Autorzy głównie koncentrują się na poprawności tej zasadniczej części tekstu. Z obowiązku recenzenta należy wymienić przykładowe uchybienia zauważone podczas lektury niniejszej rozprawy:

1. W streszczeniu w języku polskim (str. 6) Autor pisze o spektroskopii elektroimpedancyjnej, choć właściwa nazwa tej techniki badań korozyjnych, to elektrochemiczna spektroskopia impedancyjna.
2. Autor stosuje wymiennie nazwę badania tribologiczne i trybologiczne. Nie rozstrzygając, która forma jest poprawna na pewno zalecana jest konsekwencja w całej pracy. Niemniej zdaniem recenzentki bardziej właściwe są badania tribologiczne, analogicznie do nazwy Polskiego Towarzystwa Tribologicznego założonego w 1991 roku.
3. W konkluzjach zawartych w rozszerzonym streszczeniu „komórki posiane" lepiej byłoby zastąpić sformułowaniem komórki hodowane lub wysiane na powierzchni.
4. Niepoprawny podpis pod rys. 6, który dotyczy stopu Ti13Zr13Nb, a nie Ti, rys. 65 zawiera niepełny opis legendy, użyte potoczne sformułowanie „plastiki polistyrenowe", w odniesieniu do składu chemicznego stopów powinno używać się określenia zawartość pierwiastków zamiast stosowanego w pracy stężenia, koncentracji, stosowanie skrótów myślowych, np.: powłoka Au ściera się .

5. Czy na rys. 64 i 66 jest właściwy opis osi rzędnych, na której mamy skalę logarytmiczną, a nie log i_{corr} ?

Ocena merytoryczna rozprawy

Celem zaplanowanych w rozprawie badań była ocena wpływu stopowania laserowego Ti Grade 2 oraz stopu Ti13Zr13Nb pokrytych mikrometryczną powłoką złota na strukturę i właściwości powierzchni tych materiałów w kontekście zastosowań biomedycznych. Zakres prac obejmował: określenie warunków niezbędnych do elektrochemicznego osadzania złota na tytanie i jego stopach, opis wpływu laserowego stopowania na zjawiska zachodzące w obrębie warstwy wierzchniej oraz wskazanie warunków pozwalających na wytworzenie oczekiwanego składu fazowego warstwy modyfikowanej. W przeprowadzonych analizach Doktorant stosował szereg technik badawczych wykorzystywanych w dyscyplinie inżynieria materiałowa takich jak, mikroskopia świetlna, SEM + EDS, TEM, EBSD, AFM, badania z użyciem dyfrakcji rentgenowskiej, a także pomiary chropowatości i zwilżalności powierzchni. Dokonał również opisu właściwości mechanicznych (w oparciu o pomiary nanotwardości), właściwości tribologicznych (metodą ball-on-plate w roztworze Ringera) oraz odporności na korozję (w tym metodą elektrochemicznej spektroskopii impedancyjnej) i cytotoksyczności (w oparciu o badania w obecności ludzkich fibroblastów) otrzymanych materiałów. Wyniki tych badań zostały wykorzystane do porównawczej oceny właściwości w stanie wyjściowym, po nałożeniu powłoki oraz po stopowaniu laserowym. Dodatkowo w celu określenia modelu oddziaływania wiązki lesera z wytworzoną warstwą powierzchniową posłużono się analizą numeryczną.

Wykonane przez Doktoranta kompleksowe badania i wieloskalowe analizy dostarczyły intersujących i ważnych wyników z zakresu badań podstawowych i aplikacyjnych. Potwierdzają one wstępną pozytywną ocenę opisywanych materiałów pod kątem właściwości mechanicznych i biologicznych oraz mogą być podstawą do dalszych analiz prowadzonych zgodnie z normą, dotyczącą wyrobów medycznych. Autor rozprawy ma świadomość złożoności procesu dopuszczania nowych rozwiązań materiałowych w aplikacjach biomedycznych i wskazuje na potrzebę kontynuowania badań.

Chciałabym się odnieść do przedstawionego w rozprawie uzasadnienia dla prowadzonych obróbek powierzchniowych. O ile zgadzam się, że wadą stopów tytanu jest słaba odporność na zużycie, to dyskusyjne w mojej opinii jest wskazywanie przez Autora rozprawy konieczności poprawy słabej odporności na korozję (streszczenia), tłumacząc to niestabilnością warstwy tlenkowej. Istnieje tu jednak potrzeba zachowania pewnej równowagi w stosunku do innych grup biometali. Oczywiście stabilność warstwy tlenkowej zależy od środowiska, niemniej to właśnie skłonność do samopasywacji i dobra odporność na korozję w roztworach symulujących środowisko żywego organizmu oraz biozgodność są cechami, które często decydują o zakresie aplikacji tych materiałów w bioinżynierii. Doktorant zresztą sam przyznaje na str. 22, że zaletą stopów Ti jest bardzo dobra odporność na korozję. Biokompatybilność może być zdefiniowana jako zdolność materiału do prawidłowego jego

zachowania w kontakcie z tkanką biologiczną. Tytan jest metalem, który jednak wykracza poza tę definicję, bo cechuje się dodatkowo tzw. osseointegracją, czyli zdolnością do tworzenia bezpośredniego strukturalnego połączenia pomiędzy z żywą tkanką. Dzięki temu pomiędzy kością a implantem nie wytwarza się tkanka bliznowata ani chrząstka a połączenie jest bardzo silne. Istotnymi aspektami osseointegracji jest adsorpcja białek oraz adhezja komórek. Adsorpcja na powierzchni implantu wpływa na konformację białek, a ponadto adsorbowane białka mogą być inicjatorami adhezji innych komórek, cząsteczek lub bakterii, co może mieć poważny wpływ na występowanie stanów zapalnych. W ekstremalnych przypadkach doprowadza do odrzucenia implantu przez organizm. Siły elektrostatyczne pomiędzy białkiem a powierzchnią metalu są odwrotnie proporcjonalne do względnej przenikalności elektrycznej metalu – im wyższa względna przenikalność, tym mniejsze siły elektrostatyczne. Powłoka tlenku tytanu, która naturalnie występuje na powierzchni implantu ma względną przenikalność elektryczną podobną do wody, dlatego zmiana konformacyjna białka jest tak mała. Podsumowując, unikałabym określenia słaba odporność na korozję, a raczej stosowałbym: dalsza poprawa odporności na korozję, np.: pod kątem ograniczenia potencjalnego zjawiska metalozy przy długim czasie „eksploatacji" implantu.

W pierwszej części pracy, w Rozdziale 1 Doktorant podkreślając istotę badań interdyscyplinarnych, przedstawia główny cel oraz cele szczegółowe rozprawy. W Rozdziale 2 Autor przybliżyła zagadnienia z obszaru biomateriałów, w szczególności na bazie tytanu i jego połączenia ze złotem oraz opisuje wykorzystywane w medycynie metody obróbki powierzchniowej, kładąc akcent na duży potencjał w tym zakresie obróbki laserowej. Podrozdziały 2.1.1 i 2.1.2 zawierają ważne informacje, niemniej mają charakter bardzo syntetyczny i ich poszerzenie mogłoby wzbogacić pracę. Bardzo interesująca jest treść Podrozdziału 2.2 *Surface engineering in medicine*, w którym między innymi przedstawione są obróbki powierzchniowe stosowane dla komercyjnych implantów. Na uwagę zasługuje także Podrozdział 2.3 *Laser impact on the solid matter*, zawierający opis zjawisk towarzyszących odziaływaniu wiązki lasera z materiałem oraz procesów topienia i stopowania laserowego.

Rozdział 3 jest istotną częścią rozprawy, ponieważ przedstawia koncepcję pracy, jej nowatorstwo oraz rozwiązywane problemy badawcze i sformułowaną tezę, która nie budzi zastrzeżeń. Autor już na tym etapie zaznacza, że interesuje go odziaływanie powierzchni uzyskanych warstw z krwią. Niemniej łatwiej byłoby zrozumieć intencje Doktorant, gdyby wskazał wynikające z tego założenia potencjalne zastosowanie badanych materiałów. Wykorzystaną w rozprawie metodykę badawczą Doktorant przedstawił w Rozdziale 4, szczegółowo opisując wybrane materiały podłoży, parametry i metody stosownych obróbek powierzchniowych, przyjęte założenia analiz numerycznych oraz techniki i aparaturę wykorzystywaną do charakteryzowania powierzchni, mikrostruktury powłok i warstw oraz ich właściwości. Do oceny chropowatości powierzchni Autor stosował dwa parametry Ra oraz Rz, które powinny być zdefiniowane w pracy.

Uzyskanym wynikom oraz ich dyskusji poświęcony jest Rozdział 5. Numeryczna analiza przepływu ciepła pozwoliła na wstępne oszacowanie wartości temperatury osiąganej podczas

obróbki laserowej z zastosowaniem wybranych parametrów procesów. Z obliczeń wynikało, ze zarówno podłoże z Ti, jak i powłoka z Au znajdowały się w stanie ciekłym, umożliwiając dynamiczną wymianę masy w wyniku ruchów konwekcyjnych. Efekty tego procesu znalazły potwierdzenie w badaniach mikrostrukturalnych. Należy podkreślić, że w niewielu pracach doktorskich podejmuje się próby tak szerokiej analizy zjawisk z punktu widzenia możliwości modelowania budowy i właściwości warstw. Podrozdziały od 5.3 do 5.10 zawierają wyniki badań topografii powierzchni, składu chemicznego i fazowego oraz mikrostruktury warstw. W mojej opinii dużą wartość naukową mają wyniki uzyskane metodą EBSD oraz z zastosowaniem TEM. Niemniej nie są one w pełni uporządkowane. Dłuższego zastanowienia i szerszej dyskusji wymaga konkluzja mówiąca, że w analizowanych obszarach przetopienia udział fazy Ti3Au wynosił 0,067 dla TiAu 1,5 mm/s i 0,042 odpowiednio dla TiAu 1 mm/s, co zdaniem Autora oznacza to, że stosowane parametry procesu dla TiAu 1 mm/s mają lepszy wpływ na uzyskanie fazy Ti3Au. Nie jest jasne także jakich faz dotyczą rozkłady wielkości ziaren i analiza kątów dezorientacji. W przyszłych badaniach warto scharakteryzować również mikrostrukturę podłoży przed i po procesach hybrydowej obróbki powierzchniowej w celu określenia głębokości wpływu wiązki lasera.

W Podrozdziałach od 5.12 do 5.15 Doktorant przedstawił analizę właściwości badanych materiałów istotnych z punktu widzenia zastosowań w bioinżynierii. Badania obejmowały ocenę kątów zwilżania, odporności na korozję i zużycie tribologiczne, twardości oraz cytotoksyczności. W pracy brak jest opisu sposobu przygotowania powierzchni w stanie wyjściowym Ti Grade2 oraz stopu Ti, które stanowiły materiały odniesienia, byłby on pomocny w interpretacji uzyskanych, bardzo wartościowych wyników badań. W odniesieniu do badań korozyjnych i odporności na zużycie Autor każdorazowo dokonywał analizy korelacji między mikrostrukturą, a badanymi właściwościami, prowadząc również obserwację powierzchni po przeprowadzonych testach. W ocenie wpływu przeprowadzonych obróbek powierzchniowych na właściwości tribologiczne Autor zaprezentował wielkości współczynników tarcia. W mojej opinii łatwiej byłoby uogólnić uzyskane wyniki po wzbogaceniu ich o dane z badań ilościowego zużycia.

Rezultaty przeprowadzonych w ramach rozprawy badań wraz zawartymi w Rozdziale 6 konkluzjami są inspirującym do dyskusji materiałem naukowym, dlatego po zapoznaniu się z jej treścią,, chciałabym poznać opinię Doktoranta w kilku kwestiach, odnoszących się zarówno do części literaturowej, jak i empirycznej:

1. Z czym mamy do czynienia po obróbce laserowej z powłoką czy warstwą (coatings/layers). Autor stosuje dla tego stanu obie nazwy?
2. Jakie artefakty w trakcie obrazowania za pomocą rezonansu magnetycznego występują w stopach tytanu, Autor sygnalizuje ten problem w rozprawie?
3. Czy z punktu widzenia prowadzonych w pracy analiz numerycznych, istotny był fakt, że w rzeczywistych układach materiałami podłoża był Ti Grade2 i stop Ti13Zr13Nb. Co uzasadnia stosowanie dla obu tych materiałów rożnych prędkości skanowania wiązką lasera?

4. Jakie było kryterium przyjęcia wymaganej grubości (2μm) powłoki ze złota, otrzymywanej metodą elektrochemiczną oraz czy jest to parametr kluczowy dla uzyskanych w pracy wyników? Analogicznie, dlaczego przyjęto, że grubość warstwy po procesie hybrydowej obróbki powierzchniowej nie może przekroczyć 10 μm?
5. Tytan ulega szybkiej samopasywacji w kontakcie z tlenem, jaki był zatem cel poszczególnych etapów preparatyki powierzchni próbek (trawienie we wrzącym roztworze HCl, polaryzacja w roztworze H2SO4) przed procesem osadzania powłok ze złota? Na tym tle należałoby się zastanowić jak uzasadnić obecność tlenków tytanu w warstwach po obróbce laserowej Ti Grade2 oraz ich nieobecność po analogicznej obróbce na stopie Ti ?
6. Czym spowodowane były różnice w chropowatość powierzchni obu podłoży w stanie wyjściowym i przeciwny wpływ obróbki elektrochemicznej (powłoka Au) na zmiany tego parametru?
7. Warstwy uzyskane po obróbce hybrydowej miały zmienny skład chemiczny, jaka była rzeczywista grubość obszaru/podwarstwy z fazą Ti3Au?
8. W jakiej temperaturze powinny być prowadzone testy zużycia symulujące fizjologiczny chód oraz dlaczego badania odporności na zużycie ograniczono do pomiaru współczynnika tarcia?
9. W badaniach potwierdzono wzrost twardości dla próbek poddanych obróbce laserowej, z czego zatem wynika różnica w charakterze zmian współczynnika tarcia dla obu podłoży? Podobnej analizy wymagają przyczyny różnic we chropowatości warstw, budowie/mikrostrukturze oraz odporności na korozję ?
10. Dlaczego w badaniach biologicznych zastosowano komórki fibroblastów, a jako docelową chropowatość warstwy otrzymanej na drodze obróbki hybrydowej przyjęto chropowatość obwodową naczynia wieńcowego, czy jest to uzasadnione aplikacyjnie? Zastanawiające są uzyskane w pracy małe odchylenia w wynikach pomiarów cytotoksyczności. Badania komórkowe zwykle charakteryzują się rozrzutem wyników, dlatego wymagana jest duża liczba powtórzeń/próbek, jaką metodą określano liczbę komórek na powierzchni analizowanych materiałów ?
11. W odniesieniu do wyników badań korozyjnych, jak wyjaśnić spadek wartości E_{ocp} dla próbki Ti13Zr13Nb+Au na rys.65, czy uzyskane wartości parametrów dla Ti Grade2 w stanie wyjściowym (Tab. 13) są porównywalne z danymi literaturowymi w analogicznych roztworach?
12. Jeśli kluczowa dla poprawy biozgodności badanych materiałów jest obecność w warstwie wierzchniej fazy Ti3Al, to dlaczego kilka razy większą gęstość komórek obserwowano po obróbce hybrydowej na powierzchni stopu Ti13Zr13Nb niż na Ti Grade 2. Z badań wynika, że na tym ostatnim podłożu warstwa charakteryzowała się większym udziałem fazy Ti3Au? Jak przygotowywane były powierzchnie próbek w stanie wyjściowym do badań cytotoksyczności?

13. Jak w oparciu o uzyskane wyniki Autor ocenia konkurencyjność proponowanego w pracy rozwiązania w porównaniu do dotychczas znanych warstw i powłok (np.: TiN, hydroksyapatyt)?

Ocena końcowa

W opinii końcowej chciałabym stwierdzić, że pomimo swoich uwag, które mają charakter dyskusji naukowej, uważam recenzowaną pracę za bardzo wartościową pod względem naukowym, podejmującą współczesne problemy nurtujące różne grupy badawcze, zajmujące się biomateriałami. Doktorant przedstawił problem badawczy i w oryginalny sposób go rozwiązał. Wykazał się ponadto dobrą znajomością tematyki rozprawy, umiejętnością planowania i prowadzenia badań oraz interpretacji wyników. Opanował także wiele metod badawczych materiałów zarówno z obszaru analiz numerycznych, jak i empirycznych. Choć proces wprowadzenia nowych rozwiązań w implantologii jest długotrwały i złożony, to uzyskane w pracy wyniki badań mają walory poznawcze oraz aplikacyjne i mogą być uwzględnione w dyskusji nad opracowaniem tytanowych biomateriałów o większej odporności na degradację w środowisku organizmu człowieka. Z pełnym przekonaniem mogę zatem stwierdzić, że przedłożona do recenzji praca doktorska pt.: *„The influence of hybrid processes of surface microalloying on the structure and properties of surface layers of Ti and Ti alloy-based biomedical materials"* spełnia wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim, a jej Autor mgr inż. Oktawian Bialas zasługuje na stopień doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Wnoszę więc o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

W mojej opinii recenzowana praca ze względu na wielowątkowość i wieloskalowość badań oraz różnorodność zastosowanych metod badawczych zasługuje także na wyróżnienie, jeśli spełnione są formalne warunki zdefiniowane przez Radę Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej.

Halina Garbacz