

dr hab. inż. Sebastian Wroński, prof. AGH
Katedra Fizyki Materii Skondensowanej
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków, 05.02.2025 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Grzegorza Jani
*Materiały i technologia we wdrożeniu metody detekcji luzu w łącznikach implantów
stomatologicznych*

Promotor: Dr hab. inż. Jarosław Żmudzki, prof. PŚ
Opiekun naukowy z ramienia przedsiębiorstwa: Dr n.med. lek. stom. Piotr Wiśniewski

1. Formalna podstawa wykonania recenzji

Recenzja została opracowana na podstawie pisma wystosowanego przez prof. dr hab. inż. Adama Grajcara przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej z dnia 22.10.2024 r., informującego o powołaniu na recenzenta ww. rozprawy, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa.

2. Tematyka rozprawy

Podjęta tematyka rozprawy dotyczy opracowania metody badania luzu pomiędzy łącznikiem, śrubą mocującą łącznik, a implantem. Zagadnienie to jest szczególnie ważne dla współczesnej implantologii stomatologicznej, gdyż odkręcanie się śruby łącznika i samo luzowanie łącznika jest jednym z najczęstszych uszkodzeń pojawiających się podczas użytkowania implantów. Stanowi ono duże utrudnienie dla pacjenta i lekarza oraz często prowadzi do poważnych powikłań. Luz łącznika prowadzi do wytarcia gniazda implantu, zmęczenia materiału, a w konsekwencji nawet do jego złamania. Praca łącznika w mikroszczelinie prowadzi do powstania efektu pompowania wydzielin w jamie ustnej zawierającej bakterie, które mogą się przedostać do wnętrza implantu i prowadzić do powstania stanów zapalnych. Aktualnie dostępne metody wykrywania poluzowania się łącznika nie są wystarczające, gdyż bazują one na wizualnej obserwacji szczeliny lub wykonywaniu obrazowania rentgenowskiego, które umożliwia obserwację szczeliny o rozmiarach powyżej 100 mikrometrów. Ze względu na to, iż rozmiar bakterii to około 10 mikrometrów, metody obrazowania nie umożliwiają oceny stopnia szczelności między implantem a łącznikiem.

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 12.02.2025
RDJMa.165151/2025
zał.

Autor sformułował cel swojej pracy jako: połączenie poprzez zespawanie – z wykorzystaniem technologii dostępnych w warunkach laboratorium protetycznego i technologii przemysłowej – znacznika z elementem w układzie łącznika i implantu, bez znaczącego wpływu na strukturę i własności korozyjne stopu Ti6Al4V.

Praca koncentruje się na trzech etapach, których rozważenie jest niezbędne do osiągnięcia postawionego celu. Pierwszy dotyczy opracowania metody detekcji luzu w łącznikach implantów stomatologicznych. W tym celu zaproponowano unikalną i nieinwazyjną metodę badania luzu łącznika stomatologicznego z zastosowaniem odpowiednio dobranego znacznika. Drugi etap koncentruje się już na wyborze materiału znacznika i jego aplikacji na łącznik. W ramach tego etapu wykonano szereg badań takich jak tomografia, która umożliwiła weryfikację dokładności oceny położenia znacznika, a także przetestowano 2 technologie umożliwiające umieszczenie znacznika na łączniku. Są to: technika EBW (Electron Beam Welding) oraz z zastosowaniem protetycznej spawarki laserowej. Trzeci etap pracy to ocena poprawności działania układu implant i zespół łącznia. W ramach tego etapu dokonano szczegółowej analizy fizykochemicznej spoiny stopu utworzonej między łącznikiem a znacznikiem.

3. Ogólna charakterystyka i ocena formalna

Praca liczy łącznie 174 strony i ma typowy układ treści stosowany w rozprawach doktorskich. Składa się ona z czterech rozdziałów, wniosków, literatury oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Rozdział pierwszy stanowi wstęp, w którym przedstawiono aktualny stan wiedzy i przegląd literatury dotyczącej zagadnień poruszanych w pracy. Rozpoczyna się on od charakterystyki i diagnostyki przyczyn niepowodzeń w układzie łącznika śruby implantu zębowego. Następnie autor szczegółowo prezentuje aktualny stan rozwoju implantów zębowych oraz dokonuje charakterystyki sposobu połączenia łącznika z implantem. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono własności materiałów używanych do budowy implantów, ze szczególnym uwzględnieniem tytanu i jego stopów. W ostatnim podrozdziale przedstawiono zagadnienia związane z łączeniem stopów tytanu ze innymi materiałami przy pomocy różnych technik spawania.

W rozdziale drugim przedstawiono badania własne. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono metodologię wytwarzania spoiny przy pomocy protetycznej spawarki laserowej oraz techniki spawania wiązką elektronów. Rozdział 2 kończy się omówieniem różnych technik badawczych, które zostały wykorzystane przy charakterystyce wytworzonej spoiny.

Rozdział 4 to prezentacja wyników oraz ich dyskusja. Składa się on z podrozdziałów, w których kolejno prezentowane są: twardości, analizy struktury wykonane przy pomocy mikroskopii SEM, analizy rozkładu pierwiastków uzyskane przy pomocy spektroskopii dyspersji energii EDS, badania mikrostruktury z wykorzystaniem techniki EBSD oraz badania z użyciem transmisyjnej mikroskopii elektronowej TEM. Rozdział kończy się podrozdziałem, w którym omówiono badania własności elektrochemicznych wytworzonych próbek.

Ostatni, 5 rozdział zawiera dyskusję wyników. Pracę kończą: wnioski, literatura, streszczenie i abstrakt.

4. Ocena merytoryczna i uwagi krytyczne

Podjęty temat pracy jest niezwykle ciekawym i interesującym zagadnieniem, które ma szczególne znaczenie praktyczne. Opracowana koncepcja systemu detekcji luzu łącznika stomatologicznego aktualnie jest przedmiotem wdrożenia. Jej pomyślne wdrożenie z pewnością przyczyni się do zmniejszenia liczby uszkodzeń w układzie łącznik - implant.

Poniżej przedstawiam moje krytyczne uwagi oraz zawracam uwagę na pewne nieścisłości, co do których jako recenzent oczekiwałbym wyjaśnień.

Na stronie 69 autor pisze o materiale z którego wykonano znacznik. Co oznacza stwierdzenie, iż drut Au o próbie 99,999% wag został skalibrowany do średnicy 0,2-0,4mm?

Na stronie 75 autor opisuje przebieg badań własnych. Opisuje między innymi mikrotomograf rentgenowski i szczegółowo podaje niektóre parametry takie jak napięcie i prąd pracy lampy czy ilość wykonanych projekcji. Niestety zabrakło tu jednego z najważniejszych parametrów czyli podania rozdzielczości pomiaru. W kolejnych rozdziałach (strony 79, 80 i 81) autor dokonuje pomiaru drogi jaką przebywa łącznik podczas dokręcenia śruby określonym momentem siły. Podaje wartości przemieszczeń w mm z dokładnością do 7 cyfr po przecinku. Jak udało się osiągnąć nanometrową dokładność? Wyjaśnienia wymaga także metoda wykonywania takich pomiarów. Aby zrobić to precyzyjnie należy najpierw wyznaczyć powierzchnię implantu na podstawie danych tomograficznych. Krawędzie obiektu są rozmyte i występuje w nich zmiana jasności piksela od jasnego (reprezentującego obiekt) do ciemnego (reprezentującego tło). Wyznaczenie granicy obiektu wymaga wprowadzenia pewnych założeń, na przykład wykonania binaryzacji z zadaną wartością progu. W pracy nie podano szczegółów jak wykonano taki pomiar, a także w ilu miejscach był wykonywany i czy podane wartości w tabelach to wartości średnie.

Na stronie 81 autor pisze, że zaobserwowano wzrost nachylenia ścian implantu w wyniku napierania łącznika na gniazdo. Podstawowe pytanie jakie się nasuwa, to czy obserwowane odkształcenie jest odkształceniem sprężystym czy już plastycznym? Czy podjęto próbę sprawdzenia, czy czasem w tym obszarze naprężenia nie przekraczają granicy plastyczności? Prosta analiza odkształcenia oraz znajomości modułu Younga mogłaby w przybliżeniu pokazać czy nie przekroczono granicy plastyczności. Interesujące byłoby także wykonanie pomiaru po odkręceniu śruby łącznika. W ocenie recenzenta jest to kluczowe, gdyż jeśli dochodziłoby do odkształcenia plastycznego, to po poluzowaniu się łącznika należałoby go ponownie przykręcić, ale niekoniecznie już momentem siły zalecanym przez producenta.

Na stronie 82 autor napisał, iż dla momentu sił 15 Ncm (zalecany przez producenta) implant uzyskał zaszczelnienie. Jak weryfikowano czy połączenie łącznika ze śrubą i implantem jest szczelne? Średni rozmiar bakterii jaki podaje autor to 0,2 do 1,5 μm i od 1 do 10 μm długości, więc połączenie można

uznać za szczelne, jeśli jego rozmiary będą mniejsze niż rozmiary komórek. Ponieważ nie podano rozdzielczości pomiarów tomograficznych, ani nie opisano metodologii wykonywania pomiarów geometrii implantu, ciężko znaleźć uzasadnienie dla stwierdzenia, że połączenie jest szczelne.

Na stronie 104 autor przedstawia mapy orientacji ziaren uzyskane techniką EBSD dla badanego tytanu. Występują w nim dwie fazy α i β . O ile w fazie α powstałe w wyniku dyfrakcji linii Kikuchiego wydają się poprawnie rozpoznane, to w przypadku fazy β ciężko mówić o jakichkolwiek ziarnach. W obszarach tych orientacje są całkowicie przypadkowe. W pracy użyto oprogramowania OIM firmy EDAX, które wykorzystuje współczynnik nazywany CI (Confidence Index). Jego wartość zmienia się w zakresie od 0 do 1 i opisuje jakość dopasowania wzorców linii Kikuchiego do zarejestrowanych przez detektor. Jakość dopasowania można oszacować na podstawie histogramów rozkładu współczynnika CI. Zatem jak wyglądają rozkłady parametru CI dla obu faz?

Następnie na podstawie uzyskanych map orientacji wykonano obliczenia wielkości ziaren, które przedstawiono na rysunku 64. W przypadku analizy wielkości należy podać według jakiej definicji zdefiniowano ziarno. Na ogół jest to obszar który charakteryzuje się dezorientacją punktów pomiarowych nie większą niż pewna wybrana granica. Na ogół używa się wartości 50 lub 100. Jak w tym przypadku przejęto założenie? Ze względu na fatalną jakość wskaźnikowania fazy β i brak widocznych obszarów o zbliżonej dezorientacji, które tworzą ziarna, uważam, że wielkość ziaren dla tej fazy nie może być poprawnie wyliczona.

W przypadku badania spoiny uzyskanej poprzez spawania laserowe przy pomocy techniki EBSD, przedstawiono materiał macierzysty oraz obszar spoiny. Dla próbki spawanej elektronowo przedstawiono tylko obszar spoiny. Interesujące byłoby pokazanie większego obszaru, na którym znajduje się także materiał implantu. Umożliwiłoby to ocenę strefy przejściowej między spoiną a materiałem.

W tabeli 19 na stronie 117 podano wartości stałych sieci tytanu α , który posiada heksagonalną strukturę krystalograficzną o parametrze $c/a=1,628$. Natomiast w tabeli podano dość nietypowe stałe sieci. Co więcej autor jako źródło tych wartości podaje cytowanie numer 110, w którym nie podano żadnych wartości stałych sieci.

W rozdziale 3.8.1 na stronie 117 autor przedstawia pomiary potencjału obwodu otwartego E_{opc} . W wynikach zmienności potencjału obwodowego dla kilku próbek w czasie występuje bardzo duży rozrzut. Autor zaznacza że wymiary próbek wynosiły 1,5x1,5 mm. Jako wytłumaczenie autor wskazuje, iż może to być wynikiem niejednorodności rozkładu pierwiastkowego, a w szczególności złota i tytanu który obserwowano przy pomocy techniki EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy). Jednakże również duży rozrzut obserwowano w przypadku próbki kontrolnej wykonanej z Ti6Al4V. Skąd aż takie duże rozrzuty w danych? Dla próbki ze spoiną Au spawaną elektronowo przedstawiono tylko jedną krzywą. Wyciąganie jakichkolwiek wniosków na podstawie jednej próby, gdy nawet w próbkach kontrolnych obserwuje się bardzo duży rozrzut danych jest bardzo ryzykowne.

5. Konkluzja

Tematyka ocenianej pracy mieści się w zakresie dyscypliny Inżynieria Materiałowa. Rozprawa doktorska mgra inż. Grzegorza Jani obejmuje ważne zagadnienia zarówno w aspekcie teoretycznym jak i praktycznym. Podsumowując moją recenzję stwierdzam, że mgr inż. Grzegorz Jania wykazał się bardzo dobrą znajomością przedmiotu badań, doskonałym przygotowaniem merytorycznym, umiejętnością wykorzystania szerokiego spektrum metod badawczych a także zdolnością do samodzielnego planowania i realizacji badań naukowych oraz ich analizy.

Konkludując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgra inż. Grzegorza Jani spełnia warunki określone w ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20.07.2018 r. (ze zm. Dz.U. z dn. 24.10.2024 r. poz. 1571) o stopniach naukowych i tytule naukowym i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa o dopuszczenie mgra inż. Grzegorza Jani do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

W mojej opinii praca jest doskonałym przykładem na to, jak prosty pomysł, jakim jest umieszczenie znacznika, może w znaczący sposób przyczynić się do opracowania i wdrożenia nowej metodologii, która z pewnością przyczyni się do zmniejszenia liczby uszkodzeń w układzie łącznik implant.

Ze względu na dużą wartość naukową przeprowadzonych badań oraz możliwość wdrożenia opracowanej metodologii wnioskuję o wyróżnienie niniejszej pracy doktorskiej.

Prof. S. Wroński

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)